

Artigos

Influência de um condensador externo no dessalinizador solar do tipo bandeja para obter água dessalinizada no município de Queimadas

Influence of an external condenser on the tray-type solar desalinator to obtain desalinated water in the municipality of Queimadas

Wanderley Viana¹; Genilma Maria Gonçalves da Rocha¹; Carlos Antônio Pereira de Lima¹; Keila Machado de Medeiros²

¹ Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), Campina Grande, PB

² Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Cruz das Almas, BA

✉ feitosawanderley@gmail.com, mariagenilma78@gmail.com, caplima@servidor.uepb.edu.br, keilamedeiros@ufrb.edu.br

Palavras-chave:

Escassez de água;
Radiação solar;
Energia solar;
Água potável.

Resumo

O dessalinizador solar de dupla inclinação do tipo bandeja foi utilizado com o intuito de obter uma água tratada. Este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho da produção de água dessalinizada do dessalinizador solar com um condensador externo e as características físico-química da água antes e após o processo de dessalinização. Um poço de água salobra do Sítio Alto dos Cordeiros do município de Queimadas – PB foi utilizada como fonte de água a ser tratada. O dessalinizador solar tem uma área de 4 m² em que o dessalinizador solar de controle denominado como (D1) e o dessalinizador solar como o condensador externo denominado de (D2+C) e a água salina utilizada no experimento tem condutividade elétrica de 1820 µS.cm⁻¹ e pH de 7,3. Os resultados observado mais significativos foram a produção máxima de água potável no dia 19 de novembro de 2022, onde obteve um valor de 8,6 L.dia⁻¹ para o dessalinizador solar com o condensador externo (D2+C) sendo que o dessalinizador solar (D2) produziu 7,61 L.dia⁻¹ e o condensador externo 0,99 L.dia⁻¹ para o dessalinizador solar de controle (D1) teve uma produção de 8,58 L.dia⁻¹ e um índice de radiação solar média para os dois dessalinizadores solar de 874,8 W.m⁻² em uma lâmina de água salina com profundidade de 1cm. Os resultados obtidos das análises físico-químicas das águas salobra e dessalinizada apresentaram reduções na condutividade elétrica de 99,07 % para (D1) com pH de 7,3 e 99,56 % para (D2+C) com pH de 7,3 para o dia 19 e para o dia 22 de novembro, obteve uma redução de 99,45% para (D1) com pH de 6,03 e 99,4% para (D2+C) com pH de 6,4 após o processo de dessalinização, atingindo valores de acordo com os padrões de potabilidade exigidos pela Portaria do Ministério da Saúde vigente no país.

Keywords

Water scarcity;
Solar radiation;
Solar energy;
Potable water.

Revisão por pares.
Recebido em: 27/12/2022.
Aprovado em: 24/03/2023.

Abstract

The dual-slope solar tray-type desalinator was used to obtain treated water. The aim of this study was to evaluate the performance of the solar desalination water production with an external condenser and the physico-chemical characteristics of the water before and after the desalination process. Brackish water from the Sítio Alto dos Cordeiros well in the Queimadas municipality of Paraíba state was used as the source of water to be treated. The solar desalinator has an area of 4 m², with the solar desalinator control (D1) and the solar desalinator with external condenser (D2+C) used in the experiment. The saline water used in the experiment had an electrical conductivity of 1820 µS.cm⁻¹ and a pH of 7.3. The most significant observed results were the maximum production of potable water on November 19, 2022, where a value of 8.6 L.day⁻¹ was obtained for the solar desalinator with external condenser (D2+C), while the solar desalinator (D2) produced 7.61 L.day⁻¹ and the external condenser produced 0.99 L.day⁻¹. The solar radiation index was 874.8 W.m⁻² for the two solar desalination units, and the saline water depth was 1cm. The results of the physical-chemical analysis of the brackish and desalinated waters showed a reduction in electrical conductivity of 99.07% for (D1) with a pH of 7.3 and 99.56% for (D2+C) with a pH of 7.3 on November 19, and a reduction of 99.45% for (D1) with a pH of 6.03 and 99.4% for (D2+C) with a pH of 6.4 on November 22 after the desalination process, reaching values in accordance with the potability standards required by the current Ministry of Health regulations in the country.

DOI: <http://doi.org/10.14295/ras.v37i2.30212>

1. INTRODUÇÃO

A escassez de água é um problema global e mais de 4 bilhões de pessoas estão sofrendo com isso. Diversas técnicas foram desenvolvidas para obter água doce, incluindo a dessalinização térmica, osmose reversa e destilação por membrana. Essas técnicas são especialmente importantes no

Nordeste do Brasil, onde muitas pessoas enfrentam a escassez de água (HU et al., 2022).

De acordo com Lira et al. (2018), as águas subterrâneas e superficiais encontradas no semiárido paraibano apresentam níveis elevados de salinidade. Essa situação pode levar à diminuição da capacidade de produção do solo,

principalmente em áreas mal drenadas e onde há gestão inadequada da irrigação.

Segundo Hua *et al.* (2021), com o rápido desenvolvimento da sociedade e o aumento da população, a demanda humana por recursos de água doce deverá aumentar em 40% até 2050. Como a maior parte da superfície terrestre é coberta por água do mar, a extração de água doce a partir da água salgada torna-se um método viável nesse contexto, a tecnologia de dessalinização tem se mostrado uma alternativa sustentável para resolver o problema da escassez de água.

Segundo Tortajada e Nambiar (2019), o consumo de água está aumentando em todo o mundo devido ao crescimento populacional e à industrialização. Além disso, a variabilidade e as mudanças climáticas contribuíram para tornar a disponibilidade de água ainda mais problemática para aqueles que já vivem em regiões com escassos recursos hídricos ou que apenas dispõem de água salobra. Diante desse cenário, o dessalinizador solar surge como uma alternativa sustentável para solucionar o problema da escassez de água, utilizando a energia solar para dessalinizar a água salgada e transformá-la em água potável.

Nos últimos anos, os avanços na tecnologia de tratamento dos recursos hídricos têm tornado a dessalinização de água um procedimento sustentável e de alta qualidade, essencial para as populações rurais que têm acesso limitado a água doce. Com a dessalinização, é possível conservar as reservas limitadas de água doce existentes e produzir água potável a partir de fontes de água subterrânea salobra (ZHANG *et al.*, 2022).

Segundo Marinho e Leite (2020), a utilização de energia solar em processos de dessalinização pode contornar alguns problemas presentes nos processos tradicionais de produção de água, tais como os altos níveis de salinidade presentes em águas brutas provenientes de poços e açudes. O objetivo do presente estudo foi avaliar a produção de água doce gerada por um condensador externo associado a um dessalinizador solar na zona rural do município de Queimadas, na Paraíba.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O projeto e a construção do dessalinizador foram realizados na Zona Rural de Queimadas - PB, situada a 138 Km da capital João Pessoa, a 405 m acima do nível do mar, no Sítio Alto dos Cordeiros (Figura 1).

Figura 1 – localidade dos dessalinizadores solar na zona rural de Queimadas – PB



Fonte: Google Earth (2023).

