



**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO (PROPPG)  
MESTRADO ACADÊMICO EM SOCIOBIODIVERSIDADE E TECNOLOGIAS  
SUSTENTÁVEIS (MASTS)**

**CLÁUDIO WAGNER SANTOS LIMA**

**MODELAGEM MATEMÁTICA DE PROTÓTIPO PARA DESSALINIZAÇÃO DE  
ÁGUA UTILIZANDO ENERGIA SOLAR TÉRMICA COM POTENCIAL DE  
APLICAÇÃO NO MACIÇO DE BATURITÉ, CEARÁ, E REGIÕES EQUIVALENTES  
DE CLIMA.**

**REDENÇÃO – CEARÁ – BRASIL  
2022**

**CLÁUDIO WAGNER SANTOS LIMA**

**MODELAGEM MATEMÁTICA DE PROTÓTIPO PARA DESSALINIZAÇÃO DE  
ÁGUA UTILIZANDO ENERGIA SOLAR TÉRMICA COM POTENCIAL DE  
APLICAÇÃO NO MACIÇO DE BATURITÉ, CEARÁ, E REGIÕES EQUIVALENTES  
DE CLIMA.**

Dissertação apresentada á coordenação do Mestrado Acadêmico em Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis – MASTS da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente e Agrárias – Grande Área Interdisciplinar. Área de Concentração em Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis.

Orientador: Prof. Dr. Juan Carlos Alvarado Alcocer.

Coorientadora: Profa. Dra Olienaide Ribeiro de Oliveira Pinto.

**REDENÇÃO – CEARÁ – BRASIL  
2022**

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira  
Sistema de Bibliotecas da UNILAB  
Catalogação de Publicação na Fonte.

---

Lima, Claudio Wagner Santos.

L732m

Modelagem matemática de protótipo para dessalinização de água utilizando energia solar térmica com potencial de aplicação no Maciço de Baturité, Ceará, e regiões equivalentes de clima / Claudio Wagner Santos Lima. - Redenção, 2022.  
87f: il.

Dissertação - Curso de Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis, Mestrado Acadêmico em Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2022.

Orientador: Prof.º Dr. Juan Carlos Alvarado Alcocer.

Coorientador: Prof.ª Dra. Olienai de Oliveira Pinto.

1. Dessalinizador Solar. 2. Modelagem. 3. Concentrador Cilíndrico. I. Pinto, Olienai de Oliveira. II. Título.

CE/UF/BSCA

CDD 660

---

**CLÁUDIO WAGNER SANTOS LIMA**

**MODELAGEM MATEMÁTICA DE PROTÓTIPO PARA DESSALINIZAÇÃO DE  
ÁGUA UTILIZANDO ENERGIA SOLAR TÉRMICA COM POTENCIAL DE  
APLICAÇÃO NO MACIÇO DE BATURITÉ, CEARÁ, E REGIÕES EQUIVALENTES  
DE CLIMA.**

Dissertação apresentada á  
coordenação do Mestrado Acadêmico em  
Sociobiodiversidade e Tecnologias  
Sustentáveis – MASTS da Universidade da  
Integração Internacional da Lusofonia  
Afro-Brasileira – UNILAB, como parte dos  
requisitos para a obtenção do título de  
Mestre em Meio Ambiente e Agrárias –  
Grande Área Interdisciplinar. Área de  
Concentração em Sociobiodiversidade e  
Tecnologias Sustentáveis.

Aprovado em \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Juan Carlos Alvarado Alcocer.  
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (MASTS)  
Orientador

---

Profa. Dra Olienaide Ribeiro de Oliveira Pinto.  
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (MASTS)  
Coorientadora

---

Prof. Dr. XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX.  
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira

**REDEÇÃO – CEARÁ – BRASIL  
2022**

A Deus.

Aos meus pais, João Alves de  
Lima e Maria Concebida Santos Lima.

A minha esposa, Lia Teles Lima.

Ao meu filho, Leo Teles Lima.

## AGRADECIMENTO

Ao Prof. Dr. Juan Carlos Alvarado Alcocer, pela excelente orientação e apoio na construção do material.

A Profa. Dra. Olienaide Ribeiro de Oliveira Pinto, por suas orientações e colaborações, que sem seu apoio tanto na dissertação quanto na formação acadêmica a obtenção do título seria impossível.

