



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA – UEPB**  
**CAMPUS I - CAMPINA GRANDE**  
**PRÓ - REITORIA DE PÓS - GRADUAÇÃO E PESQUISA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL**  
**MESTRADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL**

**WANDERLEY FEITOSA VIANA**

**INFLUÊNCIA DE UM CONDENSADOR EXTERNO NO DESSALINIZADOR  
SOLAR DO TIPO BANDEJA PARA OBTER ÁGUA DESSALINIZADA NO  
MUNICÍPIO DE QUEIMADAS - PB**

**CAMPINA GRANDE – PB**

**2023**

**WANDERLEY FEITOSA VIANA**

**INFLUÊNCIA DE UM CONDENSADOR EXTERNO NO DESSALINIZADOR  
SOLAR DO TIPO BANDEJA PARA OBTER ÁGUA DESSALINIZADA NO  
MUNICÍPIO DE QUEIMADAS - PB**

Trabalho de Conclusão de Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologia Ambiental (PPGCTA), da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito final para obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental.

**Linha de pesquisa:** Tecnologias de Tratamento de Água e de Resíduos

**Orientador:** Prof. Dr. Carlos Antônio Pereira de Lima

**Coorientadora:** Profa. Dra. Keila Machado de Medeiros

**CAMPINA GRANDE – PB**

**2023**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

V614i Viana, Wanderley Feitosa.  
Influência de um condensador externo no dessalinizador solar do tipo bandeja para obter água dessalinizada no município de Queimadas - PB [manuscrito] / Wanderley Feitosa Viana. - 2023.  
95 p. : il. colorido.

Digitado.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2023.

"Orientação : Prof. Dr. Carlos Antônio Pereira de Lima, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT. "

"Coorientação: Profa. Dra. Keila Machado de Medeiros , UFRB - Universidade Federal do Recôncavo da Bahia"

1. Escassez de água. 2. Radiação solar. 3. Energia solar.  
4. Água potável. I. Título

21. ed. CDD 628.167

**WANDERLEY FEITOSA VIANA**

**INFLUÊNCIA DE UM CONDENSADOR EXTERNO NO DESSALINIZADOR  
SOLAR DO TIPO BANDEJA PARA OBTER ÁGUA DESSALINIZADA NO  
MUNICÍPIO DE QUEIMADAS – PB**

Trabalho de Conclusão de Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologia Ambiental (PPGCTA), da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito final para obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental.

**Linha de pesquisa:** Tecnologias de Tratamento de Água e de Resíduos

**Aprovada em: 28/02/2023**

**BANCA EXAMINADORA**



---

Prof. Dr. Carlos Antônio Pereira de Lima  
(Orientador/UEPB)



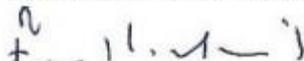
---

Profa. Dra. Keila Machado de Medeiros  
(Coorientadora/UFRB)



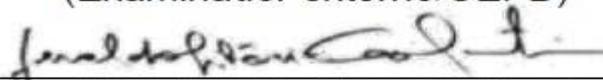
---

Profa. Dra. Juliana Ricardo de Souza  
(Examinadora externa/UFRB)



---

Prof. Dr. Francisco José Loureiro Marinho  
(Examinador externo/UEPB)



---

Profa. Dra. Geralda Gilvania Cavalcante  
(Examinadora Interna/UEPB)

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus que permitiu para tudo isso acontecer, ao longo de minha vida, e não somente nestes anos como pesquisador, mas que em todos os momentos é o maior mestre que alguém pode conhecer.

A minha mãe Luiza Gabriel Feitosa e meu padrasto Severino Tavares de Souza, pelo apoio nessa caminhada da carreira acadêmica.

A minha esposa Genilma Maria Gonçalves da Rocha pelo apoio nessa caminhada ao longo de todo o mestrado.

A meu orientador Prof. Carlos Antônio Pereira de Lima pelas leituras sugeridas ao longo dessa orientação e pela dedicação, pela atenção e oportunidades, e pela confiança.

A minha coorientadora Profa. Keila Machado de Medeiros por toda presteza e prontidão, pelos ensinamentos e auxílio para que a construção deste trabalho se tornasse possível.

Aos colegas do GRUTAA, por toda ajuda para realização deste estudo.

Aos professores e coordenação do PPGCTA pelos valiosos ensinamentos transmitidos ao longo da minha trajetória acadêmica. Ao Laboratório de Pesquisa em Ciências Ambientais (LAPECA) e Laboratório de Referência em Tecnologias de Águas (LARTECA) por ceder os equipamentos para a caracterização das águas.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA) do Centro de Ciências e Tecnologia (CCT) da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB) pela parceria na realização deste trabalho.

Meus agradecimentos aos meus amigos, companheiros de trabalho e irmãos na amizade que fizeram parte da minha formação e que vão continuar presentes em minha vida sempre.

Aos colegas de classe e trabalho pelos momentos de amizade e apoio e a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

## 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 m<sup>2</sup> em que o dessalinizador solar de controle denominado como (D1) e o dessalinizador solar com o condensador externo denominado de (D2+C) e a água salina utilizada no experimento tem condutividade elétrica de 1820  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  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<sup>-1</sup> para o dessalinizador solar com o condensador externo (D2+C) sendo que o dessalinizador solar (D2) produziu 7,61 L.dia<sup>-1</sup> e o condensador externo 0,99 L.dia<sup>-1</sup> para o dessalinizador solar de controle (D1) teve uma produção de 8,58 L.dia<sup>-1</sup> e um índice de radiação solar média para os dois dessalinizadores solar de 874,8 W.m<sup>-2</sup> 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.

Palavras chave: escassez de água; radiação solar; energia solar; água potável.

## 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 m<sup>2</sup>, 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  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  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<sup>-1</sup> was obtained for the solar desalinator with external condenser (D2+C), while the solar desalinator (D2) produced 7.61 L.day<sup>-1</sup> and the external condenser produced 0.99 L.day<sup>-1</sup>. The solar radiation index was 874.8 W.m<sup>-2</sup> 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.

Keywords: water scarcity; solar radiation; solar energy; potable water.

## LISTA DE ILUSTRAÇÃO

<b>Figura 1</b> — Mapa do Nordeste brasileiro incluindo os limites dos estados e as fronteiras.....	17
<b>Figura 2</b> — Total da irradiação solar global horizontal – médias mensais .....	21
<b>Figura 3</b> — Espectro da radiação solar e a faixa visível humana.....	22
<b>Figura 4</b> — Corte transversal e várias transferências de energia associadas .....	23
<b>Figura 5</b> — Corte transversal do arranjo esquemático do dessalinizador solar côncavo .....	24
<b>Figura 6</b> — Antigo dessalinizador solar tubular (A); Novo dessalinizador solar tubular (B).25	
<b>Figura 7</b> —Dessalinizador solar tubular parabólico e tanque de condensação .....	26
<b>Figura 8</b> — Dessalinizador solar em forma de pirâmide.....	27
<b>Figura 9</b> — Dessalinizador solar de dupla inclinação com materiais absorventes.....	28
<b>Figura 10</b> — Dessalinizador solar escalonado com superfície de inclinação .....	29
<b>Figura 11</b> — Dessalinizador solar portátil tipo ondular com refletores .....	30
<b>Figura 12</b> — Reservatório da água salina.....	32
<b>Figura 13</b> — Vidro 4mm transparente, com suas dimensões.....	33
<b>Figura 14</b> — Diagrama dos pré-moldados de alvenaria do dessalinizador solar .....	34
<b>Figura 15</b> — Sistema de entrada da água salina e saída da água dessalinizada .....	35
<b>Figura 16</b> — Energia na cobertura do dessalinizador solar.....	39
<b>Figura 17</b> — Balanço de energia para a água salobra do dessalinizador solar.....	42
<b>Figura 18</b> — Balanço de energia para a bandeja do dessalinizador solar .....	45
<b>Figura 19</b> — Local do experimento no sítio Alto dos Cordeiros .....	46
<b>Figura 20</b> — Sistema de dessalinização D1 e D2.....	47
<b>Figura 21</b> — Esquema do condensador externo no dessalinizador solar .....	48
<b>Figura 22</b> — Diagrama das etapas do projeto de pesquisa.....	49
<b>Figura 23</b> — Temperatura dos dessalinizadores, lâmina de água 1 cm .....	53
<b>Figura 24</b> — Temperatura dos dessalinizadores, lâmina de água 2 cm .....	54
<b>Figura 25</b> — Produção de água dos dessalinizadores, lâmina de 1cm.....	55
<b>Figura 26</b> — Produção de água dos dessalinizadores, lâmina de 2cm.....	56
<b>Figura 27</b> — Produtividade dos dessalinizadores, lâmina de 1cm.....	58
<b>Figura 28</b> — Produtividade dos dessalinizadores, lâmina de 2 cm.....	59
<b>Figura 29</b> — Eficiência Térmica dos dessalinizadores, lâmina de 1cm.....	60
<b>Figura 30</b> — Eficiência Térmica dos dessalinizadores, lâmina de 2 cm.....	61
<b>Figura 31</b> — Temperatura dos dessalinizadores, lâmina de água 1 cm .....	63
<b>Figura 32</b> — Temperatura dos dessalinizadores, lâmina de água 2 cm .....	64

<b>Figura 33</b> — Produção de água acumulada, lâmina de 1cm .....	65
<b>Figura 34</b> — Produção de água acumulada, lâmina de 2 cm .....	66
<b>Figura 35</b> — Produção de água instantânea, lâmina de 1cm.....	67
<b>Figura 36</b> — Produção de água instantânea, lâmina de 2cm.....	68
<b>Figura 37</b> — Produtividade dos dessalinizadores, lâmina de 1cm.....	69
<b>Figura 38</b> — Produtividade dos dessalinizadores, lâmina de 2cm.....	70
<b>Figura 39</b> — Eficiência Térmica dos dessalinizadores, lâmina de 1cm.....	71
<b>Figura 40</b> — Eficiência Térmica dos dessalinizadores, lâmina de 2cm.....	72
<b>Figura 41</b> — Fluxos de transferência de calor de convecção e evaporação, lâmina de 1cm ..	73
<b>Figura 42</b> — Fluxos de transferência de calor de convecção e evaporação, lâmina de 2cm ..	74

## LISTA DE TABELA

<b>Tabela 1</b> — Monitoramento de produção de água do condensador externo .....	62
<b>Tabela 2</b> — Resultado da análise físico-química das amostras de água.....	75
<b>Tabela 3</b> — Planilha de dados do experimento 07/04/2022 .....	83
<b>Tabela 4</b> — Planilha de dados do experimento 08/04/2022 .....	85
<b>Tabela 5</b> — Planilha de dados do experimento 13/04/2022 .....	87
<b>Tabela 6</b> — Planilha de dados do experimento 16/04/2022 .....	89
<b>Tabela 7</b> — Planilha de dados do experimento 19/11/2022 .....	91
<b>Tabela 8</b> — Planilha de dados do experimento 22/11/2022 .....	93
<b>Tabela 9</b> — Planilha de dados do experimento do condensador externo .....	95

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA	Analysis Of Variance
APA	Associação dos profissionais em Agroecologia
DST	Dessalinizador Solar Tubular
EDTA	Ácido Etilenodiaminotetracético
EFJP	Engenheiros sem Fronteiras em João Pessoa
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organizações das Nações Unidas
PVC	Policloreto de Vinil
RCR	Rota de Concentração Representativa
STD	Sólido Total Dissolvidos
UTN	Unidade de Turbidez Nefelométrica
VIC	Variable Infiltration Capacity
VPM	Valor Máximo Permitido

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Símbolos Gregos

<b>Termo</b>	<b>Designação</b>	<b>Unidade</b>
$\alpha$	Absortividade	-
$\beta$	Coefficiente de expansão térmica	$K^{-1}$
$\varepsilon$	Emissividade	-
$\eta$	Eficiência	-
$\lambda$	Condutividade térmica	$W.m^{-1}.K^{-1}$
$\Sigma$	Somatório	-
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann	$W.m^{-2}.K^{-4}$
$\tau$	Transmitância	-
$\nu$	Viscosidade cinemática	$m^2.s^{-1}$

### Símbolos Latinos

<b>Termo</b>	<b>Designação</b>	<b>Unidade</b>
$\frac{dT}{dt}$	Gradiente de temperatura	$K.s^{-1}$
$A$	Área	$m^2$
$A_{co}$	Área de cobertura do dessalinizador solar	$m^2$
$A_b$	Área da bandeja da água salobra	$m^2$
$C$	Comprimento	$M$
$D1$	Unidade experimental de dessalinização 1	-
$D2$	Unidade experimental de dessalinização 2	-
$f_c$	Calor específico	$J.Kg^{-1}.K^{-1}$
$f_e$	Calor Latente de evaporação	$J.kg^{-1}$
$g$	Gravidade Local	$m.s^{-2}$
$h_c$	Coefficiente de Transferência de Calor	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$h_e$	Coefficiente de Transferência de Calor por Evaporação	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$I_{(t)}$	Intensidade de radiação	$W.m^{-2}$
$L$	Largura	$M$
$m$	Massa	$Kg$
$M$	Produtividade do Dessalinizador Solar	$Kg.m^{-2}.h^{-1}$
$P$	Pressão	$N.m^{-2}$

$P_a$	Pressão da água	$N.m^{-2}$
$P_{vi}$	Pressão do vidro interno	$N.m^{-2}$
$Q$	Produção de água	$mL.h^{-1}$
$q$	fluxo de transferência calor	$W.m^{-2}$
$T$	Temperatura	$^{\circ}C$
$T_a$	Temperatura da água	$^{\circ}C$
$T_{vi}$	Temperatura do vidro interno	$^{\circ}C$
$v$	Velocidade média do vento	$m.s^{-1}$
$V_i$	Volume de água coletado	$mL$

#### Sub-índice Latinos

<b>Termo</b>	<b>Designação</b>
$a$	Água salobra
$ambe$	Ambiente externo
$ambi$	Ambiente interno
$b$	Bandeja
$cnd$	Condução
$cnv$	Convecção
$co$	Cobertura
$e$	Evaporação
$ir$	Irradiação
$r$	Radiação
$vi$	Vidro interno

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>16</b>
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>17</b>
<b>3.1</b>	<b>Escassez hídrica .....</b>	<b>17</b>
<b>3.2</b>	<b>Situação climática no Semiárido .....</b>	<b>19</b>
<b>3.3</b>	<b>Radiação solar em regiões semiáridas .....</b>	<b>20</b>
<b>3.4</b>	<b>Estado da Arte do dessalinizador solar .....</b>	<b>22</b>
3.4.1	Dessalinizador solar acoplado a tubos coletores .....	22
3.4.2	Dessalinizador solar com superfície côncavo .....	23
3.4.3	Dessalinizador solar tubular .....	24
3.4.4	Dessalinizador solar tubular acoplado ao concentrador parabólico .....	25
3.4.5	Dessalinizador solar em forma de pirâmide .....	26
3.4.6	Dessalinizador solar de dupla inclinação com materiais absorventes .....	27
3.4.7	Dessalinizador solar cascata com defletores .....	28
3.4.8	Dessalinizador solar portátil com refletores de radiação.....	29
<b>3.5</b>	<b>Dessalinizador solar em estudo .....</b>	<b>30</b>
<b>3.6</b>	<b>Componentes do dessalinizador solar.....</b>	<b>31</b>
3.6.1	Reservatório da lâmina de água do dessalinizador.....	31
3.6.2	Cobertura do vidro.....	32
3.6.3	Isolamento térmico de alvenaria.....	33
3.6.4	Canaletas e encaiação do sistema de dessalinização .....	34
<b>4</b>	<b>MODELAGEM MATEMÁTICA DO DESSALINIZADOR SOLAR.....</b>	<b>36</b>
<b>4.1</b>	<b>Transferência de calor .....</b>	<b>36</b>
<b>4.2</b>	<b>Produção de água do dessalinizador solar .....</b>	<b>37</b>
<b>4.3</b>	<b>Produtividade do dessalinizador solar .....</b>	<b>37</b>
<b>4.4</b>	<b>Eficiência térmica do dessalinizador solar .....</b>	<b>38</b>
<b>4.5</b>	<b>Energia da cobertura do dessalinizador .....</b>	<b>39</b>
<b>4.6</b>	<b>Energia da água salobra da bandeja do dessalinizador.....</b>	<b>42</b>
<b>4.7</b>	<b>Energia da bandeja do dessalinizador .....</b>	<b>44</b>
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>46</b>

<b>5.1</b>	<b>Localização do sistema de dessalinização.....</b>	<b>46</b>
<b>5.2</b>	<b>Etapa 1, descrição do sistema de dessalinização.....</b>	<b>46</b>
<b>5.3</b>	<b>Etapa 2, descrição do sistema de condensação externa .....</b>	<b>47</b>
<b>5.4</b>	<b>Procedimento Experimental .....</b>	<b>49</b>
<b>5.5</b>	<b>Metodologias utilizadas para análise da água .....</b>	<b>50</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>52</b>
<b>6.1</b>	<b>Fatores econômicos na construção dos dessalinizadores solar .....</b>	<b>52</b>
<b>6.2</b>	<b>Etapa 1 Avaliação da tecnologia do dessalinizador solar .....</b>	<b>52</b>
6.2.1	Temperaturas dos dessalinizadores .....	52
6.2.2	Produção de água dos dessalinizadores .....	55
6.2.3	Produtividade dos dessalinizadores .....	57
6.2.4	Eficiência Térmica Geral do dessalinizador solar .....	59
<b>6.3</b>	<b>Etapa 2 Avaliação do dessalinizador solar com o condensador externo .....</b>	<b>62</b>
6.3.1	Monitoramento de produção do condensador .....	62
6.3.2	Temperatura dos dessalinizadores .....	62
6.3.3	Produção de água acumulada dos dessalinizadores .....	65
6.3.4	Produção de água instantânea dos dessalinizadores .....	66
6.3.5	Produtividade dos dessalinizadores .....	68
6.3.6	Eficiência Térmica Geral dos dessalinizadores .....	71
6.3.7	Fluxo de transferência de calor dos dessalinizadores solar .....	72
<b>6.4</b>	<b>Análise de qualidade de água .....</b>	<b>74</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>78</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>79</b>
	<b>APÊNDICE A — TABELAS DE COLETA DE DADOS.....</b>	<b>83</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Uma reunião de cúpula importante da ONU em setembro de 2015 resultou na adoção dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável para lidar com ameaças futuras, tais como a escassez de água, a urbanização e as mudanças climáticas. De acordo com Hanoon *et al.* (2022), após o impacto causado pela pandemia do coronavírus, tornou-se crucial que a comunidade global se concentre em objetivos de desenvolvimento sustentável para enfrentar desafios globais, como a urbanização, as mudanças climáticas, a pobreza e a escassez de água.

A escassez de água é um problema sério em todo o mundo que afeta mais de 4 bilhões de pessoas. De acordo com Hu *et al.* (2022), inúmeras técnicas, incluindo dessalinização térmica, osmose reversa e destilação por membrana, foram desenvolvidas para obter água doce em todo o mundo. Especificamente, no Nordeste do Brasil, uma grande parte da população sofre com a escassez de água.

Além disso, várias atividades humanas como: o uso excessivo de pesticidas e fertilizantes para irrigação, descarte de resíduos sólidos, vazamento de fossas sépticas ou despejo de efluentes industriais nos corpos de água tem causado imensos danos aos nossos recursos hídricos superficiais e subterrâneos (MUKHOPADHYAY, DUTTAGUPTA e MUKHERJEE, 2022).

A mudança climática tem colaborado para que a região do semiárido tenha significativos níveis de diminuição hídrica, produção de alimentos e desenvolvimento social. Contexto especialmente no meio rural, reflexo de poucas políticas públicas que sejam altamente eficientes no desenvolvimento das populações dos semiárido nordestino (SILVA e FRANÇA, 2018).

De acordo com Zhang *et al.* (2022), a tecnologia de recuperação de recursos hídricos evoluiu significativamente e permitiu que a extração de minerais da dessalinização de águas se torne uma alternativa sustentável para as populações rurais. Isso ajuda a preservar as reservas limitadas de água doce existentes e fornece água doce a partir de águas subterrâneas de alta qualidade.

A região semiárida no Brasil representa cerca de 10% do território nacional, com a maior parte localizada no Nordeste. O Nordeste é considerado uma das regiões semiáridas mais

populosas do mundo, com mais de 20 milhões de habitantes, muitos dos quais vivem em áreas rurais (AMARAL, MACHADO e NAVONI, 2020).

Em regiões como o semiárido paraibano, é comum que águas subterrâneas e superficiais apresentem valores elevados de salinidade. A falta de gestão adequada da irrigação em áreas mal drenadas pode agravar esse problema e afetar negativamente a capacidade de produção do solo (LIRA, *et al.*, 2018).

No Nordeste brasileiro, a temperatura elevada em algumas épocas do ano combinada com a redução das precipitações pluviométricas, especialmente na Paraíba, pode causar impactos socioambientais e econômicos (LACERDA, LOPES e ALBUQUERQUE, 2018). De 2012 a 2016, foram registrados casos de diminuição dos níveis de água em reservatórios de abastecimento humano e em lençóis freáticos na região (MILHORANCE, *et al.*, 2019).

Devido ao rápido desenvolvimento da sociedade moderna e ao aumento da população, estima-se que a demanda humana por recursos de água doce aumente em 40% até 2050. De acordo com Hua, Xu e Xie (2021), a maior parte da superfície da Terra é coberta por água salgada, o que torna a extração de água doce da água salgada uma opção viável. Eles também argumentam que a tecnologia de dessalinização é uma solução sustentável para lidar com a escassez de água.

A utilização da energia solar para dessalinização pode solucionar alguns desafios encontrados em processos convencionais de produção de água potável, como altos níveis de salinidade em fontes subterrâneas ou superficiais. O presente estudo visa maximizar a produção de água doce de boa qualidade através da combinação de um condensador externo e um dessalinizador solar, a fim de atender às necessidades de populações rurais em Queimadas, Paraíba

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Avaliar o condensador externo associado a um dessalinizador solar para o aumento da produção de água potável no município de Queimadas - PB.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Avaliar, de forma comparativa, a eficiência do condensador acoplado a um de dessalinizador solar;
- Estudar os efeitos da radiação solar e da temperatura no interior do dessalinizador solar no processo de dessalinização da água;
- Analisar a produção de água em função da lâmina de água salobra dentro dos dessalinizadores solar;
- Averiguar a qualidade da água antes e depois da dessalinização com análises física e químicas;
- Calcular os coeficientes de transferência de calor no dessalinizador;

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

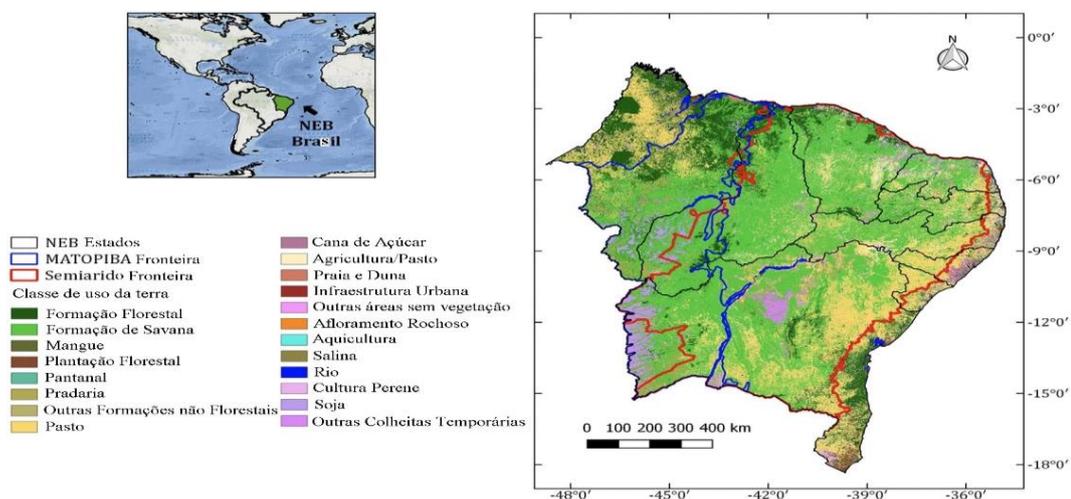
#### 3.1 Escassez hídrica

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 das Nações Unidas são um plano ambicioso para lidar com as desigualdades globais e alcançar um futuro sustentável para toda a humanidade. Para alcançar o ODS relacionado à água, é preciso ter uma abordagem integrada para gerenciar e alocar recursos hídricos, envolvendo todos os atores e partes interessadas (DI BALDASSARRE et al., 2019).

O uso excessivo e a má gestão da água estão causando uma escassez crescente de água potável em todo o mundo. O crescimento da população e a industrialização, juntamente com as mudanças climáticas e a variabilidade das condições climáticas, tornaram a disponibilidade de água uma preocupação crescente para aqueles que dependem dela para sobreviver. (TORTAJADA e NAMBIAR, 2019).

A região Nordeste do Brasil é composta por aproximadamente 1,6 milhão de quilômetros quadrados e é localizada na costa leste do país *Figura 1*. Com uma rica história e cultura, a região foi explorada primeiramente pelos colonizadores portugueses. Há fortes evidências históricas de mudanças climáticas que aumentam o risco de seca na região (MARENGO et al., 2021).

**Figura 1** — Mapa do Nordeste brasileiro incluindo os limites dos estados e as fronteiras



**Fonte:** (MARENGO, et al., 2021).

O Brasil é reconhecido por sua vasta disponibilidade de água, mas infelizmente, parte de sua população ainda enfrenta dificuldades em acessar água potável. De acordo com Costa e Silva (2021), o semiárido, localizado no Nordeste do país, tem sofrido há muito tempo com secas prolongadas e com o uso desmedido de água para atividades agrícolas, como pecuária e irrigação.

A lei federal nº 9.433 de 08 de janeiro de 1997 estabelece que a outorga de direito de uso de recursos hídricos é uma das principais ferramentas da Política Nacional de Recursos Hídricos. Esse instrumento tem como objetivo garantir o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e assegurar o direito de acesso a esses recursos.

A água da chuva é uma importante fonte de abastecimento para muitas comunidades. No entanto, diferentemente da água tratada fornecida pelos serviços municipais, a água da chuva geralmente não passa por um processo de tratamento antes de ser consumida. Vários patógenos, incluindo *Aeromonas*, *Campylobacter*, *Legionella*, *Salmonella*, *Giárdia* e *Escherichia coli*, já foram encontrados em água de chuva coletada em cisternas, poços e aquíferos superficiais (CHUBAKA, *et al.*, 2018).

De acordo com Michel *et al.* (2020), a qualidade da água é crucial para a saúde humana. As águas subterrâneas podem ser uma importante fonte de água potável pois são menos suscetíveis à poluição em comparação com as águas superficiais. No entanto, o uso intenso do solo para fins agrícolas, urbanos e industriais tem contribuído para a contaminação dessas águas subterrâneas com metais pesados, que podem ser removidos por meio de tecnologias clássicas de dessalinização.

Em comunidades rurais pequenas, pode ser bastante dispendioso garantir a disponibilidade de água potável por meio de pequenas estações de tratamento de água descentralizadas (incluindo investimentos e custos de manutenção), que são alimentadas por fontes superficiais ou subterrâneas. A poluição da fonte de água pode ter várias causas, tanto naturais quanto antropogênicas, incluindo processos geoquímicos, chuvas intensas, inundações e descarte de águas residuais não tratadas (VERLICCHI e GRILLINI, 2020).

A Portaria Nº GM/MS Nº 888/2021 estabelece a necessidade de se realizar análises de todas as águas destinadas ao consumo humano, com o objetivo de garantir a ausência de

bactérias prejudiciais, como coliformes totais e *Escherichia coli*. O objetivo é manter a qualidade da água para o bem-estar humano.

### **3.2 Situação climática no Semiárido**

Em muitas regiões do mundo, os formuladores de políticas públicas estão buscando soluções para atender às futuras demandas de água, devido ao crescente crescimento populacional e às mudanças climáticas. De acordo com Maas et al. (2017), existem dez tipos de clima no mundo: temperado, equatorial, tropical, subtropical, mediterrâneo, frio, montanha fria, polar, semiárido e desértico.