1.1. Descrição do financiamento do dessalinizador solar e condensador externo

A Associação dos Profissionais em Agroecologia (APA) financiou um projeto em parceria com os Engenheiros Sem Fronteira de João Pessoa, Paraíba. O projeto beneficiou o proprietário da área rural, o Sr. Severino Tavares de Souza, com a construção de 5 unidades de dessalinização solar. As unidades produzem um total de 65 litros de água doce por dia para atender às necessidades de quatro famílias rurais.

Além disso, foi construído um condensador externo de baixo custo para aumentar a produção de água dessalinizada. O

projeto visou fornecer uma solução sustentável para o fornecimento de água doce em regiões com recursos hídricos limitados.

1.2. Metodologias utilizadas para análise da água

A água bruta como a dessalinizada foram caracterizadas com procedimentos listados na Tabela 1, as análises foram realizadas nos laboratórios de Pesquisa em Ciências Ambientais e o de Referência em Tecnologias de Águas, ambos na UEPB, seguindo de procedimentos validados descritas no *Standard Methods for Examination of Water and Waste water* (BAIRD *et al.*, 2017).

Tabela 1 – Equipamentos utilizados para os parâmetros físico-químicos

Parâmetro	Unidade	Equipamento-Técnica
pH	Admissional	pHmetro
Condutividade elétrica	$\mu\text{S cm}^{-1}$	Condutivímetro
Cor aparente	Uh	Colorímetro
Cloretos	$\text{mg Cl}^{-1} \text{ L}^{-1}$	Titulometria - Mohr
Dureza	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	Titulometria - EDTA
Alcalinidade	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	Titulometria com indicador
Turbidez	NTU	Nefelometria
Sódio	$\text{mg Na}^{+} \text{ L}^{-1}$	Fotometria de chama
Potássio	$\text{mg K}^{+} \text{ L}^{-1}$	Fotometria de chama
STD*	mg L^{-1}	Método instrumental

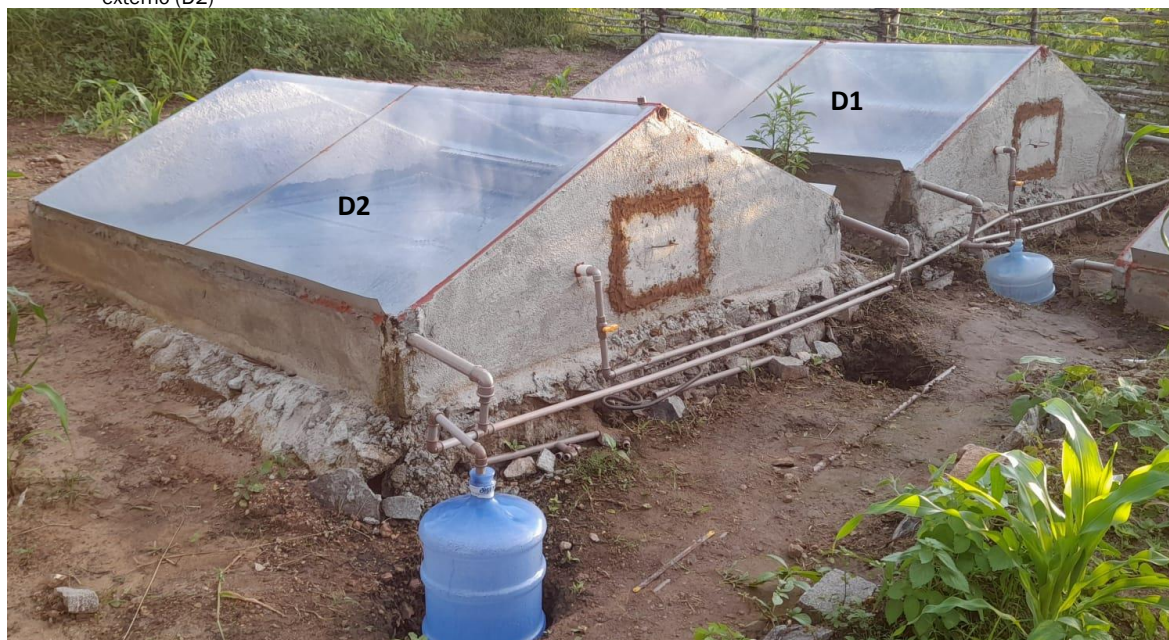
*STD = sólidos totais dissolvidos

1.3. Descrição do sistema de dessalinização

O sistema de dessalinização solar usou água salobra de um poço artesiano em uma bandeja estacionária de fundo preto. Foi utilizado um dessalinizador solar (D2) com um condensador externo para potencializar a evaporação e comparar sua produção com o dessalinizador solar de controle (D1) (Figura 2). A eficiência do condensador externo foi avaliada verificando se sua produção igualava ou superava a produção do dessalinizador solar de controle.

Com a irradiação direta da luz solar através da cobertura de vidro inclinada, a bandeja foi aquecida, aumentando a taxa de evaporação. O vapor de água condensou ao entrar em contato com a superfície interna da cobertura de vidro. Dentro do sistema de condensação externa, a água condensada foi recolhida na parte inferior pela canaleta de coleta. O alinhamento da cobertura de vidro teve um trajeto de leste a oeste para garantir a maior incidência de luz solar no interior dos dessalinizadores solar.

Figura 2 - Sistema de dessalinização com o dessalinizador solar de controle (D1) e dessalinizador solar que receberá o condensador externo (D2)



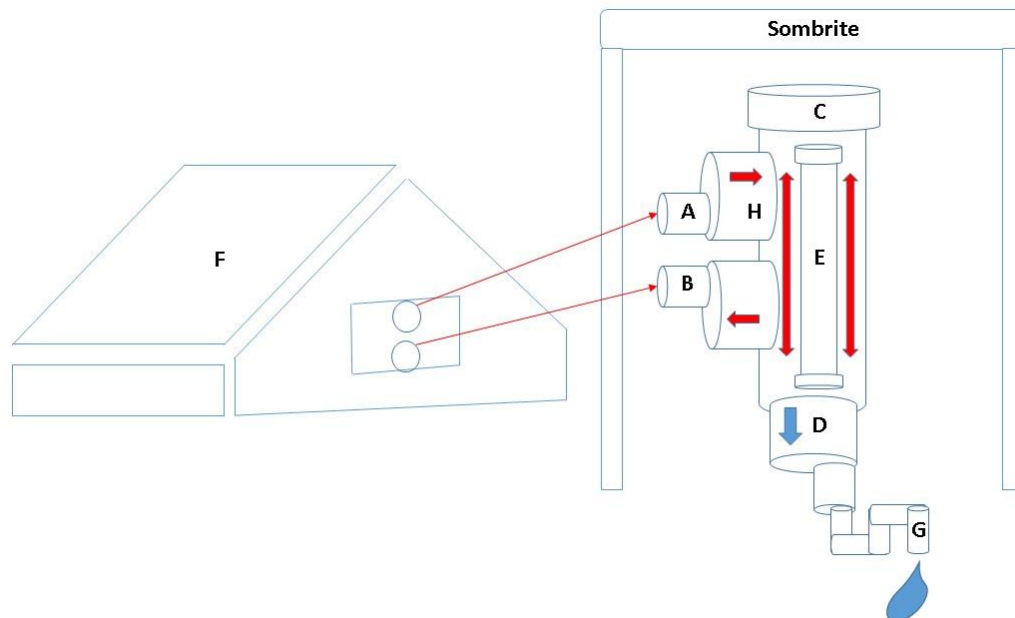
O dessalinizador solar consiste em quatro partes de placas pré-moldadas de concreto com medidas de frente e da parte de trás de 2 m de largura externa por 5 cm de espessura e com 2 medidas de altura, uma de 25 cm e outra de 70 cm, já as 2 laterais tem medidas de 2,3 m de comprimento interno por 25 cm de altura e 10 cm de largura. A área total interna