Ao Prof. Sergio Ruoso, por prontamente disponibilizar sua ideia de dessalinizador para podermos ter este trabalho, sem sua cooperação o trabalho não seria possível.

Agradeço a Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira por dar oportunidade de estudo e estrutura para a construção da minha base de conhecimento técnico para realização deste trabalho.

Agradeço ao meu chefe e colega de trabalho, Thiago Moura de Araújo por sempre apoiar minha formação.

Agradeço aos amigos que em todas as suas formas me deram apoio a prestar o curso, aos amigos que fiz durante a jornada de curso e aos que me apoiaram a terminá-lo.

Agradeço aos meus familiares, pai e mãe, que acreditaram em mim e na minha capacidade e que acabaram entendendo as necessidades dos domingos de estudo e apoiaram.

Agradeço aos meus familiares, irmãos e irmãs, que com suas formas diferentes sempre tentaram e conseguiram me estimular a querer caminhar mais na minha formação acadêmica.

Agradeço a minha esposa por me ajudar, apoiar e entender a falta de tempo para ela e ainda sempre me estimular a crescer intelectualmente.

Agradeço em especial ao meu filho, que é minha maior fonte de inspiração para querer sempre superar os obstáculos e não parar o crescimento pessoal.

Agradeço também em especial a um amigo, Antônio Edson Aquino Medeiros, que foi um dos maiores apoiadores para que eu iniciasse essa trajetória no MASTS.

## RESUMO

A escassez de água no Nordeste brasileiro sempre foi um limitador para o desenvolvimento da região, além desse fator, partes da região constitui-se de água salobra. Áreas rurais e remotas geralmente não possuem sistemas integrados de tratamento de água devido ao custo elevado, e a região Nordeste, mesmo com programas do governo como “água para todos”, não consegue suprir a demanda de pessoas contempladas devido recurso limitados do governo. Em localidades isoladas, ou em regiões mais rurais, onde é comum a utilização de poços profundos, é interessante um sistema de tratamento descentralizado. Um dos sistemas mais antigos de dessalinização de água é através da evaporação. Atualmente a técnica de dessalinização foi aprimorada sendo possível através de vários processos. Nesse contexto, o trabalho teve como objetivo apresentar uma modelagem matemática de um protótipo do projeto de um dessalinizador solar que utiliza um concentrador solar parabólico cilíndrico. Para realização desse estudo foi apresentado cada parte do projeto e por conseguinte a demonstração da modelagem matemática dele, tendo ao final do trabalho os passos e modelagem do trabalho de forma simples a poder implementar na região de Baturité ou local de clima similar. Para o desenvolvimento dos desenhos e cálculos foram utilizados softwares livres ou em suas licenças de teste. Nos resultados, demonstrou-se a matemática da tecnologia e desenvolvimento dos cálculos para que possam ser facilmente replicados fisicamente em qualquer região de semiárido.

**Palavras-chave:** Dessalinizador Solar. Modelagem. Concentrador Cilíndrico.

## **ABSTRACT**

The scarcity of water in the Brazilian Northeast has always been a limiting factor for the development of the region, in addition to this factor, parts of the region are made up of brackish water. Rural and remote areas generally do not have integrated water treatment systems due to the high cost, and the Northeast region, even with government programs such as “water for all”, is unable to meet the demand of people covered due to limited government resources. In isolated locations, or in more rural regions, where the use of deep wells is common, a decentralized treatment system is interesting. One of the oldest systems of desalination of water is through evaporation. Currently, the desalination technique has been improved and is possible through several processes. In this context, the objective of this work was to present a mathematical modeling of a prototype of the design of a solar desalinator that uses a cylindrical parabolic solar concentrator. In order to carry out this study, each part of the project was presented and therefore the demonstration of its mathematical modeling, having at the end of the work the steps and modeling of the work in a simple way to be able to implement in the region of Baturité or place of similar climate. For the development of the drawings and calculations, free software or their test licenses were used. In the results, the mathematics of the technology and the development of the calculations were demonstrated so that they can be easily replicated physically in any semi-arid region.