Nas últimas décadas, o aquecimento global tem sido uma ameaça real à humanidade. As mudanças de precipitação podem alterar as condições dos recursos hídricos subjacentes e aumentar a necessidade de novas estratégias de gestão da água especialmente em condições climáticas altamente incertas em regiões áridas e regiões semiáridas (CHOUBIN, et al., 2018).

Segundo Pereira et al. (2018), a variabilidade climática em larga escala impacta a hidrologia local e fornece informações estratégicas sobre a gestão dos recursos hídricos de uma região. Isso permite uma melhor compreensão da ocorrência de eventos extremos de seca na região.

As nuvens desempenham um papel fundamental no sistema terra-atmosfera, ao refletirem a radiação solar de volta ao espaço e reter radiação terrestre. Além disso, as nuvens produzem precipitação, compensando o resfriamento radiativo da atmosfera, o que está estreitamente ligado ao ciclo hidrológico e à distribuição de recursos hídricos (HU, *et al.*, 2021).

De acordo com Laux et al. (2021), o semiárido do Nordeste brasileiro é uma das regiões mais secas e densamente povoadas do mundo. Mesmo em anos com quantidade de chuva média, como em 2017 e 2018, a região nordestina do Brasil não conseguiu superar sua escassez de água devido à alta variabilidade das precipitações na região.

As mudanças climáticas têm sido associadas a modificações nas regiões de clima seco e úmido, o que tem impactado o ciclo da água na atmosfera. Esse fenômeno tem sido considerado um aspecto relevante das mudanças climáticas globais. O aquecimento global, por exemplo, pode afetar a evaporação potencial e, por consequência, o estado de umidade da

superfície, o que não pode ser plenamente caracterizado por meio de precipitações anormais. Essas modificações têm sido objeto de estudo, como o trabalho de Xu et al. (2022).

Segundo Yao et al. (2019), os modelos hidrológicos, como o Variable Infiltration Capacity (VIC), simulam o ciclo hidrológico em uma região, considerando as forças do clima, cobertura da terra, condições do solo e topografia, o que apresenta suas vantagens. Alguns estudos também têm se concentrado nas futuras mudanças no ciclo hidrológico para detectar a resposta ao clima futuro sob um cenário de Rota de Concentração Representativa (RCR). Desde que os programas de restauração ecológica foram implementados, alguns estudos foram realizados para determinar se eles tiveram um impacto positivo ou não no ciclo hidrológico.

A velocidade do vento pode variar ao longo do dia, o que torna um desafio o uso da ventilação para aquecimento e refrigeração de ambientes de forma eficiente em termos de energia. Além disso, as condições microclimáticas em espaços externos são influenciadas por fatores como o clima regional, o meio ambiente, a vegetação e objetos construídos pelo homem, como edifícios e estruturas (CANAN et al., 2019).

As partículas de minerais, emitidas por tempestades de poeira, são compostas por matéria orgânica e nutrientes e podem ser transportadas horizontalmente por longas distâncias. Esse processo pode levar à degradação do solo, causando mudanças em sua estrutura e composição, bem como alterações nos ciclos biogeoquímicos terrestres e oceânicos (CHKHETIANI et al., 2021).

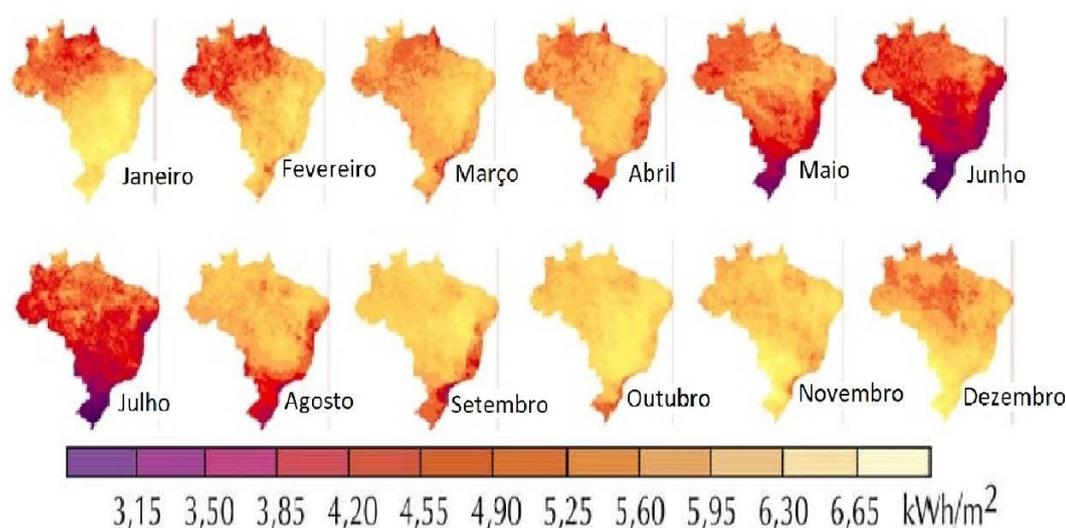
As trocas de massa e energia entre a superfície terrestre e a atmosfera são componentes-chave do fluxo de calor sensível e fluxo de calor latente. As trocas de vapor de água entre a superfície terrestre e a atmosfera conduzem a dinâmica dos principais ciclos de água, energia e biogeoquímicos da Terra e simultaneamente governam a evolução e as características da camada limite planetária, como sua profundidade, comportamento termodinâmico, a temperatura do ar na superfície e a umidade. A energia disponível tem um efeito importante nos climas regionais, no ciclo da água, nas características da camada limite e no desenvolvimento das nuvens (YUAN et al., 2017).

### **3.3 Radiação solar em regiões semiáridas**

A quantidade de radiação solar que atinge a superfície terrestre varia anualmente *Figura 2*, sendo o movimento orbital e rotacional o principal fator responsável por essa mudança. A

duração do dia e a altura do sol acima do horizonte são influenciadas por essas alterações, o que afeta a quantidade de radiação recebida pela superfície em diferentes locais (KULESZA, 2020). A compreensão detalhada da variabilidade temporal e espacial da radiação solar é crucial para entender as variações climáticas e o aquecimento global, tornando o banco de dados de longa data sobre a radiação solar uma ferramenta importante para o planejamento presente e futuro (KABA, et al., 2018).

**Figura 2** — Total da irradiação solar global horizontal – médias mensais



**Fonte:** (ROCHA, et al., 2014).

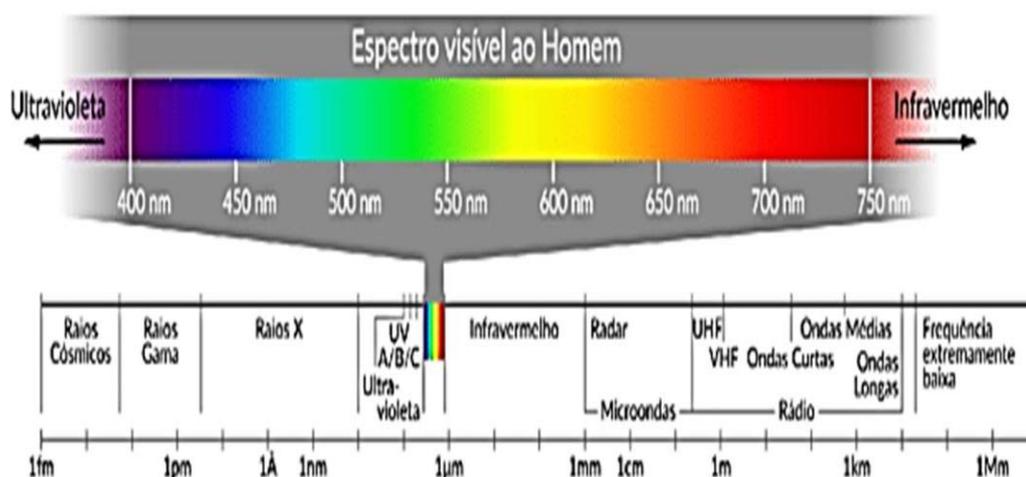
De acordo com Costa et al. (2018), a estimativa do potencial de geração de energia adota a premissa de uma taxa de desempenho médio anual fixo de 80% para todas as localidades. Embora essa abordagem permita obter uma representação razoável da expectativa de geração mensal e anual, ela não leva em conta o efeito de variáveis secundárias, como a radiação refletida, a temperatura ambiente e a velocidade do vento.

A radiação solar é fundamental para impulsionar a evaporação da superfície terrestre e é uma variável importante na interação entre a superfície e a atmosfera. Além disso, a radiação solar exerce papel importante no controle do balanço de energia da superfície, o que influencia indiretamente os processos microbianos do solo, tais como o fluxo de calor, a distribuição subsuperficial e a dinâmica da temperatura do solo (ZHOU et al., 2017).

A radiação solar abrange uma ampla faixa do espectro eletromagnético, como mostrado na *Figura 3*. Cerca de 81% da energia que atinge a superfície da Terra está na faixa de comprimentos de onda que vai do visível ao infravermelho. Essa energia alimenta processos

termodinâmicos e químicos, sejam eles naturais ou artificiais. Entre os processos naturais, destacam-se a fotossíntese, o ciclo hidrológico e a dinâmica da atmosfera e dos oceanos, com os quais interagimos rotineiramente (PEREIRA et al., 2017).

**Figura 3** — Espectro da radiação solar e a faixa visível humana



Fonte: Pereira, *et al.*, (2017).

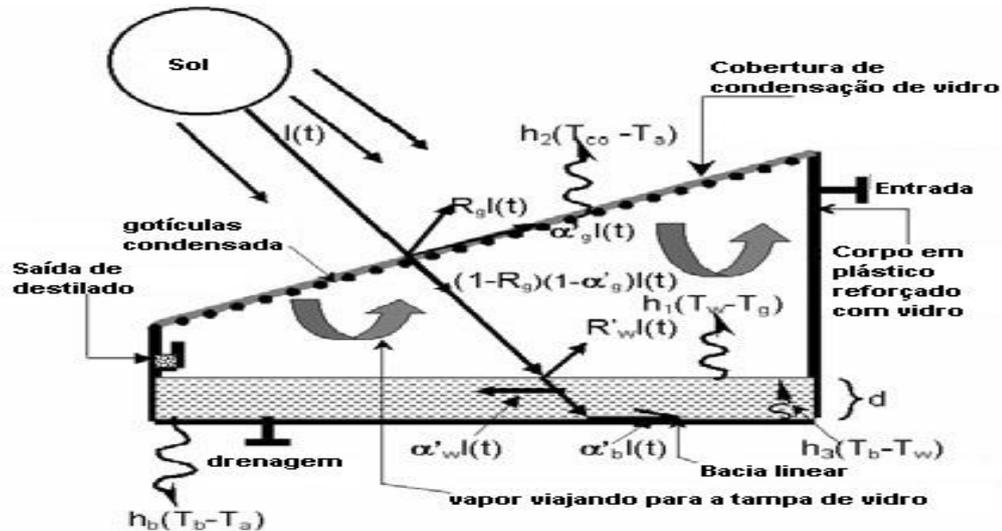
### 3.4 Estado da Arte do dessalinizador solar

#### 3.4.1 Dessalinizador solar acoplado a tubos coletores

Tiwari et al. (2007), relata a análise de desempenho anual e sazonal de diferentes profundidades de água, a uma inclinação da cobertura do dessalinizador solar a 30° *Figura 4*. Os experimentos foram conduzidos durante todo o ano de junho 2004 a maio de 2005 em seis dias claros de cada mês durante 24 horas por dia, para seis lâminas de água diferentes, temperatura, radiação solar, velocidade do ar e produção de água. Esta instalação experimental foi instalada no IIT Delhi, Nova Delhi, Índia, cuja latitude é 28.35NN. Quanto menor a profundidade de água maior rendimento anual. Aumentar a profundidade da água diminui o rendimento. O modelo térmico desenvolvido validou o rendimento horário para várias lâminas de água no verão e inverno. Os vários modos de operação interna a transferência de energia interna ainda foi avaliada e comparada relativamente para diferentes profundidades e estações. O conceito de fração solar e valores horizontais de azimute solar e ângulos de altitude tem sido usado em modelagem térmica para prever diferentes parâmetros. O valor experimental de rendimento de diferentes lâminas de água foi comparado com os valores teóricos obtidos por

modelagem térmica a vários parâmetros, como velocidades do ar ambiente e absorvidade da bacia.

**Figura 4** — Corte transversal e várias transferências de energia associadas

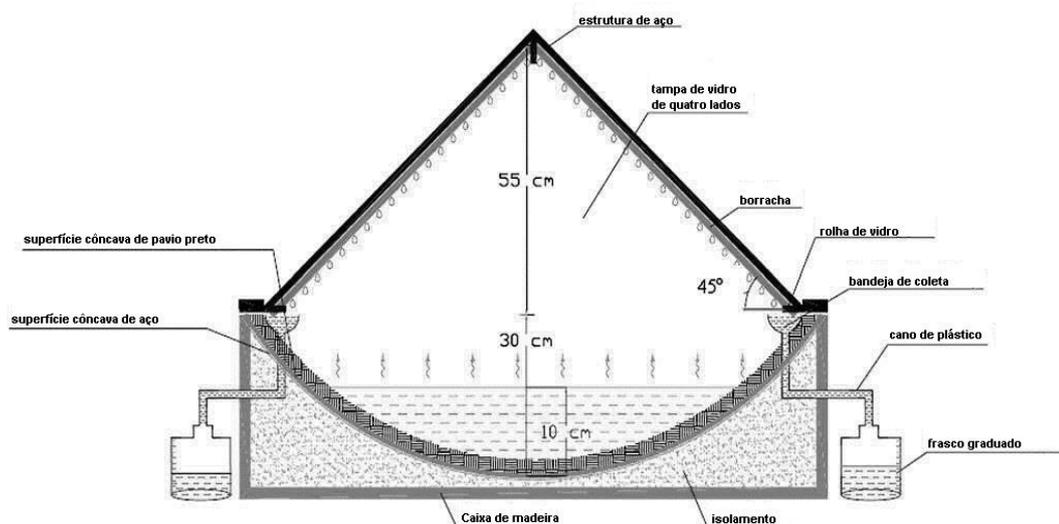


Fonte: (TIWARI, et al., 2007).

### 3.4.2 Dessalinizador solar com superfície côncavo

Kabeel (2009), relata que as superfícies utilizadas para o fenômeno de evaporação e condensação desempenham papéis importantes no desempenho do dessalinizador solar tipo bacia. No presente estudo, a bacia do dessalinizador solar é côncava com uma abertura quadrada de 1,2m x 1,2m feita de aço galvanizado. A superfície do pavio leva a mesma forma da superfície côncava e tem uma espessura de 5 cm cobrindo a bacia. A superfície do pavio é pintada de preto para absorver o máximo radiação solar. A profundidade da bacia é de 30 cm no centro. A profundidade de água salina é de 10 cm no centro. A tampa de vidro é usada em quatro lados com inclinação de 45° com a horizontal em forma de pirâmide *Figura 5*. A coleta dos dados levantados foram a de temperatura, radiação solar, produção diária e eficiência da dessalinização. A utilização de pavio côncavo aumentou a quantidade de produção de água que absorve a radiação solar e a área de superfície de evaporação. A produção média do dessalinizador solar durante o dia foi de 4,1 L.m<sup>-2</sup>, e uma eficiência máxima instantânea do sistema de 45% e média diária eficiência de 30% foram registrados. O rendimento horário máximo foi de 0,5 L.h.m<sup>-2</sup> depois do meio-dia.

**Figura 5** — Corte transversal do arranjo esquemático do dessalinizador solar côncavo

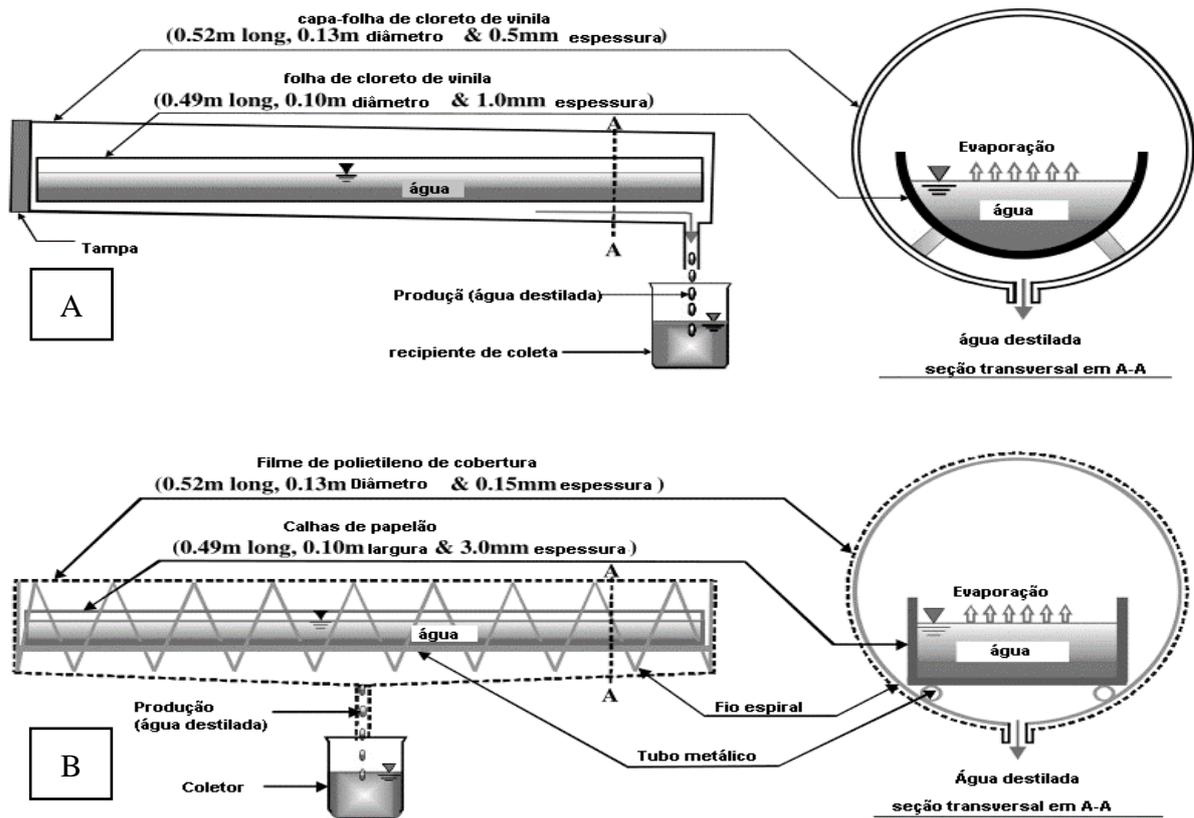


**Fonte:** (KABEEL, 2009).

### 3.4.3 Dessalinizador solar tubular

Ahsan, et al. (2012) relata uma comparação detalhada da análise de projeto, fabricação, custo e produção de água entre um antigo dessalinizador solar tubular (DST) *Figura 6 A* e um melhorado (novo) *Figura 6 B*. Já o material da capa, uma folha de cloreto de vinil, do antigo DST era um pouco pesado, caro e não pode ser facilmente moldado em um tamanho desejável. Um material altamente durável firme de polietileno foi adotado como capa do novo DST. O novo DST é feito de materiais baratos e leves. Conseqüentemente, o peso e o custo do novo DST foram visivelmente reduzidos. Alguns experimentos de campo sobre o novo DST foram realizados em Fukui (Japão) e Muscat (Omã) e os resultados observados são comparados com o antigo. O fluxo de produção de água é proporcional à diferença de temperatura dentro do reservatório, os coeficientes de transferência de massa de evaporação e coeficientes de transmissão de calor. São mais elevados do que os de condensação. O custo de fabricação e peso do novo DST foram reduzidos em 92% e 61% do antigo.

**Figura 6** — Antigo dessalinizador solar tubular (A); Novo dessalinizador solar tubular (B)

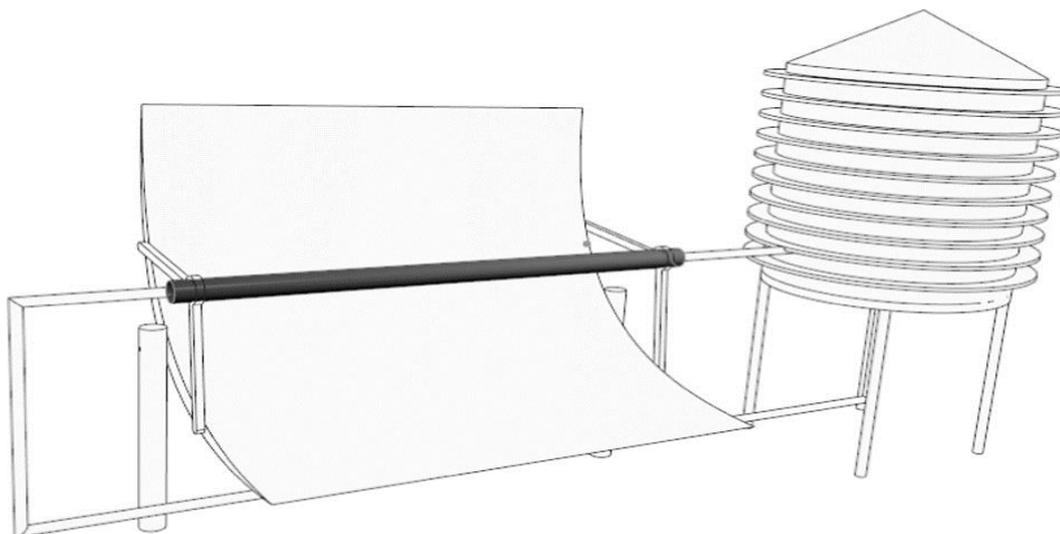


Fonte: (AHSAN, *et al.*, 2012).

#### 3.4.4 Dessalinizador solar tubular acoplado ao concentrador parabólico

Al-Nimr e Dahdolan, (2015) relata que um novo design de dessalinizador solar tubular acoplado ao concentrador parabólico com um espelho que concentra a radiação solar em um tubo localizado no foco da parábola. Com um condensador frio que passa pelo dessalinizador inclinado por um pequeno grau para coletar a água destilada *Figura 7*. Um modelo matemático de estado estacionário do dessalinizador foi proposto e simulado. Os resultados do estudo mostram tanto a eficiência quanto a taxa de destilação da produtividade de  $3,0 \text{ L m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  e a eficiência térmica máxima de 33,8%. A simulação mostrou que a diminuição da velocidade do vento e temperatura aumenta a eficiência das taxas de dessalinização. Por outro lado, o aumento da intensidade solar aumenta a taxa de dessalinização, mas a eficiência não aumenta para toda a faixa de intensidade. De acordo com a modelagem matemática, esse sistema tem melhor resultado com velocidade de fluxo de ar de  $2 \text{ m s}^{-1}$ .

**Figura 7** —Dessalinizador solar tubular parabólico e tanque de condensação

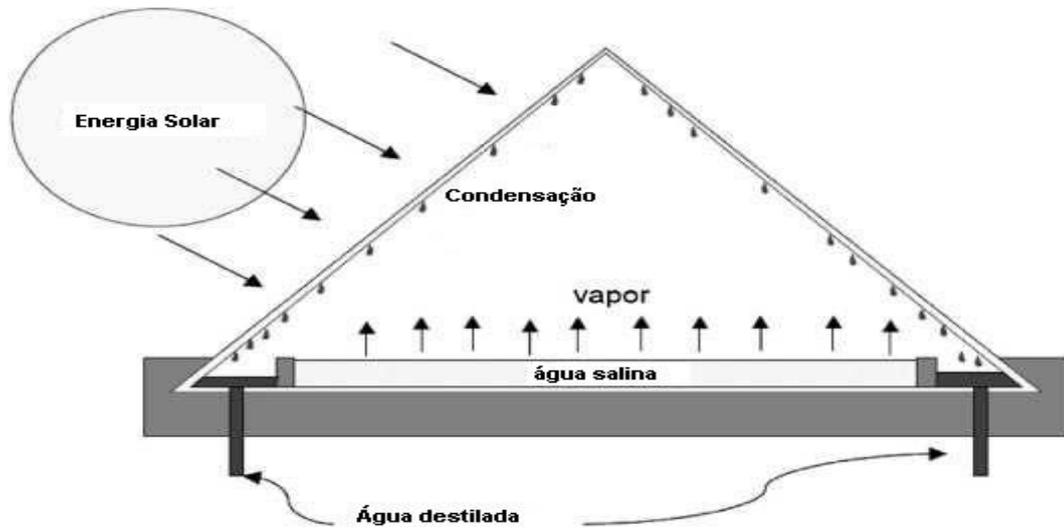


**Fonte:** (AL-NIMR e DAHDOLAN, 2015).

#### 3.4.5 Dessalinizador solar em forma de pirâmide

Vala e Kanabar, (2017) relata que a água na terra está disponível em grande quantidade, mas na forma de água salina onde apenas 1% é de água doce. Para cumprir a demanda de água doce, é necessário converter água salina em água potável. Nesta revisão com base no processo de dessalinizador solar em forma de pirâmide com  $0.82\text{ m} \times 0.81\text{ m} \times 0.75\text{ m}$  *Figura 8* e testado com diferentes profundidades de lâmina de água (2 a 4 cm) e diferente parâmetro afetando para os coeficientes de transferência de calor evaporativo. A produtividade foi de 48% maior do que a convencional e tem a forma geométrica apropriada com boa característica de construção para obtenção radiação máxima, e área de bacia mais eficaz e aumentar a produção de água fresca comparado a outros dessalinizadores solar.

**Figura 8** — Dessalinizador solar em forma de pirâmide



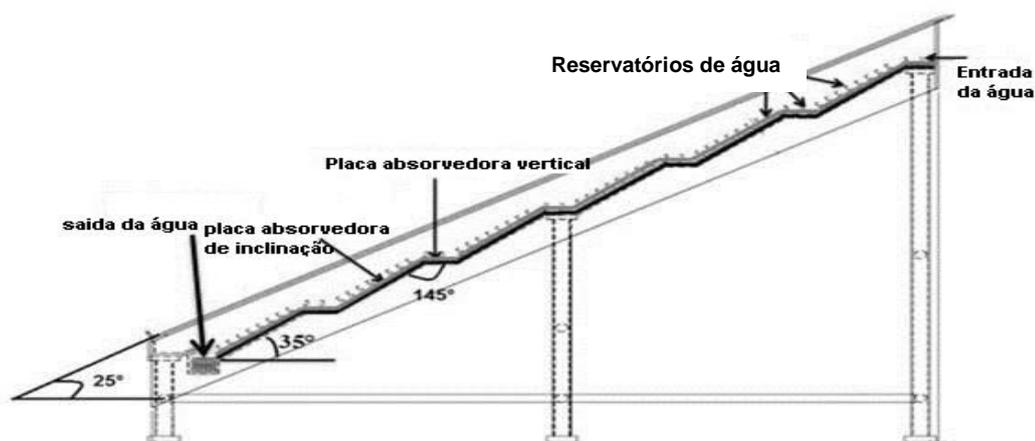
Fonte: (VALA e KANABAR, 2017).

#### 3.4.6 Dessalinizador solar de dupla inclinação com materiais absorventes

Pal, *et al.* (2017) relata que a produtividade de um dessalinizador solar de dupla inclinação com materiais absorventes com área de  $2 \text{ m}^2$  *Figura 9*. O estudo foi realizado no Instituto Nacional de Tecnologia Motilal Nehru Allahabad, Uttar Pradesh (UP), Índia, com coleta de dados de temperatura, radiação solar, produção de água, transferência de calor e eficiência do dessalinizador solar. Um aumento significativo no aporte de calor, rendimento e eficiência térmica foram obtidos na equação de eficiência instantânea. O resultado mostra que, o rendimento máximo é obtido como  $9012 \text{ mL.dia}^{-1}$  ( $4,50 \text{ L.m}^{-2}.\text{dia}$ ) para pavio de algodão preto em comparação com  $7040 \text{ mL.dia}^{-1}$  ( $3,52 \text{ L.m}^{-2}.\text{dia}$ ) para o pavio de juta a 2 cm de profundidade de água. Além disso, para a mesma condição de bacia, a eficiência térmica geral com a juta e mechas de algodão preto são 20,94% e 23,03%, respectivamente.