do dessalinizador solar é de 4,209 m², sendo 1,83 m de largura e 2,3 m de comprimento. A cobertura é composta de vidro comum transparente de 4 mm por 1,185 m de comprimento e 1,08 m de largura, a água bruta a ser tratada é armazenada numa lona encerada (“lona de caminhão”) de tamanho 1,75 m de largura por 2,25 m de comprimento, que

está instalada na base do dessalinizador esse vapor se condensa no vidro e escorre para as calhas que possuem um desnível de queda de 5 cm até a encaenação que está conectada a um galão de água, instalado na frente do dessalinizador solar.

O modelo do dessalinizador via energia solar proposto nesta pesquisa tem uma melhoria na condensação do vapor de água, onde o formato do condensador externo (Figura 3) mostra o esquema de condensação externa.

Figura 2 — Esquema do condensador externo no dessalinizador solar



Na Figura 3 o aparelho de condensação externo foi construído com materiais de PVC com um cooler e um sombrite para a diminuição de seu aquecimento do condensador quando inserido no dessalinizador (D2), onde tem duas entradas, para o interior do dessalinizador solar que é demonstrada na entrada (A) que tem a função de entrada do ar quente, que vem do cooler interno (H), onde passa por uma célula de cano com água congelada no interior (E) que é inserida a célula no interior do condensador externo pela abertura (C) e a outra entrada (B) tem a função de retorno de ar quente seco para o sistema de dessalinização (F) e assim diminuir as pressões do vapor de água durante o processo de condensação da água dessalinizada e canalizada para a saída na parte inferior do condensador externo (D) evitando perdas de calor do vapor durante a produção de água pelo sifão (G).

Foram registrados a temperatura do ambiente, temperatura externa da superfície do vidro, temperatura interna do vidro, temperatura da água salobra radiação solar e produção de água acumulada e instantânea. Com esse acompanhamento, foi possível determinar o fluxo de transferência de calor, perfis de temperatura e produção de água que conduzem o processo de dessalinização.

Para coleta dos dados, 6 termopares do tipo PT-100 sendo 3 em cada dessalinizador; um anemômetro para medição da velocidade do vento e temperatura ambiente, E um radiômetro SL 200 17957 da marca KIMO. A quantidade de água dessalinizada foi medida com a utilização de uma proveta graduada de 250 mL.

1.4. Procedimento de ensaio de coleta

A operação do equipamento foi realizada em paralelo com 2 unidades separadas do sistema principal de produção de água e coletado através de garrações de 20 L, durante os dias estudados. Para estudar os experimentos, foram definidos como fator de operação as lâminas de 1 cm com 36 Litros de água salobra e 2 cm com 72 litros de água salobra adicionada manualmente dentro dos dessalinizadores solar.

A coleta dos dados ocorreu nos dias 19/11/2022 e 22/11/2022, no mês de novembro, com o objetivo de avaliar o sistema de dessalinização com o condensador externo. Durante a pesquisa, foram realizados vários ensaios, medindo-se parâmetros predeterminados a cada 30 minutos, iniciando às 07h00min e finalizando às 17h00min.

1.5. Fluxo de transferência de calor do dessalinizador solar

Fluxo de transferência de calor da água salina e a cobertura do vidro interno pode ser calculado matematicamente pela diferença entre os fluxos de energias que estão entrando pela cobertura de vidro e a energia que está saindo de dentro do dessalinizador solar, de acordo com a Equação (1) (BOUZAID *et al.*, 2019).

$$q_{cnv_{a-vi}} = h_{cnv_{a-vi}} * A_b * (T_a - T_{vi}) \quad (1)$$

O $q_{cnv_{a-vi}}$ [W] é o fluxo de calor convectivo entre a água salobra e a cobertura de vidro interno, A_b [m²] é a área da bandeja de água salobra, T_a [K] é a temperatura da água salobra, T_{vi} [K] é a temperatura do vidro interno e $h_{cnv_{a-vi}}$

[W.m⁻².K⁻¹] é o fluxo de transferência de calor da superfície da água para cobertura de vidro dado pela Equação (2) (LOPES et al., 2021).

$$h_{cnv_{a-vi}} = 0,884 \left[(T_a - T_{vi}) + \frac{(P_a - P_{vi}) \cdot (T_a + 273)}{(268900 - P_a)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

O P_a é a pressão da água salobra dada pela Equação (3) e P_{vi} é a pressão do vidro interno dado pela Equação (4).

$$P_a = \exp \left(25,317 - \frac{5144}{T_a + 273} \right) \quad (3)$$

$$P_{vi} = \exp \left(25,317 - \frac{5144}{T_{vi} + 273} \right) \quad (4)$$

O fluxo de transferência de calor evaporativo entre a água salobra e cobertura de vidro interno está expressa pela Equação (5) (BOUZAID et al., 2019).

$$q_{e_{a-vi}} = h_{e_{a-vi}} * A_b * (T_a - T_{vi}) \quad (5)$$

O $q_{e_{a-vi}}$ [W] é o fluxo de transferência de calor evaporativo entre a água salobra e cobertura de vidro interno e o $h_{e_{a-vi}}$ [W.m⁻². K⁻¹] é o fluxo de transferência de calor por evaporação dado pela Equação (6) (LOPES, et al., 2021).

$$h_{e_{a-vi}} = 0,01627 * h_{cnv_{a-vi}} * \left[\frac{P_a - P_{vi}}{T_a - T_{vi}} \right] \quad (6)$$

