



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS DE RUSSAS**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ARI LUCAS SANTOS OLIVEIRA**

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UM DESSALINIZADOR SOLAR TIPO  
TANQUE COM TETO REMOVÍVEL**

**RUSSAS**

**2021**

ARI LUCAS SANTOS OLIVEIRA

DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UM DESSALINIZADOR SOLAR TIPO  
TANQUE COM TETO REMOVÍVEL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, *Campus* de Russas, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof(a). Dr(a). Silvia Teles Viana

RUSSAS

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

O45d Oliveira, Ari Lucas Santos.  
Desenvolvimento e análise de um dessalinizador solar tipo tanque com teto removível / Ari Lucas Santos Oliveira. – 2021.  
74 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Mecânica, Russas, 2021.  
Orientação: Profa. Dra. Sílvia Teles Viana.

1. Dessalinizador Solar. 2. Radiação Solar. 3. Tecnologias de Dessalinização. 4. Água Dessalinizada. I. Título.

CDD 620.1

---

ARI LUCAS SANTOS OLIVEIRA

DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UM DESSALINIZADOR SOLAR TIPO  
TANQUE COM TETO REMOVÍVEL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, *Campus* de Russas, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em: 07/10/2021

BANCA EXAMINADORA

---

Prof(a). Dr(a). Silvia Teles Viana (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Camilo Augusto Santos Costa  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Ms. Ramon Rudá Brito Medeiros  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Ariosvaldo e Maria de  
Lourdes.

Às minhas irmãs, Luana e Lívia.

À minha amiga Cristiane

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por todo amor e por ter me dado forças e paciência para trilhar este longo caminho. A Ti toda honra e toda glória.

Aos meus pais Ariosvaldo e Maria de Lourdes, que sempre investiram em minha educação e acreditaram no meu sucesso. Sou grato por tudo que fazem por mim, por todo apoio, por todo amor e por serem exemplo para mim e minhas irmãs. Agradeço também pelo apoio financeiro para o desenvolvimento deste projeto.

Às minhas queridas irmãs Luana e Lívia pelo companheirismo e por todo amor. À Lívia agradeço pela companhia, por suportar meus estresses diários e pelas diversas vezes que me ajudou neste trabalho. À Luana agradeço por todas as orações e todos os conselhos e conversas e, mesmo distante, por sempre se fazer presente em minha vida.

À dona Edinisia por ser como uma segunda mãe para mim. Sou grato por todo amor e apoio, e por ser minha confidente e amiga fiel. Agradeço por todas as vezes que foi meu porto seguro.

À minha amiga Cristiane (Cris) pela grande amizade e por todo apoio neste trabalho. Agradeço por sempre estar presente em todos os momentos da minha vida e por ter me ajudado em todas as etapas deste projeto, desde a construção do protótipo até a fase de testes e escrita deste trabalho. Sempre serei grato pelo que fez e faz por mim.

À minha amiga/irmã Lara por ter me ajudado a criar foco e disciplina e por ser a melhor companheira de estudos que eu poderia ter. Agradeço por ter mudado minha vida e por sempre apoiar meus sonhos.

À minha amiga Samille Kricia, que além de ser uma amiga e aluna excepcional, foi uma grande professora. Se eu cheguei até o fim deste curso foi graças a sua paciência para me ensinar cada disciplina que tive dificuldade.

Ao meu amigo/irmão Matheus (Baiano) pela parceria, por estar comigo nos momentos bons e ruins e por ter me ensinado a ser mais paciente e compreensivo. Espero realizar cada coisa que sonhamos juntos.

Ao meu grande amigo Rafael Pitombeira por todo amor e carinho que teve por mim durante o tempo que estive no *Campus*. Serei eternamente grato pela sua amizade e por ter te conhecido.

À minha querida prima Letícia pela grande amizade, por todos os conselhos e conversas, e por sempre estar me apoiando e não me deixar desistir dos meus objetivos.

Às minhas amigas Aline, Fernanda (Baiana) e Michelle que, juntamente com Lara, formavam meu grupinho. Agradeço por todos os momentos felizes e pela força para nunca desistir.

Ao meu amigo Joeliton por me ajudar na construção do dessalinizador e à minha amiga Ana Livia por ter me ajudado na obtenção de alguns dados do projeto e pela companhia durante os testes do protótipo.

À minha amiga Laura por sempre acreditar em mim e me dar forças para seguir em busca de meus sonhos. Sou grato também por sua ajuda na elaboração do projeto e na confecção da cobertura do dessalinizador.

Aos meus amigos Caio César, Luiz Fernando (Nando), Isaac Chaves, Vinícius Castro e Edgar pelas longas conversas noturnas, pela companhia em vários momentos e por todo apoio.

Aos meus amigos Paulo e Kethlen pela companhia durante este período de pandemia. Sou grato pelos momentos de felicidade que me proporcionaram durante este período difícil.

Aos meus amigos Ana Júlia, Ana Clara, Marcela e Ivan (Gasparzinho), que mesmo distantes trouxeram alegria para as minhas noites, tornando este período bem mais leve.

Aos meus amigos Lincoln e Cibele, grandes amigos que a Engenharia Química me deu. Sou grato pela amizade que suportou o tempo e a distância, e que cresce a cada dia mais.

A todos meus amigos da UFERSA, em especial a minha amiga Millene que, mesmo distante, sempre esteve torcendo por mim.

À minha amiga Nailena por todos os conselhos e conversas e por ter me dado uma segunda família. Sou grato por ter conhecido sua mãe, Gildelena, e suas irmãs, Renata e Vitória, que se tornaram grandes amigas. Agradeço por sempre me acolherem.

À minha amiga Macilânia pela amizade de longa data e por sempre torcer pelo meu sucesso. Agradeço por toda a alegria que me proporciona e pelo seu carinho.

Ao Lini Jorge e sua equipe por todo apoio prestado durante a instalação do dessalinizador no *Campus* de Russas.

A todos os professores que fizeram parte da minha graduação, em especial aos professores Dr(a). Silvia Viana, Me. Ramon Rudá e Dr. Cândido Jorge pela amizade, pelos conselhos e por todo apoio. A vocês toda minha gratidão.

Por fim, agradeço a todos os amigos do curso de Engenharia Mecânica e aos amigos dos demais cursos do *Campus* de Russas. Sou grato por cada experiência vivida e trocada durante o período de graduação.

“Concentre todos seus pensamentos na tarefa que está realizando. Os raios de Sol não queimam até que sejam colocados em foco.”

Alexander Graham Bell

## RESUMO

A escassez de água de boa qualidade ainda afeta muitos locais no Brasil, principalmente a região Nordeste, a qual, além de problemas com o abastecimento de água, sofre ainda com a elevada salinidade de seus corpos hídricos. Apesar da escassez de recursos hídricos, a região possui boa disponibilidade de radiação solar durante grande parte do ano. Desta forma, este trabalho teve como objetivo desenvolver e analisar um dessalinizador solar do tipo tanque, com o intuito de reduzir a quantidade de sais presentes na água, além de avaliar a eficiência do processo de dessalinização. Para isso, foi confeccionado um protótipo utilizando materiais de fácil acesso e de menor custo possível, disponíveis no comércio local. Para a análise do dessalinizador foram implantados sensores de temperatura tanto na parte interna, como na parte externa, com o intuito de monitorá-lo no decorrer do dia. Além disso, a temperatura do local e a radiação solar global também foram coletadas. A água dessalinizada durante o processo foi coletada em um recipiente e medida ao final de cada dia. Já a eficiência do processo de dessalinização foi avaliada pela redução dos sólidos totais dissolvidos na água. O dessalinizador mostrou uma produção de 1750 ml de água e uma eficiência de 22,89% no dia com maior radiação solar global, valores considerados satisfatórios, enquanto que a redução dos sólidos totais dissolvidos foi de 99%, comprovando a eficiência do processo de dessalinização.

**Palavras-chave:** Dessalinizador Solar; Radiação Solar; Tecnologias de Dessalinização; Água Dessalinizada.

## **ABSTRACT**

The scarcity of good quality water still affects many places in Brazil, especially the Northeast region, which, in addition to problems with water supply, still suffers from the high salinity of its water bodies. Despite the scarcity of water resources, the region has good availability of solar radiation for most of the year. Thus, this work aimed to develop and analyze a tank-type solar desalinator, in order to reduce the amount of salts present in the water, in addition to evaluating the efficiency of the desalination process. For this, a prototype was made using materials that are easily accessible and at the lowest possible cost, available in the local market. For the analysis of the desalinator, temperature sensors were implanted both inside and outside, in order to monitor it throughout the day. In addition, the local temperature and incident radiation were also collected. The water desalinated during the process was collected in a container and measured at the end of each day. The efficiency of the desalination process was evaluated by the reduction of total dissolved solids in the water. The desalinator showed a production of 1750 ml of water and an efficiency of 22.89% on the day with the highest incident radiation, values considered satisfactory, while the reduction in total dissolved solids was 99%, proving the efficiency of the desalination process.

**Keywords:** Solar Desalinator; Solar Radiation; Desalination Technologies; Desalinated Water

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição da água na Terra .....	18
Figura 2 – Representação da radiação difusa, direta e refletida .....	22
Figura 3 – Esquema do processo de dessalinização por múltiplos estágios <i>flash</i> .....	25
Figura 4 – Esquema do processo de dessalinização por múltiplos efeitos .....	26
Figura 5 – Esquema do processo de dessalinização por umidificação - desumidificação .....	27
Figura 6 – Esquema do processo de dessalinização por simples efeito .....	28
Figura 7 – Dessalinizador solar com teto removível .....	31
Figura 8 – Fechamento do tanque após o processo de rebitagem .....	33
Figura 9 – Canaletas fixadas no tanque após o processo de rebitagem .....	33
Figura 10 – Cap roscável utilizado para o fechamento da entrada de água .....	34
Figura 11 – Tanque de alumínio finalizado .....	34
Figura 12 – Base do dessalinizador .....	35
Figura 13 – Cobertura do dessalinizador sobreposta nas canaletas .....	36
Figura 14 – Borracha para vedação vidro-tanque .....	37
Figura 15 – Alça da cobertura do dessalinizador .....	37
Figura 16 – Acoplamento da mangueira na saída da calha .....	38
Figura 17 – Mangueiras conectadas ao recipiente da água dessalinizada .....	38
Figura 18 – Amostras de água antes e após o processo de dessalinização .....	39
Figura 19 – Sensores de temperatura DHT11: (a) vidro e (b) fundo .....	40
Figura 20 – Sensores DS18B20 na parte interna do dessalinizador .....	41
Figura 21 – Valores de temperatura e radiação no dia 08/02/2021 .....	47
Figura 22 – Locais de vazamento de vapor d'água .....	49
Figura 23 – Relação entre a quantidade de água produzida e a radiação média .....	50
Figura 24 – Valores de condutividade elétrica das amostras de água .....	52
Figura 25 – Valores dos sólidos totais dissolvidos das amostras de água .....	53
Figura 26 – Valores de temperatura e radiação no dia 02/02/2021 .....	66
Figura 27 – Valores de temperatura e radiação no dia 03/02/2021 .....	67
Figura 28 – Valores de temperatura e radiação no dia 04/02/2021 .....	68
Figura 29 – Valores de temperatura e radiação no dia 06/02/2021 .....	69
Figura 30 – Vista 3D do protótipo elaborado no <i>software Solidworks</i> .....	70
Figura 31 – Corte frontal e lateral do protótipo elaborado no <i>software Solidworks</i> .....	71
Figura 32 – Vistas do protótipo elaborado no <i>software Solidworks</i> .....	72

Figura 33 – Medidas relacionadas à cobertura do dessalinizador em mm .....	73
Figura 34 – Medidas relacionadas à bacia do dessalinizador em mm.....	74
Figura 35 – Medidas relacionadas ao isolante térmico do dessalinizador em mm.....	75
Figura 36 – Medidas relacionadas ao caixote de madeira do dessalinizador em mm.....	76

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação da água de acordo com a concentração de sólidos dissolvidos .....	23
Tabela 2 – Lista de materiais dos componentes do dessalinizador e suas características relevantes para o projeto.....	43
Tabela 3 – Custo dos materiais utilizados no protótipo.....	45
Tabela 4 – Quantidade de água produzida e radiação média diária .....	49
Tabela 5 – Cálculo da eficiência do dessalinizador.....	51
Tabela 6 – Valores diários dos sólidos totais dissolvidos e da condutividade elétrica .....	51

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASPE	Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado do Espírito Santo
ASTM	American Society for Testing and Materials
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
ED	Electrodialysis Desalination (Dessalinização por Eletrodiálise)
EPS	Expanded Polystyrene (Poliestireno Expandido)
EVA	Ethylene-Vinyl Acetate
G.Hyd	Gas Hydrate
HDH	Humidification-Dehumidification Desalination (Dessalinização por Umidificação-Desumidificação)
I.Ex	Ion-Exchange Desalination
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
LLE	Liquid-Liquid Extration
MED	Multieffect Desalination (Dessalinização por Múltiplos Efeitos)
MSF	Multistage Desalination Flash (Dessalinização por Múltiplos Estágios Flash)
MSG	Manufacturer's Standard Gauge
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PVC	Polyvinyl Chloride (Policloreto de Vinila)
RO	Reverse Osmose (Osmose Reversa)
STD	Simple Effect Desalinations (Dessalinização por Simples Efeito)
WRC	The World Radiation Center

## LISTA DE SIMBOLOS

$A_t$	Área do tanque coberta por água	$m^2$
$G_{sc}$	Constante Solar	$\frac{W}{m^2}$
$h_{fg}$	Entalpia de vaporização da água	$\frac{kJ}{kg}$
$I$	Radiação solar global	$\frac{kJ}{m^2}$
$m_t$	Massa total de água dessalinizada	$kg$

### *Letras Gregas*

$\eta$	Eficiência do dessalinizador	%
--------	------------------------------	---

## SUMÁRIO

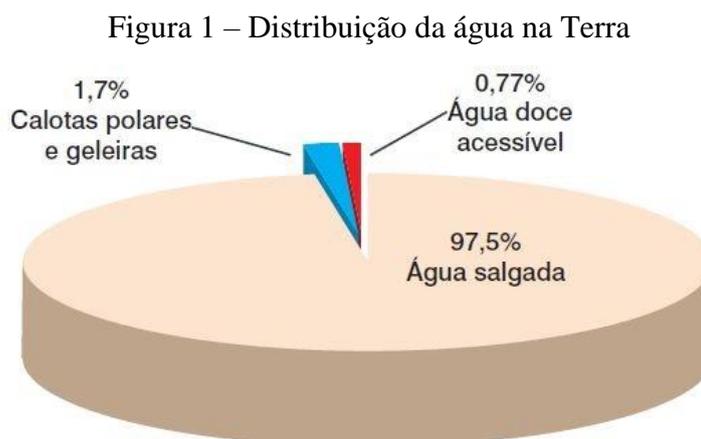
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
1.1	Objetivos.....	19
1.1.1	<i>Objetivo Geral</i> .....	19
1.1.2	<i>Objetivos Específicos</i> .....	19
1.2	Estrutura do Trabalho .....	19
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>21</b>
2.1	Radiação Solar .....	21
2.2	Dessalinização .....	23
2.3	Tecnologias de Dessalinização .....	24
2.3.1	<i>Dessalinização por Múltiplos Estágios Flash (Multistage Desalination Flash – MSF)</i> .....	24
2.3.2	<i>Dessalinização por Múltiplos Efeitos (Multieffect Desalination – MED)</i> .....	25
2.3.3	<i>Dessalinização por Umidificação – Desumidificação (Humidification – Dehumidification Desalination – HDH)</i> .....	26
2.3.4	<i>Dessalinização por Simple Efeito (Simple Effect Desalination – SED)</i> .....	27
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>30</b>
3.1	Princípio de Funcionamento do Dessalinizador Solar Simples com Teto Removível .....	30
3.1.1	<i>Parâmetro de Desempenho do Dessalinizador</i> .....	31
3.2	O Protótipo.....	32
3.2.1	<i>Processo de Construção Mecânica do Dessalinizador</i> .....	32
3.3	Experimentos .....	38
3.3.1	<i>Medições Experimentais</i> .....	40
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>43</b>
4.1	Análise dos Materiais Utilizados na Fabricação do Protótipo .....	43
4.1.1	<i>Custo dos Materiais de Construção do Protótipo</i> .....	44
4.2	Análise Térmica do Protótipo.....	46
4.3	Testes de Produção .....	48
4.4	Eficiência do Protótipo.....	50
4.5	Eficiência do Processo de Dessalinização .....	51
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>54</b>
5.1	Trabalhos Futuros .....	55

<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>56</b>
<b>APÊNDICE A – CÓDIGO ARDUINO.....</b>	<b>60</b>
<b>APÊNDICE B – RESULTADOS DOS TESTES REALIZADOS NO DIA</b>	
<b>02/02/2021 .....</b>	<b>66</b>
<b>APÊNDICE C – RESULTADOS DOS TESTES REALIZADOS NO DIA</b>	
<b>03/02/2021 .....</b>	<b>67</b>
<b>APÊNDICE D – RESULTADOS DOS TESTES REALIZADOS NO DIA</b>	
<b>04/02/2021 .....</b>	<b>68</b>
<b>APÊNDICE E – RESULTADOS DOS TESTES REALIZADOS NO DIA</b>	
<b>06/02/2021 .....</b>	<b>69</b>
<b>APÊNDICE F – VISTA 3D DO DESSALINIZADOR.....</b>	<b>70</b>
<b>APÊNDICE G – CORTES FRONTAL E LATERAL DO DESSALINIZADOR ...</b>	<b>71</b>
<b>APÊNDICE H – VISTAS SUPERIOR, FRONTAL, LATERAL E POSTERIOR</b>	
<b>DO DESSALINIZADOR .....</b>	<b>72</b>
<b>APÊNDICE I – MEDIDAS RELACIONADAS À COBERTURA .....</b>	<b>73</b>
<b>APÊNDICE J – MEDIDAS RELACIONADAS À BACIA .....</b>	<b>74</b>
<b>APÊNDICE K – MEDIDAS RELACIONADAS AO ISOLANTE TÉRMICO.....</b>	<b>75</b>
<b>APÊNDICE L – MEDIDAS RELACIONADAS AO CAIXOTE DE MADEIRA ..</b>	<b>76</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A água é considerada um dos recursos naturais mais abundantes da Terra, sendo responsável por cobrir cerca de 71% da superfície terrestre. Mesmo assim, muitos locais ainda não possuem acesso a água de boa qualidade.