**Figura 10** — Dessalinizador solar escalonado com superfície de inclinação

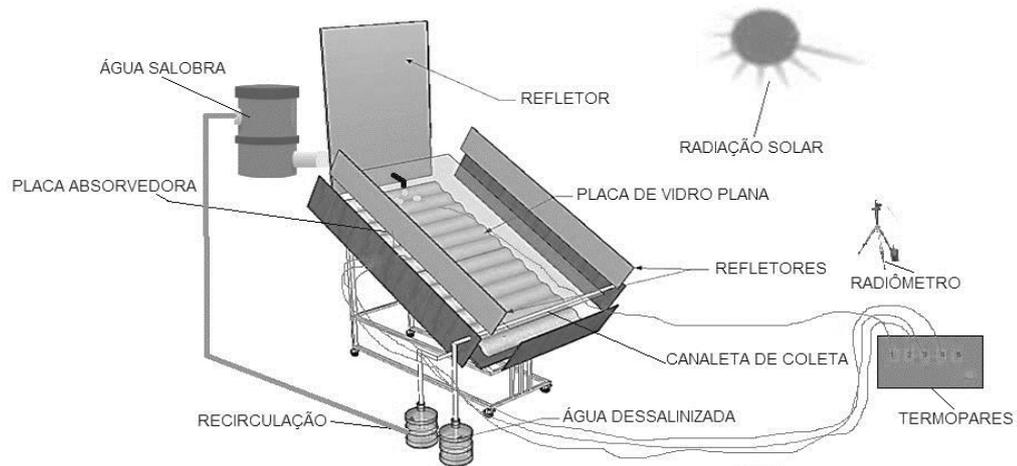


Fonte: (BOUZAID, *et al.*, 2019).

#### 3.4.8 Dessalinizador solar portátil com refletores de radiação

Silva, et al. (2020) relata que um dessalinizador solar portátil com refletores de radiação integrados foi utilizado com o intuito de obter uma água tratada conforme os padrões de potabilidade para o consumo humano *Figura 11*. Este trabalho teve como objetivo analisar o desempenho térmico do dessalinizador solar para produção de água dessalinizada e a qualidade físico-química da água antes e após o processo de dessalinização, coletando dados de temperatura, radiação solar, produção de água e estimativas computacional. A água salobra foi coletada no poço no Sítio Poço de Pedra, no município de Juazeirinho – PB. Foi observado uma produção máxima de água potável de  $2730,8 \text{ mL m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  para um índice de radiação solar média de  $660,42 \text{ W.m}^{-2}$ . Os resultados obtidos das análises físico-químicas das águas salobra e dessalinizada apresentaram reduções no teor de cloreto de 99,72%, o sódio de 99,88% e nos sólidos totais dissolvidos de 99,73% após o processo de dessalinização, atingindo valores de acordo com os padrões de potabilidade exigidos pela Portaria do Ministério da Saúde vigente no país.

**Figura 11** — Dessalinizador solar portátil tipo ondular com refletores



**Fonte:** (SILVA, *et al.*, 2020).

De acordo com os autores nesta sessão (3.4) do estado da arte sobre os diversos modelos apresentados dos dessalinizadores solar em processos de dessalinização de água salobra que pode contornar alguns problemas presentes nos processos tradicionais de produção de água potável. O presente estudo busca por uma produção máxima da água doce de boa qualidade produzida a partir de parâmetros utilizados para avaliar a tecnologia em seu real desenvolvimento e eficiência, com medições de radiação solar, temperaturas, velocidade dos ventos, capacidade de troca de energia interna e externa sobre modelos matemáticos, onde essas bases serão utilizadas para o desenvolvimento do dessalinizador solar de dupla inclinação acoplado a um condensador externo na obtenção de água potável, que possa atender as demandas das populações rurais.

### 3.5 Dessalinizador solar em estudo

A capacidade mundial de dessalinização de água, tanto de água salobra quanto de água do mar, tem aumentado constantemente a uma taxa anual de aproximadamente 9%. Grande parte desse crescimento ocorreu na região do Golfo, com destaque para o Reino da Arábia Saudita e os Emirados Árabes Unidos, que em 2016 detinham 15% e 11%, respectivamente, da capacidade total de dessalinização do mundo (JIA *et al.*, 2019).

De acordo com Flavia e Motta (2020), o processo de dessalinização por osmose reversa ocorre quando água salgada é adicionada em um recipiente e água pura em outro, separados por

uma membrana semipermeável. Os dois líquidos, em concentrações diferentes dentro do mesmo sistema, tentarão alcançar o equilíbrio osmótico. Já o processo de dessalinização solar é bem mais simples e não necessita de energia elétrica externa para ocorrer, seguindo o mesmo princípio do ciclo da água.

O dessalinizador solar tem a função de produzir água dessalinizada através de um processo que se baseia no gradiente de temperatura entre a água salgada e o vidro interno. Quando exposta à radiação solar, a água salgada aquece e evapora, gerando vapor que condensa na superfície interior da cobertura de vidro e escorre até as canaletas, onde é direcionado para um depósito de água dessalinizada (SIQUEIRA, MARTINS e VIANA, 2022).

A construção de um dessalinizador solar está diretamente relacionado com a estratégia do desenvolvimento do projeto, abrangendo o conhecimento prático das características térmicas e de operação do equipamento onde todas as etapas facilitam a compreensão do seu funcionamento.

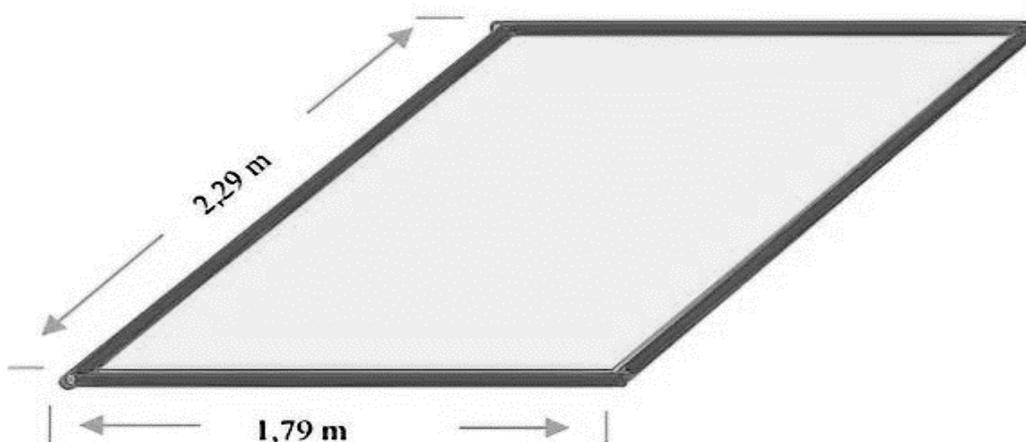
### **3.6 Componentes do dessalinizador solar**

#### **3.6.1 Reservatório da lâmina de água do dessalinizador**

O reservatório ou bandeja é uma das partes mais importantes do dessalinizador solar, pois é onde a água salobra recebe toda a radiação solar, aumentando sua temperatura e ocorrendo a evaporação. A bandeja pode ter diferentes profundidades, sendo que quanto maior for a profundidade, maior será a energia armazenada em seu interior, o que aumenta a eficiência da produção de água durante a noite, quando a incidência solar é nula. Por outro lado, quando as bandejas são mais rasas, a capacidade térmica é menor, mas a temperatura e a taxa de evaporação são maiores, o que aumenta a eficiência da produção de água durante o dia (SAADI et al., 2018).

A bandeja é um componente essencial do dessalinizador solar, responsável pela evaporação da água salobra pela exposição à radiação solar. Existem diversas formas e tamanhos de bandejas, construídas com diversos tipos de materiais. É comum utilizar tintas pretas ou materiais impermeáveis pretos para maximizar a absorção de radiação solar e transformá-la em calor. Um exemplo de construção de bandeja pode ser observado na *Figura 12* de Marinho e Leite (2020), com dimensões de 1,70 x 2,29 m, armação de canos de PVC de 32 mm e revestimento de lona emborrachada preta com fundo laranja, medindo 2 x 2,5 m.

**Figura 12** — Reservatório da água salina



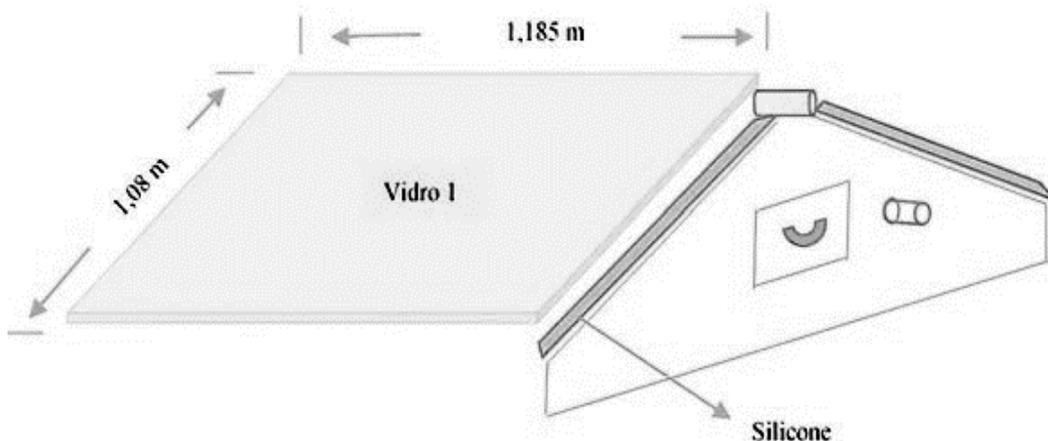
**Fonte:** (MARINHO e LEITE, 2020).

### 3.6.2 Cobertura do vidro

Os sistemas de dessalinização solar podem ter coberturas de vidro, que possuem maior durabilidade, mas também são mais frágeis e sensíveis a impactos. Durante o funcionamento do sistema durante o dia, a irradiação solar entra pela cobertura de vidro transparente e é absorvida pelo reservatório de água salgada. A água salgada é aquecida pela irradiação solar e evapora. A superfície superior da bandeja é coberta por uma tampa de vidro selada e o vapor quente sobe e se condensa na tampa de vidro. A condensação da água escorre para baixo devido à gravidade e se acumula no lado de fora do dessalinizador solar (PENG, et al., 2021).

O ângulo de inclinação da cobertura de vidro é um fator crítico para o desempenho do dessalinizador solar, já que garante a incidência direta dos raios solares no sistema de dessalinização. Além disso, é importante que a inclinação facilite o escoamento do condensado para as canaletas com um ângulo de 45°. Na *Figura 13*, pode-se observar que para preparar os vidros é necessário mão de obra especializada, pois eles devem ter 4 mm de espessura e medir 1,08 x 1,185 metros, com lapidação adequada. A vedação do sistema e segurança dos vidros é garantida pelo uso de silicone de alta temperatura.

**Figura 13** — Vidro 4mm transparente, com suas dimensões



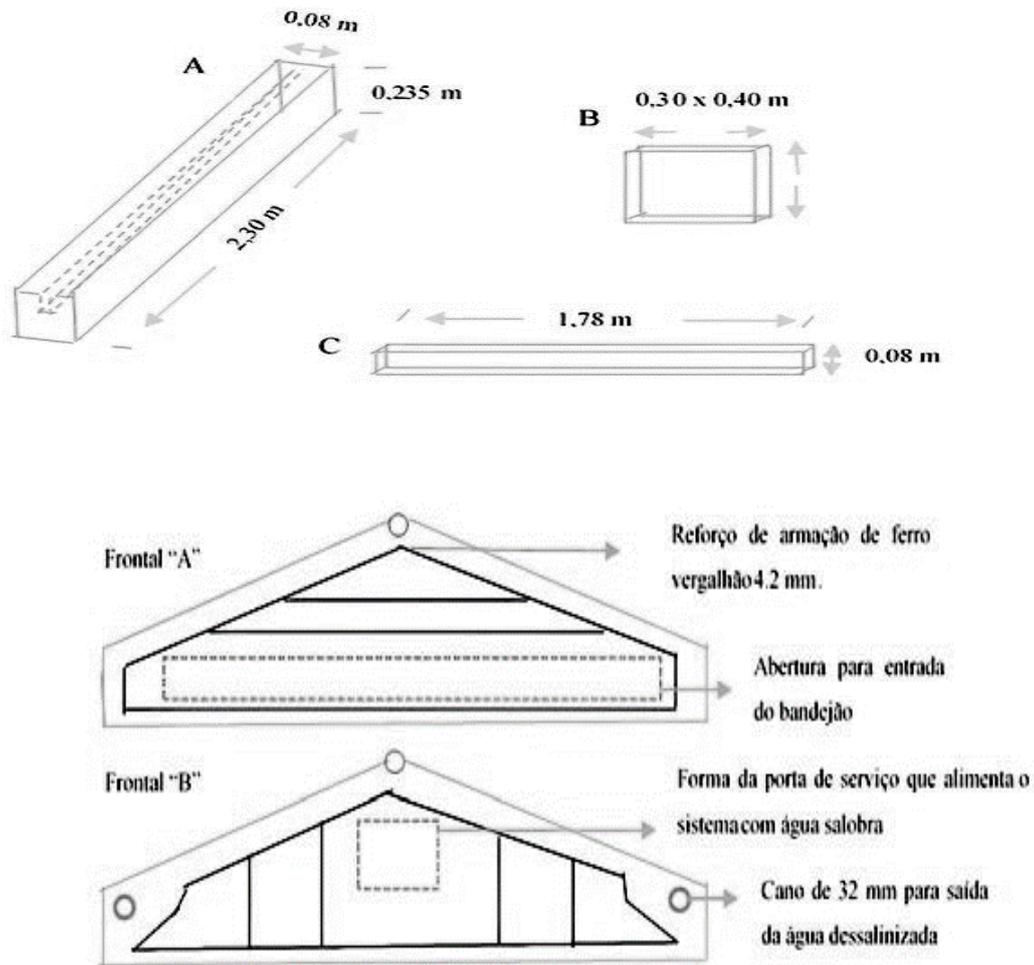
**Fonte:** (MARINHO e LEITE, 2020).

### 3.6.3 Isolamento térmico de alvenaria

O isolamento térmico na alvenaria de apoio é um elemento importante para o funcionamento do dessalinizador solar. É recomendável que o tamanho da alvenaria seja maior do que o da bandeja e que a estrutura se encaixe perfeitamente com a cobertura. Além disso, o material de construção deve resistir às condições climáticas, como ventos fortes e tempestades de areia. Os materiais mais comuns na construção de apoio de alvenaria são tijolos, blocos de cimento e placas pré-moldadas.

Para a fabricação de placas pré-moldadas, é utilizado ferro vergalhão de 4,2 mm e argamassa com a seguinte proporção: três medidas de areia lavada e peneirada para uma de cimento, além de água para a mistura. Na *Figura 14*, é possível visualizar um exemplo de placas pré-moldadas utilizadas como apoio para o dessalinizador solar.

**Figura 14** — Diagrama dos pré-moldados de alvenaria do dessalinizador solar

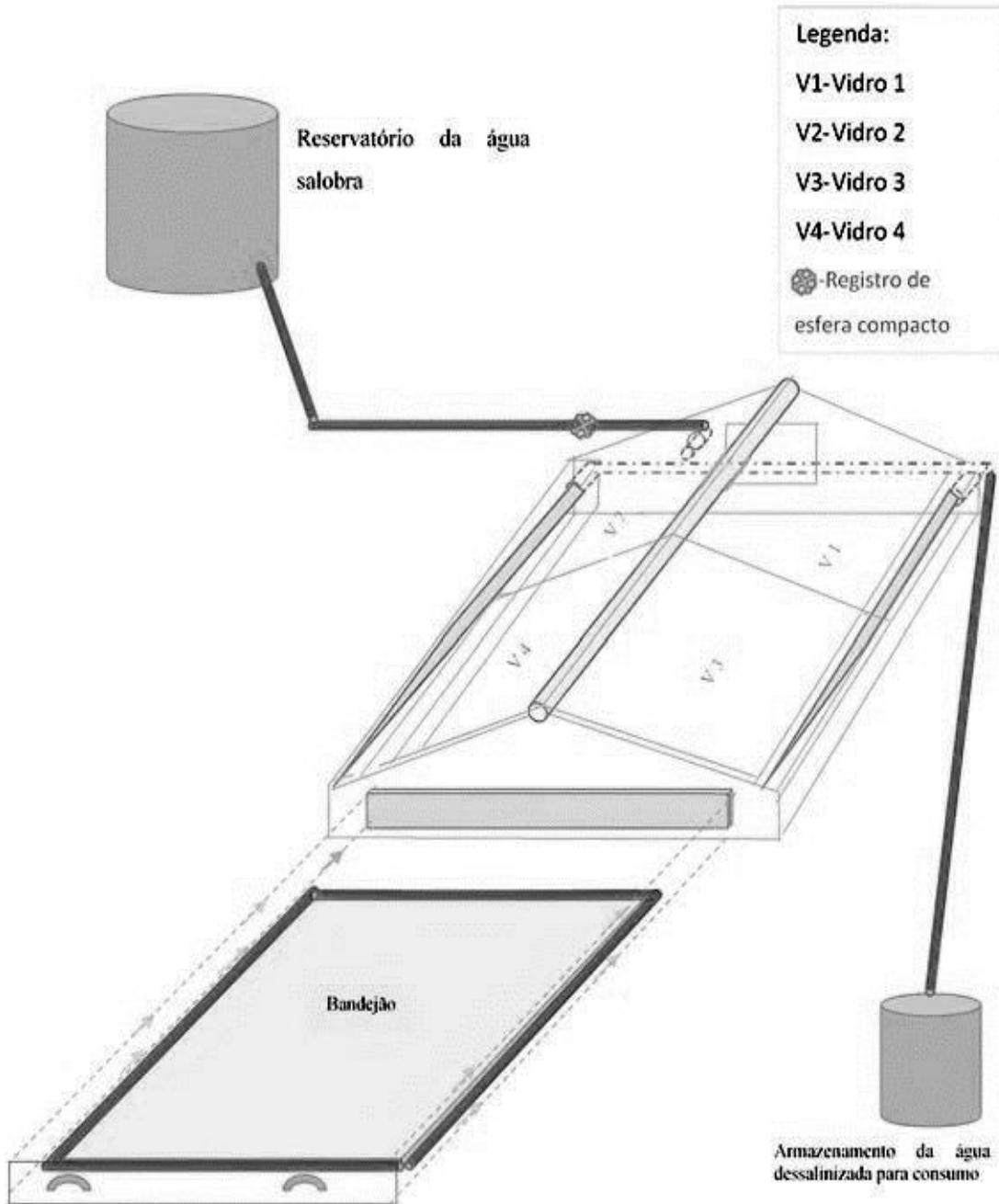


**Fonte:** (MARINHO e LEITE, 2020).

#### 3.6.4 Canaletas e encanação do sistema de dessalinização

O dessalinizador solar possui calhas de coleta em suas laterais, localizadas inicialmente na base da cobertura de vidro, que têm como objetivo coletar a água dessalinizada e transportá-la até um recipiente de coleta. É importante que os canos de PVC utilizados na coleta estejam revestidos para proteção contra a ação do tempo, sol e chuva. Para a fabricação das calhas internas, como apresentado na *Figura 15*, utiliza-se uma chapa de alumínio com desnível de queda de 5 cm para garantir o escoamento da água dessalinizada. Além disso, o sistema de encanamento é montado para garantir a entrada e saída de água no dessalinizador solar.

**Figura 15** — Sistema de entrada da água salina e saída da água dessalinizada



Fonte: (MARINHO e LEITE, 2020).

## 4 MODELAGEM MATEMÁTICA DO DESSALINIZADOR SOLAR

### 4.1 Transferência de calor

Modelar um sistema de dessalinização solar apresenta certas dificuldades devido às características transientes bastante variáveis de radiação solar e temperaturas. Segundo Lopes et al. (2021), o coeficiente de transferência de calor da superfície da água para cobertura de vidro pode ser calculado pela Equação (1).

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

Onde:

$h_c$  = Coeficiente de transferência de calor [W.m<sup>-2</sup>. K<sup>-1</sup>];

$T_a$  = Temperatura da água da bandeja do dessalinizador [°C];

$T_{vi}$  = Temperatura do vidro interno [°C];

Os valores de pressão da água ( $P_a$ ) e pressão do vidro interno ( $P_{vi}$ ) podem ser calculados utilizando as Equações (2) e (3), respectivamente, em um intervalo de temperatura entre 10°C e 90°C. Ambas as equações utilizam a unidade Kelvin (K) para temperatura, conforme descrito no artigo de LOPES et al. (2021):

$$P_a = \exp \left( 25,317 - \frac{5144}{T_a + 273} \right) \quad (2)$$

Onde:

$P_a$  = Pressão da água salobra [N.m<sup>-2</sup>];

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

Onde:

$P_{vi}$  = Pressão do vidro interno [ $\text{N.m}^{-2}$ ];

O coeficiente de transferência de calor por evaporação ( $h_e$ ) na Equação (4), necessita da Equação (1) ( $h_c$ ), da superfície da água para cobertura de vidro (LOPES, *et al.*, 2021).

$$h_e = 0,01627 * h_c * \left[ \frac{(P_a - P_{vi})}{T_a - T_{vi}} \right] \quad (4)$$

Onde:

$h_e$  = Coeficiente de Transferência de Calor por evaporação [ $\text{W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ];

#### 4.2 Produção de água do dessalinizador solar

A produção média total é obtida por meio do intervalo da produção acumulada a cada meia hora, ao longo de 10 horas de operação do sistema, utilizando a Equação (5) proposta por Lopes et al. (2021).

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^{21} V_i}{n} \quad (5)$$

Onde:

$Q$  = Produção média total ( $\text{mL.h}^{-1}$ );

$V_i$  = valores coletados durante cada meia hora (mL);

$n$  = número de horas (h);

A produção total de água, é coletada após 24 horas e graduada em uma proveta para a totalidade da produção do dia e da noite.

#### 4.3 Produtividade do dessalinizador solar

A produtividade do dessalinizador solar pode ser calculada por meio das Equações (6), (7) e (8), conforme descrito em Lopes et al. (2021).

$$M = h_e * \left( \frac{A_{co}}{A_b} \right) * \left( \frac{T_a - T_{vi}}{f_e} \right) * 3600 \quad (6)$$

$$f_e = 3161500 - 2407,9 * (T_a + 273) \quad (7)$$

$$A_{co} = \left[ \left( \frac{\tan \alpha}{\sin \theta + \cos \theta * \tan \alpha} \right) + \left( \frac{\tan \theta}{\sin \alpha + \cos \alpha * \tan \theta} \right) \right] * C * L \quad (8)$$

Onde:

$M$  = Produtividade do dessalinizador solar ( $\text{Kg.m}^{-2}\text{h}^{-1}$ );

$A_{co}$  = Área de cobertura do dessalinizador solar ( $\text{m}^2$ );

$f_e$  = Calor latente de evaporação da água salobra ( $\text{J.kg}$ );

$A_b$  = Área da bandeja da água salobra ( $\text{m}^2$ );

$\alpha$  = Ângulo de inclinação do dessalinizador [ $^\circ$ ];

$\theta$  = Ângulo de inclinação do dessalinizador [ $^\circ$ ];

$\theta = \alpha$  do Dessalinizador simétrico;

$\theta \neq \alpha$  do Dessalinizador assimétrico;

$L$  = largura do vidro (m);

$C$  = Comprimento do vidro (m);

#### 4.4 Eficiência térmica do dessalinizador solar

De acordo com Zoori et al. (2013), a eficiência térmica de um dessalinizador solar é de suma importância, pois os parâmetros das quantidades de radiação solar que chegam até o dessalinizador solar contribuem para a produção de água destilada final. Para se ter uma medida de comparação, a eficiência térmica geral do dessalinizador solar, mostrada na Equação (9), utilizou-se as Equações (4) e (6).

$$\eta = \frac{h_e * A_c * (T_a - T_{vi})}{\sum I_{(t)} * A_b} \quad (9)$$

Onde:

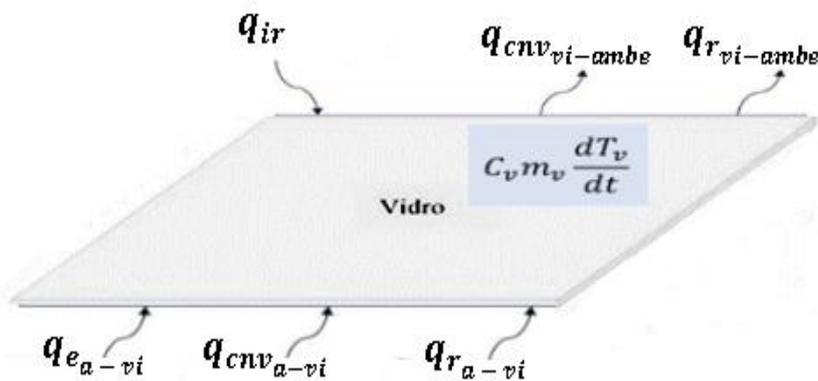
$\eta$  = Eficiência térmica geral.

$I_{(t)}$  = Radiação Solar ( $\text{W.m}^{-2}$ ).

#### 4.5 Energia da cobertura do dessalinizador

A cobertura do dessalinizador solar é composta por um vidro transparente, no qual ocorre a condensação da água potável por meio da evaporação da água salina presente na bandeja. Essa condensação ocorre devido à diferença de temperatura entre o interior e o exterior do dessalinizador. A relação entre a energia térmica para a superfície do vidro está representada na *Figura 16*.

**Figura 16** — Energia na cobertura do dessalinizador solar



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022.

O balanço de energia no vidro de condensação é calculado matematicamente pela diferença entre as energias que entram pela cobertura de vidro e a energia que sai do dessalinizador solar, de acordo com a Equação (10). O balanço energético obtido pela cobertura de vidro é resultado da energia do sol, da transferência de calor por convecção, radiação e evaporação da água para o vidro, além da energia perdida pela transferência de calor por radiação e convecção entre o vidro e o ambiente externo (BOUZAID et al., 2019).

$$C_v m_v \frac{dT_v}{dt} = q_{ir_{ambe-vi}} + q_{r_{a-vi}} + q_{cnv_{a-vi}} + q_{e_{a-vi}} - q_{r_{vi-amb_e}} - q_{cnv_{vi-amb_e}} \quad (10)$$

Na Equação (10), ( $C_v$ ) [J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>] corresponde o calor específico do vidro, ( $m_v$ ) [kg] a massa do vidro,  $\left(\frac{dT_v}{dt}\right)$  [K s<sup>-1</sup>] gradiente de temperatura do vidro e ( $q$ ) [W m<sup>-2</sup>] fluxo de transferência de calor.

O fluxo de calor radiativo substituído entre a cobertura de vidro interno e o ambiente externo pela Equação (11).

$$q_{r_{vi-amb_e}} = h_{r_{vi-amb_e}} * A_v * (T_{vi} - T_{amb_e}) \quad (11)$$

O  $h_{r_{vi-amb_e}}$  [W.m<sup>-2</sup>. K<sup>-1</sup>], coeficiente de troca de calor radiativo entre a cobertura de vidro interno e o ambiente externo, é dado pela Lei de Stefan-Boltzman, conforme mostrado na Equação (12).

$$h_{r_{vi-amb_e}} = \sigma * \varepsilon * (T_{vi}^2 + T_{amb_e}^2) * (T_{vi} + T_{amb_e}) \quad (12)$$

Os valores de ( $\sigma$ ) e ( $\varepsilon$ ) são respectivamente a constante de Stefan-Boltzman e a emissividade da cobertura de vidro. A temperatura do ambiente externo é apresentada pela Equação (13).

$$T_{amb_e} = 0,0552(T_{amb_i}^{1,5}) \quad (13)$$

O fluxo de calor convectivo entre a cobertura de vidro interno e o ambiente externo está atribuída pela Equação (14).

$$q_{cnv_{vi-amb_e}} = h_{cnv_{vi-amb_e}} * A_v * (T_{vi} + T_{amb_e}) \quad (14)$$

O  $h_{cnv_{vi-amb_e}}$  [W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>], coeficiente de troca de calor convectivo trocado entre a cobertura de vidro interno e o ambiente externo é dada pela Equação (15) (BOUZAIID, *et al.*, 2019).

$$h_{cnv_{vi-amb_e}} = 5,8 + 3,8v \quad (15)$$

Onde:

$v$  = expressa a velocidade média do vento [ $m\ s^{-1}$ ].