**Keywords:** Solar Desalinizer. Modeling. Cylindrical Concentrator.

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1</b> - MAPA DO CEARÁ COM DESTAQUE PARA O MACIÇO DE BATURITÉ.....	20
<b>FIGURA 2</b> - GRÁFICO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA, SEGUNDO AS CLASSES DE CONSUMO NA REGIÃO DO MACIÇO DE BATURITÉ.....	22
<b>FIGURA 3</b> - MODELO SIMPLIFICADO DE UM DESSALINIZADOR SOLAR TÉRMICO.....	26
<b>FIGURA 4</b> - ESQUEMÁTICO DO PROCESSO DE DESTILAÇÃO FLASH DE MÚLTIPLOS ESTÁGIOS.....	27
<b>FIGURA 5</b> - ESQUEMÁTICO SIMPLES DO PROCESSO DE DESTILAÇÃO DE MÚLTIPLO EFEITO .....	28
<b>FIGURA 6</b> - ESQUEMÁTICO DE UM DESSALINIZADOR POR CONGELAMENTO.....	29
<b>FIGURA 7</b> - ESQUEMA SIMPLIFICADO DO PROCESSO DE ELETRODIÁLISE .....	30
<b>FIGURA 8</b> - ESQUEMÁTICO DA OSMOSE REVERSA .....	31
<b>FIGURA 9</b> - ENERGIA GASTA X SAL REMOVIDO .....	33
<b>FIGURA 10</b> - EVAPORADOR SIMPLES EFEITO, TUBOS HORIZONTAIS.....	34
<b>FIGURA 11</b> - ESQUEMÁTICO DE UM TUBO RECEPTOR A VÁCUO .....	38
<b>FIGURA 12</b> - ESQUEMÁTICO DA BOMBA E DO TANQUE DE ÁGUA SALOBRA.....	39
<b>FIGURA 13</b> - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE RAIOS SOLARES NO PLANO FOCAL DO CONCENTRADOR PARABÓLICO.....	45
<b>FIGURA 14</b> - VISTA COMPLETA DAS PARTES DO DESSALINIZADOR.....	47
<b>FIGURA 15</b> - MODELO DO EVAPORADOR.....	48
<b>FIGURA 16</b> - SERPENTINA DO EVAPORADOR.....	48
<b>FIGURA 17</b> - ESQUEMA DO CIRCUITO DE ÓLEO MINERAL.....	50
<b>FIGURA 18</b> - ESQUEMÁTICO DO EVAPORADOR E AS CAIXAS SALOBRAS E DE ÁGUA DESTILADA.....	51
<b>FIGURA 19</b> – MODELO DA CAIXA DESSALINIZADA.....	56
<b>FIGURA 20</b> - CAIXA DE ARMAZENAMENTO DA ÁGUA SALOBRA.....	57
<b>FIGURA 21</b> - MODELO DO EVAPORADOR PROJETADO.....	61
<b>FIGURA 22</b> - MODELO DO TUBO RECEPTOR DA EMPRESA GAIA SOLAR.....	69
<b>FIGURA 23</b> - ATLAS SOLARIMÉTRICO DO BRASIL, 2000 EM MJ/M <sup>2</sup> .DIA.....	72

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 1 - DADOS DE CONSUMO DIVIDIDO POR CLASSES DE CONSUMO NOS ANOS DE 2011, 2016 E 2017 .....</b>	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
<b>TABELA 2 - NÚMERO DE HORAS DE SOL ÚTEIS (INTENSIDADE ACIMA DA SOMBRA) .....</b>	<b>43</b>
<b>TABELA 3 - FATOR DE CORREÇÃO A APLICAR EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE ORIENTAÇÃO DAS PLACAS .....</b>	<b>43</b>
<b>TABELA 4 - DENSIDADE DA ÁGUA DO MAR (G/CM<sup>3</sup>) PARA VÁRIAS TEMPERATURAS E SALINIDADE.....</b>	<b>58</b>
<b>TABELA 5 - VISCOSIDADE DINÂMICA DA ÁGUA EM RELAÇÃO A TEMPERATURA EM 1 ATM. ...</b>	<b>60</b>
<b>TABELA 6 - TERMODINÂMICA DA ÁGUA SATURADA .....</b>	<b>65</b>