De toda água existente, somente cerca de 2,5% é considerada água doce, os outros 97,5% estão presentes nos mares e oceanos, na forma de água salgada. Do total de água doce disponível, apenas 0,77% está acessível para o nosso consumo (em rios, lagos, lençóis freáticos, atmosfera, entre outros), enquanto o restante está armazenada em geleiras e calotas polares (GRASSI, 2001). A Figura 1 mostra um gráfico com a distribuição de água no planeta Terra.



Fonte: Grassi (2001).

O Brasil dispõe de uma privilegiada oferta de recursos hídricos, concentrando cerca de 11,6% da água doce do planeta. Porém, há uma má distribuição destas águas, onde a Amazônia, com apenas 7% da população do país, possui 70% da água doce, enquanto a região nordeste fica somente com 3% deste recurso (LOPES, 2013).

A região nordeste se caracteriza principalmente pela seca no sertão, possuindo, assim, vários problemas relacionados ao abastecimento de água. A perfuração de poços, a criação de barragens e transposição de rios são as soluções mais utilizadas para suprir a falta de água. Porém, mesmo com estas soluções, a salinidade da água ainda é um grande problema (XIMENES, 2016).

Levando em conta que o Nordeste é muito favorecido com radiação solar durante boa parte do ano, uma solução viável para o problema de salinidade da água seria a utilização de dessalinizadores que utilizam energia solar térmica como fonte de energia.

Desta forma, se faz necessário estudar e desenvolver sistemas de dessalinização baratos, eficientes, com materiais acessíveis e com fontes de energia que não agridam ao meio ambiente, como é o caso da dessalinização solar.

## **1.1 Objetivos**

### ***1.1.1 Objetivo Geral***

Este trabalho tem por objetivo desenvolver e analisar o desempenho de um dessalinizador solar do tipo tanque com cobertura removível e avaliar a eficiência do processo de dessalinização.

### ***1.1.2 Objetivos Específicos***

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- Avaliar os materiais utilizados para a construção do protótipo e os custos relacionados a estes;
- Avaliar as temperaturas internas e externas do dessalinizador no decorrer do dia;
- Analisar os valores de radiação solar global no decorrer do dia;
- Avaliar a produção diária de água dessalinizada;
- Determinar a eficiência do dessalinizador;
- Avaliar a eficiência do processo de dessalinização.

## **1.2 Estrutura do Trabalho**

No capítulo a seguir, será apresentada uma revisão da literatura contendo os conceitos relacionados ao processo de dessalinização térmica.

No Capítulo 3, serão apresentados os materiais utilizados e a metodologia de desenvolvimento e análise do dessalinizador solar simples.

Os resultados sobre a análise do protótipo e da água produzida serão mostrados no Capítulo 4 e a conclusão do trabalho, no Capítulo 5.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica, mostrando fundamentos importantes para o entendimento deste trabalho.

O capítulo se divide em três partes. A primeira parte mostra conceitos relacionados a radiação. Na segunda estão apresentados conceitos relacionados ao processo de dessalinização. A terceira parte do capítulo mostra as tecnologias utilizadas para dessalinização da água, dando ênfase na dessalinização solar térmica, com foco na dessalinização por simples efeito.

### 2.1 Radiação Solar

O Sol é uma esfera gasosa e extremamente quente, com diâmetro de  $1,39 \times 10^9$  m e, em média, está a  $1,5 \times 10^{11}$  m de distância da terra. Sua superfície atinge uma temperatura de aproximadamente 5778 K (5505 °C). (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

A energia liberada pelo Sol, devido as complexas reações que ocorrem em sua superfície, é denominada radiação solar. A radiação pode ser definida como a forma de transferência de energia em que não há a necessidade de um meio material para sua propagação. De acordo com Soares (2004), a radiação solar pode ser compreendida como a superposição de ondas eletromagnéticas que possuem comprimentos de ondas na faixa de 0,25  $\mu\text{m}$  a 4  $\mu\text{m}$ .

A radiação solar recebida acima da atmosfera é denominada radiação solar extraterrestre. Lopes (2013), afirma que, até o desenvolvimento de novas tecnologias, os valores da intensidade da radiação solar extraterrestre eram apenas estimados. Porém, com o avanço tecnológico, diversos experimentos foram realizados utilizando diferentes tipos de instrumentos de medição, encontrando, a partir destes testes, o valor de  $1353 \text{ W/m}^2 + 1,5\%$ , sendo este valor aceito pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM). Nos anos 80, após a realização de novas medições, o valor de  $1367 \text{ W/m}^2 + 1\%$  passou a ser recomendado, sendo este valor reconhecido pelo *The World Radiation Center* (WRC). Este valor corresponde a intensidade de radiação extraterrestre que chega a Terra e é denominado Constante Solar ( $G_{sc}$ ).

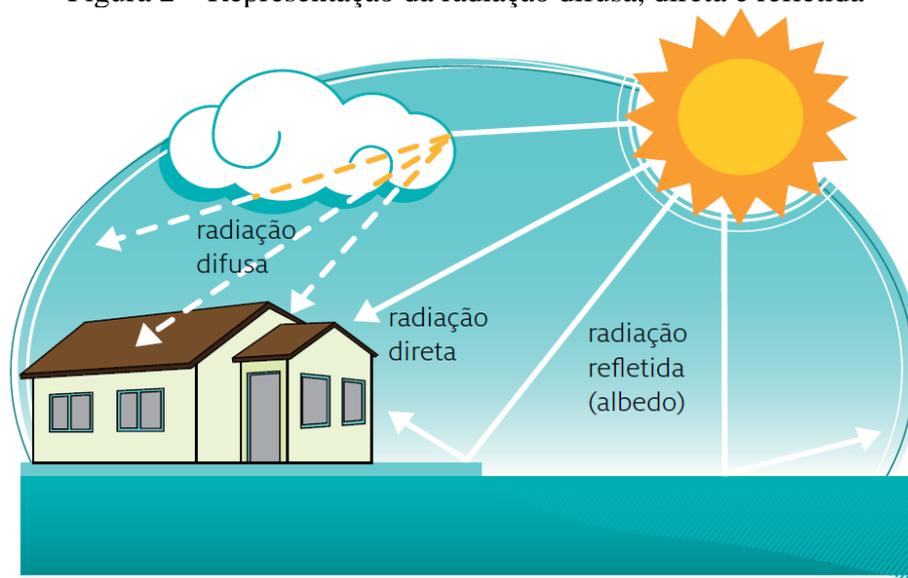
A intensidade de radiação que chega na atmosfera da Terra é diferente da experimentada pela sua superfície. A atmosfera atenua esta radiação por meio da reflexão, dispersão e absorção. Logo, a radiação que toca a superfície terrestre é menor que o valor da Constante

Solar. Pereira (2010) afirma que a radiação que atinge a superfície pode ser decomposta em três componentes (Figura 2):

- Radiação direta: constituída pelos raios solares recebidos diretamente do Sol, isto é, a parte que não foi absorvida pela atmosfera (aproximadamente 70% da radiação total).
- Radiação difusa: originada pelos raios não diretos e dispersos pela atmosfera. Este tipo de radiação é variável no tempo, ou seja, é dissipada pelas nuvens e poeiras em suspensão (cerca de 28% da radiação total).
- Radiação refletida: formada pela parcela de radiação que é refletida ao incidir sobre qualquer corpo, ou seja, é a radiação que chega a uma superfície ao ser refletida por outra superfície (aproximadamente 2% da radiação total).

A soma das radiações difusa e direta é denominada radiação global.

Figura 2 – Representação da radiação difusa, direta e refletida



Fonte: ASPE (2013).

Os instrumentos normalmente utilizados para medir a intensidade de radiação solar são:

- Piranômetro: utilizado para medir a radiação global.
- Pireliômetro: usado para medir a radiação direta.

Segundo Leite (2019), a energia solar pode ser utilizada em diversos campos diferentes, podendo ser usada em processos elétricos, químicos ou térmicos. A sua aplicação varia desde a geração de energia elétrica em placas fotovoltaicas até o aquecimento de água em residências ou setores industriais.

## 2.2 Dessalinização

A dessalinização é um processo que consiste na retirada parcial ou total dos sais e minerais presentes na água salina ou salobra, reduzindo a salinidade da solução. A finalidade deste processo, quando se refere a retirada parcial destes componentes, é a obtenção de água potável, ou seja, que possa ser utilizada para consumo humano ou animal. Já no caso da retirada total ou desmineralização, a água pode ser usada no setor industrial.

Logan (1965 apud OLIVEIRA, 2005) define salinidade como a concentração total dos íons dissolvidos. Logo, quanto maior a salinidade da água, maior será a quantidade de sólidos totais dissolvidos e, como os íons são partículas eletricamente carregadas, maior será a condutividade elétrica.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) por meio da resolução 357/2005 classifica as águas de acordo com a salinidade. A água é considerada doce quando possui salinidade inferior a 0,5‰, salobra quando a salinidade se encontra entre 0,5‰ e 30‰ e salina quando o valor da salinidade está acima de 30‰ (BRASIL, 2005).

A água também pode ser classificada de acordo com a quantidade de sólidos totais dissolvidos. A Tabela 1 mostra os tipos de água e suas respectivas concentrações de sólidos dissolvidos.

Tabela 1 – Classificação da água de acordo com a concentração de sólidos dissolvidos

Descrição	Sólidos dissolvidos (mg/l)
Água potável	< 1000
Água levemente salgada	1000 a 5000
Água moderadamente salgada	5000 a 15000
Água fortemente salgada	15000 a 35000
Água do mar	35000

Fonte: Adaptado de *Foundation for Water Research* (2015).

## 2.3 Tecnologias de Dessalinização

Existem diversos processos para a dessalinização da água. De acordo com Youssef *et al.* (2014), as principais tecnologias de dessalinização se dividem em três grupos:

- Dessalinização por membrana;
- Dessalinização química;
- Dessalinização térmica.

No processo de dessalinização por membrana, a pressão fornecida permite a rejeição dos constituintes dissolvidos na água que alimenta o sistema. As membranas são permeáveis à água, porém são impermeáveis para as substâncias nela presentes, por este motivo são rejeitadas e removidas (GRUESO-DOMÍNGUEZ *et al.*, 2019). Os principais processos de dessalinização por membrana são a eletrodialise (ED) e a osmose reversa (RO), porém existem outros.

Já a dessalinização química consiste na retirada dos sais da água por meio de processos químicos. Neste tipo de dessalinização, Youssef *et al.* (2014) cita os seguintes processos: *ion-exchange desalination* (I.Ex), *liquid-liquid extraction* (LLE) e *gas hydrate* (G.Hyd).

De acordo com Gaio (2016), o processo de dessalinização térmica tem como base o processo natural do ciclo da água e é assegurado por métodos de destilação. A água é aquecida até ocorrer a evaporação, após isso ocorre a condensação e por fim a precipitação.

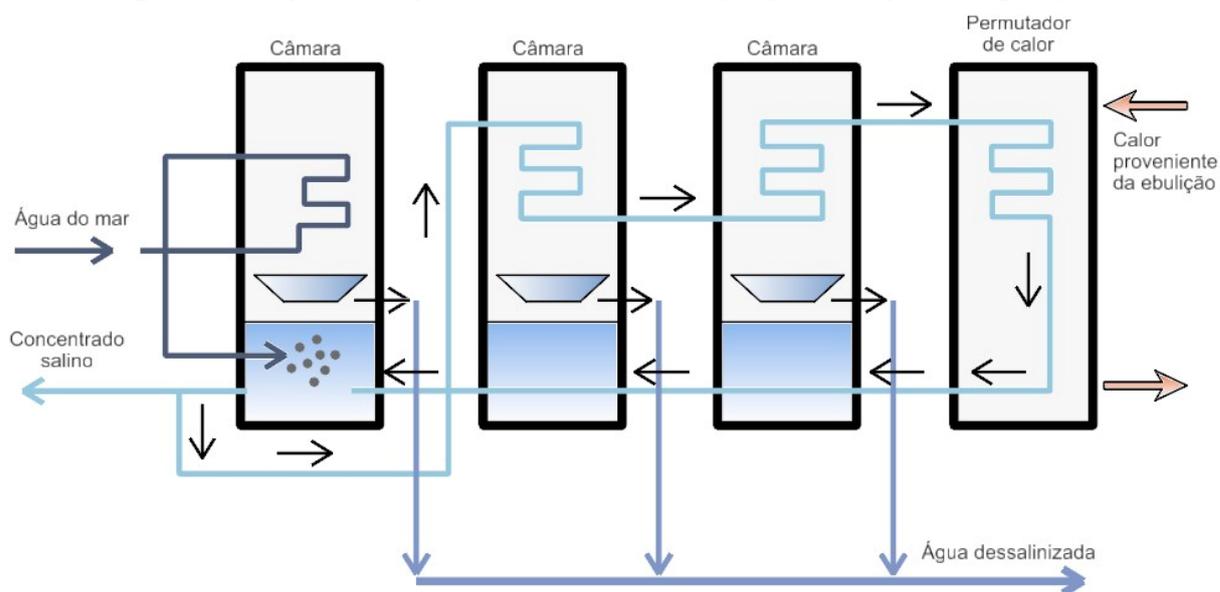
A dessalinização térmica utiliza energia na forma de calor para a remoção ou redução dos sais dissolvidos na água. Combustíveis fósseis, resistência elétrica, reações químicas exotérmicas e energia solar, podem ser usados como fontes de calor neste método de destilação. A junção de duas ou mais destas fontes dão origem a sistemas denominados híbridos. Os principais processos de dessalinização térmica são: Dessalinização por Múltiplos Estágios *Flash* (MSF), Dessalinização por Múltiplos Efeitos (MED), Dessalinização por Umidificação-Desumidificação (HDH) e Dessalinização por Simples Efeito (SED) (DUTRA, 2016).

### 2.3.1 Dessalinização por Múltiplos Estágios *Flash* (*Multistage Desalination Flash – MSF*)

No processo de dessalinização por múltiplos estágios *flash*, a água de alimentação é aquecida em um recipiente até atingir uma temperatura menor que a temperatura de ebulição. Em seguida, esta água flui por meio de uma série de estágios, onde a pressão ambiente mais baixa facilita seu aquecimento e faz com que ferva rapidamente e evapore. Neste processo, apenas uma pequena parte da água é convertida em vapor, já que a evaporação depende principalmente da pressão dentro do estágio. Isso ocorre, pois, o processo de ebulição continua

até que a água esfrie e a vaporização pare. O vapor gerado é convertido em água doce ao ser condensado nos tubos de trocadores de calor que passam por cada estágio (SHATAT; RIFFAT, 2014). A Figura 3 mostra o esquema de funcionamento de um dessalinizador por múltiplos estágios *flash*.

Figura 3 – Esquema do processo de dessalinização por múltiplos estágios *flash*



Fonte: Araújo (2013).

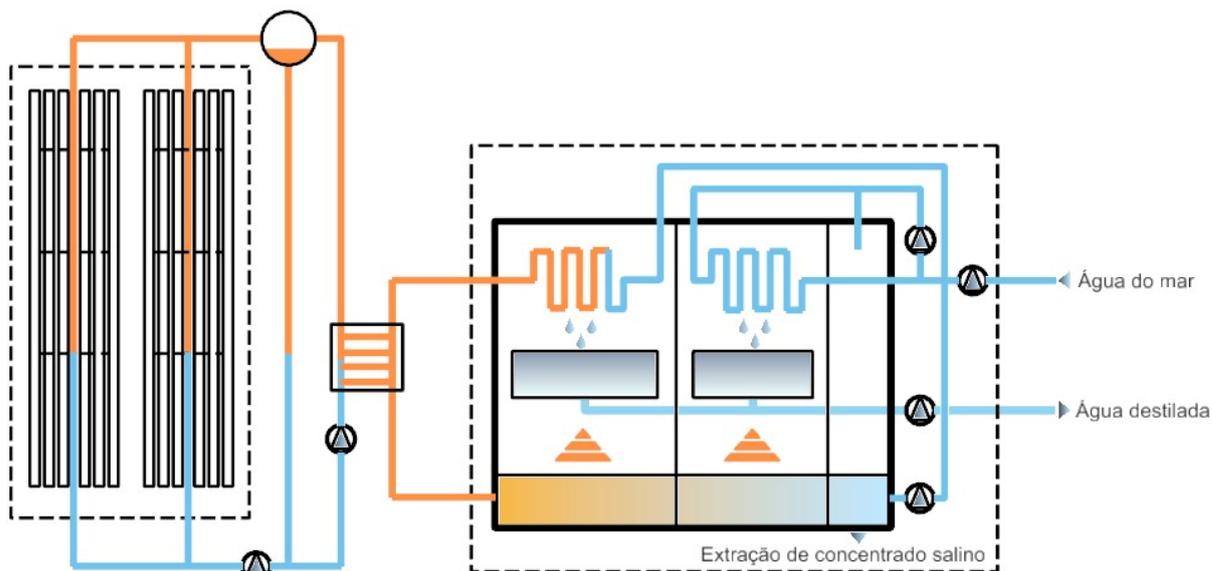
Segundo Souza (2002), plantas de MSF geralmente operam a altas temperaturas, variando de 90 °C a 120 °C. Quanto maior a temperatura, maior a eficiência do processo, porém elevar a temperatura a valores acima de 120 °C, aumenta o potencial para a formação de crostas de sais nas superfícies de metal, acelerando a corrosão nestas superfícies.

### 2.3.2 Dessalinização por Múltiplos Efeitos (Multieffect Desalination – MED)

No processo de dessalinização por múltiplos efeitos, a água do mar é evaporada por várias etapas. Na primeira etapa, é necessário a utilização de uma fonte de energia externa. Já nas etapas seguintes a fonte usada é o calor produzido pela condensação do vapor. Este processo se assemelha ao MSF, já que também possui diversos estágios em série, porém, neste caso, o princípio de redução de pressão é aplicado. À medida que a temperatura é reduzida, o ponto de ebulição da água salina também decai. A redução do ponto de ebulição resulta na fervura da água salgada por diversas vezes e condensa a água dessalinizada, sem a necessidade de uma

fonte externa de calor (LEVY, 2008). A Figura 4 mostra o esquema de funcionamento de um dessalinizador por múltiplos efeitos.