O fluxo de calor radiativo entre a água salobra e cobertura de vidro interno está expressa pela Equação (16).

$$q_{r_{a-vi}} = h_{r_{a-vi}} * A_b * (T_a - T_{vi}) \quad (16)$$

O  $h_{r_{a-vi}}$  [ $W\ m^{-2}\ K^{-1}$ ], coeficiente de troca de calor radiativo entre a água salobra e a cobertura de vidro interno está representada pela Equação (17).

$$h_{r_{a-vi}} = \frac{\sigma * (T_a^2 + T_{vi}^2) * (T_a + T_{vi})}{\frac{1}{\varepsilon_a} + \frac{1}{\varepsilon_{vi}} - 1} \quad (17)$$

Os valores de ( $\varepsilon_a$ ) e ( $\varepsilon_{vi}$ ) são respectivamente a emissividade da água salobra e a emissividade da cobertura de vidro. ( $\sigma$ ) é a constante de Stefan-Boltzman. A expressão do fluxo de calor convectivo entre a água salobra e a cobertura de vidro interno é expressada pela Equação (18).

$$q_{cnv_{a-vi}} = h_{cnv_{a-vi}} * A_b * (T_a - T_{vi}) \quad (18)$$

De acordo com Lopes, et al. (2021), o coeficiente convectivo de troca de calor entre a água salobra e a cobertura de vidro interno  $h_{cnv_{a-vi}}$  [ $W\ m^{-2}\ K^{-1}$ ] pode ser calculado pela Equação (1) de ( $h_c$ ).

O fluxo de transferência de calor evaporativo entre a água salobra e cobertura de vidro interno está expressa pela Equação (19).

$$q_{e_{a-vi}} = h_{e_{a-vi}} * A_b * (T_a - T_{vi}) \quad (19)$$

Lopes, *et al.* (2021) descreve que o coeficiente de troca de calor evaporativo entre a água salobra e a cobertura de vidro  $h_{e_{a-vi}}$  [W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>] é definido na Equação (4) de ( $h_e$ ).

Onde ( $P_a$ ) e ( $P_{vi}$ ) são respectivamente as pressões de vapor de água e as pressões da cobertura de vidro interno, e são calculados como sugerido por (LOPES, *et al.*, 2021) no enunciado da Equação (2) e (3).

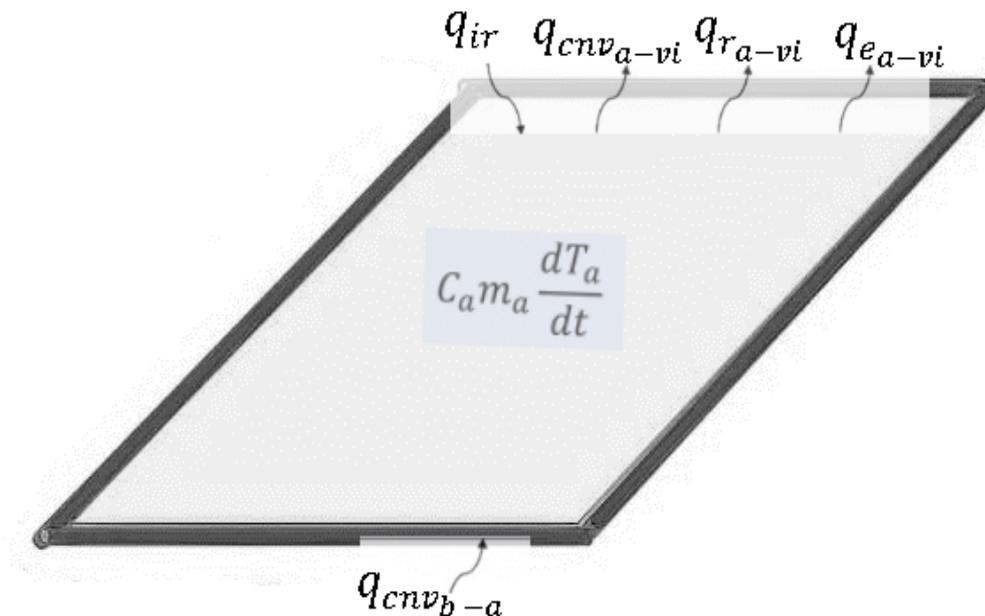
A fração absorvida do fluxo de calor da irradiação incidente na cobertura de vidro interno do dessalinizador solar  $q_{ir_{ambe-vi}}$  é dada pela Equação (20).

$$q_{ir_{ambe-vi}} = I_{(t)} * A_v * a_v \quad (20)$$

#### 4.6 Energia da água salobra da bandeja do dessalinizador

O balanço da energia calculada e a que está atingindo a água salobra na irradiação que atravessa a cobertura de vidro até alcançar a água e a convecção que ocorre entre a bandeja e a água *Figura 17*.

**Figura 17** — Balanço de energia para a água salobra do dessalinizador solar



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022.

A energia que sai do sistema é a convecção, a radiação e a evaporação que ocorre entre a água e o vidro. Na água salobra, o balanço de energia térmica é determinado pela Equação (21).

$$C_a m_a \frac{dT_a}{dt} = q_{ir\,ambi-a} + q_{cnv\,b-a} - q_{r\,a-vi} - q_{cnv\,a-vi} - q_{e\,a-v} \quad (21)$$

O fluxo de calor convectivo entre o revestimento da bandeja e a água salobra está representada pela Equação (22). ( $A_b$ ) [ $m^2$ ] é a área da bandeja e ( $T_b$ ) e ( $T_a$ ) [K] são respectivamente as temperaturas da bandeja e da água salobra.

$$q_{cnv\,b-a} = h_{cnv\,b-a} * A_b * (T_b - T_a) \quad (22)$$

O  $h_{cnv\,b-a}$  [ $W\,m^{-2}\,K^{-1}$ ] coeficiente de troca de calor convectivo entre o revestimento da bandeja e a água salobra, pode ser obtido a partir da correlação do número de Nusselt, conforme apresentado na Equação (23) (BOUZOID, *et al.*, 2019).

De fato, se  $Gr < 10^5$ .  $Nu = 1$

$$h_{cnv\,b-a} = \frac{\lambda_a}{L_b} \quad (23)$$

Se  $10^5 < Gr < 2 \times 10^7$ , o número de Nusselt pode ser determinado pela Equação (24).

$$Nu = 0,54 * (Gr * Pr)^{0,25} \quad (24)$$

Se  $Gr > 2 \times 10^7$ , o número de Nusselt pode ser determinado pela Equação (25).

$$Nu = 0,14 * (Gr * Pr)^{0,25} \quad (25)$$

O coeficiente de transferência de calor é então calculado para as duas últimas situações de acordo com a Equação (26).

$$h_{cnv\,b-a} = \frac{Nu * \lambda_a}{L_b} \quad (26)$$

Onde  $\lambda_a$  [ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ] é a condutividade térmica da água,  $L_b$  [m] é o comprimento característico da bandeja, e  $Gr$ ,  $Nu$  e  $Pr$  são respectivamente os números adimensionais Grashof, Nusselt e Prandtl.

A Equação (27) e (28) apresentam respectivamente o número de Grashof e de Prandtl.

$$Gr = \frac{g\beta(T_b - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad (27)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (28)$$

Onde ( $g$ ), ( $\nu$ ), ( $\alpha$ ) e ( $\beta$ ) representam respectivamente a gravidade local [ $\text{m.s}^{-2}$ ], a viscosidade cinemática [ $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ ], difusividade térmica e o coeficiente de expansão térmica [ $\text{K}^{-1}$ ].  $T_b$  e  $T_\infty$  [K] são respectivamente, temperatura da superfície da bandeja e temperatura da água.

A energia solar absorvida pela água salobra é dada pela Equação (29).

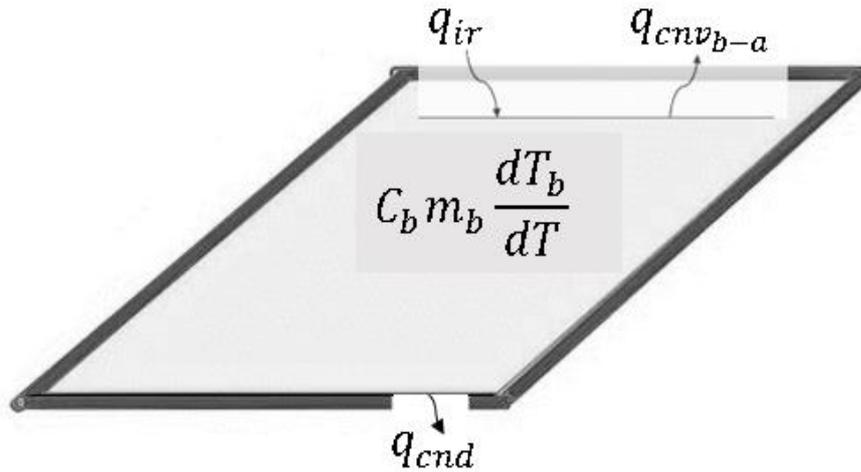
$$q_{ir_{ambe-a}} = I_{(t)} * A_b * \alpha_a * \tau_{vi} \quad (29)$$

Na Equação (29), ( $I_{(t)}$ ) [ $\text{W m}^{-2}$ ] representa a intensidade de radiação, ( $A_b$ ) [ $\text{m}^2$ ] área da bandeja, ( $\alpha_a$ ) a absortividade da água e ( $\tau_{vi}$ ) a transmitância do vidro.

#### 4.7 Energia da bandeja do dessalinizador

A bandeja é o local em que fica armazenada a água salobra para acontecer todo o processo de dessalinização. O balanço de energia térmica para a bandeja é representado pela *Figura 18*, onde o balanço de energia térmica é expresso pela Equação (30).

**Figura 18** — Balanço de energia para a bandeja do dessalinizador solar



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022.

$$C_b m_b = \frac{dT_b}{dt} = q_{ir_b} - q_{cnv_{b-a}} - q_{cnd} \quad (30)$$

Em que,  $C_b$  [ $J \text{ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ] corresponde ao calor específico da bandeja,  $m_b$  [kg] a massa da bandeja e  $\frac{dT_b}{dt}$  [ $K \text{ s}^{-1}$ ] o gradiente de temperatura da bandeja. A densidade do fluxo de calor condutivo da bandeja está representada pela Equação (31).

$$q_{cnd} = \frac{\lambda_b}{e_b} A_b (T_b - T_{bi}) \quad (31)$$

Sendo que  $\lambda_b$  [ $W \text{ m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ] e  $e_b$  [m] respectivamente, denotam a condutividade térmica e a espessura da bandeja.

A energia solar absorvida pelo revestimento da bandeja  $q_{ir_b}$  está representada pela Equação (32).

$$q_{ir_b} = I(t) * A_b * \alpha_b * \tau_{vi} * \tau_a \quad (32)$$

Onde  $I(t)$  [ $W \text{ m}^{-2}$ ] representa a intensidade de radiação,  $A_b$  [ $\text{m}^2$ ] área da água na bandeja,  $\alpha_b$  a absorvidade da bandeja,  $\tau_{vi}$  a transmitância do vidro e  $\tau_a$  há a transmitância da água.

## 5 METODOLOGIA

### 5.1 Localização do sistema de dessalinização

O projeto e construção do dessalinizador foram realizados na Zona Rural de Queimadas - PB, situada a 138 km da capital João Pessoa, a uma altitude de 451 metros acima do nível do mar, no Sítio Alto dos Cordeiros, como pode ser observado na *Figura 19*. A etapa 1 do experimento consistiu na operação dos dois dessalinizadores solares: o D1, que foi utilizado como controle, e o D2, que recebeu o ajuste do condensador externo. O objetivo dessa etapa foi avaliar a eficiência dos dessalinizadores solares e escolher o que produzisse menos para receber a tecnologia do condensador externo.

**Figura 19** — Local do experimento no sítio Alto dos Cordeiros



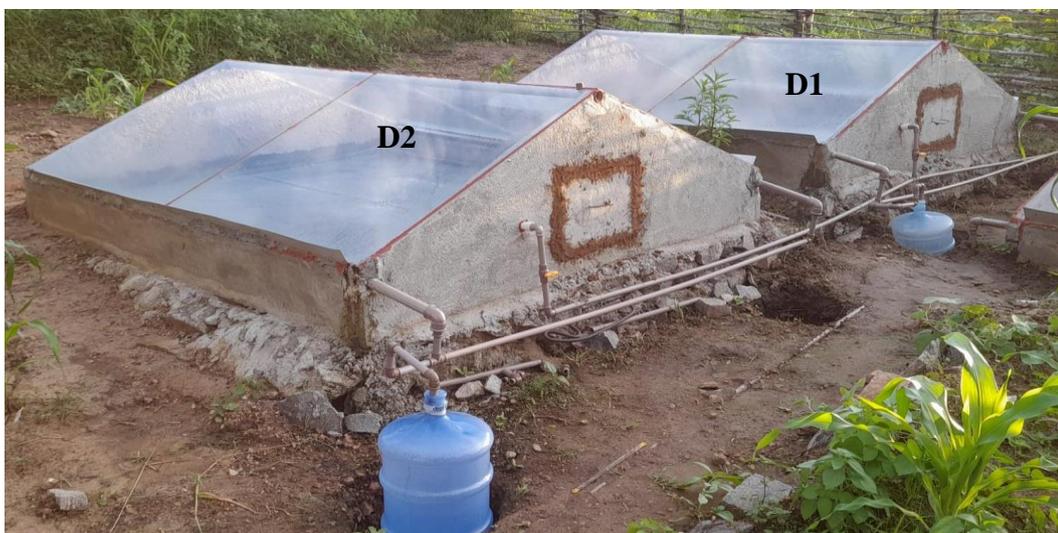
Fonte: Google mapas, 2022.

### 5.2 Etapa 1, descrição do sistema de dessalinização

O sistema foi alimentado com água salobra por encanação hidráulica diretamente de um poço artesiano, a água salobra fica em uma bandeja estacionária (água parada) de fundo preto para melhor aquecimento da água dentro do dessalinizador. Com a irradiação direta do Sol através da cobertura de vidro inclinada, rapidamente a superfície da bandeja é aquecida, transferindo o calor por meio de convecção para a água, provocando o aumento na taxa de evaporação. O vapor de água é condensado ao entrar em contato com a superfície interna da cobertura de vidro e dentro do sistema de condensação externa a água dessalinizada escorre e é recolhida na parte inferior pela canaleta de coleta.

O dessalinizador solar consiste em quatro partes de placas pré-moldadas de concreto com medidas de frente e traz de 2 m de largura 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 por 25 cm de altura e 10 cm de espessura totalizando uma área de 4,21 m<sup>2</sup>. A cobertura é composta de vidro normal transparente de 4 mm por 1,185 m de comprimento e 1,08 m de largura, o qual possibilita a passagem da radiação solar aumentando a temperatura dentro do dessalinizador, fazendo com que ocorra a evaporação da água armazenada numa lona Encerada (“lona de caminhão”) de tamanho 1,75 m de largura por 2,25 m de comprimento, e esse vapor condensar pelo vidro e escorrer para as calhas que possuem um desnível de queda de 5 cm até a encaiação que está conectada a um reservatório de água *Figura 20*.

**Figura 20** — Sistema de dessalinização D1 e D2



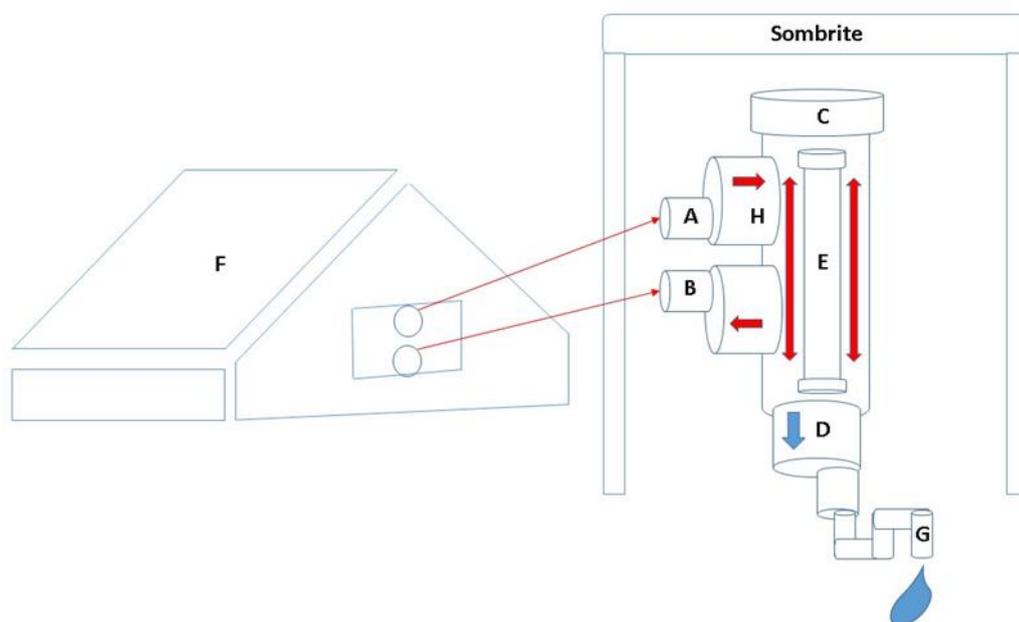
**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022.

### 5.3 Etapa 2, descrição do sistema de condensação externa

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 tem duas entradas, para o interior do dessalinizador solar onde uma tem a função de entrada do ar quente que vem do cooler, onde passa por uma cédula de cano com água fria no interior do condensador e a outra tem a função de retorno de ar quente para o sistema de dessalinização, já a canalização da saída de água condensada tem uma na parte inferior do sistema de condensação de tubos de PVC.

O aparelho de condensação externo foi construído com materiais de PVC e um sombrite de lona para a proteção do condensador externo não aquecer com o sol. 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 21* mostra o esquema de condensação externa.

**Figura 21** — Esquema do condensador externo no dessalinizador solar



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022.

Na *Figura 21* 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).

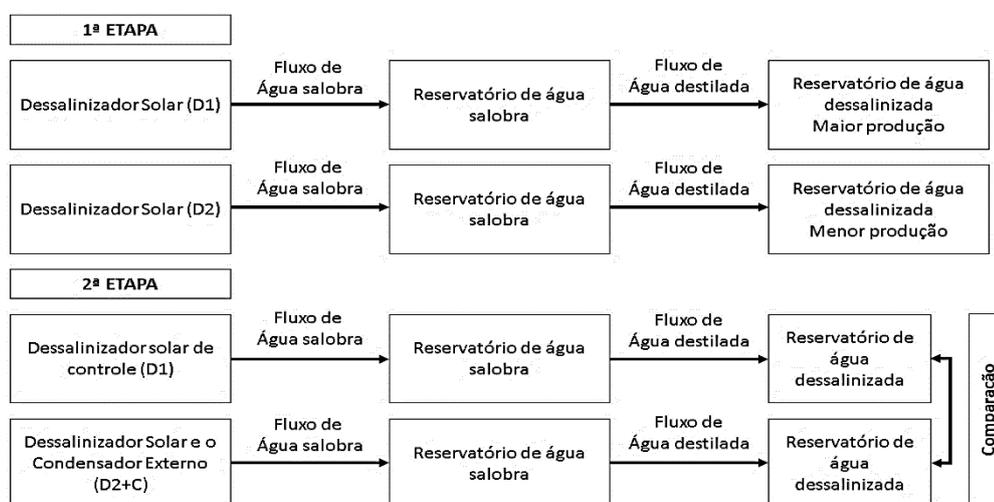
## 5.4 Procedimento Experimental

Os ensaios do dessalinizador solar foram realizados no Sítio Alto dos Cordeiros. O local escolhido facilitou o experimento pois já havia 5 unidades de dessalinizadores construídos na propriedade pelo projeto Sertão Potável com Parcerias dos Engenheiros sem Fronteiras em João Pessoa (EFJP) e a Associação dos Profissionais em Agroecologia (APA). Além disso a incidência solar é alta durante as horas de operação do equipamento.

O dessalinizador solar foi alimentado com água salobra coletada no poço da própria propriedade. 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 realização de estudos, foram definidos como fator de operação as lâminas de 1 e 2 cm de água salobra.

Durante o projeto, a coleta dos primeiros dados da primeira etapa ocorreu em abril, com o objetivo de avaliar o sistema de dessalinização sem o condensador externo e determinar a produção de cada dessalinizador solar. Com base nesses resultados, foi escolhida a unidade que produziu menos para receber o ajuste do condensador externo. A coleta dos últimos dados da segunda etapa foi realizada em novembro para comparar o sistema de dessalinização com o condensador externo em operação, representado na *Figura 22*.

**Figura 22** — Diagrama das etapas do projeto de pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Durante todo o período de pesquisa, foram realizados vários ensaios medindo-se parâmetros predeterminados a cada 30 minutos, das 07h00min às 17h00min diariamente. Esses parâmetros incluíram dados sobre a produção de água potável, fluxo de água, temperatura, salinidade e outros fatores relevantes para a avaliação da eficiência do sistema.

Durante o processo de avaliação dos dessalinizadores solares, foram estabelecidos diversos parâmetros a serem monitorados, tais como a temperatura ambiente, a temperatura da superfície externa do vidro, a temperatura interna do vidro, a temperatura da água salobra, a velocidade do vento, a radiação solar, a produção de água acumulada e a produção de água instantânea. Esses parâmetros foram fundamentais para o cálculo do fluxo de transferência de calor, que desempenham um papel crucial no processo de dessalinização. Além disso, com base nos dados coletados, foram elaborados perfis de temperatura e radiação solar, perfis de produção de água dessalinizada acumulada e instantânea, perfis de produtividade de água e perfis de eficiência térmica geral do dessalinizador solar. Isso permitiu uma análise mais completa e precisa da performance do sistema de dessalinização, fornecendo informações valiosas para a melhoria do processo.

Para coletar os dados de cada parâmetro, foram utilizados 6 termopares do tipo PT-100 para medir as temperaturas, sendo 3 termopares em cada dessalinizador solar. Além disso, foi utilizado um anemômetro para medir a velocidade do vento e a temperatura ambiente, bem como um radiômetro SL 200 17957 da marca KIMO para medir a radiação solar. A quantidade de água dessalinizada foi medida com o auxílio de uma proveta graduada. Todos os equipamentos utilizados na pesquisa foram cedidos pelo LAPECA da UEPB. Para analisar os dados coletados e realizar os balanços de energia, foram utilizados os resultados experimentais obtidos e as equações presentes na literatura.

## **5.5 Metodologias utilizadas para análise da água**

A eficiência do sistema também está relacionada à qualidade da água dessalinizada, visto que essa é a real finalidade do dessalinizador solar. Dessa forma, tanto a água salobra como a dessalinizada foram submetidas a testes para verificar alguns parâmetros físico-químicos que são importantes segundo a legislação de potabilidade da água citada nesse estudo.

Durante a pesquisa, as análises foram realizadas nos laboratórios de Pesquisa em Ciências Ambientais e Referência em Tecnologias de Águas, ambos na UEPB. Para obter todos

os parâmetros físico-químicos das águas provenientes da alimentação e do destilado, foram utilizadas as metodologias apresentadas no *Quadro 1*, juntamente com os equipamentos listados.

**Quadro 1** — Equipamentos utilizados para os parâmetros físico-químicos

<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>Equipamento-Técnica</b>
Ph	Admissional	pHmetro
Condutividade elétrica	$\mu\text{S cm}^{-1}$	Condutivímetro
Cor aparente	Uh	Colorímetro
Cloreto	$\text{mg Cl}^{-1} \text{ L}^{-1}$	Titulometria – Mohr
Dureza	$\text{mg Ca CO}_3 \text{ L}^{-1}$	Titulometria – EDTA
Alcalinidade	$\text{mg Ca CO}_3 \text{ L}^{-1}$	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	$\text{mg L}^{-1}$	Método instrumental

STD = sólidos totais dissolvidos

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Fatores econômicos na construção dos dessalinizadores solar

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.

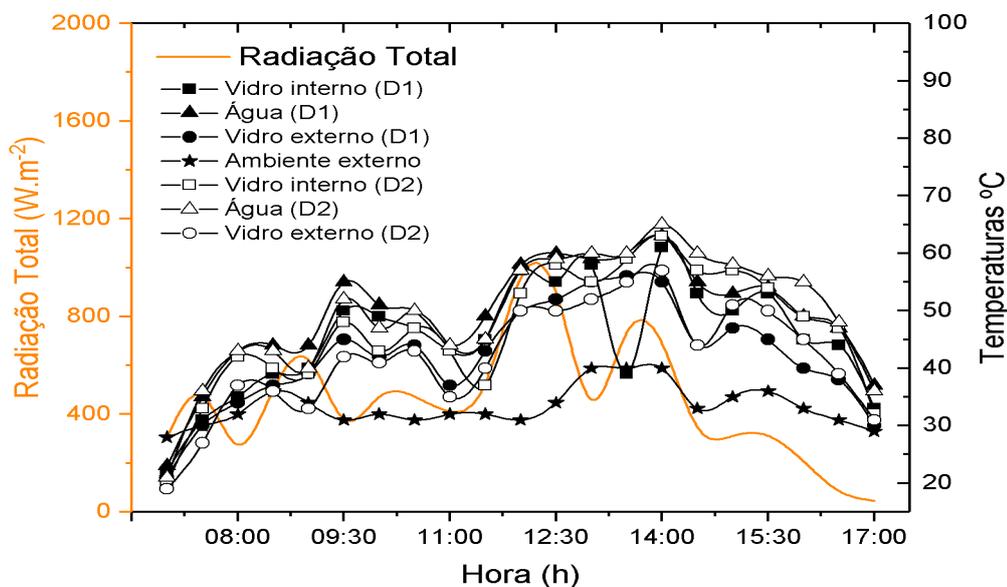
### 6.2 Etapa 1 Avaliação da tecnologia do dessalinizador solar

Para determinar os perfis de temperatura, eficiência térmica, produção e produtividade do dessalinizador solar, foram selecionados quatro dias, dois em abril e dois em novembro. Os resultados da pesquisa realizada nos dias 07/04/2022, 08/04/2022, 19/11/2022 e 22/11/2022 são apresentados a seguir. Os dias 13/04 e 16/04 são repetições dos dias 07/04 e 08/04 e seus resultados estão no Apêndice A. É importante ressaltar que os experimentos realizados em abril representam a etapa 1, que visa avaliar a tecnologia do dessalinizador solar antes de ser modificado com o condensador externo estudado na etapa 2 em novembro.

#### 6.2.1 Temperaturas dos dessalinizadores

A *Figura 23* representa 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 07/04/2022. Os dados detalhados estão apresentados na *Tabela 3* (Apêndice A). Com uma lâmina de água de 1cm, verifica-se o aumento gradativo dos perfis de temperatura até às 14h00min, onde os valores da temperatura interna e externa da cobertura de vidro mantiveram-se inferiores a temperatura da água e a radiação solar teve grandes variações devido as condições climáticas do dia em que se encontrava nublado.