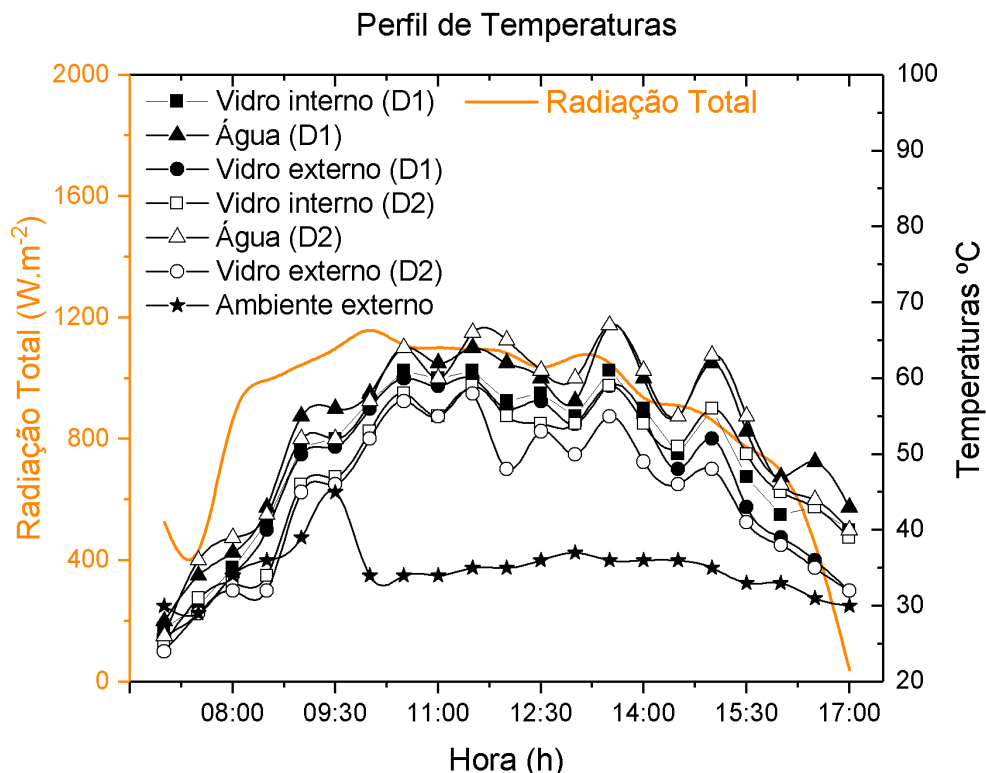
2. RESULTADOS E DISCUSSÕES

2.1. Perfis de Temperatura

Foram representados na forma de perfis de temperatura as variações de temperatura interna e externa do vidro, temperatura da água dentro placa absorvedora (bandeja) e a temperatura ambiente em função da radiação solar incidente nos dois dessalinizadores monitorados no dia 19/11/2022.

De acordo com o INEP (2021), a região de Queimadas apresenta uma média de 5524 Wh.m⁻².dia⁻¹ de radiação solar em novembro. No dia em questão, a média de radiação solar foi de 875 Wh.m⁻².dia⁻¹, e a Figura 4 mostra a variação da temperatura da água bruta com uma lâmina de água de 1cm. Observou-se um aumento da temperatura no período de 07h00min a 13h30min, seguido por uma ligeira queda até atingir 40 °C às 17h00min, correlacionado com a potência radiativa registrada. Os valores de temperatura interna e externa da cobertura de vidro mantiveram-se inferiores à temperatura da água, permitindo uma evaporação adequada na água bruta e a condensação na cobertura interna do vidro.

Figura 3 – Perfil de Temperatura dos dessalinizadores, lâmina de água 1 cm



A temperatura da água salobra variou ao longo do dia no dessalinizador solar (D1), iniciando às 07h00min em 28 °C e atingindo 67 °C às 13h30min, três horas e meia depois do momento de maior incidência de radiação solar, de 1192 W.m⁻². Já o dessalinizador solar (D2), iniciando às 07h00min

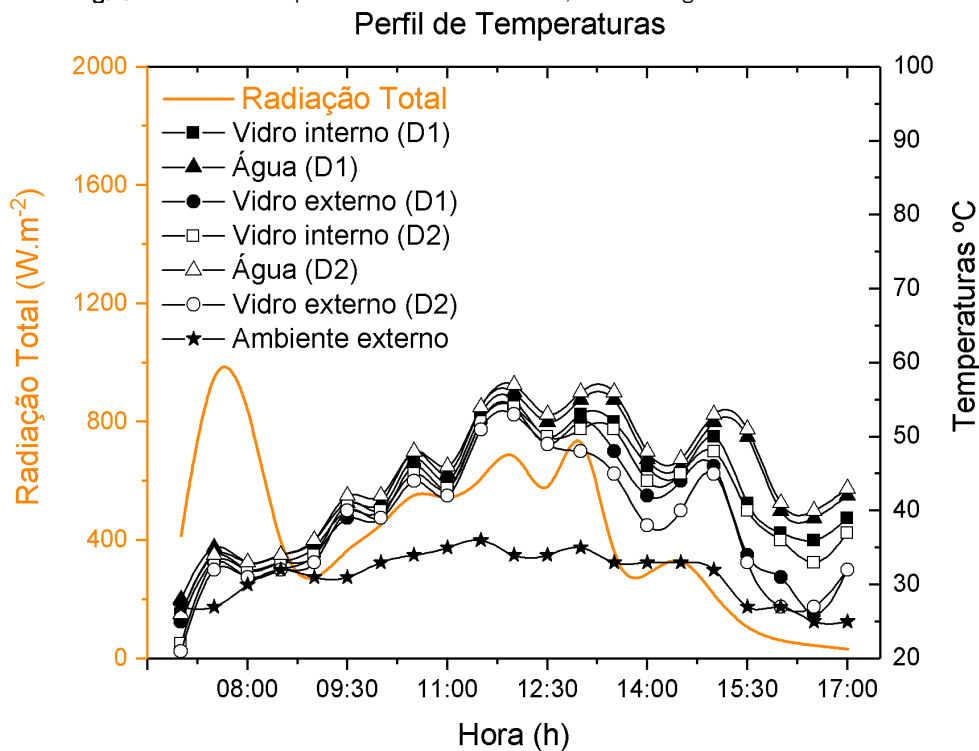
em 28 °C e atingindo 67 °C às 13h30min, resultando em um comportamento térmico satisfatório do sistema de dessalinização com uma lâmina de água para 1cm.

De acordo com o INEP (2021), a média de radiação solar na

região de Queimadas em novembro é de $5524 \text{ Wh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$. No dia 22/11/2022, a média de radiação solar foi de $426 \text{ Wh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$. A temperatura da água bruta foi monitorada ao longo do dia e apresentou um aumento de 57°C para 40°C entre 07h00min e 16h30min, com uma leve queda de temperatura no meio do dia. Houve uma diminuição drástica na radiação solar durante o período de chuva das 15h00min

às 17h00min, mas os valores de temperatura interna e externa da cobertura de vidro permaneceram inferiores à temperatura da água, permitindo a adequada evaporação na água bruta e condensação na cobertura interna do vidro. O perfil de temperatura da água com uma lâmina de 2cm (Figura 5).

Figura 4 – Perfil de Temperatura dos dessalinizadores, lâmina de água 2 cm



A temperatura da água salobra sofre variações ao longo do dia nos dessalinizadores solar (D1 e D2) inicia às 07h00min, com 28°C e 26°C respectivamente e (D1) atinge maior temperatura às 12h00min, alcançando 56°C , após quatro horas e meia, da maior incidência de radiação solar, de $1093 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Já o dessalinizador solar (D2) atinge a maior temperatura às 12h00min alcançando 57°C quatro horas e meia depois da maior incidência solar. Logo, no estudo realizado em paralelo com o (D1 e D2) do experimento do dia 22/11/2022 foi obtido um valor superior de temperatura para o (D1), resultando em um comportamento térmico satisfatório do sistema de dessalinização com uma lâmina de água para 2cm.

Os resultados observados nos perfis de temperatura da Figura 4 e Figura 5 acompanham a intensidade de radiação solar no sistema como resultado da radiação solar direta no

dessalinizador. O perfil da temperatura ambiente variou de 29°C a 45°C no decorrer do experimento do dia 19/11/2022, para o experimento do dia 22/11/2022 variou de 25°C a $36,0^\circ\text{C}$.