Figura 4 – Esquema do processo de dessalinização por múltiplos efeitos



Fonte: Araújo (2013).

De acordo com Guerreiro (2009), o MED, assim como o MSF, pode utilizar diversas fontes de calor, além disso, este processo tem capacidade de dessalinizar grandes quantidades de água salina. Segundo Narayan *et al.* (2010), o desempenho deste sistema de dessalinização é proporcional a quantidade de estágios.

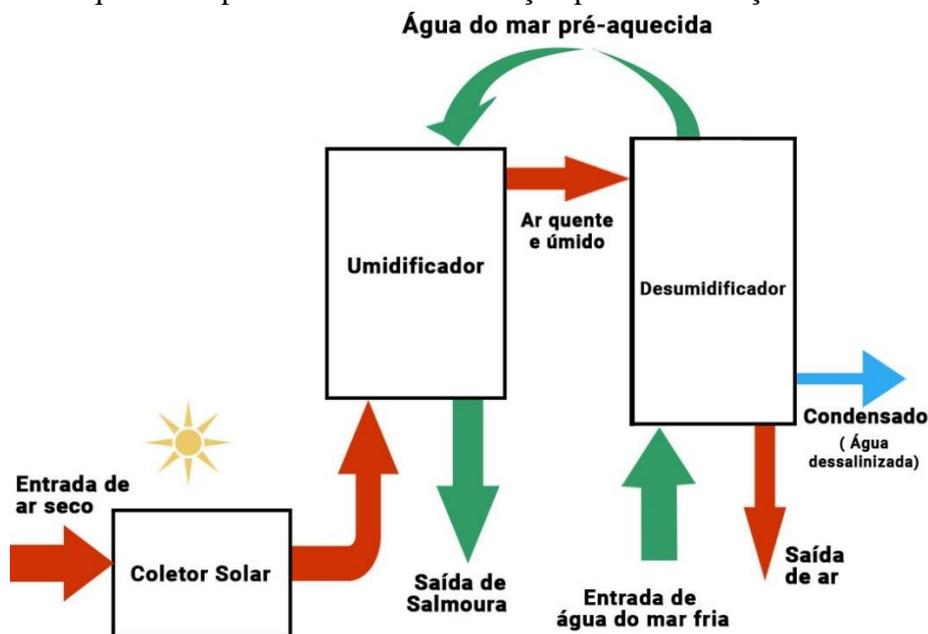
### 2.3.3 Dessalinização por Umidificação – Desumidificação (Humidification – Dehumidification Desalination – HDH)

No processo de dessalinização por umidificação e desumidificação, o sistema é composto basicamente por um umidificador (evaporador), um desumidificador (condensador), bombas e tubulações (LAWAL *et al.*, 2018). As principais configurações deste processo são: ciclos aquecidos com água e ciclos aquecidos com ar (SHARQAWY *et al.*, 2014).

No umidificador, o ar e a água, aquecidos previamente por uma fonte externa de calor, estão em contato, e, por conta disso, a umidade do ar aumenta para a condição de saturação. O ar úmido e quente sai do evaporador e entra no condensador. No desumidificador, o ar umidificado entra em contato com uma superfície resfriada, provocando a condensação do vapor e, conseqüentemente, produzindo água doce (MEHRGOO; AMIDPOUR, 2011). A

Figura 5 mostra o esquema de funcionamento de um dessalinizador por umidificação - desumidificação.

Figura 5 – Esquema do processo de dessalinização por umidificação - desumidificação



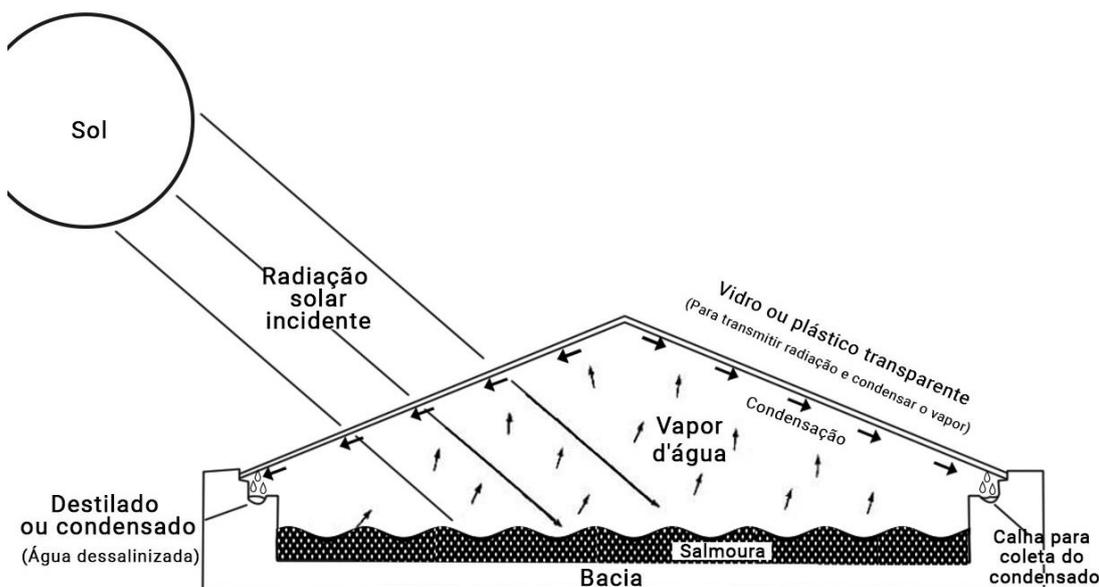
Fonte: Adaptado de Narayan *et al.* (2010).

Segundo Narayan *et al.* (2010), o processo HDH é uma das tecnologias de dessalinização solar mais eficientes, se destacando quando aplicadas em locais isolados, onde não há um fornecimento contínuo de energia elétrica. Nesta planta de dessalinização, podem ser utilizadas fontes de energias renováveis, como energia solar ou geotérmica.

#### 2.3.4 Dessalinização por Simple Efeito (*Simple Effect Desalination – SED*)

No processo de dessalinização por simples efeito, a água contida no dessalinizador é aquecida até que ocorra a evaporação e, em seguida, a condensação do vapor no teto. Por fim, o condensado escoar pela cobertura até cair em canais de coleta. Este tipo de dessalinizador também é conhecido como dessalinizador tipo tanque. Geralmente, neste sistema se utiliza energia solar, porém a operação com outras fontes de energia também é possível. Quando operado de forma híbrida, ou seja, com energia solar e elétrica, é possível operá-lo durante o dia inteiro (DUTRA, 2016). A Figura 6 mostra o esquema de funcionamento de um dessalinizador por simples efeito.

Figura 6 – Esquema do processo de dessalinização por simples efeito



Fonte: Adaptado de Buros *et al.* (1980).

De acordo com Bouchekima (2003), este dessalinizador é uma ótima solução para tratar a água de comunidades em locais isolados, pois não depende de tecnologias avançadas. Além disso, dessalinizadores do tipo tanque são caracterizados pela facilidade de construção, não sendo necessária uma mão de obra especializada, desde que se tenha acesso aos materiais para construí-los. Vale ressaltar que os custos para manutenção e operação são mínimos.

#### 2.3.4.1 Materiais para Construção de um Dessalinizador Solar Tipo Tanque

Segundo Buros *et al.* (1980), diversos materiais podem ser usados para a confecção da bacia, cobertura, paredes, estruturas e canaletas de coleta do condensado, onde a disponibilidade do material no local de implantação é um fator importante. Outro fator relevante é o custo do material, este deve ser mínimo para reduzir os gastos.

Os componentes mais relevantes deste sistema são:

- Tampa;
- Tanque;
- Calhas.

A tampa (cobertura) é um dos componentes mais importante do processo. O material que a compõe, geralmente, é vidro ou plástico transparente. A transparência do material é necessária para que a radiação incidente seja transmitida para o interior do dessalinizador. O

vidro demonstra ser um excelente material, porém costuma ser caro e está sujeito a quebras durante o seu manuseio (BUROS *et al.*, 1980).

A água salina ou salobra ficará contida dentro do tanque (bacia), logo os materiais escolhidos para sua confecção devem ser à prova d'água e possuir resistência à corrosão. Além disso, a superfície deve ser lisa, para uma melhor limpeza, e deve possuir uma boa absorção da radiação incidente, facilitando transformação desta em calor. Outros critérios importantes para a escolha do material são: durabilidade, custo, peso e grau de toxicidade. Dentre os materiais mais utilizados estão os aços diversos, concreto, madeira, fibra de vidro, entre outros (MALUF, 2005).

O propósito das calhas (canaletas) no dessalinizador é a coleta da água condensada e o transporte desta para o recipiente de armazenamento. Este componente fica localizado na base da cobertura. As canaletas devem ser estreitas, para reduzir o sombreamento causado por elas. Além disso, devem possuir características semelhantes à do tanque, já que praticamente serão expostas às mesmas condições. Materiais como aço inox, alumínio revestido, ferro galvanizado e PVC, são os mais utilizados. Já o cobre ou latão devem ser evitados, pois podem trazer riscos à saúde. Na escolha das calhas, fatores como custo, durabilidade e resistência a radiação solar devem ser levados em consideração (MALUF, 2005).

A aplicação de um isolante térmico é importante para a redução da perda de calor para o ambiente. O material isolante deve ser aplicado na parte externa da bacia e deve possuir uma boa resistência térmica. Segundo Costa (2008), os materiais isolantes podem variar bastante. Madeira, plástico, lã de vidro, areia e fibra de agave são alguns dos materiais utilizados para o isolamento térmico do tanque. O poliestireno expandido (EPS) também se destaca como isolante térmico. De acordo com Amianti (2005), o EPS possui baixa condutibilidade térmica, ou seja, dificulta a transferência de calor, possui baixo peso específico e é resistente ao envelhecimento.

A vedação é outro fator importante para a construção do dessalinizador. Para evitar a perda de água e de vapor, um selante deve ser aplicado tanto no vidro, como no tanque, quando necessário. Os vedantes devem possuir resistência à corrosividade e à abrasividade, além de resistir à altas temperaturas. O material mais utilizado para vedação é a borracha de silicone acético (COSTA, 2008).

Componentes como tubulações e válvulas devem ser feitos de materiais similares ao do tanque ou com materiais que se adaptem as características do fluido. O PVC, é o tipo de material mais utilizado para esta aplicação, porém existem outros, só que com custos mais elevados (COSTA, 2008).

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Este capítulo apresenta o dessalinizador solar construído, sendo este do tipo tanque e com teto removível. São apresentados os materiais e a metodologia de montagem, assim como sua operação e metodologia de testes.

Este capítulo está dividido em três partes. Na primeira é explicado o funcionamento do dessalinizador solar simples com teto removível. A segunda parte apresenta o protótipo, explanando o processo de construção e os materiais utilizados. Já na terceira e última parte são descritos os experimentos realizados para analisar o dessalinizador.

#### **3.1 Princípio de Funcionamento do Dessalinizador Solar Simples com Teto Removível**

O dessalinizador solar simples com teto removível é apresentado na Figura 7. Neste dessalinizador, a água é introduzida por meio de um tubo com formato curvo que conecta o exterior com o interior do protótipo. No processo de dessalinização, a irradiação solar atravessa o vidro transparente e chega ao reservatório com água imersa dando início ao processo de aquecimento. Quando a água atinge uma certa temperatura, é dado início ao processo de evaporação. Ao evaporar, o vapor d'água chega ao vidro e é condensado, já que o teto possui uma menor temperatura. Logo, os sais contidos na água continuam no tanque, pois seria necessária uma temperatura superior a  $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$  para evaporá-los. A água condensada no vidro escorre para dentro das canaletas e, em seguida, escoar por meio de mangueiras que estão conectadas a um recipiente, onde a água é coletada.

Figura 7 – Dessalinizador solar com teto removível



Fonte: Autor, 2021.

Finalizado o processo de dessalinização, o teto é removido para a retirada da água salobra e para a limpeza do tanque. A água é retirada por meio de uma válvula contida no fundo do dessalinizador. Realizada a limpeza, o teto é colocado novamente sobre o tanque.

### 3.1.1 Parâmetro de Desempenho do Dessalinizador

O projeto de um dessalinizador tipo tanque se preocupa em alcançar os resultados com o mínimo de gastos possíveis. Porém, a eficiência do protótipo também é um fator relevante neste projeto.

Para avaliar o desempenho do dessalinizador é importante conhecer o valor da radiação solar global e a quantidade de água produzida no decorrer do dia.

De acordo com Duffie e Beckman (2013), o cálculo da eficiência do dessalinizador se dá através da seguinte equação:

$$\eta = \frac{\text{O que é produzido}}{\text{O que é fornecido}} = \frac{m_T \times h_{fg}}{A_t \times I} \quad (1)$$

onde,

$m_T$	Massa total de água dessalinizada
$h_{fg}$	Entalpia de vaporização da água
$A_t$	Área do tanque coberta por água
$I$	Radiação solar global

### 3.2 O Protótipo

Para facilitar a confecção do protótipo, foi feito um desenho esquemático tridimensional do dessalinizador solar, utilizando o *software Solidworks* (Apêndice F). Para construção, foram utilizados materiais de fácil acesso e de menor custo possível, disponíveis na cidade na qual os testes foram realizados, com o intuito de gastar o mínimo de recursos financeiros. Após adquirir todos os materiais necessários, a confecção do dessalinizador foi iniciada, começando pela base e finalizando com o teto, sendo este último removível para facilitar na limpeza e manutenção. Além disso, vale ressaltar que o destilador é móvel, para facilitar o seu manuseio e deslocamento.

O protótipo do dessalinizador solar térmico foi instalado na Universidade Federal do Ceará *Campus* de Russas. A cidade de Russas está localizada a 162 km de Fortaleza, tendo coordenadas geográficas de latitude (S) 4° 56' 25" e longitude (WGr) 37° 58' 33" e altitude de 20,51 m. (IPECE, 2017).

#### 3.2.1 Processo de Construção Mecânica do Dessalinizador

Para a construção do tanque, foi utilizada uma chapa de alumínio de 1,20 mm de espessura (bitola MSG 18). Foram feitos os cortes necessários para facilitar o dobramento, utilizando uma máquina de corte. As partes cortadas formaram rebarbas, sendo estas retiradas com o auxílio de uma lixadeira. O dobramento foi realizado utilizando uma viradeira de chapas manual. Para a fixação das partes dobradas e fechamento do tanque foram utilizados rebites, como mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Fechamento do tanque após o processo de rebitagem



Fonte: Autor, 2021.

Acabado o tanque, foram feitos os furos necessários para colocar as canaletas, a válvula de saída e o tubo de entrada da água. As canaletas foram feitas a partir da junção de dois perfis em L com 1500 mm de comprimento, pois não foram encontrados perfis do tipo U nos comércios locais. Os perfis foram unidos formando um perfil em U, por meio de rebites e silicone, sendo este último utilizado para melhorar a fixação. Um dos lados do perfil foi cortado para não tocar o teto de vidro, caso contrário, impediria o escoamento da água para as canaletas. Já o lado oposto, foi fixado na parede do tanque, também por meio de rebites, como mostra a Figura 9. As canaletas foram fixadas com uma inclinação de  $3,5^\circ$  para melhorar o escoamento da água.

Figura 9 – Canaletas fixadas no tanque após o processo de rebitagem



Fonte: Autor, 2021.

Fixadas as canaletas, foi inserida a válvula de saída da água no fundo do tanque de alumínio. Primeiramente, foi feito um rebaixo no centro do tanque, após isso foi feito o furo para encaixar a válvula. O rebaixo foi necessário para evitar que a borda da válvula impedisse a saída total da água contida no tanque, no momento da limpeza.

Um tubo foi colocado para facilitar a introdução da água no tanque, evitando a necessidade de sempre retirar o teto no momento de inserir a água. Foi feito um furo na lateral oposta à de saída das canaletas. Neste furo foi colocado um adaptador soldável para caixa d'água e, em seguida, foi encaixada uma curva roscável com 90° neste adaptador. Um cap roscável foi utilizado como rolha na ponta externa da curva, como pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 – Cap roscável utilizado para o fechamento da entrada de água



Fonte: Autor, 2021.

O tanque de alumínio finalizado é mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Tanque de alumínio finalizado



Fonte: Autor, 2021.

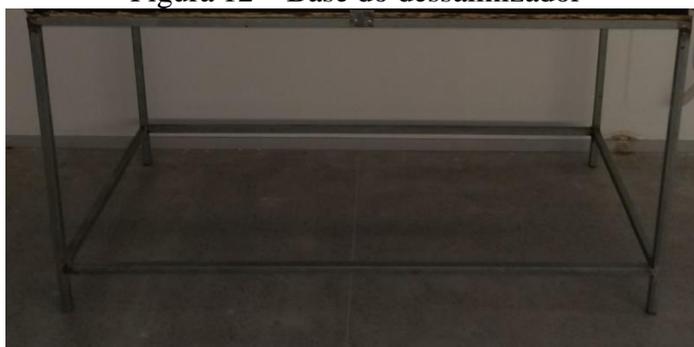
Após a fixação de todos os componentes no tanque, foi feita a vedação utilizando silicone vermelho de alta temperatura. O silicone foi aplicado nos locais que se mostravam propensos a perdas de calor ou vazão de água, tais como: emendas e furos. Depois da aplicação, foi necessário esperar o tempo de cura do silicone de 24 h para que houvesse a secagem total do mesmo. Dando sequência, foi realizado um teste de estanqueidade do tanque, com o intuito de encontrar possíveis vazamentos. Foi colocada uma certa quantidade de água no tanque e, em seguida, este foi guardado em um local isolado. Após 48 h, foi possível observar que o nível da água não havia diminuído, levando a conclusão de que a vedação ocorreu da forma bem-sucedida. Além disso, foram realizadas inspeções nos possíveis pontos de vazamento para ter garantia da eficiência do silicone.