**Figura 23** — Temperatura dos dessalinizadores, lâmina de água 1 cm

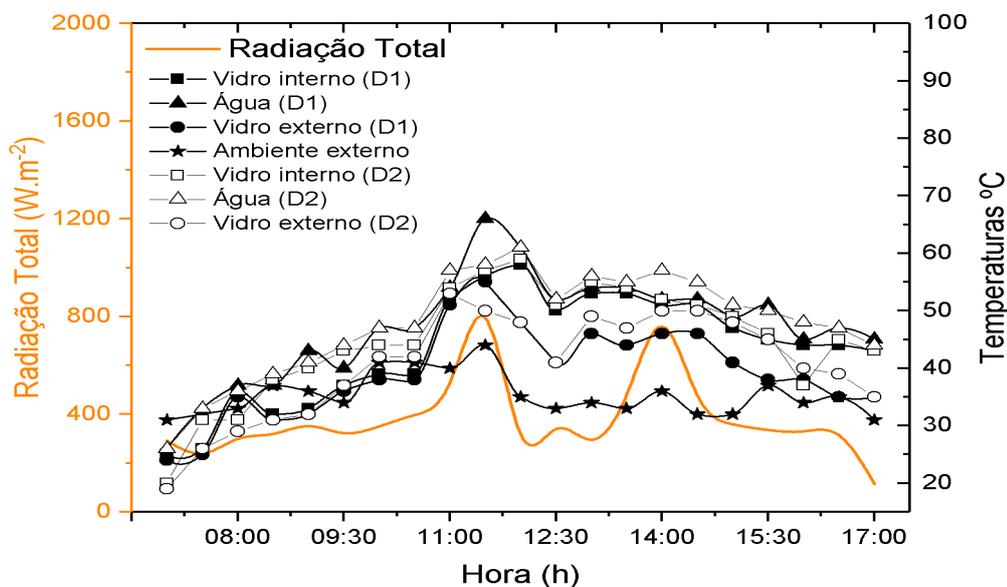


**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022.

Durante o dia, a temperatura da água salobra apresentou variações significativas nos dois dessalinizadores solares estudados (D1 e D2). Observou-se que no D1, às 07h00min, a temperatura era de  $23^{\circ}C$  (o valor mais baixo observado), enquanto que a temperatura máxima de  $63^{\circ}C$  foi atingida às 14h00min, duas horas após o momento de maior incidência de radiação solar, que foi de  $1072 W.m^{-2}$ . Já no D2, às 07h00min, a temperatura da água era de  $21^{\circ}C$ , e atingiu a temperatura máxima de  $65^{\circ}C$  às 14h00min. O estudo realizado em paralelo com o D1 e D2 do experimento do dia 07/04/2022 revelou que o D2 apresentou uma temperatura superior, resultando em um comportamento térmico satisfatório do sistema de dessalinização com uma lâmina de água de 1cm.

A *Figura 24* representa as variações de temperatura interna e externa do vidro, temperatura da água dentro placa absorvedora (bandejão) e a temperatura ambiente em função da radiação solar incidente nos dois dessalinizadores monitorados no dia 08/04/2022 (Apêndice A) Tabela 4. Com uma lâmina de água de 2cm, verifica-se o aumento gradativo dos perfis de temperatura até às 11h30min, depois teve uma variação devido a um curto período de chuva que diminui drasticamente a radiação solar e a temperatura do vidro das 12h00min às 13h00min.

**Figura 24** — Temperatura dos dessalinizadores, lâmina de água 2 cm



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022.

De forma semelhante a temperatura da água salobra teve significativas variações ao longo do dia observa-se que o dessalinizador solar (D1 e D2) às 07h00min, apresentou a mesma temperatura de 23 °C e (D1) (Semelhante a lamina de 1 cm) e atinge maior temperatura às 11h30min, alcançando 66 °C, exatamente no momento de maior incidência de radiação solar, de 1056 W.m<sup>-2</sup>. Já o dessalinizador solar (D2) atinge a maior temperatura às 12h00min alcançando 61 °C meia hora depois da maior incidência solar. Logo, no estudo realizado em paralelo com o (D1 e D2) do experimento do dia 08/04/2022 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.

Observa-se que os perfis de temperatura na *Figura 23* e *Figura 24* acompanham a intensidade de radiação solar no sistema, devido a decorrência da radiação solar direta no dessalinizador. O perfil da temperatura ambiente variou de 28 °C a 40 °C no decorrer do experimento do dia 07/04/2022, para o experimento do dia 08/04/2022 variou de 31 °C a 44,0 °C.

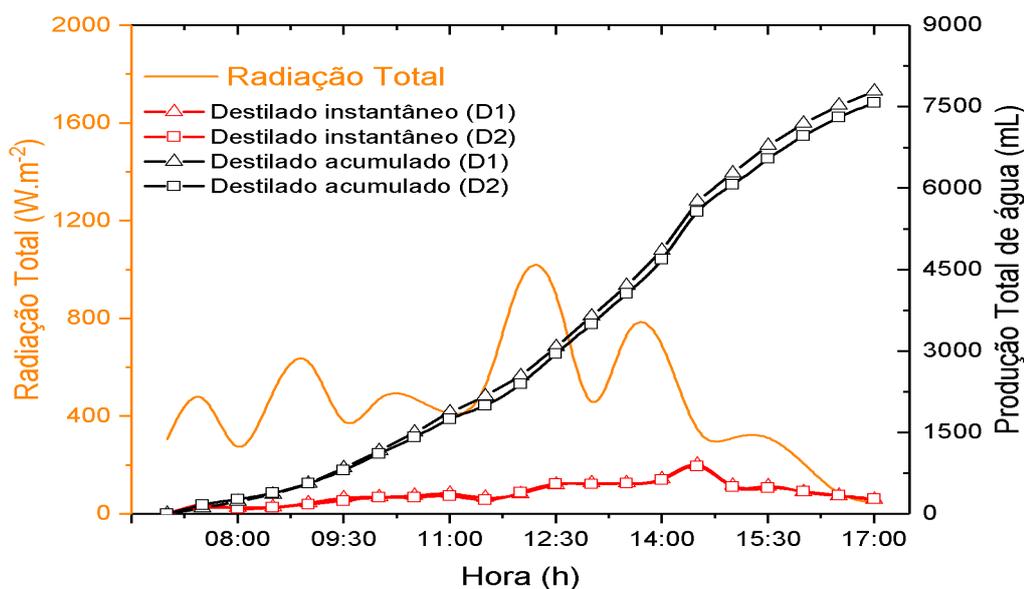
Além disso, os valores obtidos nas *Figura 23* e *Figura 24* para a temperatura da água foram maiores do que a temperatura interna do vidro e que por sua vez foi maior do que a temperatura externa do vidro. Esse comportamento crescente na variação das temperaturas de

forma gradativa do interior para a parte exterior do dessalinizador ocorre devido os mecanismos internos e externos de transferência de calor (LOPES, *et al.*, 2021).

### 6.2.2 Produção de água dos dessalinizadores

A *Figura 25* apresenta a variação da produção de água acumulada e produção de água instantânea, em função a radiação solar do dia 07/04/2022. Observa-se que o volume de água dessalinizada acompanha a variação da radiação solar, onde há o acúmulo gradativo da produção de água dessalinizada. Com base nos valores obtidos, percebeu-se que durante o ensaio a radiação solar estava favorável ao experimento até as 12h00min, apresentando valores acima da média de  $1072 \text{ W.m}^{-2}$ . Outro fato observado foi ausência de alterações bruscas de radiação solar apesar que ao longo do dia, esteve com o céu semi-encoberto (nublado), influenciando diretamente na temperatura interna do dessalinizador, que é um fator importante no processo de dessalinização. E com isso, a produção de água dessalinizada acumulada total durante o período de incidência solar do dia que foi de 7790,0 mL para o dessalinizador solar (D1) e 7580,0 mL para o dessalinizador solar (D2).

**Figura 25** — Produção de água dos dessalinizadores, lâmina de 1cm



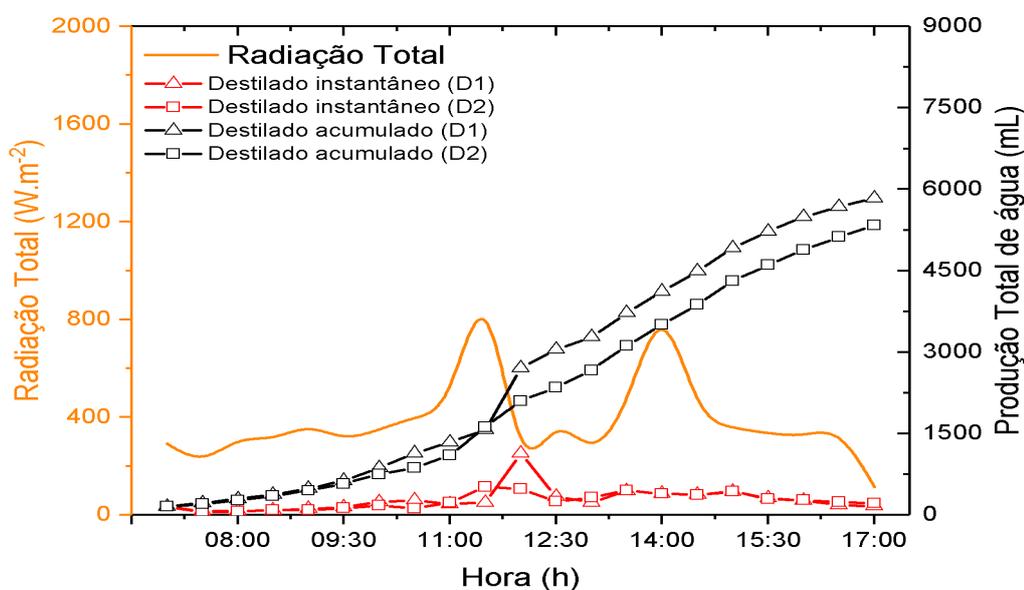
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Na *Figura 25* a produção instantânea teve influência da radiação solar mostrando que a temperatura do vidro ao cair contribui na produção instantânea aumentando a condensação da

água dessalinizada. Verifica-se que as 14h30min houve produção de 906,0 mL em 30 minutos de operação do sistema para o dessalinizador (D1) tendo uma média de  $30,2 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$  e para o mesmo horário o dessalinizador (D2) teve uma produção de 878,0 mL em 30 minutos com uma média de  $29,27 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$  de operação de sistema.

A *Figura 26* apresenta a variação da produção de água acumulada e produção de água instantânea em função a radiação solar do dia 08/04/2022 com uma lâmina de água de 2cm. Observa-se que o volume de água dessalinizada acompanha a variação da radiação solar, onde há o acúmulo gradativo da produção de água dessalinizada. Com base nos valores obtidos, percebeu-se que durante o ensaio a radiação solar estava favorável ao experimento até as 11h30min, apresentando valores acima da média de  $1056 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Outro fato observado foi a alteração brusca de radiação solar durante um período de chuva às 12h00min, influenciando diretamente a temperatura interna do dessalinizador, que é um fator importante no processo de dessalinização. E com isso, a produção de água dessalinizada acumulada total durante o experimento foi de 5837,0 mL para o dessalinizador solar (D1) e 5338,0 mL para o dessalinizador solar (D2).

**Figura 26** — Produção de água dos dessalinizadores, lâmina de 2cm



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022.

Na *Figura 26* verifica-se que a produção instantânea teve influência da radiação solar, pois quando havia redução nesse parâmetro houve aumento na produção instantânea, mostrando que a temperatura do vidro ao cair contribuía na produção instantânea o aumento e da condensação da água dessalinizada. Observa-se que às 12h00min a produção foi de 1136,0 mL em 30 minutos para o dessalinizador (D1) com uma média de  $37,87 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$  e para o dessalinizador (D2) o maior valor foi observado às 11h30min com  $520,0 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$  em 30 minutos com uma média de  $17,33 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ .

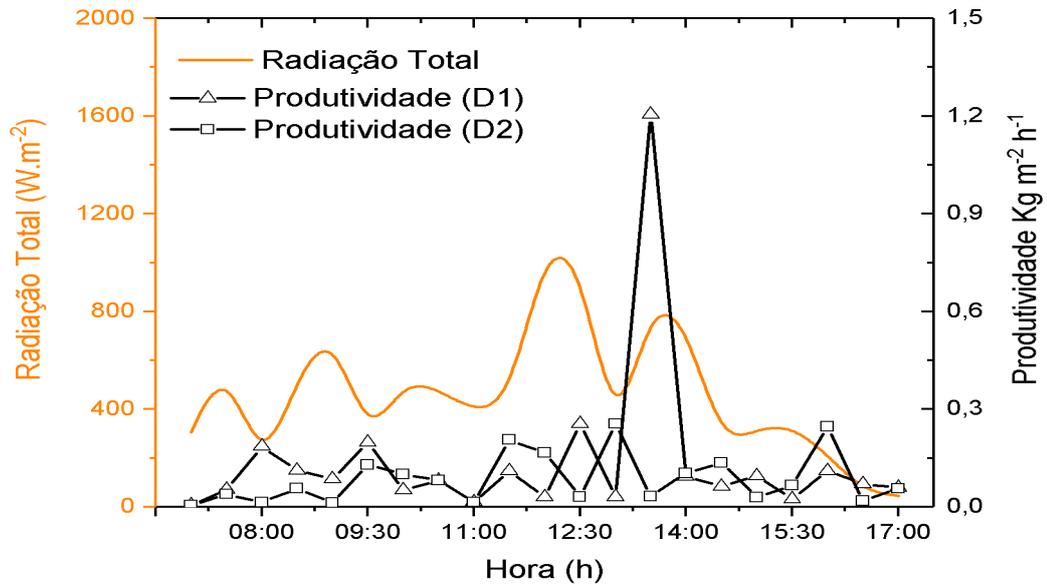
Na *Figura 25* e *Figura 26*, é possível observar que a lâmina de água com 1 cm de profundidade obteve uma melhor produção de água do que a lâmina com 2 cm de profundidade. Isso comprova que quanto menor a lâmina de água, mais rápido é o processo de evaporação e, conseqüentemente, maior é a produção de água dessalinizada. Além disso, o tempo e a energia de evaporação acumulada durante o dia também influenciam na produção de água. Durante o experimento, houve um dia de chuva, o que aumentou a produção instantânea de água. No entanto, a energia de evaporação demorou mais tempo para acumular novamente dentro do dessalinizador solar, fazendo com que a produção de água acumulada desse dia fosse menor do que a do dia anterior.

A produção de (D1 e D2) no período de 24 horas do dia 07/04 foi de  $10322 \text{ mL}\cdot\text{dia}^{-1}$  e  $9996 \text{ mL}\cdot\text{dia}^{-1}$  respectivamente e para o dia 08/04 foi de  $8695 \text{ mL}\cdot\text{dia}^{-1}$  para (D1) e  $8078 \text{ mL}\cdot\text{dia}^{-1}$  para (D2). Totalizando  $19017 \text{ mL}\cdot\text{dia}^{-1}$  para (D1) e  $18074 \text{ mL}\cdot\text{dia}^{-1}$  para (D2), com isso a diferença de produção de água total de dois dias foi de  $943 \text{ mL}\cdot\text{dia}^{-1}$  para (D1) sendo mais eficiente do que (D2). Então na segunda etapa (D2) receberá o condensador externo para avaliar o aumento da produção de água.

### 6.2.3 Produtividade dos dessalinizadores

A *Figura 27* demonstra os perfis de produtividade do dessalinizador solar (D1) e (D2) que foram calculados a partir da Equação (6) de (LOPES, *et al.*, 2021) que necessariamente foram calculadas as transferências de calor das Equações (1), (2), (3), (4), (7) e (8) onde os dados foram retirados do experimento 07/04/2022.

**Figura 27** — Produtividade dos dessalinizadores, lâmina de 1cm

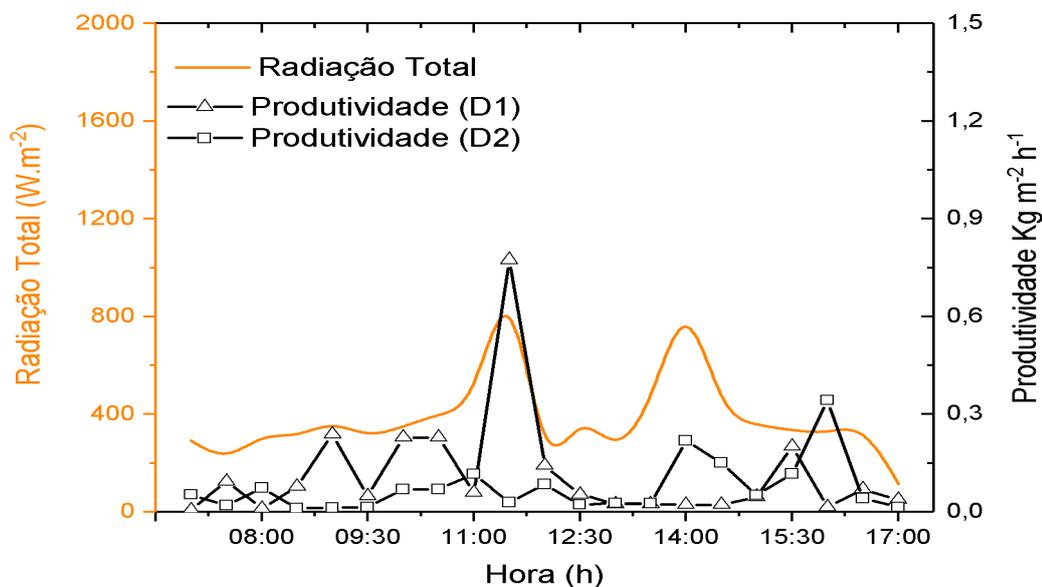


**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022.

Na *Figura 27* durante a realização dos experimentos com o dessalinizador solar (D1), a produtividade mínima  $0,004 Kg.m^{-2}.h^{-1}$  foi obtido as 07h00min e a produtividade máxima  $1,205 Kg.m^{-2}.h^{-1}$  as 13h30min. A produtividade total coletada foi  $2,934 Kg.m^{-2}.h^{-1}$  para 10 horas de coleta, com média de  $0,14 Kg.m^{-2}.h^{-1}$ . Já o dessalinizador solar (D2), a produtividade mínima  $0,004 Kg.m^{-2}.h^{-1}$  foi obtido às 07h00min e a produtividade máxima  $0,254 Kg.m^{-2}.h^{-1}$  foi obtido às 13h00min. A produtividade total coletada foi  $1,797 Kg.m^{-2}.h^{-1}$ , com média de  $0,086 Kg.m^{-2}.h^{-1}$ .

A *Figura 28* demonstra os perfis de produtividade do dessalinizador solar (D1) e (D2) que foram calculados a partir da Equação (6) de (LOPES, *et al.*, 2021) que necessariamente foram calculadas as transferências de calor das Equações (1), (2), (3), (4), (7) e (8) onde os dados foram retirados do experimento 08/04/2022.

**Figura 28** — Produtividade dos dessalinizadores, lâmina de 2 cm



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022.

Na *Figura 28* durante a realização dos experimentos com o dessalinizador solar (D1), a produtividade mínima  $0,006 \text{ Kg.m}^{-2}.h^{-1}$  foi obtido às 07h00min e a produtividade máxima  $0,774 \text{ Kg.m}^{-2}.h^{-1}$  às 11h30min. A produtividade total coletada foi  $2,422 \text{ Kg.m}^{-2}.h^{-1}$  para um intervalo de 10 horas de coleta de dados, com média de  $0,115 \text{ Kg.m}^{-2}.h^{-1}$ . Já o dessalinizador solar (D2), a produtividade mínima  $0,011 \text{ Kg.m}^{-2}.h^{-1}$  foi obtido às 08h30min e a produtividade máxima  $0,343 \text{ Kg.m}^{-2}.h^{-1}$  às 16h00min. A produtividade total coletada foi  $1,566 \text{ Kg.m}^{-2}.h^{-1}$ , com média de  $0,075 \text{ Kg.m}^{-2}.h^{-1}$ .

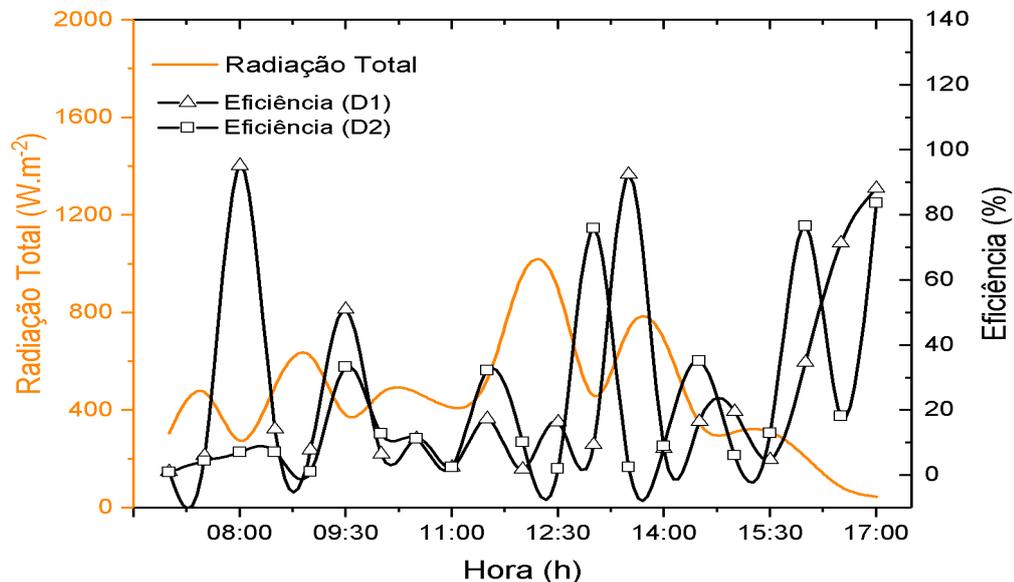
A análise das *Figura 27* e *Figura 28* revelou que a lâmina de 1cm teve a maior produtividade de água em momentos de menor radiação solar, pois o vapor já formado condensava mais facilmente. Por outro lado, a lâmina de 2cm teve o efeito contrário, devido ao seu volume maior de água salina, o processo de evaporação demandava mais energia para acumular e, portanto, teve uma produtividade menor do que a lâmina de 1cm. Entretanto, na presença de alta radiação solar, a lâmina de 2cm apresentou melhores valores de produtividade.

#### 6.2.4 Eficiência Térmica Geral do dessalinizador solar

A *Figura 29* demonstra os perfis de eficiência térmica do dessalinizador solar (D1 e D2) que foram calculadas a partir da Equação (9) para a lâmina de 1 cm (LOPES, *et al.*, 2021), que

necessariamente foram calculadas as transferências de calor das Equações (4) e (6), onde os dados foram retirados do experimento 07/04/2022.

**Figura 29** — Eficiência Térmica dos dessalinizadores, lâmina de 1cm

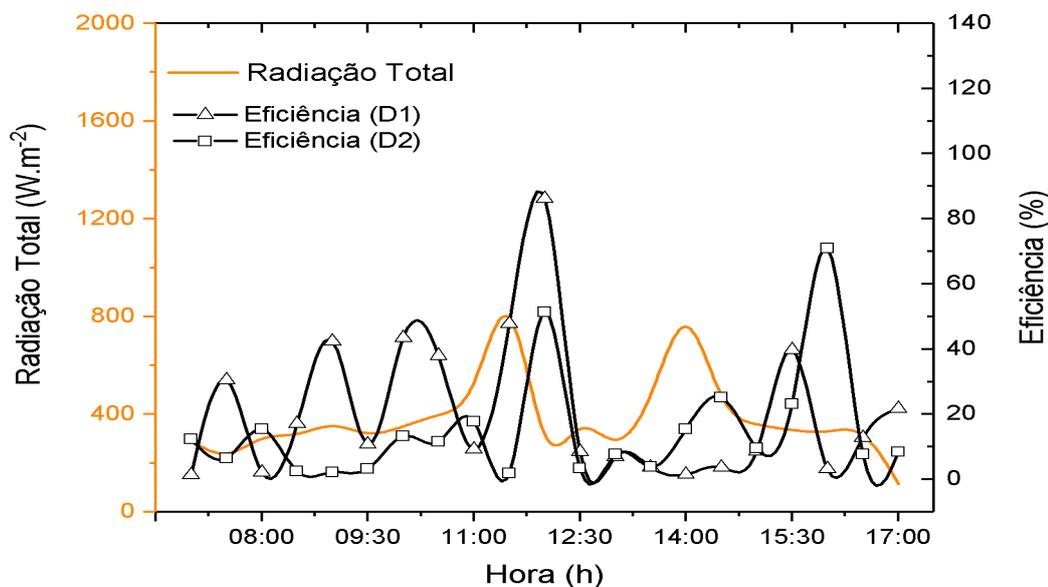


**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022.

Na *Figura 29* durante a realização dos experimentos com o dessalinizador solar (D1), a eficiência térmica mínima 1,04 % foi obtido as 07h00min onde a eficiência térmica máxima 95,17 % as 08h00min e a eficiência térmica média durante as 10 horas de coleta foi 27,40 %. Já o dessalinizador solar (D2), a eficiência térmica mínima 0,93 % foi obtido as 07h00min e a eficiência térmica máxima 83,71 % as 17h00min. e a eficiência térmica média foi de 21,19%.

A *Figura 30* demonstra os perfis de eficiência térmica do dessalinizador solar (D1 e D2) que foram calculadas a partir da Equação (9) para uma lâmina de 2 cm de (LOPES, *et al.*, 2021), que necessariamente foram calculadas as transferências de calor das Equações (4) e (6), onde os dados foram retirados do experimento 08/04/2022.

**Figura 30** — Eficiência Térmica dos dessalinizadores, lâmina de 2 cm



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022.

Na *Figura 30* durante a realização dos experimentos com uma lâmina de 2 cm o dessalinizador solar (D1), a sua eficiência térmica mínima foi de 1,29 %, obtido as 07:00h e sua eficiência térmica máxima foi de 86,19 % as 12h00min e a eficiência térmica média durante às 10 horas foi de 20,90 %. Já o dessalinizador solar (D2), a eficiência térmica mínima foi de 1,84 %, obtido as 11:30h e a eficiência térmica máxima foi de 70,92 % as 16:00h. e a eficiência térmica média foi de 14,92%.

A eficiência térmica está relacionada com a temperatura da água e a temperatura do vidro interno, isto é quanto maior for a temperatura da água e menor a temperatura do vidro interno, maior à evaporação do dessalinizador solar. Na *Figura 29* para uma lâmina de 1 cm o dessalinizador (D1 e D2) mostrava mais eficiência quando a radiação solar tinha um comportamento decrescente, onde os seus valores eram menores. Isso indica que, com uma lâmina de 1 cm de água, o sistema de dessalinização apresentou melhores resultados em condições de menor radiação solar, possivelmente devido ao fato de que a energia térmica acumulada no sistema era suficiente para aumentar a temperatura da água e, conseqüentemente, a evaporação, sem que a temperatura do vidro interno atingisse níveis muito elevados que pudessem prejudicar a eficiência do sistema.

Já na *Figura 30* para uma lâmina de 2 cm o dessalinizador (D1 e D2) mostrava mais eficiência quando a radiação solar tinha um comportamento crescente, onde os seus valores eram maiores. Isso sugere que, com uma lâmina de 2 cm de água, o sistema de dessalinização apresentou melhores resultados em condições de alta radiação solar, possivelmente porque a energia térmica acumulada no sistema era mais lenta em aumentar a temperatura da água devido à maior quantidade de água salobra no sistema, e a alta radiação solar ajudou a aumentar a temperatura mais rapidamente. Em ambos os casos, a eficiência térmica apresentou comportamento semelhante à produtividade, mostrando que essas duas variáveis estão intimamente ligadas.

### 6.3 Etapa 2 Avaliação do dessalinizador solar com o condensador externo

#### 6.3.1 Monitoramento de produção do condensador

Durante o mês de novembro nas datas de 01 a 08/11 foi avaliado o melhor funcionamento da produção de água total do condensador externo no período das 07h:00 as 17h:00, avaliando os seguintes aspectos: Utilização de sombrite, água congelada (AC), um cooler (V) e testemunha (T0 = sem a utilização de nada como resfriamento no condensador) onde foram obtidos os seguintes resultados na *Tabela 1*.