2.2. Análise de variância na produção de água dessalinizada instantânea

Os valores de produção de água dessalinizada do dia 19/11 para uma lâmina 1cm foram coletados instantaneamente durante cada intervalo de hora representado na Tabela 2, onde (PI D1) é produção instantânea do dessalinizador solar de controle, (PI D2) produção instantânea do segundo dessalinizador solar, (PI C) produção instantânea do condensador externo e (PI D2+C) produção instantânea do segundo dessalinizador solar com o condensador externo.

Tabela 2 – Produção instantâneas de água dessalinizada do dia 19, para uma lâmina de 1cm

Hora	PI D1	PI D2	PI C	PI D2+C	Médias
07:00	108,0	160,0	0	160,0	107,0
07:30	54,0	32,0	36	68,0	47,5
08:00	94,0	74,0	22	96,0	71,5
08:30	152,0	88,0	18	106,0	91,0
09:00	220,0	86,0	24	110,0	110,0
09:30	302,0	134,0	22	156,0	153,5
10:00	436,0	230,0	36	266,0	242,0
10:30	590,0	380,0	80	460,0	377,5
11:00	530,0	410,0	80	490,0	377,5
11:30	632,0	498,0	60	558,0	437,0
12:00	724,0	580,0	60	640,0	501,0
12:30	714,0	554,0	54	608,0	482,5
13:00	610,0	570,0	50	620,0	462,5
13:30	670,0	610,0	90	700,0	517,5
14:00	610,0	620,0	110	730,0	517,5
14:30	480,0	560,0	50	610,0	425,0
15:00	440,0	550,0	50	600,0	410,0
15:30	430,0	450,0	60	510,0	362,5
16:00	350,0	430,0	40	470,0	322,5
16:30	250,0	390,0	30	420,0	272,5
17:00	188,0	220,0	20	240,0	167,0
Médias	408,8	363,2	47,2	410,4	—

De acordo com os dados dos representados na Tabela 2 as hipóteses que foram testadas são: H0 em que suas médias não se diferem e H1 são as médias que se diferem uma das outras. Sendo que o teste utilizado foi a ANOVA de fator duplo

sem repetição na Tabela 3, pois esse método verificou se a diferenças entre as linhas em horas e colunas em produções instantâneas.

Tabela 3 – Anova de fator duplo sem repetição do dia 19/11 para uma lâmina de 1cm

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	valor-P	F crítico
Linhas	2131083,81	20	106554,19	9,24**	8,85E-12**	2,20
Colunas	1925086,67	3	641695,56	55,66**	2,49E-17**	4,13
Erro	691701,33	60	11528,36			
Total	4747871,81	83				

**A 1% de significância, rejeitando H0 onde as médias se diferem entre linhas e colunas

De acordo com o resultado apresentado na Tabela 3 o resultado demonstra que o H0 foi rejeitado isso quer dizer que há diferenças significativas nas medias entre as linha e colunas. Os valores médios da obtidos na Tabela 2 se diferem nas linhas das horas de 13h30min e 14h00min para a produção instantânea de água dessalinizada e na coluna do (PI D2+C), observou-se a maior média de 410,4 mL entre as colunas para a produção instantânea.

Os valores de produção de água dessalinizada do dia 22/11 para uma lâmina 2cm foram coletados instantaneamente durante cada intervalo de hora representado na Tabela 4.

De acordo com os dados apresentado na Tabela 4, as hipóteses que foram testadas são: H0 em que suas médias não se diferem e H1 são as médias que se diferem uma das outras. Sendo que o teste utilizado foi a ANOVA de fator duplo sem repetição na Tabela 5.

Tabela 4 – Produção instantâneas de água dessalinizada do dia 22, para uma lâmina de 2cm

Hora	PI D1	PI D2	PI C	PI D2+C	Médias
07:00	180,0	190,0	60	250,0	170,0
07:30	60,0	50,0	10	60,0	45,0
08:00	70,0	60,0	14	74,0	54,5
08:30	44,0	40,0	16	56,0	39,0
09:00	72,0	52,0	14	66,0	51,0
09:30	100,0	80,0	14	94,0	72,0
10:00	98,0	84,0	16	100,0	74,5
10:30	140,0	110,0	50	160,0	115,0
11:00	186,0	126,0	100	226,0	159,5
11:30	216,0	156,0	80	236,0	172,0
12:00	256,0	200,0	60	260,0	194,0
12:30	258,0	210,0	80	290,0	209,5
13:00	308,0	240,0	74	314,0	234,0
13:30	352,0	272,0	64	336,0	256,0
14:00	382,0	314,0	50	364,0	277,5
14:30	380,0	310,0	40	350,0	270,0
15:00	338,0	290,0	30	320,0	244,5
15:30	430,0	468,0	54	522,0	368,5
16:00	354,0	354,0	30	384,0	280,5
16:30	300,0	290,0	20	310,0	230,0
17:00	450,0	530,0	10	540,0	382,5
Médias	236,8	210,7	42,3	253,0	—

Tabela 5 – Anova de fator duplo sem repetição do dia 22/11 para uma lâmina de 2cm

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	valor-P	F crítico
Linhas	872336,95	20	43616,85	9,04**	1,39E-11**	2,20
Colunas	595623,38	3	198541,13	41,16**	1,42E-14**	4,13
Erro	289451,62	60	4824,19			
Total	1757411,95	83				

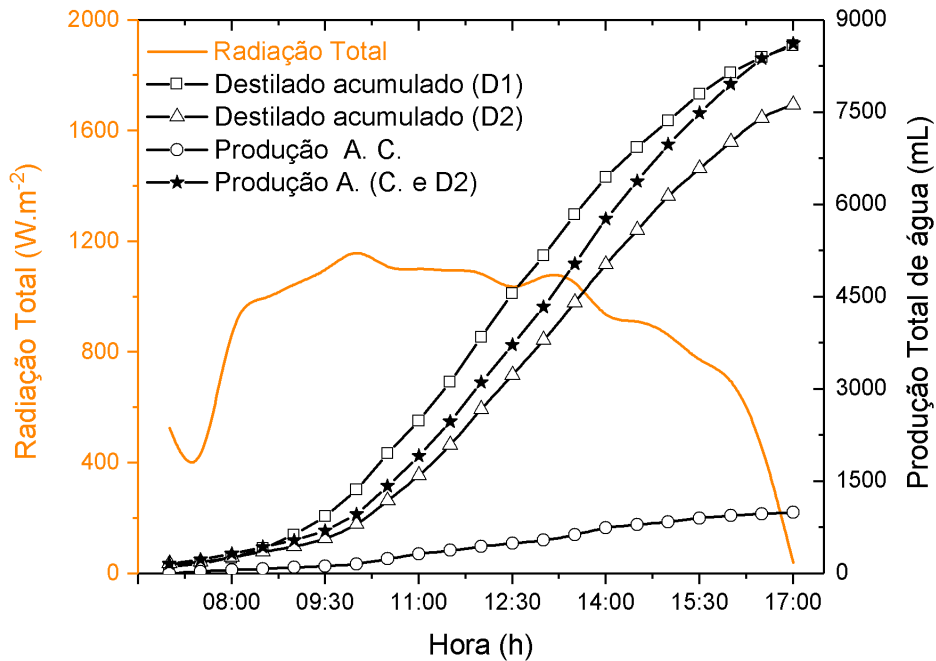
**A 1% de significância, rejeitando H0 onde as médias se diferem entre linhas e colunas

De acordo com os dados apresentado na Tabela 5 o resultado demonstrar que H0 foi rejeitado isso quer dizer que há diferenças significativas nas medias entre as linha e colunas. Os valores médios da Tabela 4 se diferem nas linhas das horas de 17h00min para a produção instantânea de água dessalinizada e na coluna do (PI D2+C), observou-se a maior média de 253 mL entre as colunas para a produção instantânea.