## LISTA DE QUADROS

<b>QUADRO 1 - PATENTES DO WIPO QUE RELACIONAM CONCENTRADOR PARABÓLICO E DESSALINIZAÇÃO</b> .....	52
<b>QUADRO 2 - PATENTES DO EPO QUE RELACIONAM CONCENTRADOR PARABÓLICO E DESSALINIZAÇÃO</b> .....	52
<b>QUADRO 3 - CALOR ESPECÍFICO DE ALGUNS MATERIAIS EM (CAL/G. °C) E (J/KG.K)</b> .....	66
<b>QUADRO 4 - FLUIDOS X COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA</b> .....	68
<b>QUADRO 5 - INFORMAÇÕES TÉCNICAS TUBO RECEPTOR DA EMPRESA GAIA SOLAR.</b> .....	70
<b>QUADRO 6 - CARACTERÍSTICAS DE LÍQUIDO SATURADO DO FLUIDO DOWTHERM A (UNIDADES INTERNACIONAL)</b> .....	70

## LISTA DE ABREVIACÃO

- A** - Área de contato do trocador de calor.
- $A_{tubftc}$**  - Área da tubulação da bomba em [m<sup>2</sup>]
- b** - distância de sombra
- COELCE** – Companhia Elétrica do Ceará
- $c_p$**  - Calor específico.
- $C_{ent}^s$**  - Concentração de sais da entrada
- $C_r^s$**  - Concentração de sais do rejeito
- $C_v^s$**  - Concentração de sais do vapor
- DCV** - Destilação por Compressão de Vapor
- DNOCS** - Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
- ENEL** - Ente nazionale per l'energia elétrica
- EPO** - European Patent Office
- f** - distância focal
- FTC** - Fluido de Transferência de Calor
- h** - Coeficiente de transferência de calor por convecção
- H** - Entalpia.
- $H_c$**  - Entalpia específica carga
- Hm** - Altura manométrica
- $H_{mftc}$**  - Altura manométrica da bomba em [m]
- $H_r$**  - Entalpia específica do rejeito.
- $H_{tc}$**  - Calor latente do líquido trocador de calor.
- $H_{tc}$**  - Entalpia específica do trocador de calor
- INPE** - Instituto Nacional de Pesquisa Espacial
- IOCS** – Inspetoria de Obras Contra as Secas
- L** - Espessura da parede
- $m_c$**  – Massa da carga
- MED** - Destilação de Múltiplo Efeito
- $m_r$**  – Massa do rejeito
- MSF** - Destilação Flash de Múltiplos Estágios
- $m_{l_{tc}}$**  - Massa de líquido do trocador de calor
- $M_{tc}$**  - Vazão mássica do líquido do trocador de calor.

$m_v$  – Massa do vapor

**OR** - Osmose Reversa

$P_i$  - Pressão

$P_{bsalobra}$  - Potência da bomba salobra

$q$  - Quantidade de calor.

$Q_i$  - Vazão da bomba

**Qapc** - Quantidade de água *per capita*

**Qdrs** - Quantidade de dias que o reservatório irá suprir

**Qpf** - Quantidade de pessoas por família

**R** – Raio da parábola

**SPG** - Secretaria do Planejamento e Gestão

**SSI** - Irradiância Solar Espectral

**T** - Temperatura.

**TSI** - Irradiância Solar Total

**U** - Coeficiente total de troca térmica.

$U_c$  - Energia da carga

$U_r$  - Energia do rejeito

$U_{tc}$  - Energia do trocador de calor

$U_v$  - Energia do vapor

**UA** – Unidade Astronômica

$V_{entEvap}$  - Vazão mássica de entrada do evaporador

$V_{ftc}$  - Vazão mássica do fluido trocador de calor em [kg/s]

$v_{ftc}$  - Velocidade do fluido trocador de calor em [m/s]

$v_i$  - Velocidade do fluido

$V_{tan}$  - Volume total de água necessário

$V_{tanSal}$  - Volume tanque de água salgada

**Wf** - largura do tubo receptor

**WIPO** - World Intellectual Property Organization

**Y** - Viscosidade dinâmica

**Zi** - Altura da tubulação relativa

**$\Delta T$**  - Variação de temperatura

**$\lambda$**  - Condutividade térmica

$\rho_{as}$  - Massa específica da água salobra

$\rho_{ftc}$  - Massa específica do fluido trocador de calor em [kg/m<sup>3</sup>]