**Tabela 1** — Monitoramento de produção de água do condensador externo

Dias	Com sombrite				Sem sombrite			
	T0	AC	V	AC+V	T0	AC	V	AC+V
01 a 08/11	164 mL	386 mL	430 mL	660 mL	80 mL	284 mL	210 mL	352 mL

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

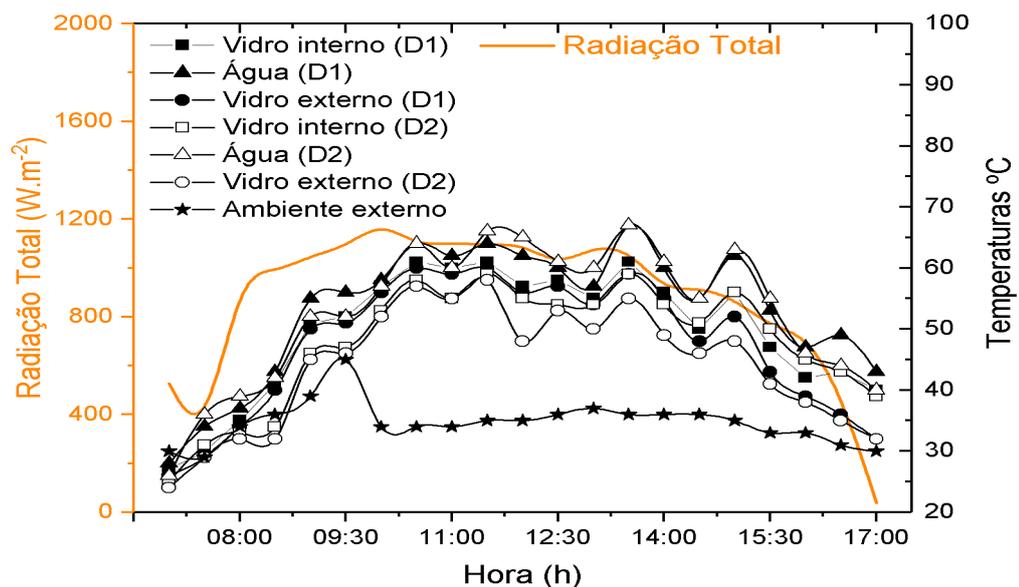
Verifica-se na tabela 2 que o melhor resultado foi a utilização de água congelada com o cooler e com um sombrite com 660 mL para o melhor resfriamento do condensador externo na produção de água dessalinizada.

#### 6.3.2 Temperatura dos dessalinizadores

A *Figura 31* representa 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 (Apêndice A), *Tabela 7*. Com uma lâmina de água de 1cm, verifica-se o aumento gradativo dos perfis de temperatura até às 12h00min, onde os valores da temperatura interna e externa da cobertura de vidro mantiveram-se inferiores a temperatura da água e a radiação solar teve grandes variações devido as condições climáticas do dia em que se encontrava nublado.

**Figura 31** — Temperatura dos dessalinizadores, lâmina de água 1 cm



**Fonte:** Elaborado pelo autor 2022.

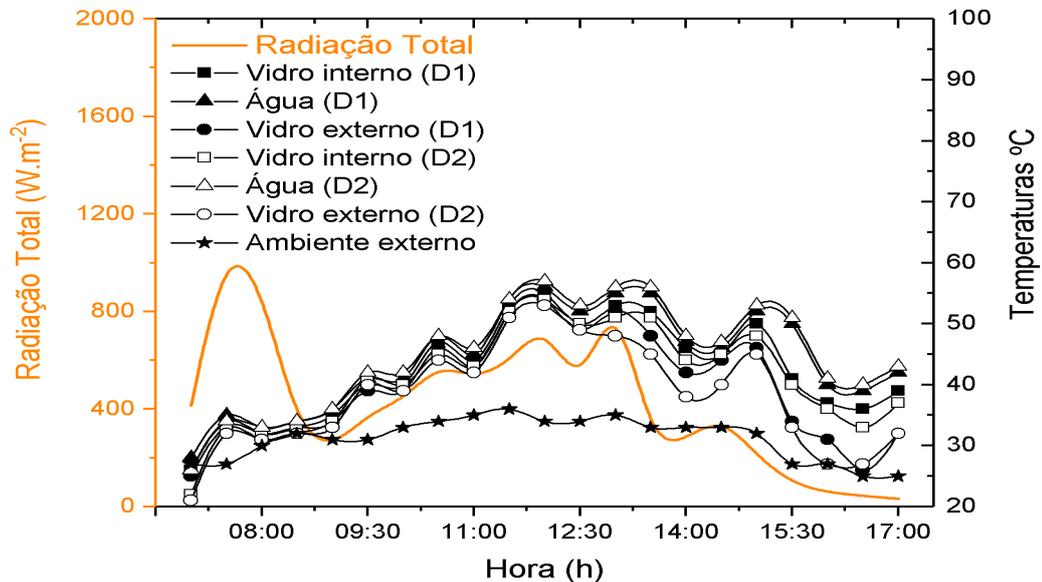
A temperatura da água salobra sofre variações ao longo do dia onde o dessalinizador solar (D1) às 07h00min com a temperatura de 28 °C e atinge maior temperatura às 13h30min, alcançando 67 °C, três horas e meia depois do momento de maior incidência de radiação solar, de 1192 W.m<sup>-2</sup>. Já o dessalinizador solar (D2) às 07h00min com a temperatura de 26 °C e atinge a maior temperatura às 13h30min alcançando 67 °C.

A *Figura 32* representa as variações de temperatura interna e externa do vidro, temperatura da água dentro placa absorvedora (bandejão) e a temperatura ambiente em função da radiação solar incidente nos dois dessalinizadores monitorado no dia 22/11/2022 (Apêndice A). *Tabela 8*.

Com uma lâmina de água de 2 cm, verifica-se o aumento gradativo dos perfis de temperatura até às 12h00min, onde os valores da temperatura interna e externa da cobertura de

vidro mantiveram-se inferiores a temperatura da água e a radiação solar que teve uma grande variação devido a um curto período de chuva que diminui drasticamente a radiação solar e a temperatura do vidro das 12h00min às 13h00min.

**Figura 32** — Temperatura dos dessalinizadores, lâmina de água 2 cm



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

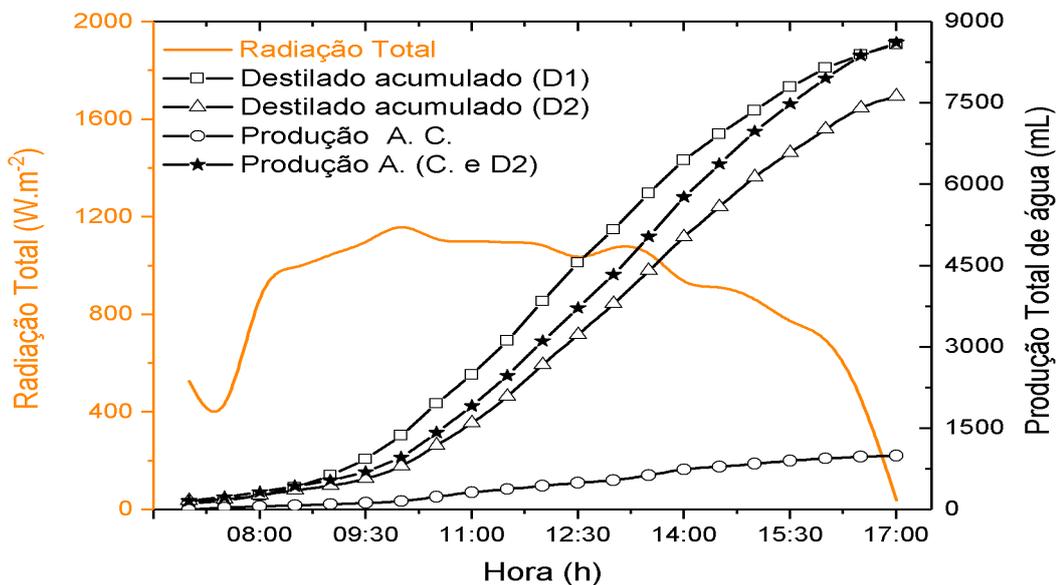
A temperatura da água salobra sofre variações ao longo do dia onde o dessalinizador solar (D1 e D2) às 07h00min, com 28 °C e 26 °C respectivamente e (D1) atinge maior temperatura às 12h00min, alcançando 56 °C, após quatro horas e meia, da maior incidência de radiação solar, de 1093 W.m<sup>-2</sup>. 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).

Observa-se que os perfis de temperatura na *Figura 31* e *Figura 32* acompanham a intensidade de radiação solar no sistema, devido a decorrência 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 °C.

### 6.3.3 Produção de água acumulada dos dessalinizadores

A *Figura 33* apresenta a variação da produção de água acumulada em função a radiação solar do dia 19/11/2022 valores inclusos na *Tabela 7*. Observa-se que o volumes obtidos durante o dia que estava favorável para a produção de água no experimento até as 10h00min, apresentando valores acima da temperatura de  $1192 \text{ W.m}^{-2}$ . Outro fato observado foi ausência de alterações bruscas de radiação solar, influenciando diretamente na temperatura interna do dessalinizador, que é um fator importante no processo de dessalinização. E com isso, a produção de água dessalinizada acumulada durante o experimento foi de 8584,0 mL para o dessalinizador solar (D1) e 7626,0 mL para o dessalinizador solar (D2), e para o condensador externo (C) teve produção acumulada de 992 mL e para a soma do dessalinizador solar com o condensador externo (D2+C) obteve o valor de 8618,0 mL encontrado na *Tabela 9*.

**Figura 33** — Produção de água acumulada, lâmina de 1cm

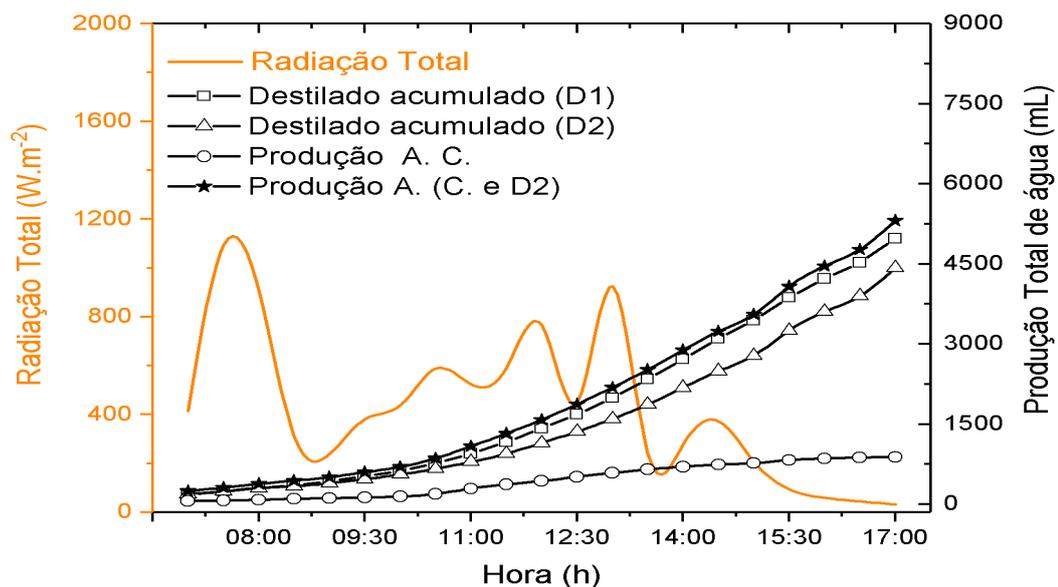


**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022.

A *Figura 34* apresenta a variação da produção de água acumulada em função a radiação solar do dia 22/11/2022. Observa-se que o volumes obtidos durante o dia que não estava favorável para a produção de água no experimento depois das 07h30min, apresentando valores abaixo da temperatura de  $1093 \text{ W.m}^{-2}$ . Outro fato observado foram as alterações bruscas de radiação solar devido ao tempo por esta nublado, influenciando diretamente na temperatura

interna do dessalinizador, que é um fator importante no processo de dessalinização. E com isso, a produção de água dessalinizada acumulada durante o experimento foi de 4974,0 mL para o dessalinizador solar (D1) e 4426,0 mL para o dessalinizador solar (D2), e para o condensador externo (C) teve produção acumulada de 886 mL e para a soma do dessalinizador solar com o condensador externo (D2+C) obteve o valor de 5312,0 mL.

**Figura 34** — Produção de água acumulada, lâmina de 2 cm



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

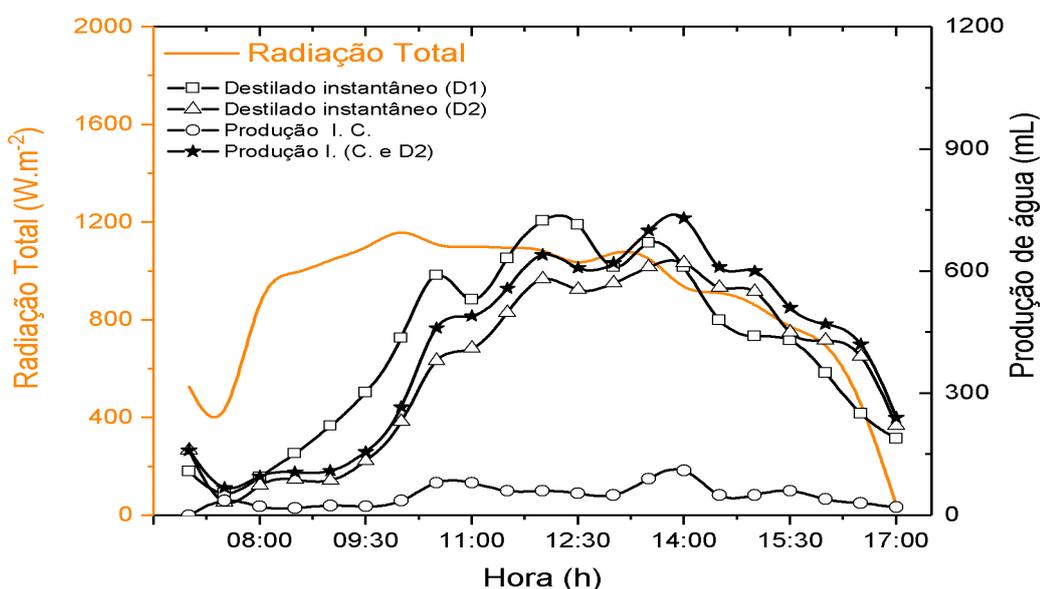
Na *Figura 33* e *Figura 34* a lâmina de 1cm obteve a melhor produção de água do que a lâmina de 2cm, provando que quanto menor a lâmina, mais rápido a evaporação da água e maior e a produção de água dessalinizada. Devido ao tempo a energia de evaporação acumulada durante o dia que influenciou na produção de água, devido a uma chuva no final do segundo dia das 15h30min até o fim do experimento aumentando a produção acumulada nas ultimas coletas.

#### 6.3.4 Produção de água instantânea dos dessalinizadores

Na *Figura 35* pode-se observar a influência da radiação solar na produção instantânea de água dessalinizada no dia 19/11/2022. A queda da temperatura do vidro interno contribuiu para aumentar a condensação da água, resultando em um aumento na produção instantânea. Às 12h00min, o dessalinizador (D1) obteve uma produção de 724,0 mL em 30 minutos, com uma

média de  $24,13 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ . Já o dessalinizador (D2) obteve uma produção de  $620,0 \text{ mL}$  no mesmo período, com uma média de  $20,67 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ . O condensador externo, por sua vez, obteve uma produção instantânea total de  $110 \text{ mL}$  no mesmo horário, com uma média de  $3,67 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ .

**Figura 35** — Produção de água instantânea, lâmina de  $1 \text{ cm}$



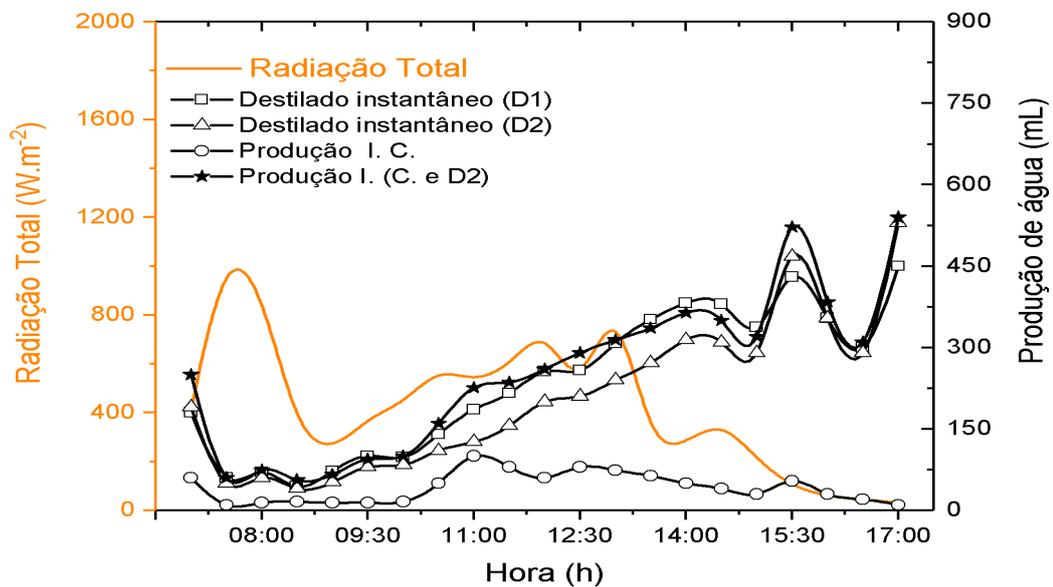
**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022.

Ao somar a produção do dessalinizador solar e do condensador externo (D2+C) na *Figura 35*, obteve-se uma produção total de  $730 \text{ mL}$  às  $14\text{h}00\text{min}$ , com uma média de  $24,34 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ . Esses resultados mostram a importância da radiação solar na produção de água dessalinizada e como a queda da temperatura do vidro interno pode contribuir para aumentar a condensação da água.

Na *Figura 36*, podemos observar que a produção instantânea do dia  $22/11/2022$  foi influenciada pela radiação solar, indicando que a temperatura do vidro interno é um fator determinante para a produção instantânea e aumento da condensação da água dessalinizada. Às  $17\text{h}00\text{min}$ , o dessalinizador (D1) produziu um total de  $450,0 \text{ mL}$  em 30 minutos, com uma média de  $15 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ , enquanto o dessalinizador (D2) produziu um total de  $530,0 \text{ mL}$  no mesmo horário, com uma média de  $17,67 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ . Além disso, às  $17\text{h}00\text{min}$ , o condensador externo (C) apresentou uma produção instantânea total de  $10 \text{ mL}$ , com uma média de  $0,33 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ . Ao somarmos a produção do dessalinizador solar e do condensador externo (D2+C),

obtivemos uma produção total de 540 mL, com uma média de  $21 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$  às 17h00min. Esses resultados evidenciam a eficiência do dessalinizador solar como uma alternativa viável para a produção de água potável em regiões áridas e semiáridas, em que a disponibilidade de água doce é escassa.

**Figura 36** — Produção de água instantânea, lâmina de 2cm



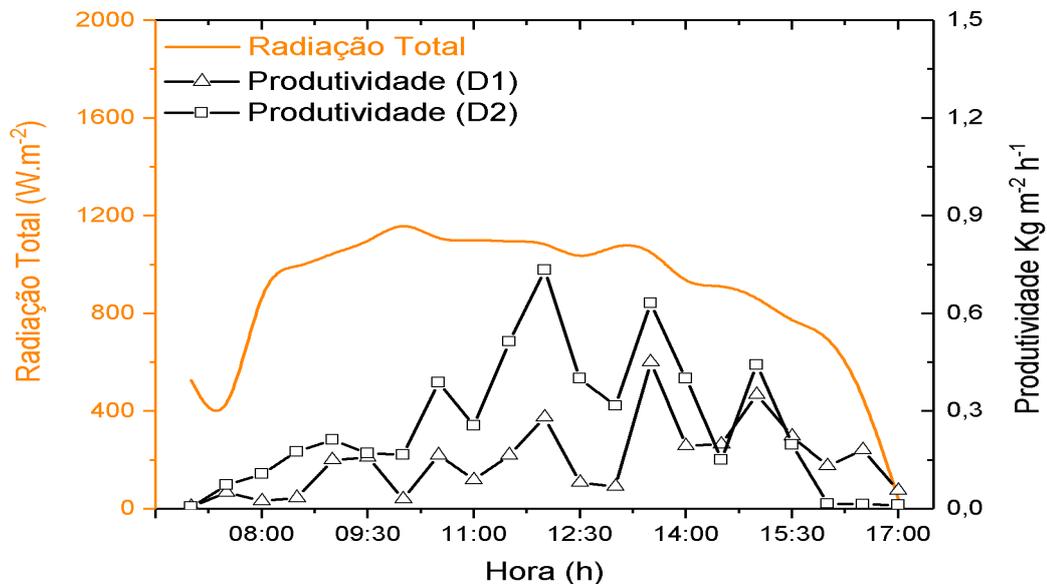
**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022.

Na *Figura 35* e *Figura 36* a lâmina de 1cm obteve a melhor produção de água do que a lâmina de 2cm, provando que quanto menor a lâmina, mais rápido a evaporação da água e maior a produção de água dessalinizada. Devido ao tempo a energia de evaporação acumulada durante o dia que influenciou na produção de água, devido a uma chuva no final do segundo dia das 15h30min até o fim do experimento aumentando a produção instantânea nas últimas coletas.

### 6.3.5 Produtividade dos dessalinizadores

A *Figura 37* demonstra os perfis de produtividade do dessalinizador solar (D1 e D2) que foram calculados a partir da Equação (6) de (LOPES, et al., 2021) que necessariamente foram calculadas as transferências de calor das Equações (1), (2), (3), (4), (7) e (8) onde os dados foram retirados do experimento 19/11/2022.

**Figura 37** — Produtividade dos dessalinizadores, lâmina de 1cm

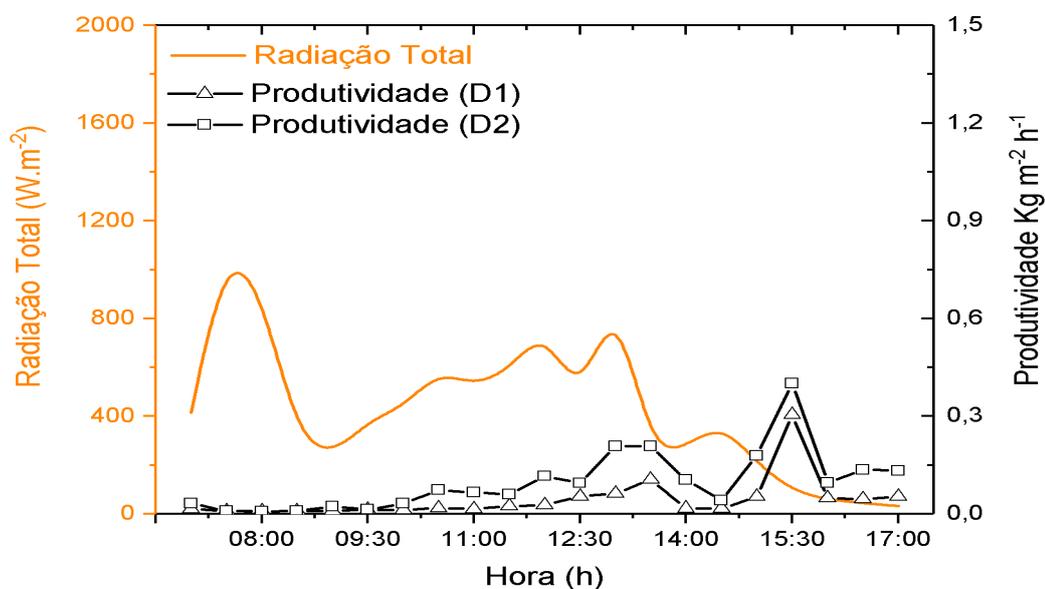


**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022.

Na *Figura 37* durante a realização dos experimentos com o dessalinizador solar (D1), a produtividade mínima  $0,006\text{ Kg.m}^{-2}.h^{-1}$  foi obtido às 07h00min e a produtividade máxima  $0,451\text{ Kg.m}^{-2}.h^{-1}$  às 13h30min. A produtividade total coletada foi  $3,091\text{ Kg.m}^{-2}.h^{-1}$  para um intervalo de 10 horas de coleta de dados, com média de  $0,147\text{ Kg.m}^{-2}.h^{-1}$ . Já o dessalinizador solar (D2), a produtividade mínima  $0,006\text{ Kg.m}^{-2}.h^{-1}$  foi obtido às 07h00min e a produtividade máxima  $0,734\text{ Kg.m}^{-2}.h^{-1}$  às 12h00min. A produtividade total coletada foi  $5,386\text{ Kg.m}^{-2}.h^{-1}$ , com média de  $0,256\text{ Kg.m}^{-2}.h^{-1}$ .

A *Figura 38* demonstra os perfis de produtividade do dessalinizador solar (D1 e D2) que foram calculados a partir da Equação (6) de (LOPES, *et al.*, 2021) que necessariamente foram calculadas as transferências de calor das Equações (1), (2), (3), (4), (7) e (8) onde os dados foram retirados do experimento 22/11/2022.

**Figura 38** — Produtividade dos dessalinizadores, lâmina de 2cm



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022.

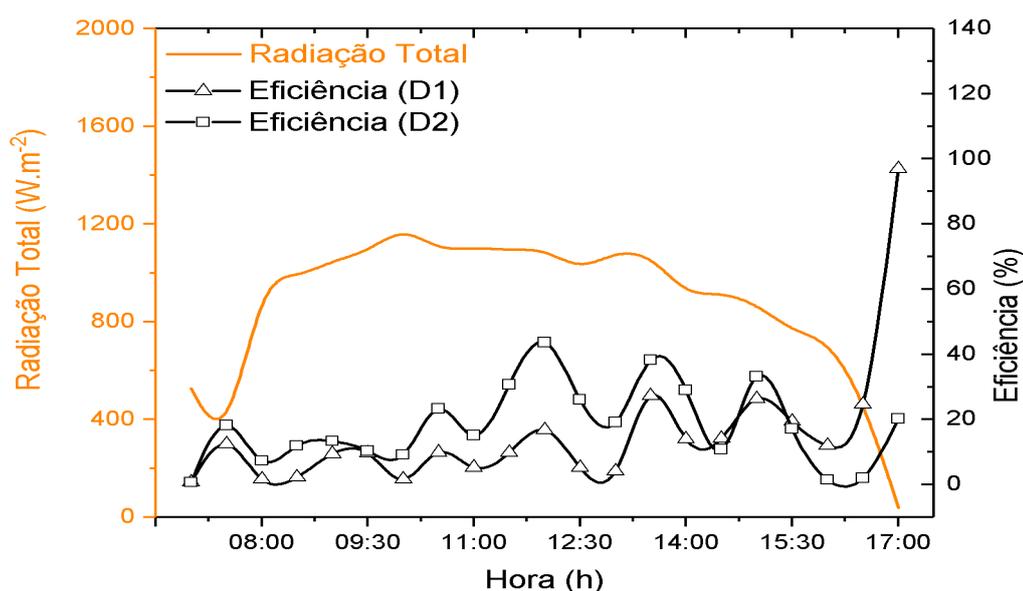
Na *Figura 38* durante a realização dos experimentos com o dessalinizador solar (D1), a produtividade mínima  $0,008 \text{ Kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  foi obtido às 08h00min e a produtividade máxima  $0,305 \text{ Kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  às 15h30min. A produtividade total coletada foi  $0,921 \text{ Kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  para um intervalo de 10 horas de coleta de dados, com média de  $0,044 \text{ Kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ . Já o dessalinizador solar (D2), a produtividade mínima  $0,008 \text{ Kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  foi obtido às 08h00min e a produtividade máxima  $0,4 \text{ Kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  às 15h30min. A produtividade total coletada foi  $2,043 \text{ Kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ , com média de  $0,097 \text{ Kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ .

Na *Figura 37* a lâmina de 1cm obteve a melhor produtividade de água, quando a radiação solar se manteve constante, fazendo com que o vapor, já formado condensasse nos períodos de menor radiação, já na *Figura 38* a radiação solar na lâmina de 2 cm influenciava quando estava em alta tendo melhores valores de produtividade. No período de chuva das 15h30min até o fim do experimento a lâmina de 2 cm inverteu o seu comportamento de produtividade quando a radiação solar diminui a produtividade aumenta.

### 6.3.6 Eficiência Térmica Geral dos dessalinizadores

A *Figura 39* demonstra os perfis de eficiência térmica do dessalinizador solar (D1 e D2) que foram calculadas a partir da Equação (9) para a lâmina de 1 cm (LOPES, *et al.*, 2021), que necessariamente foram calculadas as transferências de calor das Equações (4) e (6), onde os dados foram retirados do experimento 19/11/2022.

**Figura 39** — Eficiência Térmica dos dessalinizadores, lâmina de 1cm

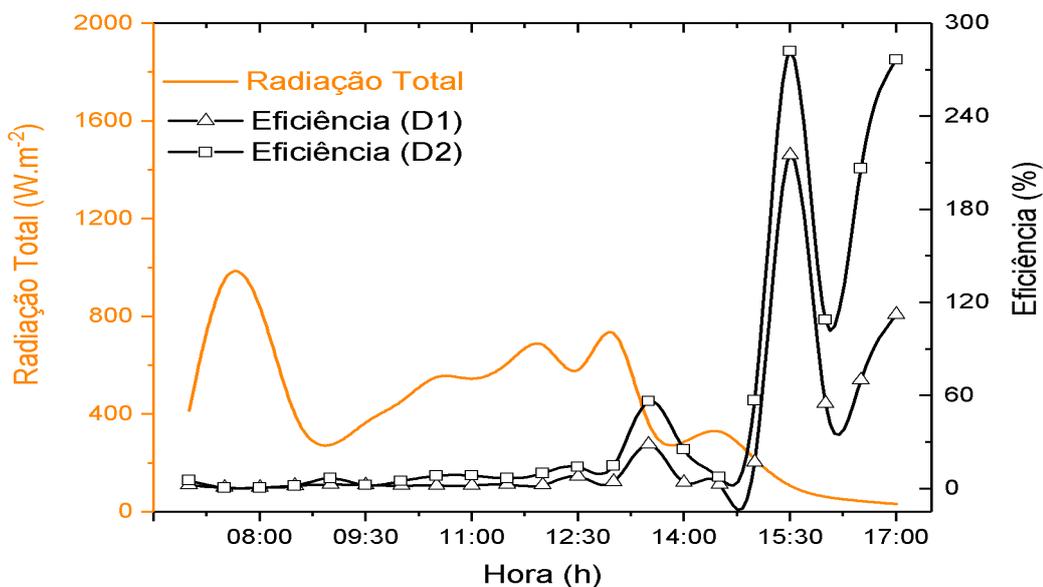


**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022.

Na *Figura 39* durante a realização dos experimentos com o dessalinizador solar (D1), a eficiência térmica mínima 0,8 % foi obtido as 07h00min onde a eficiência térmica máxima 96,98 % as 17h00min e a eficiência térmica média durante o intervalo das 10 horas de coleta foi 15,42 %. Já o dessalinizador solar (D2), a eficiência térmica mínima 0,72 % foi obtido às 07h00min e a eficiência térmica máxima 43,65 % as 12h00min. e a eficiência térmica média foi 18,14%.

A *Figura 40* demonstra os perfis de eficiência térmica do dessalinizador solar (D1 e D2) que foram calculadas a partir da Equação (9) para uma lâmina de 2 cm de (LOPES, *et al.*, 2021), que necessariamente foram calculadas as transferências de calor das Equações (4) e (6), onde os dados foram retirados do experimento 22/11/2022.

**Figura 40** — Eficiência Térmica dos dessalinizadores, lâmina de 2cm



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022.

Na *Figura 40* durante a realização dos experimentos com uma lâmina de 2 cm o dessalinizador solar (D1), a sua eficiência térmica mínima foi de 0,56 %, obtido as 07h30min e sua eficiência térmica máxima foi de 215,04 % as 15h30min e a eficiência térmica média durante o intervalo de 10 horas foi de 25,63 %. Já o dessalinizador solar (D2), a eficiência térmica mínima foi de 0,53 %, obtido às 07h:30min e a eficiência térmica máxima foi de 282,08 % as 15h:30min. e a eficiência térmica média foi de 52,57%.

A eficiência térmica está relacionada com a temperatura da água e a temperatura do vidro interno, isto é quanto maior for a temperatura da água e menor a temperatura do vidro interno, maior à evaporação do dessalinizador solar. Na *Figura 39* e *Figura 40* para uma lâmina de 1 e 2 cm o dessalinizador (D1 e D2) mostrava mais eficiência quando a radiação solar tinha um comportamento decrescente, onde os seus valores eram menores. Visto que o comportamento da eficiência térmica é semelhante ao da produtividade.

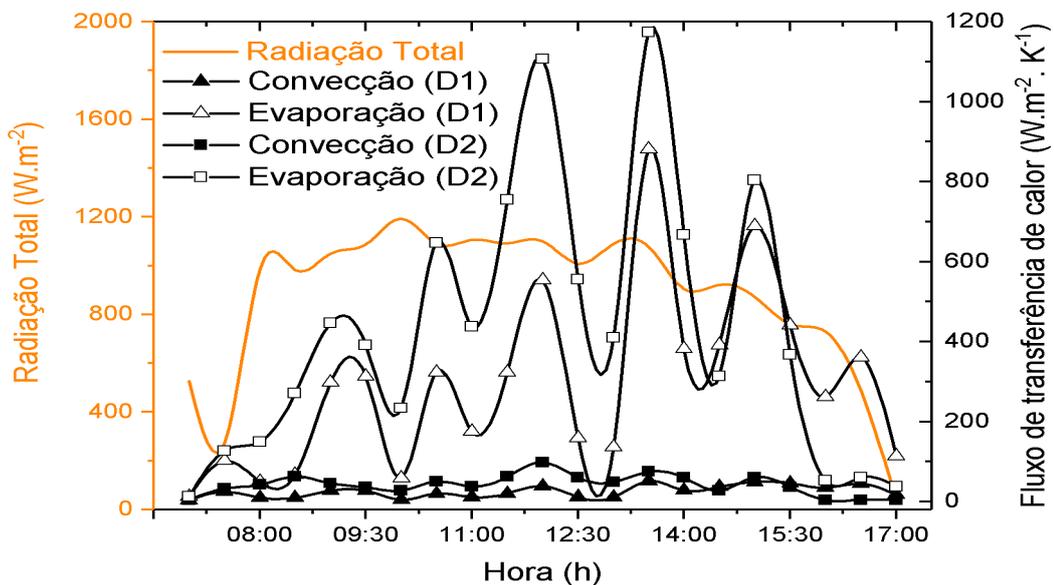
### 6.3.7 Fluxo de transferência de calor dos dessalinizadores solar

Nesta seção, abordamos a análise dos fluxos de transferência de calor por convecção e evaporação em (D1) e (D2). As curvas de convecção estão relacionadas com a temperatura da água salobra e a temperatura do vidro, em relação à radiação solar. Já as curvas de evaporação

apresentam valores maiores que os da convecção e são geralmente mais sensíveis à variação de temperatura. O fluxo de convecção e o fluxo de evaporação foram calculados com base nas equações (18) e (19), respectivamente.

Na *Figura 41* são representadas as curvas dos coeficientes de convecção e evaporação para (D1 e D2), com lâmina de 1,0 cm. Para (D1) o coeficiente de evaporação atinge seu máximo às 13h:30min no valor de  $880,66 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ . As curvas dos coeficientes de convecção atingem o seu máximo, chegando a  $51,36 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ , respectivamente. Para (D2) às curvas dos coeficientes de convecção atingem o seu máximo, chegando  $98,21 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ , respectivamente. A curva do coeficiente de evaporação de (D2) oscila bastante e atinge seu valor máximo, no mesmo horário, de  $1174,22 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ , evidenciando que os fluxos de transferência de calor em (D2) são maiores que em (D1) para o experimento do dia 19/11/2022.

**Figura 41** — Fluxos de transferência de calor de convecção e evaporação, lâmina de 1cm

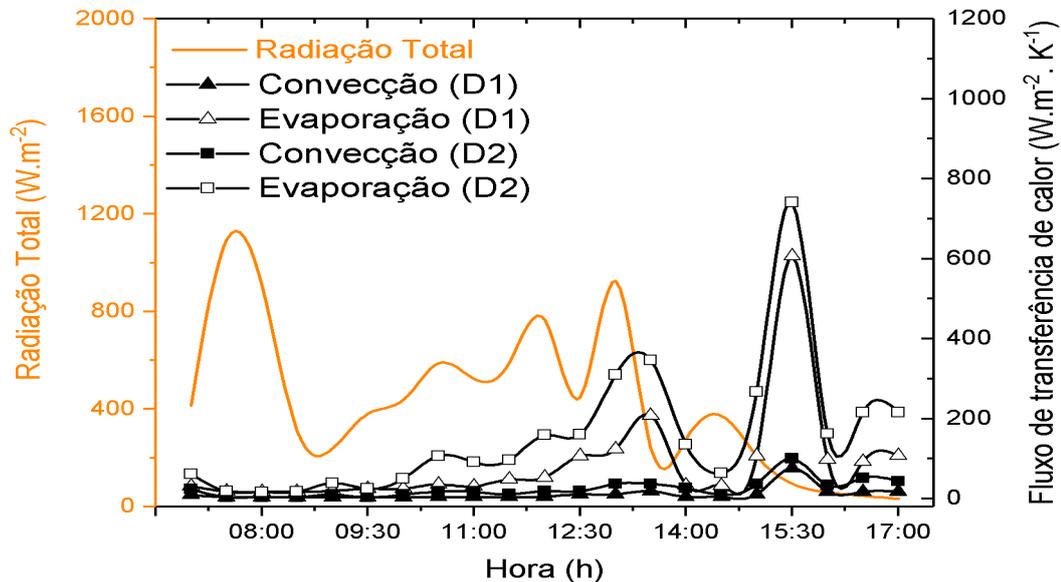


**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022

Na *Figura 42* são representadas as curvas dos coeficientes de convecção e evaporação para (D1 e D2), com lâmina de 2,0 cm. Para (D1) o coeficiente de evaporação atinge seu máximo às 15h:30min no valor de  $606,8 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ . As curvas dos coeficientes de convecção atingem o seu máximo, chegando a  $76,43 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ , respectivamente. Para (D2) às curvas dos coeficientes de convecção atingem o seu máximo, chegando  $99,98 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ , respectivamente.

A curva do coeficiente de evaporação de (D2) oscila bastante e atinge seu valor máximo, no mesmo horário, de  $741,64 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ , evidenciando que os fluxos de transferência de calor em (D2) foram maiores que em (D1) para o experimento do dia 22/11/2022.

**Figura 42** — Fluxos de transferência de calor de convecção e evaporação, lâmina de 2cm



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

#### 6.4 Análise de qualidade de água

A quantidade e qualidade da água doce é fundamental para a realização das atividades humanas de consumo, abastecimento público, agricultura, indústria e a geração de energia elétrica. Isto é, a qualidade da água necessária para cada tipo de finalidade humana tem parâmetros de avaliação distintos. A qualidade da água precisa estar sob fiscalização constante de avaliação aos parâmetros, de suas características físicas e químicas.

O presente trabalho também teve como finalidade verificar a potabilidade da água obtido pelo sistema proposto. Desta forma, o *Tabela 2* apresenta um comparativo entre a água salobra, água dessalinizada e água reconstituída após o processo de dessalinização solar com a relação aos parâmetros de potabilidade mencionados na seção 5.5 Além disso, também são apresentados os valores máximos permitidos pela legislação atual.

**Tabela 2** — Resultado da análise físico-química das amostras de água

Parâmetro de controle	AS	07/04/2022		08/04/2022		V. M. P.*
		D1	D2	D1	D2	
<b>pH</b>	7,3	7,3	7,3	6,03	6,4	6,0 — 9,0
<b>Condutividade elétrica (<math>\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}</math>)</b>	1820	17	8	10	11	—
<b>Cor aparente (uH)</b>	25,1	14,4	13,3	10,9	10,6	15
<b>Cloreto (<math>\text{mgCl}^{-1}\text{L}^{-1}</math>)</b>	198,8	7,1	7,1	7,1	7,1	250
<b>Dureza (<math>\text{mgCaCO}_3\text{L}^{-1}</math>)</b>	395	7,5	10	7,5	10	300
<b>Alcalinidade (<math>\text{mgCaCO}_3\text{L}^{-1}</math>)</b>	91	4	4	4	3	—
<b>Turbidez (NTU)</b>	0,38	1,05	0,96	0,41	0,22	5
<b>Sódio (<math>\text{mg Na}^+\text{L}^{-1}</math>)</b>	270	0	0	0	0	200
<b>Potássio (<math>\text{mg K}^+\text{L}^{-1}</math>)</b>	17	0	0	0	0	—
<b>STD (<math>\text{mg L}^{-1}</math>)</b>	902	8	4	4	5	500

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

\*V. M. P. = Valor Máximo Permitido/ STD= Sólidos Totais Dissolvidos/ AS = Água salobra/ D1= Dessalinizador solar 1/ D2 = Dessalinizador solar 2.

O valor do pH encontrado na amostra para a água salobra foi de 7,3 e após o processo de dessalinização o pH estabilizou em 7,3 para o (D1 e D2) para o dia 07/04 e o dia 08/04 o pH para o (D1) foi de 6,03 e para o (D2) 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 dentro do padrão de potabilidade.

O valor da condutividade elétrica para a água salobra foi de 1820  $\mu\text{S cm}$  com a aplicação da dessalinização foi possível observar uma redução de 99,07 % para (D1) e 99,56 % para (D2) do dia 07/04 e para o dia 08/04 obteve uma redução de 99,45% para (D1) e 99,4 % para o (D2) da condutividade elétrica na água. De acordo com os seguintes autores (MAHARJAN, JOSHI e SHRESTHA, 2018; SUDHA, 2022) os dados de condutividade elétrica é uma medida dos íons inorgânicos presentes na água. A presença desses sais nas águas aumenta a condutividade elétrica, ao medir a salinidade que afeta muito no sabor da água e tem um impacto significativo na aceitação dos usuários como água potável.

O valor obtido na análise de sólidos totais dissolvidos (STD) na água salobra foi de 902 mg L<sup>-1</sup>, na qual está fora dos padrões exigidos pela Portaria n° GM/MS N° 888/2021, que delimita valor máximo de 500 mg L<sup>-1</sup> para água potável. Quanto ao valor obtido de STD da água dessalinizada, teve uma redução de 99,11 % para (D1) e 99,56 % para (D2) do dia 07/04 e para o dia 08/04 obteve uma redução de 99,56% para (D1) e 99,45% para (D2) de STD que estavam presentes na amostra de água salobra após o processo de dessalinizador solar e, portanto, o parâmetro de STD atendeu o valor referenciado pela legislação vigente.

A cor aparente, e determinada pela Portaria n° GM/MS N° 888/2021 o valor máximo de 15 uH para a água potável, uma vez que, quanto maior o valor da cor aparente, maior será a quantidade de partículas coloidais ou em suspensão. Na *Tabela 2* os valores de cor aparente da amostra de água salobra apresentam um valor acima do máximo permitido dos padrões de potabilidade e apenas as amostras das águas dessalinizadas dos dois dessalinizadores apresentaram a cor aparente de acordo com a legislação vigente.

Os valores de cloretos observados na *Tabela 2* de todas as amostras apresentaram valores dentro do permitido pela Portaria n° GM/MS N° 888/2021, entretanto, ao analisar a água após o processo de dessalinização solar, obteve-se uma redução de 96,43% de cloreto, para todas as amostras de águas dos dois dessalinizadores solar.

O parâmetro mais significativo foi o do sódio, que apresentou na amostra da água salobra um teor, no valor de 270,0 mg. L<sup>-1</sup>, acima do valor máximo permitido pela Portaria n° GM/MS N° 888/2021, observa-se que todas as amostras de água dessalinizada apresentaram valores dentro do padrão de potabilidade, tendo uma redução de 99,99% de cada amostra de água dessalinizada. Com relação ao parâmetro potássio, a Portaria n° GM/MS N° 888/2021, não estabelece limites em água de abastecimento humano. O potássio foi encontrado na água salobra com uma concentração de 17,0 mg. L<sup>-1</sup> *Tabela 2* e as águas dessalinizadas obteve uma redução de 99,99% para todas as amostras.

Devido aos baixos níveis de salinidade das águas dessalinizadas obtida, faz necessário a reconstituição salina para adequá-la ao consumo humano de acordo com a Portaria n° GM/MS N° 888/2021. O processo de dessalinização precisa ter no mínimo de 30 mg L<sup>-1</sup> de sais, e deve atender aos padrões de potabilidade. Desse modo, para atender aos padrões de potabilidade, deve-se acrescentar na água dessalinizada um percentual de 2,44 % para (D1) e 2,88 % para (D2) do dia 07/04 e para o dia 08/04 deve acrescentar um valor de 2,88% para (D1) e 2,77%

para (D2) do volume de água salobra com uma média de aproximadamente 2,74% para cada amostra onde o volume adicionado seria de 27,4 mL da água salobra para cada litro de água dessalinizada, desde que ela se encontre dentro dos padrões microbiológicos estabelecidos pela Portaria nº GM/MS Nº 888/2021.

## 7 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. No presente trabalho, além de atingirmos os objetivos iniciais e diante dos resultados obtidos, pode-se inferir que:

- A incidência de radiação solar sobre os dois dessalinizadores foram essenciais para o aumento dos perfis de temperatura e evaporação da água salobra, que contribuíram com o processo de dessalinização.
- Foi constatado que a eficiência térmica do dessalinizador acompanhou o fluxo de radiação solar e que teve relação direta com a produção de água dessalinizada.
- Os resultados obtidos das análises físico-químicas das águas salobras e dessalinizadas foram satisfatórios, apresentando valores de (S. T. D.), entre outros, após o processo de dessalinização, dentro dos valores máximos permitidos pela Portaria nº GM/MS Nº 888/2021, o que confirma a eficiência do dessalinizador solar para a obtenção de água dessalinizada.
- Foi constatado a eficiência do dessalinizador solar com o condensador externo (D2+C) com a melhor produção de água nos dois dias durante a segunda etapa onde o valor de produção do (D2+C) foi 8,618 L no dia 19/11 e 5,312 L para o dia 22/11 que superou a produção de (D1) para o dia 19/11 que foi 8,584 L e para o dia 22/11 que obteve uma produção de 4,974 L mostrando que o condensador externo mais o dessalinizador solar é eficiente na produção de água dessalinizada.
- Desta forma, foi comprovada a eficiência do dessalinizador solar com o condensador externo, para a obtenção de água doce, podendo ser aplicado nas comunidades isoladas do semiárido paraibano, onde ocorre grande escassez de água potável.

## REFERÊNCIAS

- AHSAN, A. et al. Design, fabrication and performance analysis of an improved solar still. **Desalination**, [S.N.], v. 292, p. 105-112, April 2012.
- AL-NIMR, M. A.; DAHDOLAN, M. E. Modeling of a novel concentrated solar still enhanced with a porous evaporator and an internal condenser. **Solar Energy**, [S. N.], v. 114, p. 8-16, 2015.
- AMARAL, K. D. S.; MACHADO, N. D. S. D. S.; NAVONI, J. A. Implantação de sistemas de dessalinização em comunidades rurais do semiárido do Rio Grande do Norte: percepção social da água potável e das ações voltadas a ampliar o seu acesso universal. **Desenvolv. e Meio Ambiente**, Paraná, v. 54, n. 1, p. 362-378, jul./dez 2020. ISSN 2176-9109.
- BOUZOID, M. et al. Numerical Analysis of Thermal Performances for a Novel Cascade Solar Desalination Still Design. **Energy Procedia**, [S. N.], p. 1071–1082, 2019.
- CANAN, F. et al. Outdoor thermal comfort conditions during summer in a cold semi-arid climate. A transversal field survey in Central Anatolia (Turkey). **Building and Environment**, [S. N.], p. 212-224, November 2019.
- CHKHETIANI, O. G. et al. Analysis of Mineral Aerosol in the Surface Layer over the Caspian Lowland Desert by the Data of 12 Summer Field Campaigns in 2002–2020. **Atmosphere**, [S. N.], p. 1-23, July 2021.
- CHOUBIN, B. et al. Precipitation forecasting using classification and regression trees (CART) model: a comparative study of different approaches. **Environmental Earth Sciences**, Germany, p. 1-13, April 2018.
- CHUBAKA, C. E. et al. Microbiological Values of Rainwater Harvested in Adelaide. **Pathogens**, [S. N.], p. 1-12, February 2018.
- COSTA, A. M. G. D.; LOPES, B. M.; UTURBEY, W. MAPEAMENTO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL – UMA ABORDAGEM PRELIMINAR. **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**, Gramado, v. 1, n. 1, p. 1-10, abril 2018.
- COSTA, L. C. A. D.; SILVA, G. D. P. D. Save water and energy: A techno-economic analysis of a floating solar photovoltaic system to power a water integration project in the Brazilian semiarid. **Energy Research**, Nova Jersey, p. 17924-17941, October 2021.
- DI BALDASSARRE, GIULIANO et al. Sociohydrology: Scientific Challenges in Addressing the Sustainable Development Goals. **Water Resources Research**, Nova Jersey, v. 55, n. 8, p. 6327–6355, August 2019.
- FLAVIA, P. D. S.; MOTTA, Q. J. Dessalinização por osmose reversa. **Revista Tecnológica da Universidade Santa Úrsula**, RIO DE JANEIRO, v. 3, n. 2, p. 16-32, JUL/DEZ 2020.
- HANOON, S. K. et al. Using scenario modelling for adapting to urbanization and water scarcity: towards a sustainable city in semi-arid areas. **Periodicals of Engineering and Natural Sciences**, [S. N.], v. 10, n. 1, p. 518-532, February 2022. ISSN 2303-4521.

- HU, X. et al. A robust low-level cloud and clutter discrimination method for ground-based millimeter-wavelength cloud radar. **Atmos. Meas. Tech.**, [S. N.], p. 1743–1759, March 2021.
- HU, Y. et al. The promising solar-powered water purification based on graphene functional architectures. **EcoMat**, Nova Jersey, p. 1-15, February 2022.
- 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.
- JIA, X. et al. Analyzing the Energy Consumption, GHG Emission, and Cost of Seawater Desalination in China. **Energies**, [S. N.], January 2019.
- KABA, K. et al. Estimation of daily global solar radiation using deep learning model. **Energy**, [S. N.], p. 126-135, July 2018.
- KABEEL, A. E. Performance of solar still with a concave wick evaporation surface. **Energy**, [S. N.], p. 1504–1509, 2009.
- KULESZA, K. Spatiotemporal variability and trends in global solar radiation over Poland based on satellite-derived data (1986–2015). **Int J Climatol**, [S. N.], p. 6526–6543, April 2020.
- LACERDA, F. F.; LOPES, G. M. B.; ALBUQUERQUE, M. M. D. Viveiros educadores na Caatinga – mitigação aos efeitos da mudança do clima no semiárido brasileiro. **Revista Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 26, n. 2, p. 353 -361, dez 2018. ISSN 2526-7043.
- LAUX, P.; AL., et. A semi-objective circulation pattern classification scheme for the semi-arid Northeast Brazil. **Int J Climatol**, Nova Jersey, p. 51-72, January 2021.
- LEI Nº 9.433, DE 8 DE JANEIRO. DA POLÍTICA NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS. **Presidência da República Casa Civil**, Distrito Federal, 1997.
- LIRA, R. M. D. et al. 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.
- LOPES, J. T. et al. 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.
- MAAS, A. et al. Water storage in a changing environment: The impact of allocation institutions on value. **Water Resources Research**, Nova Jersey, p. 672–687, January 2017.
- 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.

MARENGO, J. A. et al. Drought in Northeast Brazil: A review of agricultural and policy adaptation options for food security. **Climate Resil Sustain.**, São Paulo, p. 1-20, August 2021.

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.

MICHEL, M. M. et al. Mineral Materials Coated with and Consisting of  $MnO_x$  — Characteristics and Application of Filter Media for Groundwater Treatment: A Review. **Materials**, [S. N.], p. 1-35, May 2020.

MILHORANCE, C. et al. O desafio da integração de políticas públicas para a adaptação às mudanças climáticas no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Climatologia**, Brasília, v. 24, n. 15, p. 175 -195, Jan - jun 2019. ISSN 2237-8642.

MUKHOPADHYAY, A.; DUTTAGUPTA, S.; MUKHERJEE, A. Emerging organic contaminants in global community drinking water sources and supply: a review of occurrences, processes and removal. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [S. N.], p. 1-12, March 2022.

PAL, P. et al. Performance analysis of modified basin type double slope multi-wick solar still. **Desalination**, [S. N.], p. 68-82, August 2017.

PENG, G. et al. compact flat solar still with high performance. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, [S. N.], p. 1-10, July 2021.

PEREIRA, E. B. et al. Atlas Brasileiro de Energia Solar. 2. ed. São José dos Campos: INPE, v. 1, 2017. Cap. 12, p. 1-80.

PEREIRA, T. A. D. S. et al. Key Climate Oscillation Factors Controlling Precipitation Variability during the Dry Season in Eastern Northeast Brazil: Study Case of Mundaú and Paraíba Do Meio River Basins. **Water**, [S. N.], p. 2-13, November 2018.

PORTARIA, GM/MS Nº888. 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.

ROCHA, L. D. S. et al. O POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA INTEGRADA A REDE PÚBLICA DE DISTRIBUIÇÃO: “UM EXEMPLO DE AÇAILÂNDIA PARA O MARANHÃO”. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, [S. N.], v. 3, p. 107-127, 2014.

SAADI, Z. et al. Performance evaluation of a new stepped solar still under the desert climatic conditions. **Energy Conversion and Management**, [S. N.], p. 1749-1760, June 2018.

SILVA, A. O. D. et al. Potabilização de água salobra por meio de um dessalinizador solar portátil com refletores de radiação integrados. **Águas Subterrâneas**, [S. N.], v. 34, n. 3, p. 285-295, out 2020.

SILVA, V. P. D.; FRANÇA, G. L. D. S. Percepção de mudanças do clima, impactos e adaptação para sertanejos do semiárido. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba/PR, v. 22, n. 1, p. 229-248, jan-jun 2018. ISSN 2237-8642.

SIQUEIRA, A. M. D. O.; MARTINS, A. L. S.; VIANA, E. E. D. Princípios de funcionamento de diferentes métodos de dessalinização de água do mar e análise paramétrica de um dessalinizador de múltiplo efeito (MED). **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, [S. N.], v. 8, n. 1, p. 1-17, Janeiro 2022. ISSN 2527-1075.

SUDHA, R. ASSESSMENT OF WATER QUALITY PARAMETERS OF MAVADI KULAM AND ITS SURROUNDING BORE WELL WATER SAMPLES, PONMALAIPATTI, TIRUCHIRAPPALLI (DT), TAMIL NADU, INDIA. **Asian Journal of Advances in Research**, [S. N.], v. 13, p. 8-18, February 2022.

TIWARI, A. K.; TIWARI, G. N. Thermal modeling based on solar fraction and experimental study of the annual and seasonal performance of a single slope passive solar still: The effect of water depths. **Desalination**, [S. N.], p. 184–204, 2007.

TORTAJADA, C.; NAMBIAR, S. Communications on Technological Innovations: Potable Water Reuse. **Water**, Basel, Switzerland, p. 1-29, January 2019.

VALA, S.; KANABAR, B. Solar Distillation Based on Pyramid Shape Solar Still- A Review. **Journal for Research**, [S. N.], v. 3, n. 3, p. 1-4, May 2017. ISSN 2395-7549.

VERLICCHI, P.; GRILLINI, V. Surface Water and Groundwater Quality in South Africa and Mozambique—Analysis of the Most Critical Pollutants for Drinking Purposes and Challenges in Water Treatment Selection. **Water**, [S. N.], v. 12, p. 1-21, January 2020.