Terminada a vedação, foi feito o caixote externo de madeira que serve como suporte e também como isolante térmico. As peças de madeira foram cortadas de acordo com as medidas estabelecidas no desenho esquemático, onde cada pedaço possui 10 mm de espessura. Após o corte, os pedaços de madeira foram unidos com pregos, formando, assim, uma espécie de caixa na qual o tanque de alumínio foi colocado em seu interior. Vale ressaltar que entre o caixote de madeira e o tanque de alumínio, há um isolante térmico com 20 mm de espessura.

O isolante utilizado no protótipo foi o isopor (EPS). As partes de EPS foram cortadas e coladas na madeira de forma a preencher toda a caixa. Após fixar o isolante no interior do caixote, o tanque de alumínio foi inserido sobre o isopor de forma justa, evitando folgas entre o alumínio e o isolante, e também pressionando-o contra o caixote de madeira, dando uma maior fixação. Para evitar qualquer risco de deslocamento do tanque, foram colocados parafusos nas laterais conectando o tanque de alumínio com a caixa de madeira. Foram utilizados parafusos de inox, para não haver o risco de enferrujamento e uma possível contaminação da água.

Para que o tanque ficasse elevado, uma base foi feita utilizando pedaços de metalon. O suporte pode ser visto na Figura 12.

Figura 12 – Base do dessalinizador



Para fechar o protótipo, foi confeccionado um teto utilizando vidro, tendo este 4 mm de espessura. Nesta parte do processo, os pedaços de vidro foram cortados de acordo com as medidas do desenho apresentado no Apêndice I. Além disso, as peças de vidro laterais foram cortadas de acordo com o ângulo de escoamento da canaleta, já que o teto será sobreposto nestas partes. Para unir os cortes de vidro e garantir uma inclinação de 45° no teto, foi utilizado um perfil em L na parte superior da tampa. Além disso, uma cola fixa espelho foi usada para a fixação das peças. O tempo de espera para a secagem desta cola foi de 48 h. Finalizada esta etapa, o teto foi colocado sobre as canaletas, como mostrado na Figura 13, de forma que a água condensada deslizesse pelo vidro e caísse diretamente nos canais de escoamento.

Figura 13 – Cobertura do dessalinizador sobreposta nas canaletas



Fonte: Autor, 2021.

Com o teto acoplado, foi feita a vedação com uma borracha em volta do vidro. A borracha foi fixada na madeira, como pode ser visto na Figura 14, utilizando uma cola instantânea. O tempo de secagem da cola foi de 10 segundos. A borracha foi pressionada contra a madeira para ocorrer a fixação e empurrada contra o vidro para que não houvesse nenhuma folga entre a borracha e o teto, pois qualquer folga acarretaria em perdas de calor para o ambiente.

Figura 14 – Borracha para vedação vidro-tanque



Fonte: Autor, 2021.

Para facilitar a remoção do teto, foram coladas duas peças de alumínio no vidro, que funcionam como um tipo de alça, representada na Figura 15. Foi utilizada cola *epóxi Araldite* neste processo, pois além de necessitar de uma boa fixação e suportar altas temperaturas, também era necessário que suportasse o peso do teto.

Figura 15 – Alça da cobertura do dessalinizador



Fonte: Autor, 2021.

Por fim, mangueiras foram acopladas nas saídas das canaletas, como apresentado na Figura 16, para direcionar a água até o recipiente que vai recebê-la após o processo. Para facilitar o acoplamento das mangueiras, foi feita uma pequena curvatura em cada aba maior das canaletas e, após isso, foi colocado uma mangueira em cada canal. Para a fixação das mangueiras foram utilizadas abraçadeiras de nylon. Nos locais de saída das canaletas, onde

havia partes propícias a vazamentos, foi utilizado silicone de alta temperatura para vedar e evitar possíveis perdas de calor.

Figura 16 – Acoplamento da mangueira na saída da calha



Fonte: Autor, 2021.

### 3.3 Experimentos

A coleta da água dessalinizada foi feita utilizando mangueiras guiando a água produzida da saída das canaletas até um garrafão de 20 litros. (Figura 17).

Figura 17 – Mangueiras conectadas ao recipiente da água dessalinizada



Fonte: Autor, 2021.

Testes de produção foram realizados com o intuito de avaliar a produção de água dessalinizada. Este teste foi feito por um período de nove horas diárias (das 8h00 às 17h00), durante um período de aproximadamente 1 mês (do dia 21/01/2021 ao dia 23/02/2021). Os primeiros testes foram feitos para encontrar possíveis pontos de perdas de calor. Realizado estes testes iniciais, foi dado início aos testes de produção.

Durante estes testes o sistema foi abastecido com 7,8 litros de água por dia, o que corresponde a uma lâmina de água de 10 mm. Neste experimento foram coletadas três amostras de água por dia: uma no início do dia, antes de passar pelo processo de dessalinização, e as outras duas no final do dia, sendo uma amostra da água após o processo e a outra do rejeito contido dentro do tanque. Todas amostras eram armazenadas em garrafas e identificadas com a data da coleta, o tipo correspondente e, no caso da água dessalinizada, a quantidade produzida no dia (Figura 18).

Figura 18 – Amostras de água antes e após o processo de dessalinização



Fonte: Autor, 2021.

Foram realizados diversos dias de testes de produção, porém somente cinco dias serão apresentados aqui, já que foram descartados os dias com precipitação ou em que ocorreram problemas com o sistema de monitoramento.

Ao longo de cada dia foram monitoradas as temperaturas de quatro pontos distintos no protótipo. Já a radiação foi obtida de outra maneira, pois não havia a disponibilidade de nenhum aparelho para medi-la.

### 3.3.1 Medições Experimentais

Para realizar os testes é fundamental que o dessalinizador seja monitorado por algum tipo de sensor, pois seria inviável e impreciso fazer as medições necessárias de forma manual. A coleta destes dados é importante para interpretar os resultados e avaliar o funcionamento do protótipo.

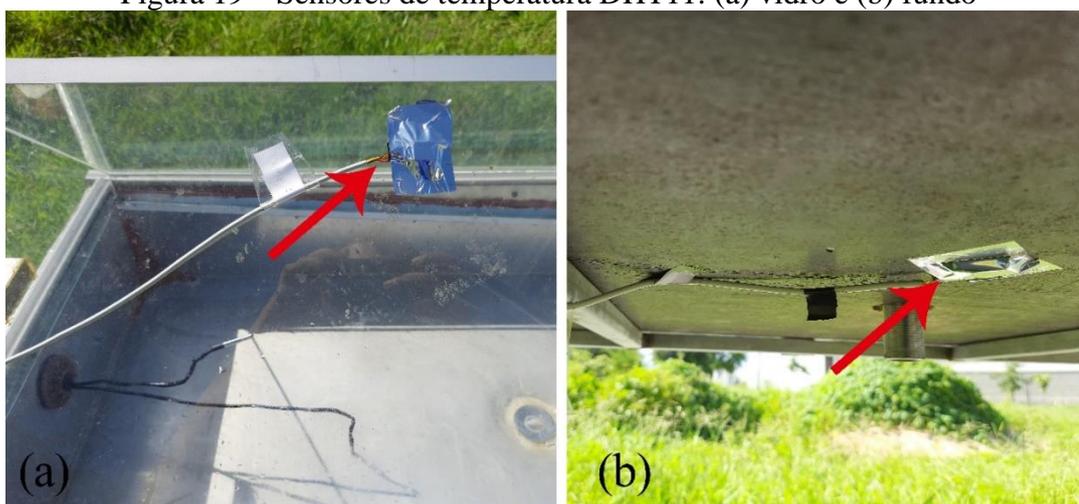
Para acompanhar o funcionamento do destilador, sensores de temperatura foram utilizados para monitorá-lo. Estes sensores são listados a seguir:

- Dois sensores de umidade e temperatura DHT11 com faixa de medição de temperatura entre 0 °C e 50 °C e precisão de  $\pm 2$  °C;
- Dois sensores de temperatura DS18B20 com faixa de medição variando entre -55 °C e +125 °C e precisão de  $\pm 0,5$  °C na faixa de -10 °C a +85 °C.

Os sensores foram montados em uma placa arduino uno R3. A montagem e a elaboração do programa foram realizadas em parceria com um aluno que lecionou um curso de arduino no *Campus*. O código foi armazenado na placa arduino e está disponível no Apêndice A.

Os sensores de umidade e temperatura foram dispostos externamente no dessalinizador. Um sensor foi colocado no teto para medir a temperatura do vidro, enquanto o outro foi colocado no fundo do dessalinizador (Figura 19).

Figura 19 – Sensores de temperatura DHT11: (a) vidro e (b) fundo



Fonte: Autor, 2021.

Os sensores DS18B20 foram utilizados na parte interna do dessalinizador. Este tipo de sensor foi escolhido por ser indicado para ambientes úmidos ou molhados. Um sensor foi implantado para medir a temperatura do ar interno (Figura 20). Enquanto o outro foi utilizado

para medir a temperatura da água no tanque. Vale ressaltar que, neste último caso, somente a ponta do sensor deve estar em contato com a água, como mostrado na Figura 20, evitando o contato do fio com o líquido, para não correr o risco de danificá-lo.

Figura 20 – Sensores DS18B20 na parte interna do dessalinizador



Fonte: Autor, 2021.

A placa arduino era ligada às 8h00 e desligada às 17h00. O código elaborado foi programado para medir os dados com intervalos de cinco minutos e estes eram gravados em um cartão micro SD, no formato de texto.

Ao final de cada dia o cartão era retirado e os dados eram transferidos para um computador para serem tratados no Excel. Após a transferência dos dados, era feita uma limpeza no arquivo de texto para a gravação dos dados do dia seguinte.

Os valores da temperatura do local foram disponibilizados por Lima (2021), a qual desenvolveu uma pequena estação meteorológica e instalou próxima ao dessalinizador.

Os valores de radiação diária foram obtidos a partir de dados disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) da estação meteorológica localizada em Jaguaruana, cidade vizinha do município de Russas. Diferente do arduino, a estação realiza as medições com intervalos de uma hora.

Para avaliar a eficiência da dessalinização, foi medido a condutividade elétrica das amostras de água. Foi utilizado para este teste um condutivímetro de bancada MS TECNOPON modelo mCA-150.1. Para realizar as análises, as amostras de água deviam estar em equilíbrio térmico com o ambiente, pois a condutividade elétrica varia com a temperatura. No mesmo

equipamento foi realizada a medição dos sólidos totais dissolvidos (STD). Quanto menor o valor da condutividade elétrica e do STD, maior a pureza da água.

Além disso, foi feita a medição da quantidade de água dessalinizada diariamente, onde o volume da água produzida foi registrado ao final de cada dia.

Outro fator levado em consideração neste trabalho foi o custo dos materiais utilizados na fabricação do protótipo.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos após os testes com o protótipo.

Este capítulo está dividido cinco partes. Na primeira é feita uma avaliação dos materiais utilizados e seus custos. A segunda parte faz uma análise das variáveis térmicas do protótipo. A terceira parte mostra a quantidade de água produzida, enquanto a quarta apresenta a eficiência do dessalinizador. Por fim, a última parte analisa a eficiência do processo de dessalinização da água.

### 4.1 Análise dos Materiais Utilizados na Fabricação do Protótipo

Os materiais escolhidos para a confecção do dessalinizador solar simples com teto removível, apresentam as características necessárias para que o protótipo tenha um bom desempenho. Os principais componentes, os materiais utilizados e suas respectivas características são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Lista de materiais dos componentes do dessalinizador e suas características relevantes para o projeto

Componente	Material	Características
Cobertura	Vidro	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transparência (Permite a passagem dos raios solares);</li> <li>• Baixa condutividade térmica;               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Impermeável.</li> </ul> </li> </ul>
Tanque	Alumínio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistente à corrosão;</li> <li>• Condutividade térmica elevada;               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Leve;</li> </ul> </li> <li>• Boa absorção de calor.</li> </ul>
Calhas	Alumínio branco	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistente à corrosão;</li> <li>• A pintura branca, além de proteger, reflete os raios</li> </ul>

		incidentes, reduzindo o aquecimento das canaletas. Desta forma, isto impede que a água nas calhas passe pelo processo de evaporação novamente.
Isolante térmico I	Isopor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixa condutividade térmica, ou seja, funciona como um ótimo isolante;</li> <li>• Leve;</li> <li>• Resistente ao envelhecimento.</li> </ul>
Isolante térmico II	Madeirite plastificado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta resistência (Podendo ficar exposto ao sol ou à chuva);</li> <li>• Maior durabilidade;</li> <li>• Além de isolante térmico, serve como suporte para a bacia do dessalinizador.</li> </ul>

Fonte: Autor, 2021.

Os demais componentes apresentam características similares as citadas anteriormente, tais como: resistência ao calor, durabilidade e resistência à corrosão.

O silicone utilizado para a vedação do tanque é resistente a altas temperaturas, pode ser utilizado em áreas úmidas, é resistente a incidência de raios solares e possui fungicida. Além disso, é indicado para a vedação de tanques e possui excelente adesão em alumínio. O adesivo do vidro possui características semelhantes a estas, porém o silicone utilizado é próprio para a fixação de materiais de vidro.

Os materiais foram selecionados pelas características necessárias ao projeto, custo-benefício e pela disponibilidade no comércio local.

#### ***4.1.1 Custo dos Materiais de Construção do Protótipo***

O custo do dessalinizador tem relação direta com o material selecionado para sua construção. Estes custos são especificados na Tabela 3.

Tabela 3 – Custo dos materiais utilizados no protótipo

Material	Valor (R\$)
Abraçadeira de nylon	1,80
Adaptador soldável para caixa d'água 25 mm x ¾	7,02
Adesivo epóxi araldite hobby	19,00
Adesivo instantâneo multiuso	27,70
Borracha para vedação	120,00
Cap roscável ¾	0,59
Chapa de alumínio 2000 x 1000 x 18 mm	207,90
Curva 90° eletroduto pesado ¾	3,15
Fixa espelho (Adesivo à base de polímeros)	25,00
Madeira	94,00
Mangueira 1" x 2,5 mm	9,90
Metalon	75,00
Parafusos 3,5 x 22 mm	2,50
Perfis de alumínio do tipo L	44,00
Placas de EPS (Isopor) 20 mm	24,80
Pregos 32 x 1,85 mm	2,00
Silicone acético de alta temperatura vermelho	23,00
Válvula lavatório latão	26,91
Vidro incolor 4 mm	224,00
<b>TOTAL</b>	<b>938,27</b>

Fonte: Autor, 2021.

Como mostrado na Tabela 3, o custo total de material de consumo foi de R\$ 938,27 (novecentos e trinta e oito reais e vinte e sete centavos).

Os materiais que tiveram maior influência no custo do protótipo foram: o vidro (23,87%), a chapa de alumínio (22,16%), a borracha para vedação (12,79%) e a chapa de madeirite plastificado (10,02%). Estes materiais representam 68,84% dos gastos com a

confeção do dessalinizador, ou seja, são os responsáveis por aumentar significativamente o preço do protótipo.

A borracha de vedação poderia ser substituída por um material de EVA espesso, o que acarretaria numa redução do preço. Porém este material não foi encontrado em nenhum comércio local.

## **4.2 Análise Térmica do Protótipo**

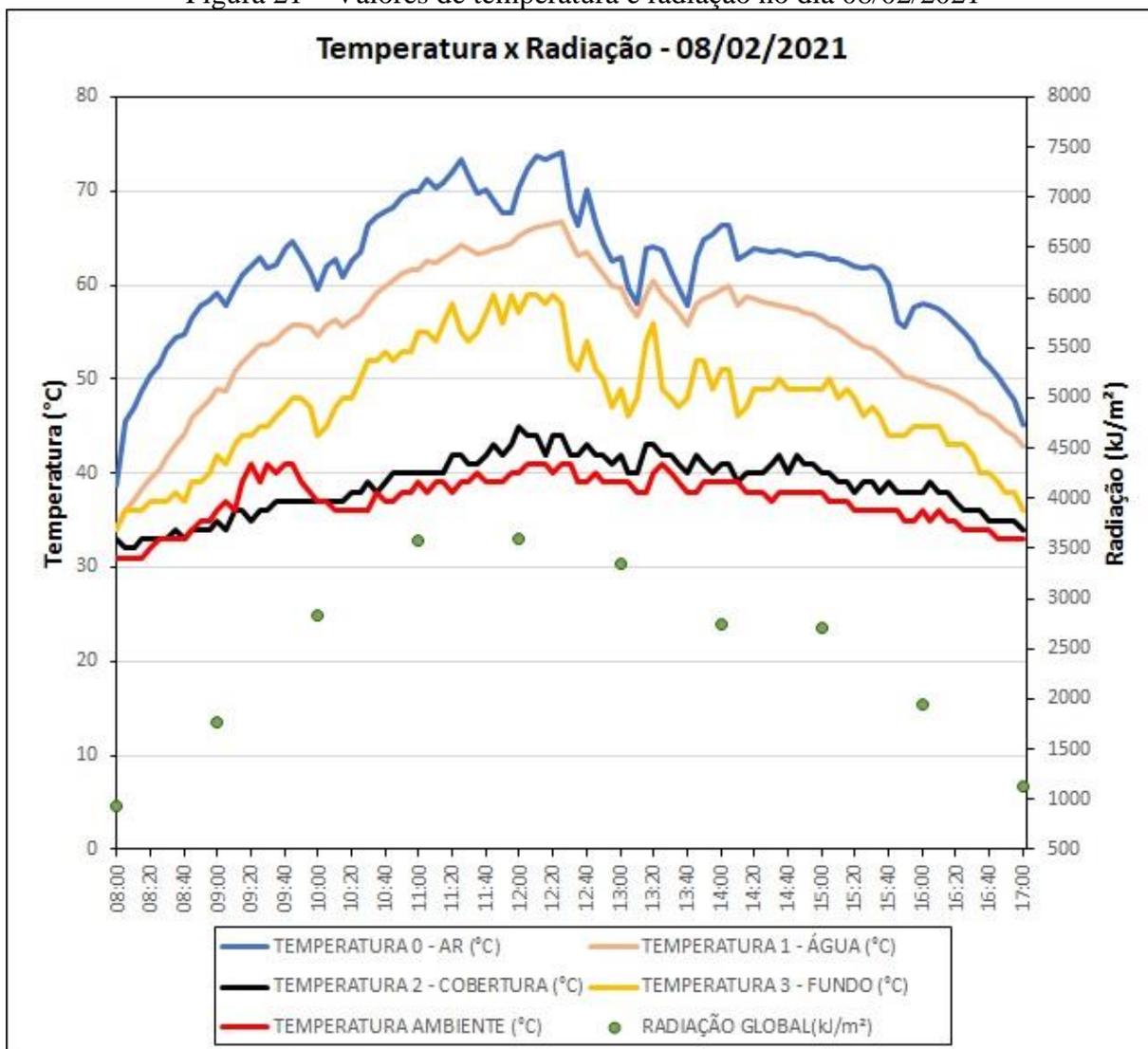
Para avaliar o desempenho do dessalinizador, foram coletadas as temperaturas internas (do ar e da água) e externas (da cobertura e do fundo) do protótipo. Além destas, a temperatura do local de instalação também foi monitorada no decorrer do dia. Também foi feito o acompanhamento das condições climáticas. Já a radiação foi extraída dos dados disponibilizados pelo INMET, da estação meteorológica de Jaguaruana – CE.