$\psi$  - ângulo entre a normal e o fim da parábola

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>18</b>
<b>2.1</b>	<b>DESSALINIZADORES SOLARES: UMA TECNOLOGIA VIÁVEL PARA O CAMPO</b>	<b>18</b>
<b>2.2</b>	<b>O MACIÇO DE BATURITÉ.</b>	<b>19</b>
<b>2.3</b>	<b>ENERGIA E RADIAÇÃO</b>	<b>23</b>
2.3.1	FOTOTÉRMICA	23
<b>2.4</b>	<b>ENERGIA SOLAR.</b>	<b>24</b>
2.4.1	ENERGIA SOLAR TÉRMICA	24
2.4.2	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	24
2.4.3	ENERGIA TERMOSSOLAR OU ENERGIA SOLAR CONCENTRADA	25
<b>2.5</b>	<b>DESSALINIZAÇÃO</b>	<b>25</b>
2.5.1	PROCESSOS TÉRMICOS	25
2.5.1.1	DESSALINIZAÇÃO TÉRMICA:	26
2.5.1.2	DESTILAÇÃO FLASH DE MÚLTIPLOS ESTÁGIOS (MSF)	27
2.5.1.3	DESTILAÇÃO DE MÚLTIPLO EFEITO (MED)	27
2.5.1.4	DESTILAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR (CV)	28
2.5.1.5	CONGELAMENTO	29
2.5.2	PROCESSOS POR MEMBRANAS	29
2.5.2.1	ELETRODIÁLISE (ED)	30
2.5.2.2	OSMOSE REVERSA (OR)	31
<b>3</b>	<b>PRINCÍPIO TEORICO DO DESSALINIZADOR</b>	<b>33</b>
<b>3.1</b>	<b>ENERGIA GASTA PARA DESSALINIZAÇÃO.</b>	<b>33</b>
<b>3.2</b>	<b>EVAPORADOR</b>	<b>33</b>
<b>3.3</b>	<b>TUBO RECEPTOR</b>	<b>37</b>
<b>3.4</b>	<b>FLUIDO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR (FTC) DO TROCADOR DE CALOR.</b>	<b>38</b>
<b>3.5</b>	<b>DIMENSIONAMENTO DAS BOMBAS</b>	<b>39</b>
3.5.1	DIMENSIONAMENTO DA BOMBA DO TANQUE	39
3.5.2	BOMBA DO FLUIDO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.	40
<b>3.6</b>	<b>CONCENTRADOR CILÍNDRICO PARABÓLICO</b>	<b>42</b>

3.6.1	CRITÉRIOS DE PARTIDA _____	42
3.6.2	INTENSIDADE ÚTIL E RENDIMENTO DO COLETOR _____	42
3.6.2.1	CÁLCULO DA INTENSIDADE ÚTIL _____	42
3.6.2.2	PASSOS PARA O CÁLCULO DA ENERGIA ÚTIL E DETERMINAÇÃO DA SUPERFÍCIE NECESSÁRIA _____	44
3.6.3	DEFINIÇÕES PARA A PARABÓLICA CILÍNDRICA. _____	44
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS _____</b>	<b>46</b>
<b>4.1</b>	<b>DESCRIÇÃO DESSALINIZADOR SOLAR PARABÓLICO _____</b>	<b>46</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCURSÃO _____</b>	<b>51</b>
<b>5.1</b>	<b>ESTUDO PROSPECTIVO _____</b>	<b>51</b>
<b>5.2</b>	<b>PROJETO DOS TANQUES. _____</b>	<b>54</b>
5.2.1	TANQUE DE ÁGUA DESSALINIZADA. _____	55
5.2.2	TANQUE DE ÁGUA SALOBRA. _____	56
5.2.3	BOMBA DE ÁGUA SALOBRA _____	57
<b>5.3</b>	<b>PROJETO DO EVAPORADOR _____</b>	<b>60</b>
5.3.1	VAZÃO MÁSSICA DE SAÍDA DO EVAPORADOR. _____	62
5.3.2	VAZÃO MÁSSICA DE ENTRADA. _____	62
5.3.3	QUANTIDADE DE SAIS QUE ENTRAM NO EVAPORADOR: _____	63
5.3.4	QUANTIDADE DE SAIS NO REJEITO DO EVAPORADOR: _____	63
5.3.5	VAZÃO MÁSSICA DO REJEITO. _____	64
5.3.6	BALANÇO DE ENERGIA DO EVAPORADOR. _____	64
5.3.7	DIMENSIONAMENTO DO TROCADOR DE CALOR. _____	67
<b>5.4</b>	<b>CONCENTRADOR DE CALOR. _____</b>	<b>69</b>
5.4.1	TUBO RECEPTOR _____	69
5.4.2	FLUIDO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR. _____	70
5.4.3	ÁREA DO CONCENTRADOR CILÍNDRICO PARABÓLICO. _____	71
5.4.4	LARGURA DO CONCENTRADOR CILÍNDRICO PARABÓLICO _____	73
5.4.5	BOMBA DO FLUÍDO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR _____	76
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO _____</b>	<b>81</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O semiárido do Nordeste brasileiro tem como principal característica climática a instabilidade temporal e espacial das chuvas, em paralelo a esses fatores é observado na região elevadas taxas de temperatura e evaporação. A taxa de precipitação média anual desta localização geográfica é igual ou inferior a 800 milímetros e as temperaturas anuais medias são elevadas, sendo iguais ou superiores a 25°C. Este tipo de clima se estende por quase todo o interior do Nordeste (LUCENA *et al.*, 2018).