XU, J. et al. Shifts in Dry-Wet Climate Regions over China and Its Related Climate Factors between 1960–1989 and 1990–2019. **Sustainability**, [S.N.], p. 1-16, janeiro 2022.

YAO, Y. et al. Extended Dependence of the Hydrological Regime on the Land Cover Change in the Three-North Region of China: An Evaluation under Future Climate Conditions. **Remote Sensing**, [S. N.], p. 1-16, Janeiro 2019.

YUAN, G. et al. Understanding the Partitioning of the Available Energy over the Semi-Arid Areas of the Loess Plateau, China. **Atmosphere**, [S. N.], p. 1-13, may 2017.

ZHANG, H. et al. Advancing Strategies of Biofouling Control in Water-Treated Polymeric Membranes. **Polymers**, [S. N.], p. 1-23, March 2022.

ZHOU, Q. et al. A machine learning approach to estimation of downward solar radiation from satellite derived data products: An application over a semi-arid ecosystem in the U.S. **PLoS ONE**, [S. N.], p. 1-19, August 2017.

ZOORI, H. A. et al. Comparison between energy and exergy efficiencies in a weir type cascade solar still. **Desalination**, [S. N.], p. 113–121, July 2013. ISSN 0011-9164.

## APÊNDICE A — TABELAS DE COLETA DE DADOS

Tabela 3 — Planilha de dados do experimento 07/04/2022

(Continua)

Experi- mento	Hora	Radiação Total W.m <sup>2</sup>	Tempe- ratura da água D1 °C	Tempe- ratura do vidro interno D2 °C	Tempe- ratura do vidro externo D3 °C	Tempe- ratura da água D4 °C	Tempe- ratura do vidro interno D5 °C	Tempe- ratura do vidro externo D6 °C
<b>1</b>	07:00	307	23	22	21	21	20	19
<b>2</b>	07:30	602	35	31	30	36	33	27
<b>3</b>	08:00	130	43	35	34	43	42	37
<b>4</b>	08:30	530	44	39	37	43	40	36
<b>5</b>	09:00	737	44	40	39	40	39	33
<b>6</b>	09:30	256	55	50	45	52	48	42
<b>7</b>	10:00	521	51	49	42	47	43	41
<b>8</b>	10:30	480	50	47	44	50	47	43
<b>9</b>	11:00	391	44	43	37	44	43	35
<b>10</b>	11:30	425	49	45	43	45	37	40
<b>11</b>	12:00	1072	58	57	50	57	53	50
<b>12</b>	12:30	1023	60	55	52	59	58	50
<b>13</b>	13:00	220	59	58	55	60	55	52
<b>14</b>	13:30	855	60	39	56	60	59	55
<b>15</b>	14:00	757	63	61	55	65	63	57
<b>16</b>	14:30	252	55	53	44	60	57	44
<b>17</b>	15:00	320	53	50	47	58	57	51
<b>18</b>	15:30	334	54	53	45	56	54	50
<b>19</b>	16:00	212	49	45	40	55	49	45
<b>20</b>	16:30	65	47	44	38	48	47	39
<b>21</b>	17:00	45	37	33	30	36	32	31

**Tabela 3** — Planilha de dados do experimento 07/04/2022

(Conclusão)

<b>Expe ri ment o</b>	<b>Temperat ura ambiente externo °C</b>	<b>Velocid ade do Vento m.s<sup>-1</sup></b>	<b>Destilad o instantâ neo D1 ml</b>	<b>Destilad o instantâ neo D2 ml</b>	<b>Destilad o acumul ado D1 ml</b>	<b>Destilad o acumul ado D2 ml</b>	<b>Vazã o D1 ml.m in<sup>-1</sup></b>	<b>Vazã o D2 ml.m in<sup>-1</sup></b>
<b>1</b>	28	2,2	0,0	0,0	0	0	0	0
<b>2</b>	30	0,3	108,0	168,0	108	168	0	0
<b>3</b>	32	2,0	120,0	104,0	228	272	0	0
<b>4</b>	36	0,7	128,0	116,0	356	388	0	0
<b>5</b>	34	3,0	202,0	178,0	558	566	0	0
<b>6</b>	31	2,1	292,0	242,0	850	808	18	16
<b>7</b>	32	0,9	312,0	306,0	1162	1114	22	18
<b>8</b>	31	2,1	338,0	300,0	1500	1414	20	18
<b>9</b>	32	0,0	372,0	332,0	1872	1746	20	26
<b>10</b>	32	0,0	298,0	254,0	2170	2000	24	20
<b>11</b>	31	3,3	368,0	396,0	2538	2396	24	26
<b>12</b>	34	1,4	538,0	554,0	3076	2950	36	30
<b>13</b>	40	1,0	566,0	550,0	3642	3500	36	36
<b>14</b>	40	2,0	566,0	560,0	4208	4060	32	36
<b>15</b>	40	1,8	646,0	630,0	4854	4690	40	40
<b>16</b>	33	0,0	906,0	878,0	5760	5568	34	40
<b>17</b>	35	1,8	520,0	498,0	6280	6066	32	32
<b>18</b>	31	2,1	510,0	478,0	6790	6544	30	30
<b>19</b>	33	3,2	404,0	418,0	7194	6962	24	26
<b>20</b>	31	1,4	334,0	344,0	7528	7306	22	20
<b>21</b>	29	0,0	262,0	274,0	7790	7580	18	22

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022.

**Tabela 4** — Planilha de dados do experimento 08/04/2022

(Continua)

<b>Experi- mento</b>	<b>Hora</b>	<b>Radiação Total W.m<sup>2</sup></b>	<b>Tempe- ratura da água D1 °C</b>	<b>Tempe- ratura do vidro interno D2 °C</b>	<b>Tempe- ratura do vidro externo D3 °C</b>	<b>Tempe- ratura da água D4 °C</b>	<b>Tempe- ratura do vidro interno D5 °C</b>	<b>Tempe- ratura do vidro externo D6 °C</b>
<b>1</b>	07:00	292	26	25	24	26	20	19
<b>2</b>	07:30	206	33	26	25	33	31	26
<b>3</b>	08:00	321	37	36	35	36	31	29
<b>4</b>	08:30	305	37	32	31	39	38	31
<b>5</b>	09:00	375	43	33	32	41	40	32
<b>6</b>	09:30	303	40	37	36	44	43	37
<b>7</b>	10:00	350	47	39	38	47	44	42
<b>8</b>	10:30	400	47	39	38	47	44	42
<b>9</b>	11:00	429	54	52	51	57	54	53
<b>10</b>	11:30	1056	66	56	55	58	57	50
<b>11</b>	12:00	108	61	58	48	61	59	48
<b>12</b>	12:30	424	52	50	41	52	51	41
<b>13</b>	13:00	230	54	53	46	56	55	49
<b>14</b>	13:30	429	54	53	44	55	54	47
<b>15</b>	14:00	932	52	51	46	57	52	50
<b>16</b>	14:30	394	52	51	46	55	51	50
<b>17</b>	15:00	356	49	47	41	51	49	48
<b>18</b>	15:30	334	51	45	38	50	46	45
<b>19</b>	16:00	321	45	44	38	48	37	40
<b>20</b>	16:30	362	47	44	35	47	45	39
<b>21</b>	17:00	115	45	43	35	44	43	35

**Tabela 4** — Planilha de dados do experimento 08/04/2022

(Conclusão)

<b>Expe ri ment o</b>	<b>Temperat ura ambiente externo °C</b>	<b>Velocid ade do Vento m.s<sup>-1</sup></b>	<b>Destilad o instantâ neo D1 ml</b>	<b>Destilad o instantâ neo D2 ml</b>	<b>Destilad o acumul ado D1 ml</b>	<b>Destilad o acumul ado D2 ml</b>	<b>Vazã o D1 ml.m in<sup>-1</sup></b>	<b>Vazã o D2 ml.m in<sup>-1</sup></b>
<b>1</b>	31	2,0	152,0	154,0	152	154	0	0
<b>2</b>	32	1,0	70,0	71,0	222	225	0	0
<b>3</b>	33	2,0	70,0	72,0	292	297	0	0
<b>4</b>	37	3,0	84,0	87,0	376	384	0	0
<b>5</b>	36	0,8	112,0	112,8	488	497	0	0
<b>6</b>	34	2,0	140,0	142,0	628	639	16	16
<b>7</b>	41	0,0	240,0	240,0	868	879	22	20
<b>8</b>	41	0,3	270,0	270,3	1138	1149	22	20
<b>9</b>	40	1,0	202,0	203,0	1340	1352	24	26
<b>10</b>	44	0,0	228,0	228,0	1568	1580	32	50
<b>11</b>	35	0,0	1136,0	1136,0	2704	2716	24	40
<b>12</b>	33	0,6	342,0	342,6	3046	3059	22	26
<b>13</b>	34	0,0	232,0	232,0	3278	3291	40	20
<b>14</b>	33	0,0	442,0	442,0	3720	3733	44	32
<b>15</b>	36	0,4	398,0	398,4	4118	4131	28	34
<b>16</b>	32	0,7	372,0	372,7	4490	4504	36	26
<b>17</b>	32	0,7	428,0	428,7	4918	4933	44	38
<b>18</b>	37	0,0	309,0	309,0	5227	5242	22	20
<b>19</b>	34	0,0	264,0	264,0	5491	5506	36	22
<b>20</b>	35	2,1	184,0	186,1	5675	5692	18	26
<b>21</b>	31	1,7	162,0	163,7	5837	5855	32	18

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022.

**Tabela 5** — Planilha de dados do experimento 13/04/2022

(Continua)

<b>Experi- mento</b>	<b>Hora</b>	<b>Radiação Total W.m<sup>2</sup></b>	<b>Tempe- ratura da água D1 °C</b>	<b>Tempe- ratura do vidro interno D2 °C</b>	<b>Tempe- ratura do vidro externo D3 °C</b>	<b>Tempe- ratura da água D4 °C</b>	<b>Tempe- ratura do vidro interno D5 °C</b>	<b>Tempe- ratura do vidro externo D6 °C</b>
<b>1</b>	07:00	231	36	29	28	32	28	27
<b>2</b>	07:30	659	36	33	32	34	33	30
<b>3</b>	08:00	269	44	37	36	38	34	32
<b>4</b>	08:30	260	47	42	38	41	37	36
<b>5</b>	09:00	201	43	39	36	41	40	36
<b>6</b>	09:30	864	54	46	45	50	44	41
<b>7</b>	10:00	971	58	57	50	57	52	49
<b>8</b>	10:30	392	72	65	56	67	66	60
<b>9</b>	11:00	843	73	61	58	67	64	58
<b>10</b>	11:30	1111	72	63	58	66	63	62
<b>11</b>	12:00	920	69	68	62	68	62	59
<b>12</b>	12:30	885	71	70	62	70	62	61
<b>13</b>	13:00	1035	70	68	63	65	63	60
<b>14</b>	13:30	923	67	64	62	67	62	60
<b>15</b>	14:00	827	62	61	60	63	61	59
<b>16</b>	14:30	789	68	61	60	61	60	58
<b>17</b>	15:00	560	67	61	60	63	60	59
<b>18</b>	15:30	601	62	60	53	59	58	54
<b>19</b>	16:00	534	57	51	47	48	46	43
<b>20</b>	16:30	396	55	49	44	47	44	39
<b>21</b>	17:00	279	54	48	45	54	50	45

**Tabela 5** — Planilha de dados do experimento 13/04/2022

(Conclusão)

<b>Expe ri ment o</b>	<b>Temperat ura ambiente externo °C</b>	<b>Velocid ade do Vento m.s<sup>-1</sup></b>	<b>Destilad o instantâ neo D1 ml</b>	<b>Destilad o instantâ neo D2 ml</b>	<b>Destilad o acumul ado D1 ml</b>	<b>Destilad o acumul ado D2 ml</b>	<b>Vazã o D1 ml.m in<sup>-1</sup></b>	<b>Vazã o D2 ml.m in<sup>-1</sup></b>
<b>1</b>	27	0,0	50,0	38,0	50	38	0	0
<b>2</b>	28	0,6	26,0	32,0	76	70	0	0
<b>3</b>	30	0,0	102,0	98,0	178	168	0	0
<b>4</b>	32	2,1	108,0	94,0	286	262	0	0
<b>5</b>	33	1,8	124,0	116,0	410	378	0	0
<b>6</b>	42	0,3	190,0	202,0	600	580	20	16
<b>7</b>	46	2,1	392,0	354,0	992	934	28	20
<b>8</b>	38	2,0	628,0	652,0	1620	1586	32	20
<b>9</b>	37	0,0	322,0	340,0	1942	1926	28	20
<b>10</b>	36	2,1	722,0	706,0	2664	2632	36	36
<b>11</b>	37	2,1	622,0	584,0	3286	3216	38	36
<b>12</b>	39	2,0	672,0	686,0	3958	3902	42	38
<b>13</b>	38	2,0	734,0	746,0	4692	4648	42	38
<b>14</b>	37	0,4	740,0	740,0	5432	5388	40	40
<b>15</b>	37	0,3	662,0	678,0	6094	6066	42	40
<b>16</b>	39	0,0	712,0	738,0	6806	6804	30	30
<b>17</b>	36	3,3	568,0	586,0	7374	7390	30	30
<b>18</b>	35	2,2	566,0	606,0	7940	7996	30	26
<b>19</b>	36	0,0	444,0	494,0	8384	8490	18	20
<b>20</b>	33	0,1	332,0	340,0	8716	8830	22	18
<b>21</b>	31	0,3	258,0	326,0	8974	9156	16	16

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022.

**Tabela 6** — Planilha de dados do experimento 16/04/2022

(Continua)

<b>Experi- mento</b>	<b>Hora</b>	<b>Radiação Total W.m<sup>2</sup></b>	<b>Tempe- ratura da água D1 °C</b>	<b>Tempe- ratura do vidro interno D2 °C</b>	<b>Tempe- ratura do vidro externo D3 °C</b>	<b>Tempe- ratura da água D4 °C</b>	<b>Tempe- ratura do vidro interno D5 °C</b>	<b>Tempe- ratura do vidro externo D6 °C</b>
<b>1</b>	07:00	307	38	32	30	36	34	31
<b>2</b>	07:30	366	40	38	36	38	37	35
<b>3</b>	08:00	701	49	43	37	45	39	38
<b>4</b>	08:30	922	52	47	40	48	42	41
<b>5</b>	09:00	421	56	49	42	47	52	46
<b>6</b>	09:30	496	59	52	44	57	54	48
<b>7</b>	10:00	1137	64	58	56	60	56	52
<b>8</b>	10:30	1029	66	56	55	60	55	53
<b>9</b>	11:00	482	76	73	65	68	67	61
<b>10</b>	11:30	488	71	67	62	64	63	61
<b>11</b>	12:00	1067	67	62	59	64	62	56
<b>12</b>	12:30	300	73	70	60	71	70	59
<b>13</b>	13:00	936	72	68	61	68	65	61
<b>14</b>	13:30	241	74	72	66	73	71	66
<b>15</b>	14:00	890	73	69	67	74	70	66
<b>16</b>	14:30	332	68	62	55	65	64	55
<b>17</b>	15:00	327	60	57	51	60	58	50
<b>18</b>	15:30	122	55	50	42	56	52	42
<b>19</b>	16:00	140	57	48	41	54	50	40
<b>20</b>	16:30	289	52	47	38	48	47	39
<b>21</b>	17:00	419	50	42	36	45	43	36

**Tabela 6** — Planilha de dados do experimento 16/04/2022

(Conclusão)

<b>Expe ri ment o</b>	<b>Temperat ura ambiente externo °C</b>	<b>Velocid ade do Vento m.s<sup>-1</sup></b>	<b>Destilad o instantâ neo D1 ml</b>	<b>Destilad o instantâ neo D2 ml</b>	<b>Destilad o acumul ado D1 ml</b>	<b>Destilad o acumul ado D2 ml</b>	<b>Vazã o D1 ml.m in<sup>-1</sup></b>	<b>Vazã o D2 ml.m in<sup>-1</sup></b>
<b>1</b>	29	0,0	120,0	96,0	120	96	0	0
<b>2</b>	31	0,0	20,0	20,0	140	116	0	0
<b>3</b>	32	2,5	60,0	66,0	200	182	0	0
<b>4</b>	38	0,6	130,0	116,0	330	298	0	0
<b>5</b>	36	0,4	140,0	122,0	470	420	0	0
<b>6</b>	35	0,1	266,0	218,0	736	638	30	20
<b>7</b>	39	0,4	318,0	252,0	1054	890	24	20
<b>8</b>	38	0,6	414,0	372,0	1468	1262	36	14
<b>9</b>	38	0,6	542,0	514,0	2010	1776	38	32
<b>10</b>	37	0,6	504,0	499,0	2514	2275	32	30
<b>11</b>	39	0,0	608,0	966,0	3122	3241	38	36
<b>12</b>	37	0,3	612,0	436,0	3734	3677	32	32
<b>13</b>	37	0,7	556,0	650,0	4290	4327	30	40
<b>14</b>	43	2,5	616,0	640,0	4906	4967	44	24
<b>15</b>	40	1,2	630,0	642,0	5536	5609	36	32
<b>16</b>	37	1,0	670,0	684,0	6206	6293	28	28
<b>17</b>	40	1,5	550,0	526,0	6756	6819	32	30
<b>18</b>	36	0,0	752,0	792,0	7508	7611	44	30
<b>19</b>	33	1,4	546,0	460,0	8054	8071	26	18
<b>20</b>	31	0,6	374,0	386,0	8428	8457	20	24
<b>21</b>	31	0,9	320,0	332,0	8748	8789	16	30

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022.

**Tabela 7** — Planilha de dados do experimento 19/11/2022

(Continua)

<b>Experi- mento</b>	<b>Hora</b>	<b>Radiação Total W.m<sup>2</sup></b>	<b>Tempe- ratura da água D1 °C</b>	<b>Tempe- ratura do vidro interno D2 °C</b>	<b>Tempe- ratura do vidro externo D3 °C</b>	<b>Tempe- ratura da água D4 °C</b>	<b>Tempe- ratura do vidro interno D5 °C</b>	<b>Tempe- ratura do vidro externo D6 °C</b>
<b>1</b>	07:00	525	28	27	26	26	25	24
<b>2</b>	07:30	272	34	30	29	36	31	29
<b>3</b>	08:00	984	37	35	34	39	33	32
<b>4</b>	08:30	983	43	41	40	42	34	32
<b>5</b>	09:00	1049	55	51	50	52	46	45
<b>6</b>	09:30	1087	56	52	51	52	47	46
<b>7</b>	10:00	1193	58	57	56	57	53	52
<b>8</b>	10:30	1090	64	61	60	64	58	57
<b>9</b>	11:00	1105	62	60	59	60	55	55
<b>10</b>	11:30	1092	64	61	60	66	59	58
<b>11</b>	12:00	1100	62	57	56	65	55	48
<b>12</b>	12:30	1008	60	58	57	61	54	53
<b>13</b>	13:00	1089	57	55	54	60	54	50
<b>14</b>	13:30	1077	67	61	59	67	59	55
<b>15</b>	14:00	905	60	56	55	61	54	49
<b>16</b>	14:30	922	55	50	48	55	51	46
<b>17</b>	15:00	872	62	56	52	63	56	48
<b>18</b>	15:30	760	53	47	43	55	50	41
<b>19</b>	16:00	730	47	42	39	46	45	38
<b>20</b>	16:30	489	49	43	36	44	43	35
<b>21</b>	17:00	39	43	40	32	40	39	32

**Tabela 7** — Planilha de dados do experimento 19/11/2022

(Conclusão)

<b>Expe ri ment o</b>	<b>Temperat ura ambiente externo °C</b>	<b>Velocid ade do Vento m.s<sup>-1</sup></b>	<b>Destilad o instantâ neo D1 ml</b>	<b>Destilad o instantâ neo D2 ml</b>	<b>Destilad o acumul ado D1 ml</b>	<b>Destilad o acumul ado D2 ml</b>	<b>Vazã o D1 ml.m in<sup>-1</sup></b>	<b>Vazã o D2 ml.m in<sup>-1</sup></b>
<b>1</b>	30	2,1	108,0	160,0	108	160	0	0
<b>2</b>	29	2,0	54,0	32,0	162	192	0	0
<b>3</b>	34	2,0	94,0	74,0	256	266	0	0
<b>4</b>	36	2,4	152,0	88,0	408	354	0	0
<b>5</b>	39	2,0	220,0	86,0	628	440	14	0
<b>6</b>	45	2,8	302,0	134,0	930	574	14	10
<b>7</b>	34	2,1	436,0	230,0	1366	804	34	10
<b>8</b>	34	2,1	590,0	380,0	1956	1184	20	16
<b>9</b>	34	2,3	530,0	410,0	2486	1594	22	20
<b>10</b>	35	4,2	632,0	498,0	3118	2092	26	20
<b>11</b>	35	2,3	724,0	580,0	3842	2672	22	22
<b>12</b>	36	1,4	714,0	554,0	4556	3226	26	20
<b>13</b>	37	1,5	610,0	570,0	5166	3796	26	28
<b>14</b>	36	2,5	670,0	610,0	5836	4406	24	30
<b>15</b>	36	2,1	610,0	620,0	6446	5026	24	30
<b>16</b>	36	1,8	480,0	560,0	6926	5586	18	20
<b>17</b>	35	2,0	440,0	550,0	7366	6136	20	22
<b>18</b>	33	2,5	430,0	450,0	7796	6586	14	16
<b>19</b>	33	2,1	350,0	430,0	8146	7016	12	14
<b>20</b>	31	2,0	250,0	390,0	8396	7406	10	12
<b>21</b>	30	2,7	188,0	220,0	8584	7626	10	10

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

**Tabela 8** — Planilha de dados do experimento 22/11/2022

(Continua)

<b>Experi- mento</b>	<b>Hora</b>	<b>Radiação Total W.m<sup>2</sup></b>	<b>Tempe- ratura da água D1 °C</b>	<b>Tempe- ratura do vidro interno D2 °C</b>	<b>Tempe- ratura do vidro externo D3 °C</b>	<b>Tempe- ratura da água D4 °C</b>	<b>Tempe- ratura do vidro interno D5 °C</b>	<b>Tempe- ratura do vidro externo D6 °C</b>
<b>1</b>	07:00	415	28	26	25	26	22	21
<b>2</b>	07:30	1093	35	34	33	34	33	32
<b>3</b>	08:00	907	33	32	31	33	32	31
<b>4</b>	08:30	312	34	33	32	34	33	32
<b>5</b>	09:00	238	36	35	34	36	34	33
<b>6</b>	09:30	381	41	40	39	42	41	40
<b>7</b>	10:00	437	41	40	39	42	40	39
<b>8</b>	10:30	588	48	47	46	48	45	44
<b>9</b>	11:00	524	45	44	43	46	43	42
<b>10</b>	11:30	590	54	53	52	54	52	51
<b>11</b>	12:00	766	56	55	54	57	54	53
<b>12</b>	12:30	449	52	50	49	53	50	49
<b>13</b>	13:00	925	55	53	52	56	51	48
<b>14</b>	13:30	243	55	52	48	56	51	45
<b>15</b>	14:00	276	47	46	42	48	44	38
<b>16</b>	14:30	373	46	45	44	47	45	40
<b>17</b>	15:00	208	52	50	46	53	48	45
<b>18</b>	15:30	94	50	41	34	51	40	33
<b>19</b>	16:00	59	40	37	31	41	36	27
<b>20</b>	16:30	44	39	36	26	40	33	27
<b>21</b>	17:00	32	42	39	32	43	37	32

**Tabela 8** — Planilha de dados do experimento 22/11/2022

(Conclusão)

<b>Expe ri ment o</b>	<b>Temperat ura ambiente externo °C</b>	<b>Velocid ade do Vento m.s<sup>-1</sup></b>	<b>Destilad o instantâ neo D1 ml</b>	<b>Destilad o instantâ neo D2 ml</b>	<b>Destilad o acumul ado D1 ml</b>	<b>Destilad o acumul ado D2 ml</b>	<b>Vazã o D1 ml.m in<sup>-1</sup></b>	<b>Vazã o D2 ml.m in<sup>-1</sup></b>
<b>1</b>	27	1,5	180,0	190,0	180,0	190,0	0	0
<b>2</b>	27	2,1	60,0	50,0	240,0	240,0	0	0
<b>3</b>	30	2,0	70,0	60,0	310,0	300,0	0	0
<b>4</b>	32	1,5	44,0	40,0	354,0	340,0	0	0
<b>5</b>	31	2,0	72,0	52,0	426,0	392,0	0	0
<b>6</b>	31	1,7	100,0	80,0	526,0	472,0	10	8
<b>7</b>	33	2,0	98,0	84,0	624,0	556,0	12	10
<b>8</b>	34	1,7	140,0	110,0	764,0	666,0	10	10
<b>9</b>	35	2,1	186,0	126,0	950,0	792,0	10	16
<b>10</b>	36	1,2	216,0	156,0	1166,0	948,0	16	12
<b>11</b>	34	2,1	256,0	200,0	1422,0	1148,0	14	16
<b>12</b>	34	0,0	258,0	210,0	1680,0	1358,0	24	16
<b>13</b>	35	1,8	308,0	240,0	1988,0	1598,0	20	20
<b>14</b>	33	3,0	352,0	272,0	2340,0	1870,0	20	20
<b>15</b>	33	1,8	382,0	314,0	2722,0	2184,0	22	20
<b>16</b>	33	1,7	380,0	310,0	3102,0	2494,0	18	20
<b>17</b>	32	1,2	338,0	290,0	3440,0	2784,0	20	20
<b>18</b>	27	1,4	430,0	468,0	3870,0	3252,0	18	20
<b>19</b>	27	0,9	354,0	354,0	4224,0	3606,0	14	14
<b>20</b>	25	2,1	300,0	290,0	4524,0	3896,0	12	10
<b>21</b>	25	0,7	450,0	530,0	4974,0	4426,0	10	12

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

**Tabela 9** — Planilha de dados do experimento do condensador externo

Hora	19/11/2022				22/11/2022			
	Produção instantânea do condensador	Produção acumulada do condensador	Produção Total instantânea D2 + PC	Produção Total acumulada D2 + PC	Produção instantânea do condensador	Produção acumulada do condensador	Produção Total instantânea D2 + PC	Produção Total acumulada do D2 + PC
<b>07:00</b>	0	0	160,0	160,0	60	60	250,0	250,0
<b>07:30</b>	36	36	68,0	228,0	10	70	60,0	310,0
<b>08:00</b>	22	58	96,0	324,0	14	84	74,0	384,0
<b>08:30</b>	18	76	106,0	430,0	16	100	56,0	440,0
<b>09:00</b>	24	100	110,0	540,0	14	114	66,0	506,0
<b>09:30</b>	22	122	156,0	696,0	14	128	94,0	600,0
<b>10:00</b>	36	158	266,0	962,0	16	144	100,0	700,0
<b>10:30</b>	80	238	460,0	1422,0	50	194	160,0	860,0
<b>11:00</b>	80	318	490,0	1912,0	100	294	226,0	1086,0
<b>11:30</b>	60	378	558,0	2470,0	80	374	236,0	1322,0
<b>12:00</b>	60	438	640,0	3110,0	60	434	260,0	1582,0
<b>12:30</b>	54	492	608,0	3718,0	80	514	290,0	1872,0
<b>13:00</b>	50	542	620,0	4338,0	74	588	314,0	2186,0
<b>13:30</b>	90	632	700,0	5038,0	64	652	336,0	2522,0
<b>14:00</b>	110	742	730,0	5768,0	50	702	364,0	2886,0
<b>14:30</b>	50	792	610,0	6378,0	40	742	350,0	3236,0
<b>15:00</b>	50	842	600,0	6978,0	30	772	320,0	3556,0
<b>15:30</b>	60	902	510,0	7488,0	54	826	522,0	4078,0
<b>16:00</b>	40	942	470,0	7958,0	30	856	384,0	4462,0
<b>16:30</b>	30	972	420,0	8378,0	20	876	310,0	4772,0
<b>17:00</b>	20	992	240,0	8618,0	10	886	540,0	5312,0

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.