2.3. Perfis de produção de água acumulada

A variação da produção de água acumulada em função a radiação solar do dia 19/11/2022 é apresentado na Figura 6. Os volumes obtidos durante o ensaio com maior radiação solar 1192 W.m⁻² alcançou- se no ensaio realizado com mais estabilidade no perfil de irradiação solar, a produção de água dessalinizada foi de 8,58 L para o dessalinizador solar (D1) e 7,61 L para o dessalinizador solar (D2), e para o condensador externo (C) de 0,990 L O que implica para o sistema (D2+C) uma produção conjunta de 8,6 L.

Figura 5 – Perfil de produção de água acumulada para uma lâmina de 1cm
Perfil de produção de água acumulada

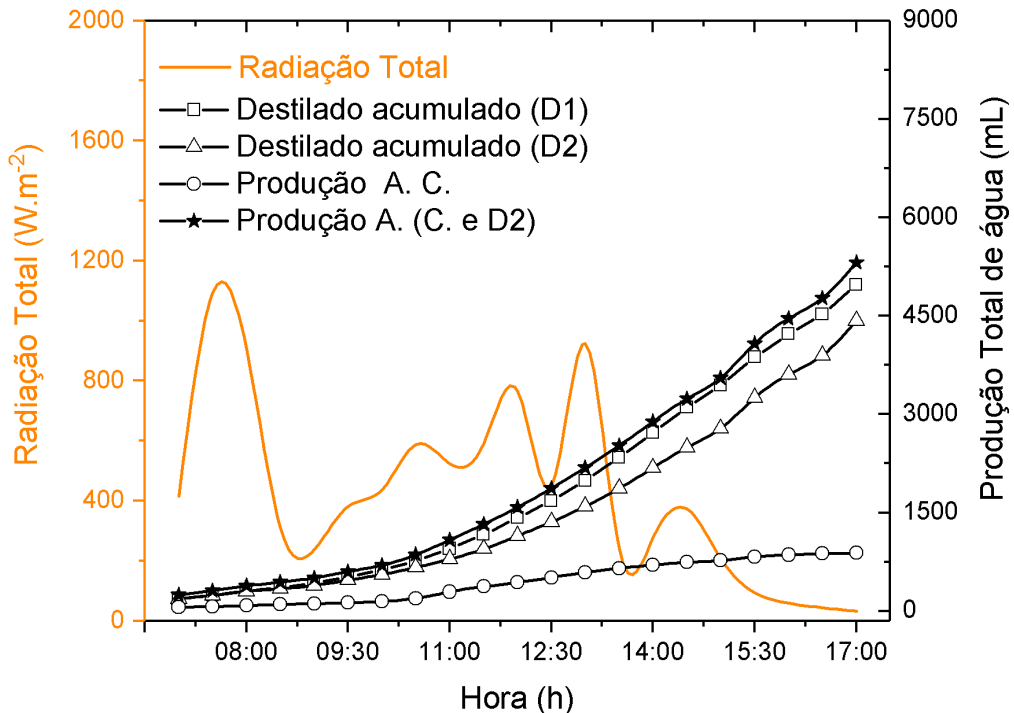


A variação da produção de água acumulada em função a radiação solar do dia 22/11/2022 é apresentada na Figura 7. Destaca-se as alterações bruscas de radiação solar devido a incidência de nuvens o que compromete a performance de ambos sistemas de dessalinização. Com isso, a produção de água foi de 4,97 L para (D1) e 4,42 L para (D2), e de 0,88 L

para (C), sendo a produção conjunta de (D2+C) correspondente a 5,3 L o que representa uma queda de 38,4 % em relação ao ensaio do dia 19/11/2022, dada as melhores condições climáticas locais, contudo destaca-se que a qualidade da água produzida a qual tem baixa salinidade.

Figura 6 – Perfil de produção de água acumulada para uma lâmina de 2 cm

Perfil de produção de água acumulada



Os resultados observados nas Figura 6 e Figura 7 a lâmina de 1cm obteve a melhor produção de água do que a lâmina de

2cm, provocando em uma maior taxa de evaporação quando comparada com a lâmina de 2cm, pois quanto menor a

lâmina, mais rápido é o aumento da temperatura elevando assim a taxa de evaporação da água implicando em uma maior produção de água dessalinizada.

Durante o dia 22/11 a taxa de condensação durante o ensaio influenciou na produção de água, devido a uma chuva no final do dia às 15h30min até o fim do ensaio, aumentando a produção de água dessalinizadas nas ultimas coletas.

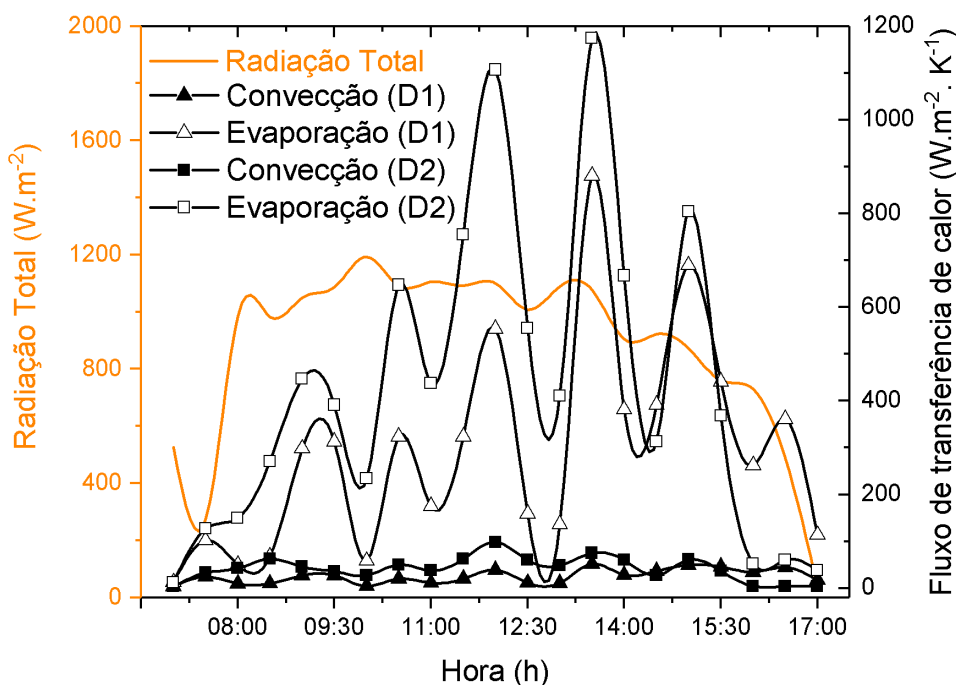
2.4. Fluxos de transferência de calor de convecção e evaporação

A análise dos fluxos de transferência de calor de convecção e evaporação em (D1) e (D2). Foram calculados com as Equações de 1 a 6. Com relação a radiação solar, as curvas

do fluxo de transferência de calor de evaporação, possuem valores maiores do que o fluxo de transferência de calor por convecção que geralmente é mais sensível a variação de temperatura dentro do dessalinizador solar.