O monitoramento das temperaturas do dessalinizador foi realizado do dia 21/01/2021 até o dia 23/02/2021. As medições eram iniciadas às 8h00 e encerradas às 17h00, com intervalos de 5 minutos entre cada medição. Por conta das condições climáticas e por alguns problemas com o sistema de monitoramento, somente cinco dias de testes foram aproveitados. Dias chuvosos ou com dados de medições incompletos, foram desconsiderados.

Neste tópico do trabalho serão mostrados os dados referentes a um dia de teste, com a finalidade de não ser repetitivo. Os demais dias estão disponibilizados nos apêndices: B, C, D e E.

A Figura 21 mostra os resultados das temperaturas internas e externas do protótipo, da temperatura ambiente e da radiação global referentes ao dia 08/02/2021.

Figura 21 – Valores de temperatura e radiação no dia 08/02/2021



Fonte: Autor, 2021.

Podemos notar que tanto as temperaturas referentes ao dessalinizador, quanto a temperatura do local variam de acordo com a radiação solar. Algumas oscilações são notáveis, sendo estas causadas por conta da nebulosidade. Durante o período de testes, o céu estava parcialmente nublado durante todos os dias.

É possível observar que a maior variação foi na temperatura do ar dentro do dessalinizador com diferença de 35,5 °C. A temperatura máxima do ar neste dia foi de 74,19 °C e a mínima foi de 38,69 °C. Já a temperatura da água variou entre 34,06 e 66,75 °C, com uma diferença de 32,69 °C entre a máxima e a mínima. Os demais dias possuem um comportamento semelhante, onde a temperatura do ar sempre é superior à da água.

A temperatura do vidro sofreu pouca variação, estando seus valores sempre próximos dos valores da temperatura ambiente, como mostrada na Figura 21. O valor máximo da temperatura do vidro foi de 45 °C, enquanto o da temperatura ambiente foi de 41 °C.

A temperatura do fundo chegou a atingir uma diferença de 25 °C entre a temperatura mínima (34 °C) e a máxima (59 °C). Esta variação ocorreu por conta das trocas de calor com o ambiente e também devido a refletividade, tanto do solo, como do piso de concreto.

Os valores mais elevados de temperatura ocorreram no período entre 11h00 e 14h00. Algumas oscilações podem ser observadas, pois neste período a nebulosidade estava inconstante, chegando a encobrir o Sol em alguns momentos do dia.

Já a radiação teve seus maiores valores entre os horários das 11h00 às 13h00, chegando a atingir o valor máximo de 3594,14 kJ/m<sup>2</sup> ao meio dia. Durante o tempo de medição, a radiação teve um valor médio de 2457,98 kJ/m<sup>2</sup>.

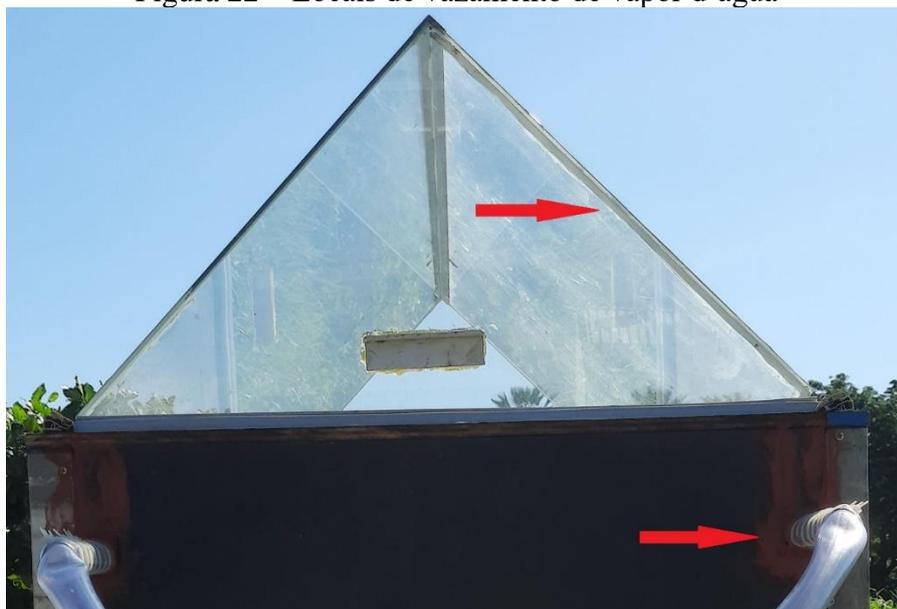
### **4.3 Testes de Produção**

Os testes de produção foram realizados utilizando 7,8 litros de água, o que corresponde a uma lâmina de água de 10 mm. Este nível está de acordo com o adotado por Soares (2004), que constatou em seus estudos que a medida que a lâmina d'água é minimizada, a produção é maximizada.

A inclinação da cobertura do dessalinizador é um fator importante para a produção de água. De acordo com Soares (2004), foi verificado que a partir de uma inclinação de 15° é possível garantir que a água condensada no vidro escoe para as canaletas com aproximadamente 100% de aproveitamento, ou seja, sem que o condensado goteje de volta para o tanque. Logo, a inclinação de 45° escolhida para este projeto satisfaz esta condição, garantindo que a água condensada seja totalmente coletada.

Nos primeiros dias, os testes foram realizados com o intuito de encontrar possíveis vazamentos no tanque ou na cobertura. Foi possível notar o vazamento de vapor d'água tanto nas junções dos vidros, como na saída das canaletas (Figura 22). Neste período, a quantidade de água produzida variou entre 750 ml e 900 ml. A partir destes testes iniciais foram feitas melhorias na vedação da tampa e do tanque.

Figura 22 – Locais de vazamento de vapor d'água



Fonte: Autor, 2021.

A quantidade de água dessalinizada e a radiação média para um período de 9 horas de medição são apresentadas na Tabela 4 e Figura 23.

Tabela 4 – Quantidade de água produzida e radiação média diária

	02/02/2021	03/02/2021	04/02/2021	06/02/2021	08/02/2021
Água dessalinizada (ml)	1200	1625	1700	1625	1750
Radiação solar global média (kJ/m <sup>2</sup> )	1870,44	2403,21	2424,34	2374,38	2457,98

Fonte: Autor, 2021.

Figura 23 – Relação entre a quantidade de água produzida e a radiação média



Fonte: Autor, 2021.

Como podemos constatar na Tabela 4 e na Figura 23, quanto maior a radiação média, maior a quantidade de água produzida. Logo, fica nítido a influência da radiação na produção de água diária.

#### 4.4 Eficiência do Protótipo

Podemos encontrar a eficiência do dessalinizador conhecendo a quantidade diária da radiação solar global no período de 9 horas. Para o cálculo desta radiação, multiplicamos a radiação média de cada dia pela quantidade de horas em que o protótipo estava em funcionamento, ou seja, 9 horas diárias. Além da área do dessalinizador e da massa de água produzida, devemos conhecer também o valor do calor latente de evaporação da água a pressão de 1 atm. De acordo com as tabelas termodinâmicas, este valor é de  $2256,5 \text{ kJ/m}^2$  (ÇENGEL; BOLES, 2013).

A Tabela 5 apresenta os resultados das medições da massa de água dessalinizada, da radiação solar global para um período de 9h, o valor do calor latente de vaporização, a área do protótipo e a eficiência do dessalinizador, equação (1). A eficiência média dos cinco dias de teste é igual a 21,96%. Já eficiência máxima, como pode ser visto, foi de 22,89%, produzindo 1750 ml de água.

Tabela 5 – Cálculo da eficiência do dessalinizador

	$m_T$ - Massa de água dessalinizada (kg)	I - Radiação solar global ( $\text{kJ/m}^2$ )	$h_{fg}$ - Entalpia de vaporização da água ( $\text{kJ/kg}$ )	$A_t$ - Área ( $\text{m}^2$ )	$\eta$ - Eficiência (%)
02/02/2021	1,2	16833,94	2256,5	0,78	20,62
03/02/2021	1,625	21628,92	2256,5	0,78	21,73
04/02/2021	1,7	21819,06	2256,5	0,78	22,54
06/02/2021	1,625	21369,43	2256,5	0,78	22,00
08//02/2021	1,75	22121,85	2256,5	0,78	22,89

Fonte: Autor, 2021.

#### 4.5 Eficiência do Processo de Dessalinização

Através de parâmetros como condutividade elétrica e sólidos totais dissolvidos (STD) da água, podemos avaliar a eficiência do processo de dessalinização. A Tabela 6 apresenta os valores de condutividade elétrica e sólidos totais dissolvidos (STD) da água antes e após o processo de dessalinização.

Tabela 6 – Valores diários dos sólidos totais dissolvidos e da condutividade elétrica

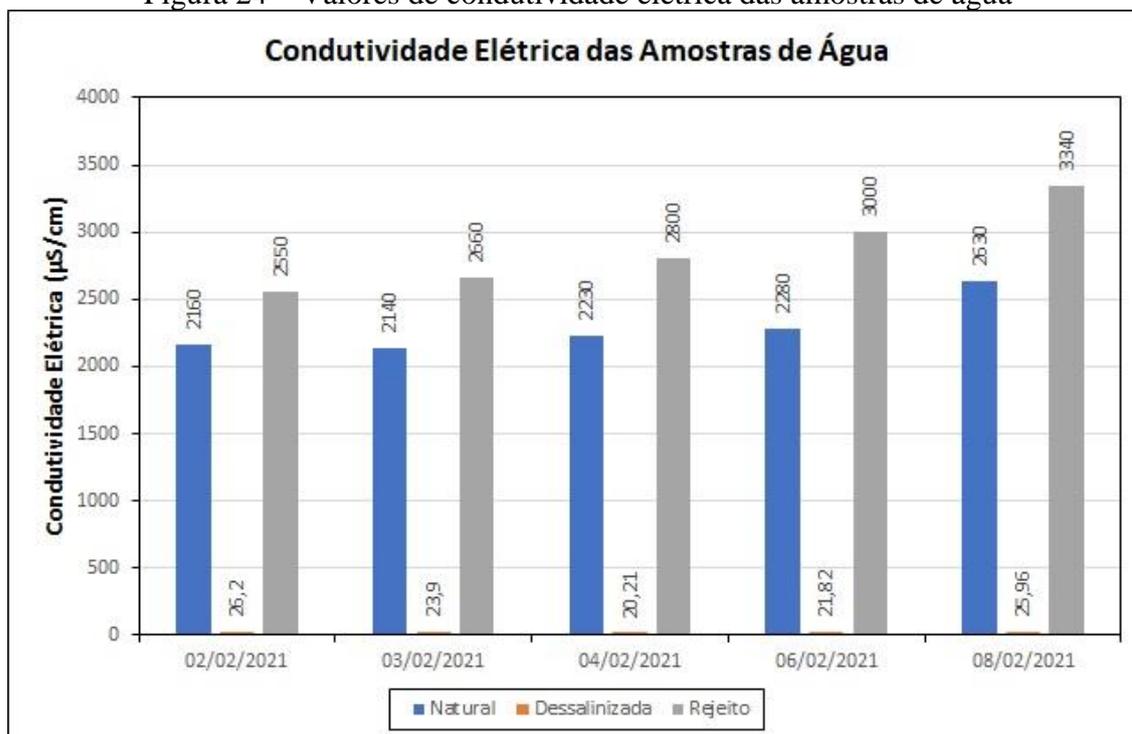
	Amostras de água	Sólidos totais dissolvidos (mg/l)	Condutividade elétrica ( $\mu\text{S/cm}$ )
02/02/2021	Natural	1037	2160
	Dessalinizada	12,64	26,2
	Rejeito	1284	2550
03/02/2021	Natural	1062	2140
	Dessalinizada	11,79	23,9
	Rejeito	1328	2660
04/02/2021	Natural	1154	2230
	Dessalinizada	9,22	20,21
	Rejeito	1433	2800
06/02/2021	Natural	1186	2280
	Dessalinizada	9,37	21,82

	Rejeito	1558	3000
08//02/2021	Natural	1343	2630
	Dessalinizada	13,22	25,96
	Rejeito	1716	3340

Fonte: Autor, 2021.

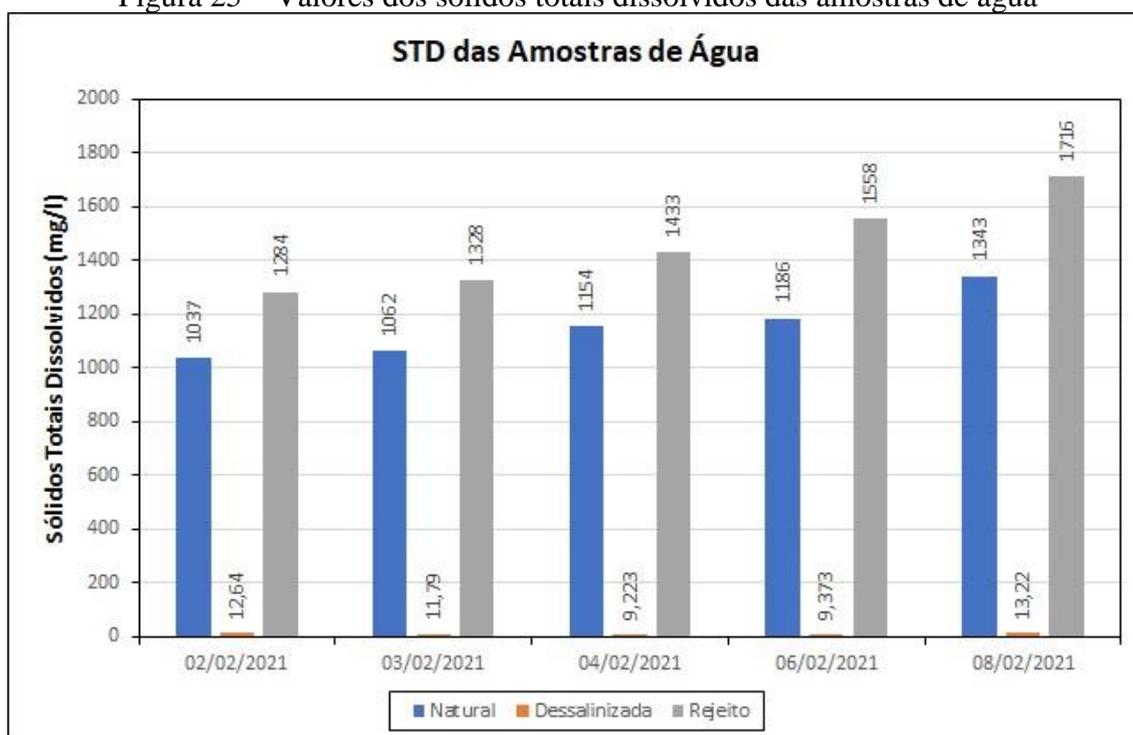
Com os dados da Tabela 6, foram elaborados gráficos para melhorar a visualização dos resultados obtidos neste estudo. As Figuras 24 e 25 apresentam os valores de condutividade elétrica e STD, respectivamente, das três amostras de água coletadas durante os cinco dias de teste.

Figura 24 – Valores de condutividade elétrica das amostras de água



Fonte: Autor, 2021.

Figura 25 – Valores dos sólidos totais dissolvidos das amostras de água



Fonte: Autor, 2021.

Podemos notar que tanto a condutividade elétrica, como a quantidade de sólidos totais dissolvidos sofreram uma grande redução em seus valores. Além disso, de acordo com a Tabela 1, a água produzida se enquadra como água potável, já que a quantidade de sólidos totais dissolvidos está abaixo de 1000 mg/l em todas as amostras de água dessalinizada.

Como a quantidade de sais é proporcional a quantidade de sólidos totais dissolvidos, podemos afirmar que a quantidade de sais das amostras de água rejeitada após o processo aumentou. O descarte desta água, dependendo dos níveis de sais, pode ser prejudicial para o meio ambiente.

## 5 CONCLUSÃO

No presente trabalho foi desenvolvido um protótipo de um dessalinizador solar do tipo tanque com teto removível e, a partir disto, análises foram realizadas com o intuito de avaliar a viabilidade de construção, a produção e a eficiência do dessalinizador, e a eficiência do processo de dessalinização. A partir dos testes e das análises realizadas, foi possível destacar algumas conclusões.

Com base nas análises dos materiais utilizados na confecção do protótipo, foi possível concluir que estes materiais possuem as características necessárias para o bom funcionamento e desempenho do dessalinizador, tendo estes: alta durabilidade, resistência ao calor e à corrosão, baixo peso, boa absorção de calor (no caso da bacia) e boa resistência térmica (no caso dos isolantes térmicos). Devido ao baixo peso dos componentes, houve uma facilidade no transporte do protótipo. Além disso, vale salientar que o teto removível facilitou a limpeza do tanque, das canaletas e dos vidros.