O fluxo de transferência de calor de evaporação de (D1), atingiu o seu máximo às 13h:30min no valor de $881 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ com a radiação solar de 1077 W.m^{-2} , para as curvas dos fluxos de convecção atingiram o seu máximo em $51 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, no mesmo horário. Para (D2) o fluxo de transferência de calor de evaporação, atingiu o seu máximo às 13h:30min no valor de $1174 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ com a radiação de 1077 W.m^{-2} , e para às curvas dos fluxos de transferência de calor de convecção teve o pico de $98 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, às 12h00min com a radiação solar de 1100 W.m^{-2} (Figura 8).

Figura 7 – Fluxo de Transferência de calor de convecção e evaporação, com lâmina de 1,0 cm
Perfil de fluxo de transferência de calor

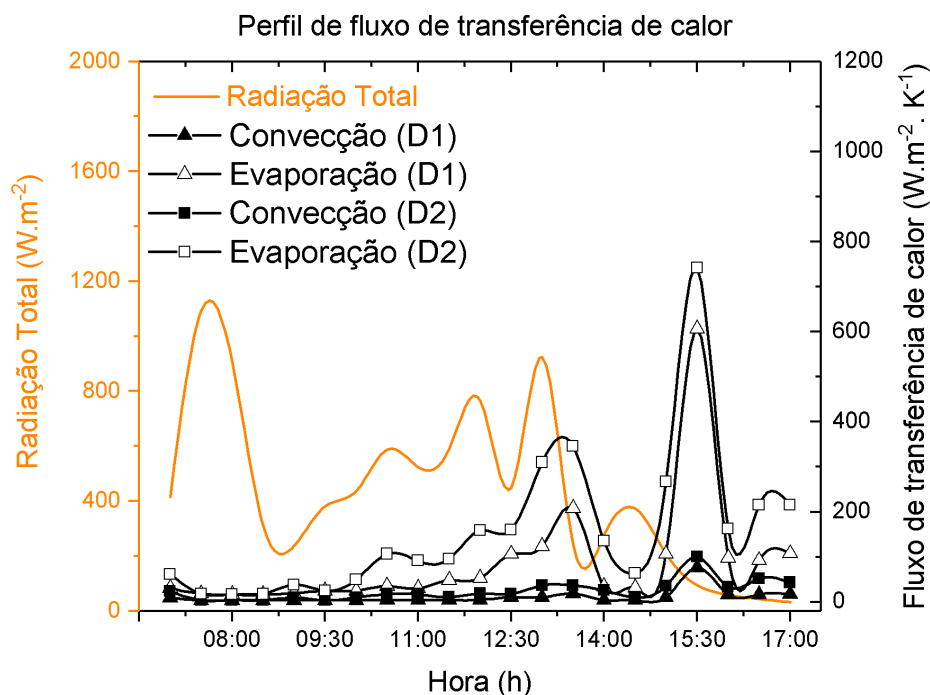


Os fluxos de transferência de calor de evaporação e convecção dentro do dessalinizador solar (D2) representados na Figura 8 são superiores durante o mesmo período de coleta do dessalinizador solar (D1) mostrando que transferência de calor está sendo influenciada pelo condensador externo que tem a função de trocas de calor dentro do dessalinizador solar D2 para o experimento do dia 19/11/2022.

O fluxo de transferência de calor de evaporação de (D1), atingiu o seu máximo às 15h:30min no valor de $606,8 \text{ W.m}^{-2}$.

K^{-1} com a radiação solar de 94 W.m^{-2} , para as curvas dos fluxos de convecção atingiram o seu máximo em $76,43 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, no mesmo horário. Para (D2) o fluxo de transferência de calor de evaporação, atingiu o seu máximo às 15h:30min no valor de $741,64 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ com a radiação de 94 W.m^{-2} , e para às curvas dos fluxos de transferência de calor de convecção teve o pico de $99,98 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, às 15h30min com a radiação solar de 94 W.m^{-2} (Figura 9).

Figura 8 – Coeficientes de convecção e evaporação, com lâmina de 2 cm



Os fluxos de transferência de calor de evaporação e convecção dentro do dessalinizador solar (D2) representado na Figura 9 são superiores durante o mesmo período de coleta do dessalinizador solar (D1) mostrando que transferência de calor está sendo influenciada pelo condensador externo que tem a função de trocas de calor dentro do dessalinizador solar D2 para o experimento do dia 22/11/2022.

2.5. Análise de qualidade de água

A caracterização da água bruta e depois da passagem pelos sistemas de dessalinização é apresentada na Tabela 6 em conjunto os valores máximos permitidos V. M. P., pela Portaria nº GM/MS Nº 888/2021.

Tabela 6 – Resultado da análise físico-química das amostras de água

Parâmetro de controle	AS*	19/11/2022		22/11/2022		V. M. P.*
		D1	D2+C	D1	D2+C	
pH	7,3	7,3	7,3	6,03	6,4	6,0 – 9,0
Condutividade elétrica ($\mu S.cm^{-1}$)	1820	17	8	10	11	–
Cor aparente (uH)	25,1	14,4	13,3	10,9	10,6	15
Cloreto ($mg Cl.L^{-1}$)	198,8	7,1	7,1	7,1	7,1	250
Dureza ($mg CaCO_3.L^{-1}$)	395	7,5	10	7,5	10	300
Alcalinidade ($mg CaCO_3.L^{-1}$)	91	4,0	4,0	4,0	3,0	–
Turbidez (NTU)	0,38	1,05	0,96	0,41	0,22	5,0
Sódio ($mg Na.L^{-1}$)	270	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	200
Potássio ($mg K.L^{-1}$)	17	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	–
STD* ($mg.L^{-1}$)	902	8	4	4	5	500

*V. M. P. = Valor Máximo Permitido/ STD= Sólidos Totais Dissolvidos/ AS = Água salobra.

O valor do pH registrado na amostra para a água bruta do dia 19/11 foi de 7,3 e não se alterou pelo processo de dessalinização para os parâmetros da água bruta do dia 22/11 apresentaram os mesmos valores do dia 19/11 e o pH da água bruta estava em 7,3 mas após o processo de dessalinização os valores de água dessalinizada se alterou para o (D1) foi de 6,03 e para o (D2+C) foi de 6,4. Comparando

esses dados com a Portaria nº GM/MS Nº 888/2021, que estabelece os índices ideais de pH entre 6,0 e 9,0, observa-se que as amostras apresentam valores em acordo com o padrão de potabilidade.