Com relação ao custo total de material de consumo do dessalinizador (R\$ 938,27), podemos considerar este valor razoável, já que os comércios locais possuem pouca variedade de materiais disponíveis que satisfazem as exigências do projeto, além de possuírem preços elevados. Desta forma, o protótipo foi construído com o menor valor possível para a aplicação na cidade de Russas – CE.

A partir do gráfico que relaciona temperatura e radiação, foi possível observar que as temperaturas variam de acordo com a radiação solar global no decorrer do dia, sendo estes influenciados também pela nebulosidade do local.

Por meio dos testes iniciais com o dessalinizador foram identificados alguns pontos de vazão de vapor d'água, mostrando falhas na vedação. A vedação do protótipo foi uma das maiores dificuldades do projeto, já que o dessalinizador necessitava estar em funcionamento para encontrar os locais de vazamento. Após os ajustes, a vedação se mostrou eficiente, já que a produção de água dessalinizada aumentou consideravelmente e a temperatura interna do protótipo chegou a atingir 74,19 °C.

Os testes de produção mostraram a relação entre a produção de água e a radiação solar global diária, podendo ser observado uma maior produção de destilado nos dias com radiações mais elevadas. Além disso, foi possível notar que nos horários de maior temperatura e radiação

(das 11h às 14h), a vazão de água foi maior, porém não foi possível quantificar a produção de água por hora.

O dessalinizador teve uma produção média de 1580 ml de água dessalinizada. Enquanto que a sua eficiência média foi de 21,96%. Estes valores são considerados satisfatórios, porém poderiam ser melhorados com a aplicação de tinta preta no tanque, o que aumentaria absorção de calor, ou a utilização de refletores, o que aumentaria a incidência de radiação na cobertura do protótipo.

As reduções dos sólidos totais dissolvidos e da condutividade elétrica variaram entre 98 e 99%, deixando as concentrações de sais bem baixas. Desta maneira, o processo de dessalinização da água se mostrou eficiente e a água pode ser classificada como potável. Porém outros testes devem ser realizados para concluir se a água pode ser consumida.

## **5.1 Trabalhos Futuros**

Com o intuito de realizar melhorias e propor a continuação de estudos sobre o presente trabalho, algumas sugestões para trabalhos futuros são listadas abaixo:

- A aplicação de tinta preta na bacia do dessalinizador para aumentar a absorção de calor;
- A utilização de refletores e uma análise sobre a influência deste sobre a eficiência do dessalinizador;
- Uma melhor análise das características físicas, químicas e biológicas da água dessalinizada;
- Um estudo sobre as características da água rejeitada, para encontrar uma utilização para esta água.

## REFERÊNCIAS

AMIANTI, M. **Uso e aplicação do poliestireno expandido (EPS) reciclado para impermeabilização por impregnação de superfícies de concreto pré-fabricado**. 2005. 123 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/3255>. Acesso em: 17 out. 2020.

ARAÚJO, A. C. S. A. **Contribuição para o estudo da viabilidade/sustentabilidade da dessalinização enquanto técnica de tratamento de água**. 2013. 125 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2013. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10362/10203>. Acesso em: 18 out. 2020.

ASPE - AGÊNCIA DE SERVIÇOS PÚBLICOS DE ENERGIA DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO. **Energia Solar no Espírito Santo - Tecnologias, Aplicações e Oportunidades**. [S. l.], 2013. Disponível em: <https://arsp.es.gov.br/estudos-energeticos>. Acesso em: 13 jun. 2021.

BOUCHEKIMA, B. A small solar desalination plant for the production of drinking water in remote arid areas of southern Algeria. **Desalination**, [s. l.], v. 159, ed. 2, p. 197-204, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(03\)90071-3](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(03)90071-3). Acesso em: 22 out. 2020.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 357, de 15 de junho de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasil: Diário Oficial da União, n. 53, p. 58-63, 18 mar. 2005. Disponível em: [http://conama.mma.gov.br/?option=com\\_sisconama&task=arquivo.download&id=450](http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=450). Acesso em: 13 jun. 2021.

BUROS, O. K.; COX, R. B.; NUSBAUM, I.; EL-NASHAR, A. M.; BAKISH, R. **The USAID desalination manual**. DUNAGAN, D. (ed.). Washington, D.C.: CH2M HILL International Corporation, 1980.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. 1018 p. ISBN 978-85-8055-200-3.

COSTA, G. C. **Destilação solar: aplicação no tratamento de efluentes líquidos de laboratórios**. 2008. 106 p. Dissertação (Mestrado em Química) - Instituto de Química, Universidade de Brasília, Brasília, 2008. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/9063>. Acesso em: 17 out. 2020.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 4. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2013.

DUTRA, K. M. **Montagem e teste de um novo arranjo do dessalinizador solar térmico de múltiplos estágios com recuperação de calor**. 2016. 83 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/19567>. Acesso em: 18 out. 2020.

FOUNDATION FOR WATER RESEARCH. A Review of Current Knowledge. **Desalination for Water Supply**, Bucks, UK, 2015. Disponível em: <http://www.fwr.org/desal.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2021.

GAIO, S. S. M. **Produção de água potável por dessalinização: tecnologias, mercado e análise de viabilidade econômica**. 2016. 90 p. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente) - Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2016. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10451/26066>. Acesso em: 8 maio 2021.

GRASSI, M. T. As águas do planeta Terra. **Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola**, [s. l.], v. 1, ed. 1, p. 31-40, 2001. Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/cadernos/01/aguas.pdf>. Acesso em: 16 maio 2021.

GRUESO-DOMÍNGUEZ, M. C.; CASTRO-JIMÉNEZ, C. C.; CORREA-OCHOA, M. A.; SALDARRIAGA-MOLINA, J. C. Estado del arte: desalinización mediante tecnologías de membrana como alternativa frente al problema de escasez de agua dulce. **Revista Ingenierías Universidad De Medellín**, [s. l.], v. 18, n. 35, p. 69-89, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.22395/rium.v18n35a5>. Acesso em: 8 jun. 2021.

GUERREIRO, M. L. F. B. **Dessalinização para produção de água potável: Perspectivas para Portugal**. 2009. 80 p. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10216/60336>. Acesso em: 18 out. 2020.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Brasil, 2021. Disponível em: <https://tempo.inmet.gov.br/>. Acesso em: 24 fev. 2021.

IPECE - INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ. **Perfil Municipal 2017**: Russas. Ceará: 2017. Disponível em: [https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2018/09/Russas\\_2017.pdf](https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2018/09/Russas_2017.pdf). Acesso em: 24 fev. 2021.

LAWAL, D.; ANTAR, M.; KHALIFA, A.; ZUBAIR, S.; AL-SULLAIMAN, F. Humidification-dehumidification desalination system operated by a heat pump. **Energy Conversion and Management**, [s. l.], v. 161, p. 128-140, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.01.067>. Acesso em: 22 maio 2021.

LEITE, W. U. **Destilação solar para fins de dessalinização: aplicação de materiais alternativos e tecnológicos para a produção mais eficiente de água potável**. 2019. 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/27131>. Acesso em: 24 out. 2020.

LEVY, J. Q. **Novas Fontes de Abastecimento de Água: Reutilização e Dessalinização**. 1. ed. Lisboa, Portugal: 2008. 85 p. ISBN 978-989-96061-0-4. Disponível em: [http://www.ecoservicos.pt/index\\_htm\\_files/index\\_htm\\_files/Novas%20Fontes%20de%20Abastecimento%20de%20Agua.pdf](http://www.ecoservicos.pt/index_htm_files/index_htm_files/Novas%20Fontes%20de%20Abastecimento%20de%20Agua.pdf). Acesso em: 24 out. 2020.

LIMA, A. L. O. **Estação meteorológica de baixo custo utilizando arduino**. 2021. 63 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Russas, 2021. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/57832>.

LOPES, J. T. **Dimensionamento e análise térmica de um dessalinizador solar tipo bacia com cobertura assimétrica**. 2013. 188 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14754>. Acesso em: 25 out. 2020.

MALUF, A. P. **Destiladores solares no Brasil**. 2005. 39 p. Monografia (Lato Sensu em Fontes Alternativas de Energia) - Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2005. Disponível em: [http://www.solenerg.com.br/files/monografia\\_alexandre.pdf](http://www.solenerg.com.br/files/monografia_alexandre.pdf). Acesso em: 25 out. 2020.

MEHRGOO, M.; AMIDPOUR, M. Constructal design of humidification?dehumidification desalination unit architecture. **Desalination**, [s. l.], v. 271, ed. 1-3, p. 62-71, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.12.011>. Acesso em: 21 mar. 2021.

NARAYAN, G. P.; SHARQAWY, M. H.; SUMMERS, E. K.; LIENHARD, J. H.; ZUBAIR, S. M.; ANTAR, M. A. The potential of solar-driven humidification?dehumidification desalination for small-scale decentralized water production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 14, n. 4, p. 1187-1201, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.014>. Acesso em: 13 mar. 2021.

OLIVEIRA, J. I. R. **Estudo da contribuição potencial do solo no processo de salinização de águas superficiais em uma pequena bacia hidrográfica do semi-árido baiano**. 2005. 121 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2005. Disponível em: <http://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/9717>. Acesso em: 17 out. 2020.

PEREIRA, P. T. S. **Energia solar térmica: perspectivas do presente e do futuro**. 2010. 115 p. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10216/60373>. Acesso em: 24 out. 2020.

SHARQAWY, M. H.; ANTAR, M. A.; ZUBAIR, S. M.; ELBASHIR, A. M. Optimum thermal design of humidification dehumidification desalination systems. **Desalination**, [s. l.], v. 349, p. 10-21, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.06.016>. Acesso em: 6 mar. 2021.

SHATAT, M.; RIFFAT, S. B. Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, [s. l.], v. 9, ed. 1, p. 1-19, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts025>. Acesso em: 7 mar. 2021.

SOARES, C. **Tratamento de água unifamiliar através da destilação solar natural utilizando água salgada, salobra e doce contaminada**. 2004. 110 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/87556>. Acesso em: 18 out. 2020.

SOUZA, L. F. **Análise térmica de um dessalinizador de múltiplo efeito para obtenção de água potável**. 2002. 72 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2002. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/tede/5309>. Acesso em: 25 out. 2020.

XIMENES, S. C. G. **Cálculo dos coeficientes de desempenho em um teste de um dessalinizador solar térmico com abastecimento contínuo operando com circuito de óleo térmico**. 2016. 50 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/31749>. Acesso em: 24 out. 2020.

YOUSSEF, P. G.; AL-DADAH, R.K.; MAHMOUD, S. M. Comparative Analysis of Desalination Technologies. **Energy Procedia**, [s. l.], v. 61, p. 2604-2607, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.258>. Acesso em: 14 mar. 2021.

## APÊNDICE A – CÓDIGO ARDUINO

```

#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <Wire.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include "dht.h"

// 3 - Porta do pino de sinal do DS18B20 DENTRO DO VIDRO EMBAIXO DA AGUA
#define ONE_WIRE_BUS3 3
// 2 - Porta do pino de sinal do DS18B20 DENTRO DO VIDRO ACIMA DA AGUA
#define ONE_WIRE_BUS2 2

//-----DHT11
const int pinoDHT112 = A2; //PINO DHT11 - ACIMA DO VIDRO
const int pinoDHT113 = A3; //PINO DHT11 - EMBAIXO DO VIDRO
dht DHT; //VARIÁVEL DO TIPO DHT

//----LED
const int pinoLUZ = 7; //PINO ANALÓGICO UTILIZADO PELO DHT11

OneWire oneWire(2);
DallasTemperature sensor(&oneWire);

int ndispositivos = 0;
float Temp;

// Armazena temperaturas minima e maxima
float tempMin = 999;
float tempMax = 0;

```

```
//----- CARTAO SD
//Pino de conexão do pino CS do modulo
const int chipSelect = 4;

void setup(void){

  sensor.begin();

  Serial.begin(9600);
  pinMode(pinoLUZ, OUTPUT);

  Serial.println("Localizando Dispositivos ...");
  Serial.print("Encontrados ");
  ndispositivos = sensor.getDeviceCount();
  if(ndispositivos!=0){
    Serial.print(ndispositivos, DEC);
    Serial.println(" sensores encontrados.");
  }
  digitalWrite(pinoLUZ, HIGH);

  //Inicia a comunicacao com o modulo SD
  if (!SD.begin(chipSelect)){
    Serial.println("Falha ao acessar o cartao ");
    Serial.println("Verifique o cartao/conexoes e reinicie o Arduino...");
    return;
  }else{
    Serial.println("Cartao iniciado corretamente !");
  }
  Serial.println();
  digitalWrite(pinoLUZ, LOW);
```

```

}

void mostra_endereco_sensor(DeviceAddress deviceAddress){
  for (uint8_t i = 0; i < 8; i++){
    // Adiciona zeros se necessário
    if (deviceAddress[i] < 16) Serial.print("0");
    Serial.print(deviceAddress[i], HEX);
  }
}

void loop(){
  // Le a informacao do sensor 3
  sensor.requestTemperatures();
  for (int i = 0; i < ndispositivos; i++) {
    //Serial.print("Sensor ");
    Temp = sensor.getTempCByIndex(i);
    //Serial.print(Temp);
    //Serial.println("°C");
    if (Temp < tempMin){
      tempMin = Temp;
    }
    if (Temp > tempMax){
      tempMax = Temp;
    }
    Serial.print("Temp ");
    Serial.print(i);
    Serial.print(": ");
    Serial.println(Temp);
    // Serial.print(" Min : ");
    //Serial.print(tempMin);
    //Serial.print(" Max : ");
    //Serial.println(tempMax);
  }
}

```

```

delay(2000);

//---
DHT.read11(pinoDHT112); //LÊ AS INFORMAÇÕES DO SENSOR
Serial.print("Temp 2: ");
int auxTemp = DHT.temperature;
Serial.print(DHT.temperature,0);
Serial.println(" ");
delay(1000);
DHT.read11(pinoDHT113); //LÊ AS INFORMAÇÕES DO SENSOR
Serial.print("Temp 3: ");
Serial.print(DHT.temperature,0);
Serial.println(" ");
delay(1000);

if(auxTemp>1){
  File dataFile = SD.open("dados.txt", FILE_WRITE);
  if (dataFile){
    Serial.println("| Arquivo encontrado!");
    //DADOS DS18B20

    for (int i = 0; i < ndispositivos; i++) {
      //Serial.print("Sensor ");
      Temp = sensor.getTempCByIndex(i);
      //Serial.print(Temp);
      //Serial.println("°C");
      if (Temp < tempMin){
        tempMin = Temp;
      }
      if (Temp > tempMax){

```

```

    tempMax = Temp;
  }
  dataFile.print("Temp ");
  dataFile.print(i);
  dataFile.print(": ");
  dataFile.println(Temp);

}

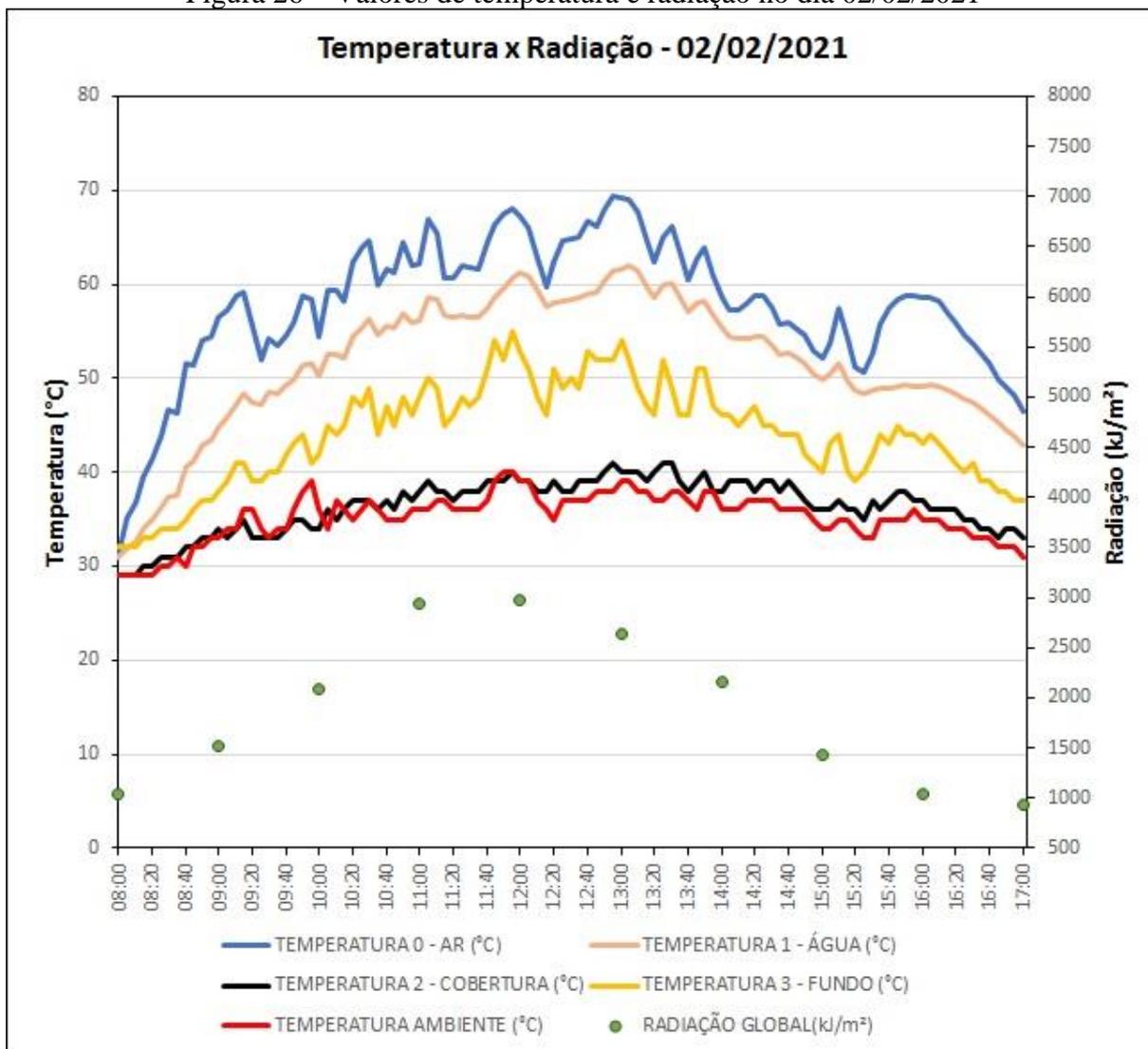
delay(1000);
//DADOS DHT11
DHT.read11(pinoDHT113); //LÊ AS INFORMAÇÕES DO SENSOR
dataFile.print("Temp 2: ");
dataFile.print(DHT.temperature,0);
dataFile.println(" ");
delay(1000);
DHT.read11(pinoDHT112); //LÊ AS INFORMAÇÕES DO SENSOR
dataFile.print("Temp 3: ");
dataFile.print(DHT.temperature,0);
dataFile.println(" ");
dataFile.println(" ");
dataFile.close();
Serial.println("| Dados gravados! |");
}else{
  Serial.println("| Arquivo nao encontrado!");
  digitalWrite(pinoLUZ, LOW);
  delay(1000);
  digitalWrite(pinoLUZ, HIGH);
  delay(5000);
  digitalWrite(pinoLUZ, LOW);
}
}
digitalWrite(pinoLUZ, LOW);
delay(100);

```

```
digitalWrite(pinoLUZ, HIGH);  
delay(100);  
digitalWrite(pinoLUZ, LOW);  
delay(100);  
delay(300000);  
}
```

## APÊNDICE B – RESULTADOS DOS TESTES REALIZADOS NO DIA 02/02/2021

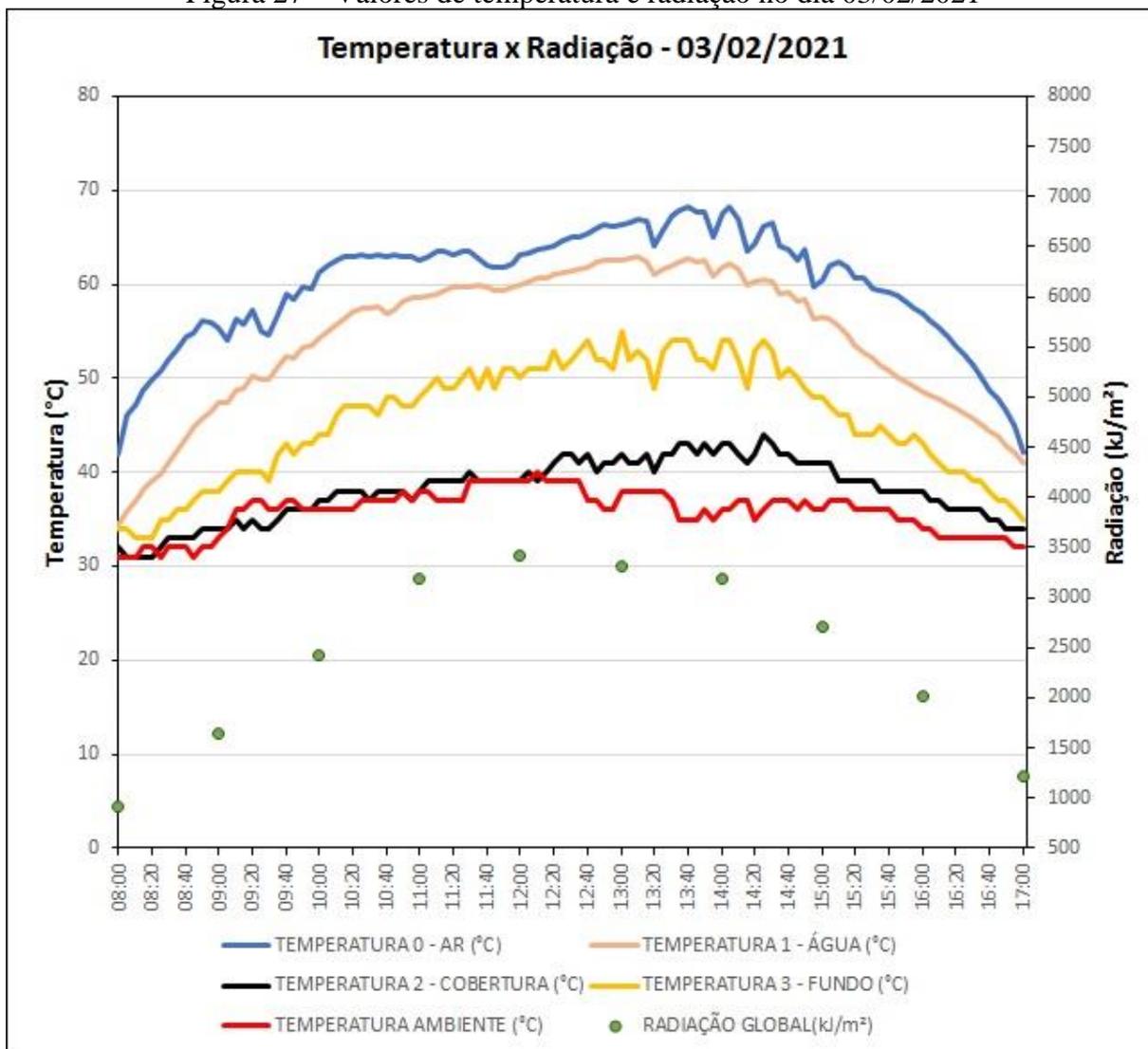
Figura 26 – Valores de temperatura e radiação no dia 02/02/2021



Fonte: Autor, 2021.

## APÊNDICE C – RESULTADOS DOS TESTES REALIZADOS NO DIA 03/02/2021

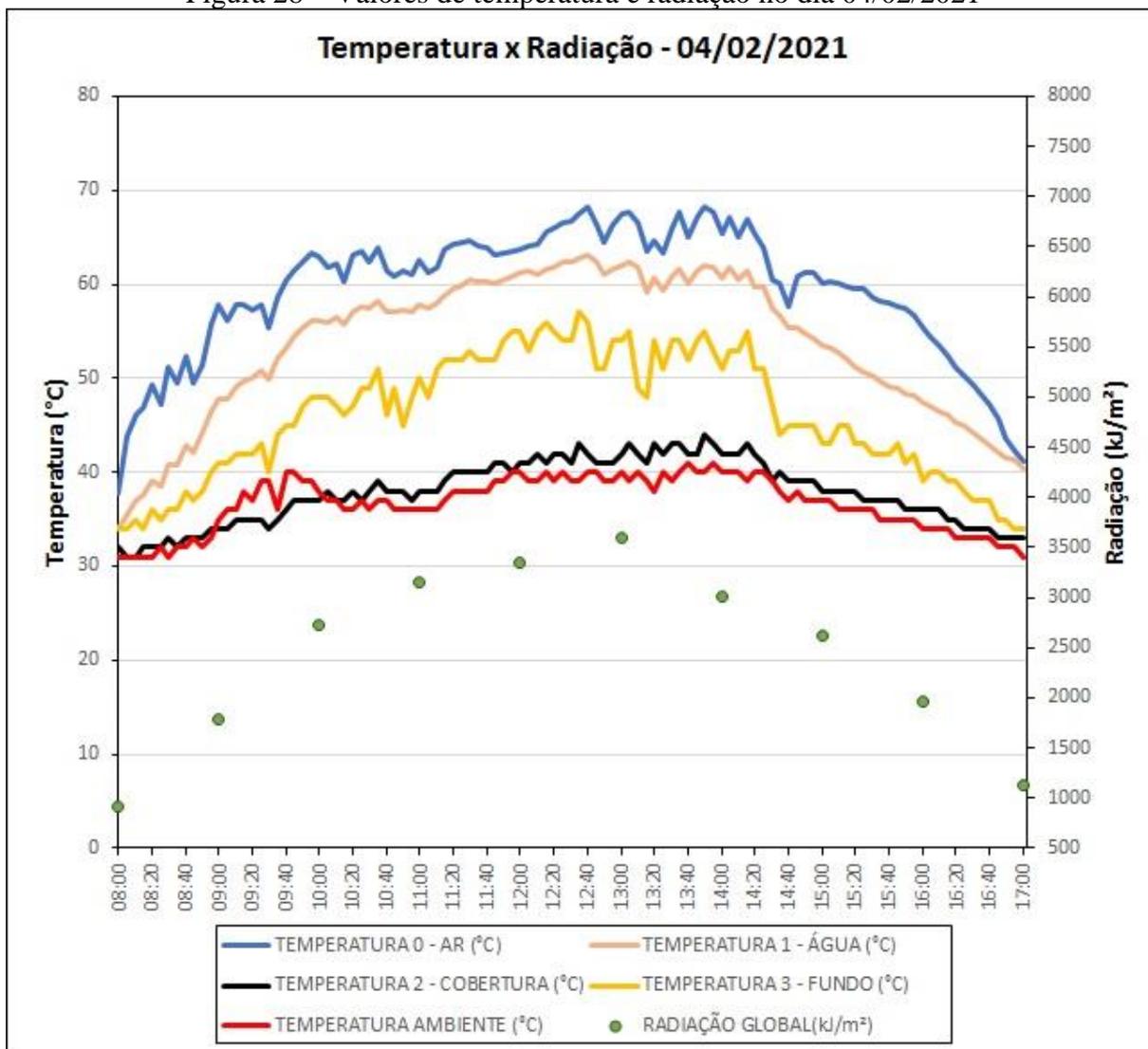
Figura 27 – Valores de temperatura e radiação no dia 03/02/2021



Fonte: Autor, 2021.

## APÊNDICE D – RESULTADOS DOS TESTES REALIZADOS NO DIA 04/02/2021

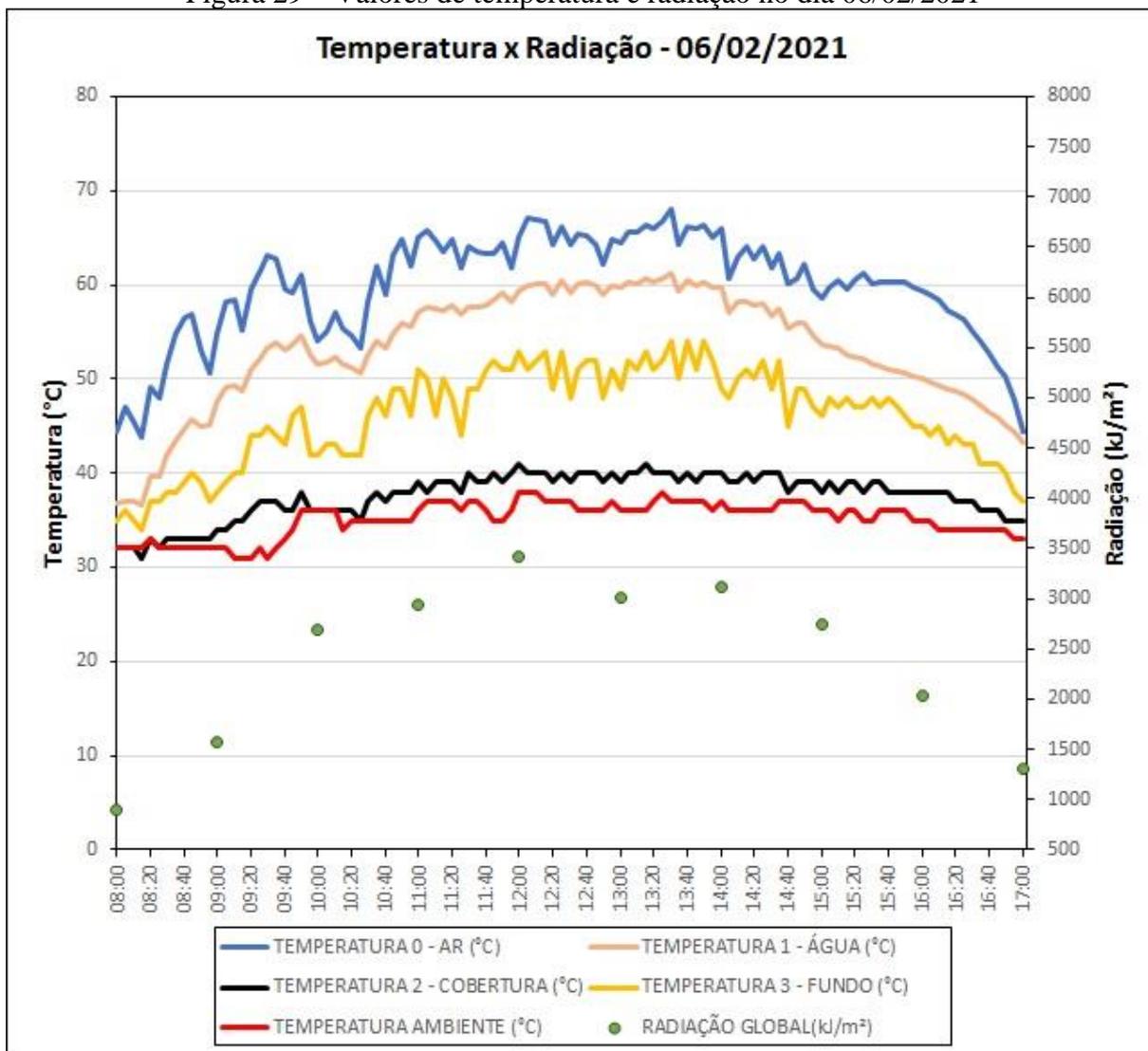
Figura 28 – Valores de temperatura e radiação no dia 04/02/2021



Fonte: Autor, 2021.

## APÊNDICE E – RESULTADOS DOS TESTES REALIZADOS NO DIA 06/02/2021

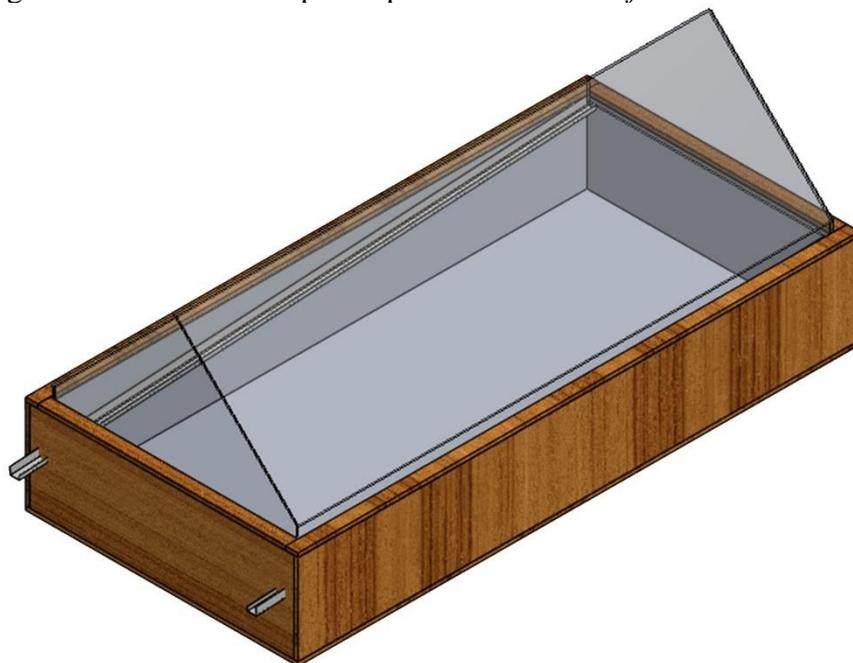
Figura 29 – Valores de temperatura e radiação no dia 06/02/2021



Fonte: Autor, 2021.

## APÊNDICE F – VISTA 3D DO DESSALINIZADOR

Figura 30 – Vista 3D do protótipo elaborado no *software Solidworks*

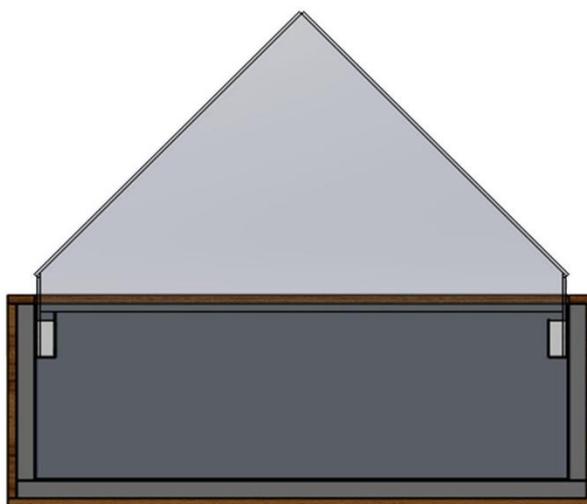


VISTA 3D

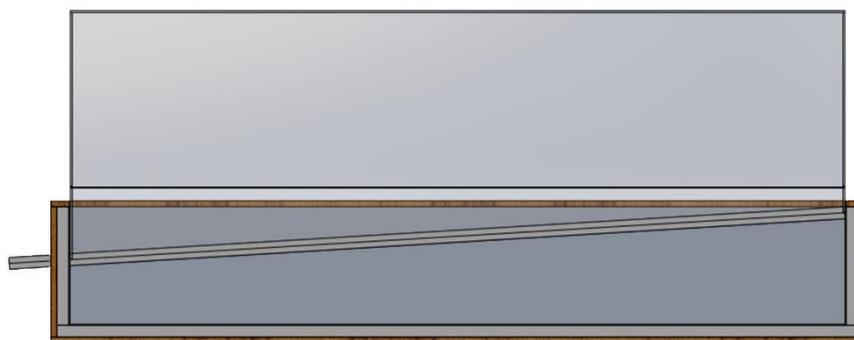
Fonte: Autor, 2021.