O valor da condutividade elétrica para a água salobra foi de $1820 \mu S.cm^{-1}$ e para a água purificada foi de $17 \mu S.cm^{-1}$, o

que implica numa redução de 99,1% para (D1) e 8 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ com uma redução de 99,6% para o sistema (D2+C) em 19/11. No segundo ensaio, realizado com menor irradiação a diferença nas eficiências de remoção de sais foi ainda menor com ambos sistemas registando valores de 99,4% para condutividade elétrica de 10 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. De acordo com o estudo experimental realizado por Brito et al. em 2020, foi testado um dessalinizador solar com dupla inclinação e foi obtida uma redução de 99,13% na condutividade elétrica da água. Esses resultados são semelhantes aos encontrados neste estudo.

O valor obtido na análise de sólidos totais dissolvidos (STD) na água salobra foi de 902 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, na qual está fora dos padrões exigidos pela Portaria nº GM/MS Nº 888/2021, que delimita valor máximo de 500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ para água potável. Para a água tratada o STD foi reduzido para a faixa de 4 a 8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ o que implica na produção de uma água de baixo teor de minerais e, portanto, atende o valor referenciado pela legislação vigente.

A cor aparente limitada pela Portaria nº GM/MS Nº 888/2021 ao valor máximo de 15 uH desprovido de materiais (matéria orgânica dissolvida na água) partículas que causam a turbidez. Os resultados obtidos na Tabela 6 dos valores de cor aparente da amostra de água bruta apresentam um valor acima do máximo permitido dos padrões de potabilidade e apenas as amostras das águas dessalinizadas nos dois dessalinizadores apresentaram a cor aparente de acordo com a legislação vigente.

Os valores de cloretos e outros parâmetros Na, K, dureza (Ca+Mg) foram bastante reduzidos em todas as amostras da Tabela 6, em bom acordo com os V.M.P.

Os baixos níveis de salinidade das águas dessalinizadas tem uma média de aproximadamente 5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ que se faz necessário a reconstituição salina para adequá-la ao consumo humano de acordo com a Portaria nº GM/MS Nº 888/2021. O processo de dessalinização precisa ter no mínimo de 30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de sais, e deve atender aos padrões de potabilidade. Desse modo, para atender aos padrões de potabilidade, deve-se acrescentar aproximadamente 30 mL da água salobra para cada litro de água dessalinizada, estabelecidos pela Portaria nº GM/MS Nº 888/2021.

3. CONCLUSÕES

Após a construção e utilização do equipamento de dessalinização solar financiado pela Associação dos Profissionais em Agroecologia e pelos Engenheiros Sem Fronteira de João Pessoa, foi constatado que os resultados obtidos dos perfis de temperaturas, produção de águas e o fluxo de transferência de calor apresentaram concordância com resultados experimentais, possibilitando a utilização do equipamento. A variação na incidência de radiação solar sobre os dois dessalinizadores impactou os perfis de temperatura e evaporação da água salobra, mas sem comprometer a qualidade da água produzida.

Foi verificado que o sistema de dessalinização solar com o condensador externo (D2+C) apresentou a melhor produção de água nos dois ensaios avaliados. Apesar de ser mais caro para construir, sua eficiência justifica o investimento. As análises físico-químicas das águas revelaram que os sistemas de dessalinização são capazes de produzir água com valores reduzidos na condutividade elétrica da água dessalinizada em acordo com os V.M.P., da Portaria nº GM/MS Nº 888/2021, necessitando apenas de uma pequena remineralização com adição de 3% de água salobra à água tratada.

Para garantir a potabilidade da água, é recomendada a adição de hipoclorito para desinfecção bacteriana, complementando o tratamento da água e incluindo a etapa de desinfecção antes do consumo. Comprovou-se a eficiência do novo dessalinizador solar com o condensador externo para a obtenção de água doce, podendo ser aplicado em comunidades isoladas do semiárido paraibano, onde há escassez de água potável. A iniciativa beneficiou a propriedade do Sr. Severino Tavares de Souza, construindo 5 unidades de dessalinização solar, que produzem 65 a 70 litros de água doce para atender a demanda de 4 famílias rurais.

REFERÊNCIAS

BAIRD, R. B.; EATON, A. D.; RICE, E. W. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. *American Public Health Association*, Washington D.C., n. 23, 2017.

BOUZAID, M.; ANSARI, O.; TAHA-JANAN, M.; MOUHSIN, N.; OUBREK, M. Numerical Analysis of Thermal Performances for a Novel Cascade Solar Desalination Still Design. *Energy Procedia*, [S. N.], p. 1071-1082, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.274>

BRITO, Y. J. V. D. et al. Estudo experimental de um dessalinizador solar do tipo bandeja com dupla inclinação para potabilização de água no semiárido paraibano. *Águas Subterrâneas*, v. 32, n. 2, p. 156-165, maio 2020. <https://doi.org/10.14295/ras.v34i2.29773>

HU, Y.; YAO, H.; LIAO, Q.; LIN, T.; CHENG, H.; QU, L. The promising solar-powered water purification based on graphene functional architectures. *EcoMat*, Nova Jersey, p. 1-15, February 2022. <https://doi.org/10.1002/eom2.12205>

HUA, W. S.; XU, H. J.; XIE, W. H. Review on adsorption materials and system configurations of the adsorption desalination applications. *Applied Thermal Engineering*, [S. N.], p. 1-28, December 2021. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117958>

INEP. *Médias do total diário da irradiação direta normal para o Estado da Paraíba*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos-SP. 2021.

LIRA, R. M. DE; GORDIN, L. C.; SILVA, E. F. DE F. E.; SILVA, G. F. DA; DANTAS, D. DA C.; MORAIS, J. E. F. DE. Leaching of cations in soil cultivated with sugarcane subjected to saline irrigation and leaching fractions. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, PB, v. 22, n. 9, p. 616-621, Abr./Jul. 2018. ISSN 1807-1929. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n9p616-621>

LOPES, J. T.; MIRANDA, R. F. DE; MARTINS, K. C. R.; BELFORT, J. F.; RAMOS, S. R. R. Eficiência de um dessalinizador solar simétrico com bacia parabólica composto disposto em paralelo. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v. 7, n. 4, p. 35722-35733, mar./abr. 2021. ISSN 2525-8761. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n4-165>

MAHARJAN, S.; JOSHI, T. P.; SHRESTHA, S. M. Poor Quality of Treated Water in Kathmandu: Comparison with Nepal Drinking Water Quality Standards. *Tribhuvan University Journal of Microbiology*, [S. N.], v. 5, p. 83-88, December 2018. ISSN 2382-5499. <https://doi.org/10.3126/tujm.v5i0.22319>

MARINHO, F. J. L.; LEITE, S. F. Tecnologia social: dessalinizador solar. In: MARINHO, F. J. L.; LEITE, S. F. **Coleção Agrobiodiversidade**. 1. ed. Campina Grande: Plural Editorial, v. 1, 2020. p. 1-36.

PORTARIA GM/MS Nº 888. dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. *Ministerio de Estado da Saúde*, Distrito Federal, p. 1-49, 2021.

TORTAJADA, C.; NAMBIAR, S. Communications on Technological Innovations: Potable Water Reuse. *Water*, Basel, Switzerland, p. 1-29, January 2019. <https://doi.org/10.3390/w11020251>

ZHANG, H.; ZHU, S.; YANG, J.; MA, A. Advancing Strategies of Biofouling Control in Water-Treated Polymeric Membranes. *Polymers*, [S. N.], p. 1-23, March 2022. <https://doi.org/10.3390/polym14061167>