## APÊNDICE G – CORTES FRONTAL E LATERAL DO DESSALINIZADOR

Figura 31 – Corte frontal e lateral do protótipo elaborado no *software Solidworks*



CORTE FRONTAL

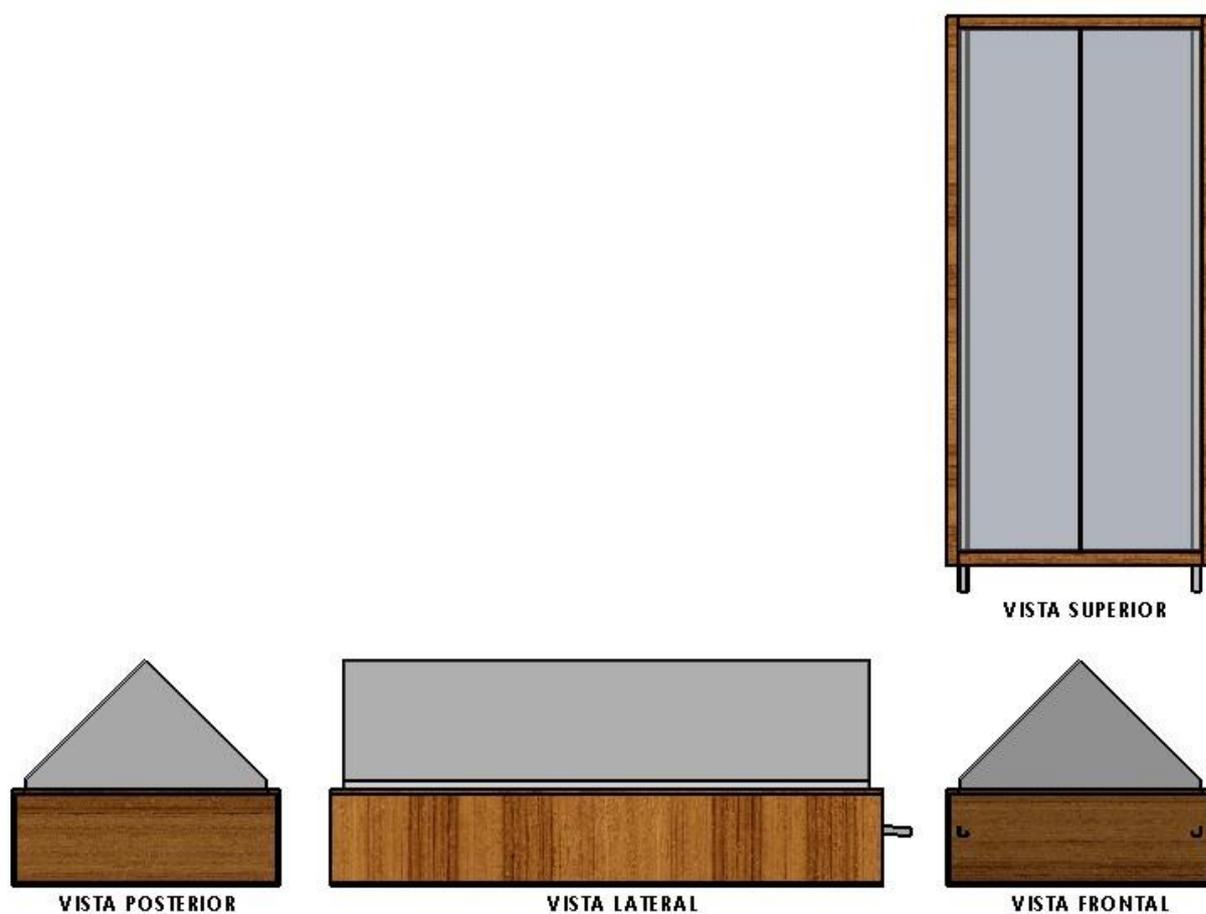


CORTE LATERAL

Fonte: Autor, 2021.

## APÊNDICE H – VISTAS SUPERIOR, FRONTAL, LATERAL E POSTERIOR DO DESSALINIZADOR

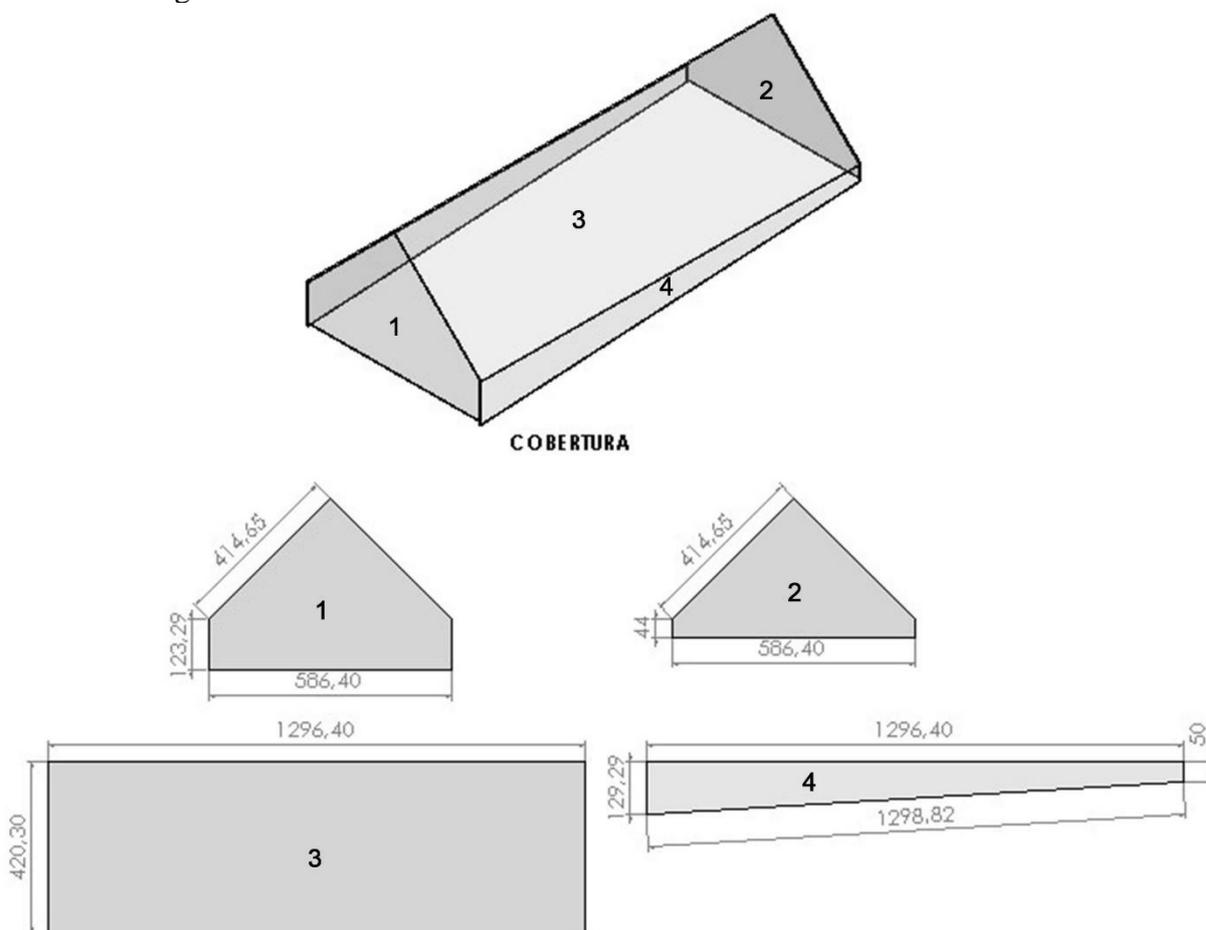
Figura 32 – Vistas do protótipo elaborado no *software Solidworks*



Fonte: Autor, 2021.

## APÊNDICE I – MEDIDAS RELACIONADAS À COBERTURA

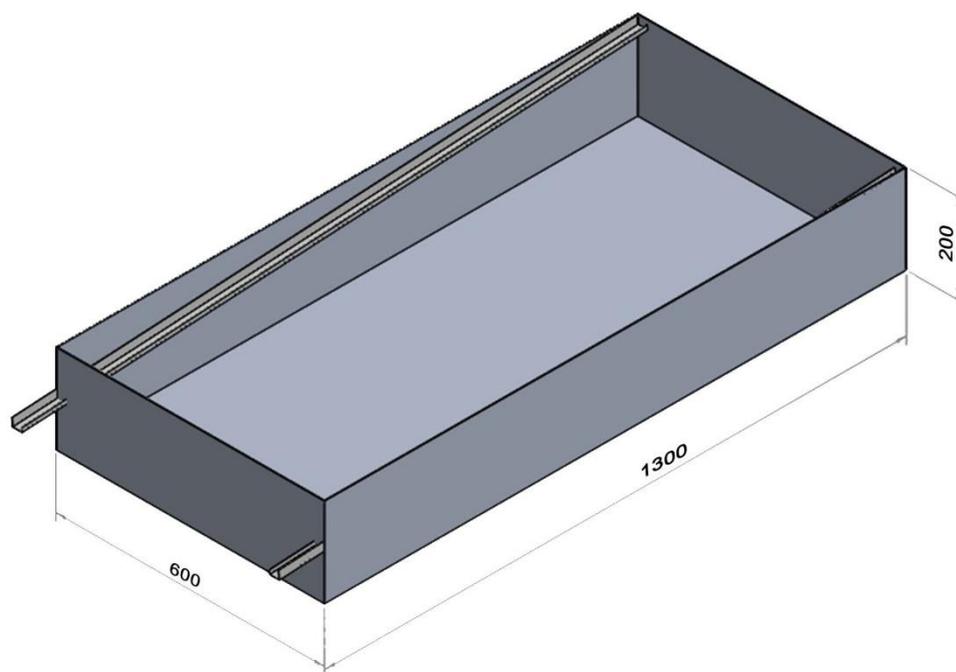
Figura 33 – Medidas relacionadas à cobertura do dessalinizador em mm



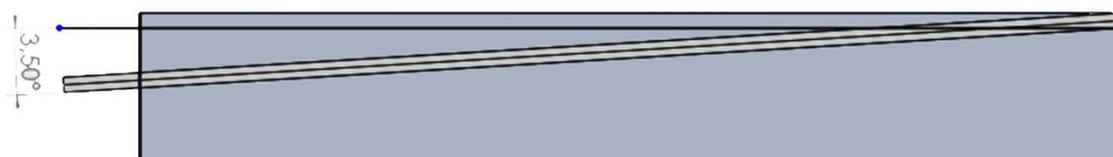
Fonte: Autor, 2021.

## APÊNDICE J – MEDIDAS RELACIONADAS À BACIA

Figura 34 – Medidas relacionadas à bacia do dessalinizador em mm



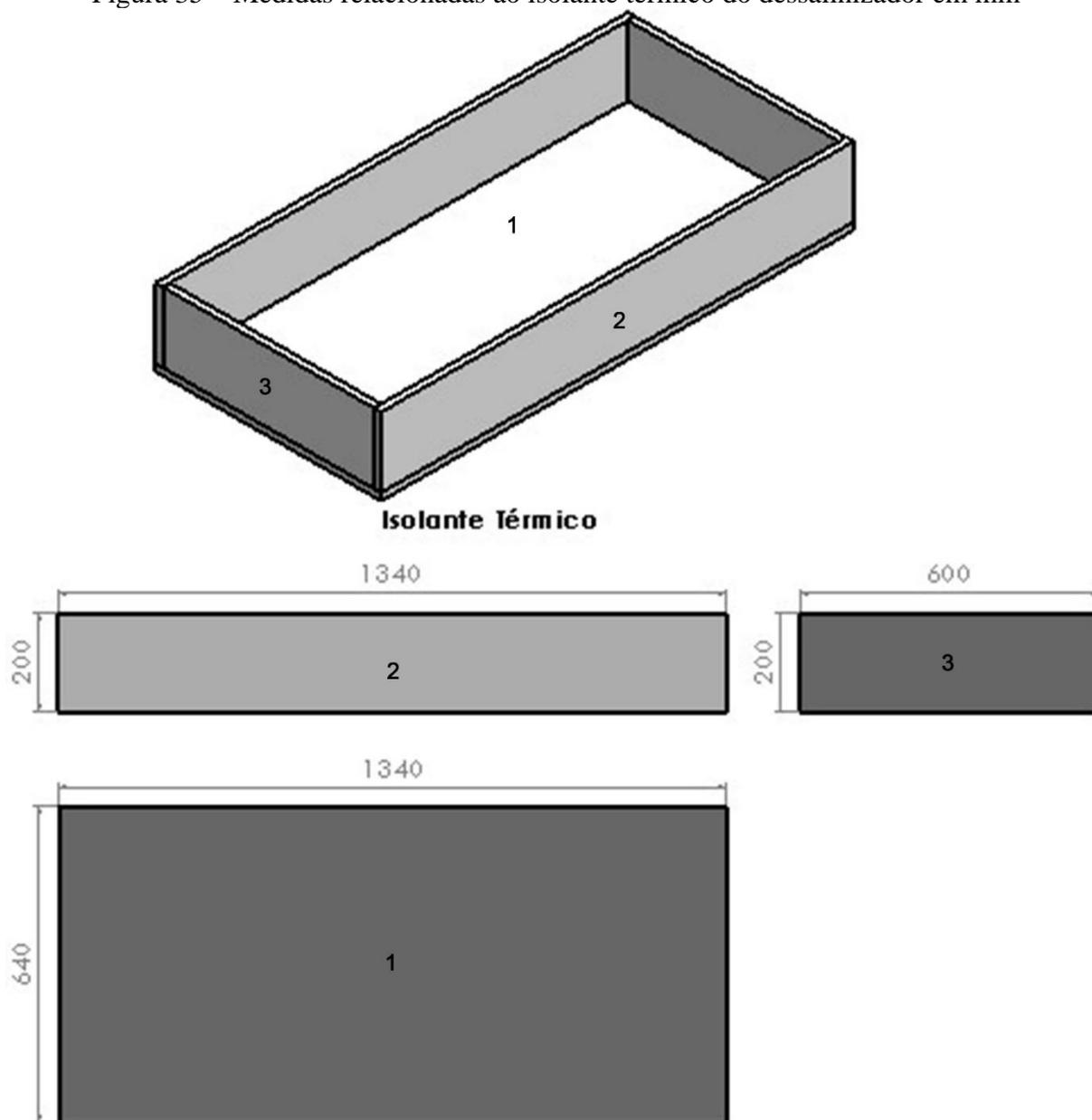
BACIA



Fonte: Autor, 2021.

## APÊNDICE K – MEDIDAS RELACIONADAS AO ISOLANTE TÉRMICO

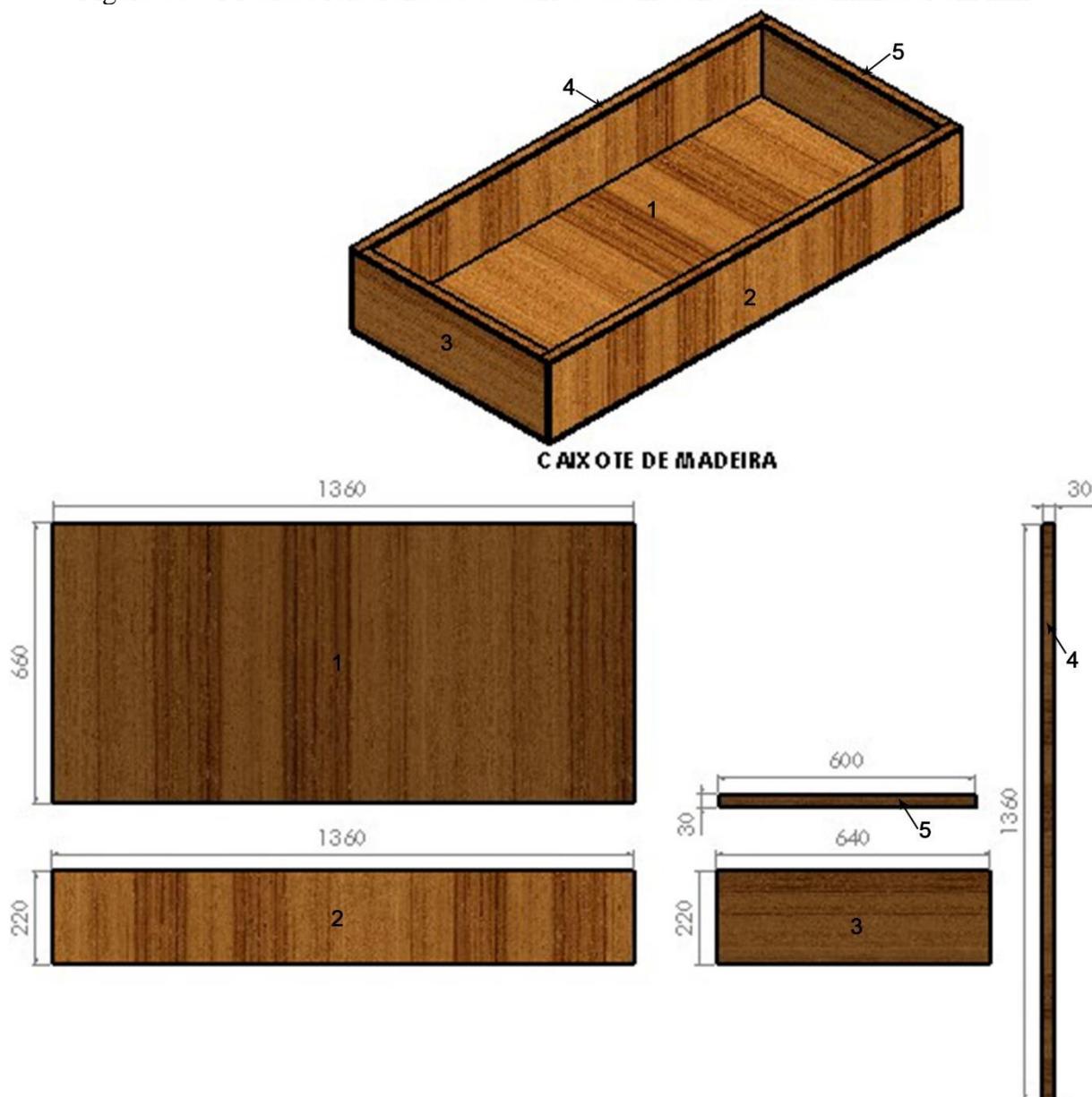
Figura 35 – Medidas relacionadas ao isolante térmico do dessalinizador em mm



Fonte: Autor, 2021.

**APÊNDICE L – MEDIDAS RELACIONADAS AO CAIXOTE DE MADEIRA**

Figura 36 – Medidas relacionadas ao caixote de madeira do dessalinizador em mm



Fonte: Autor, 2021.