A região Nordeste tem um histórico de seca, morte de pessoas e gado e o drama dos refugiados ambientais em larga escala, conhecidos como os retirantes. No sentido de resolver o problema da região, no ano de 1909, foi criada a Inspetoria de Obras Contra as Secas (IOCS), em 1945 foi reestruturada e passou a se denominar de Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS), por fim, em 1959, com a criação da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) que a seca passou a ser visto como o principal problema a ser vencido na região (FERREIRA, 2017).

Conforme exposto em Avaliação Físico-Química e Microbiológica da Água de Poços Profundos da Macrorregião do Maciço de Baturité-CE (2016) é visto que a região do maciço de Baturité, para 100% das amostras analisadas todas apresentaram variáveis que as deixam impróprias para o consumo humano, necessitando de tratamento para o mesmo. Sabe-se ainda que no Maciço do Baturité, um percentual de sua população vive da exploração das atividades rurais (bovinocultura, ovinocultura, caprinocultura e etc.) e/ou de culturas agrícolas que muitas vezes não são capazes de fornecer renda suficiente para a sobrevivência, e em alguns casos, por falta de conhecimento, recursos ou políticas públicas de incentivo, não se tem a utilização das tecnologias adequadas, entre outras coisas, desperdiçando o potencial da região, de modo que os prejuízos econômicos e ambientais são evidentes (OLIVEIRA *et al.*, 2016).

O Maciço de Baturité - Ceará é uma área de potencial turístico, que contempla uma das mais importantes serras úmidas do Estado, próximo à metrópole Fortaleza, e abriga um contingente populacional alto, principalmente ao sopé de encostas a barlavento, vertente úmida (IPECE, 2016). O Maciço compreende uma área de 3.707,3 km<sup>2</sup> e é formado de 13 municípios, sendo: Pacoti, Palmácia,

Guaramiranga, Mulungu, Aratuba, Capistrano, Itapiúna, Baturité, Aracoiaba, Acarape, Redenção, Barreira e Ocara. Os habitantes da macrorregião somam 230.523, com maioria na zona rural (IPECE, 2016).

Para as regiões mais afastadas da capital como o caso do maciço, além da água, outra problemática atual da região rural é relacionada a utilização de energia em sua forma elétrica, que nem sempre alcança todos os moradores e quando o faz é um custo no orçamento familiar a ser administrado. O maciço apesar de apresentar um bom desenvolvimento não está livre dessas problemáticas. Cientes dessas limitações buscamos a alternativa da energia solar.

O Sol é um dos maiores provedores de energia e a base necessária para a vida no nosso planeta. A energia solar é convertida de várias formas e sempre foi utilizada como fator determinante para a evolução da civilização humana, e esse quadro só teve uma mudança na segunda revolução industrial, com as máquinas a vapor (THAKKAR, 2013). Hoje, quando o assunto é geração distribuída de energia elétrica, voltamos a utilizar a energia do sol e ter como grande representante a geração fotovoltaica. Em sua pesquisa Pereira, 2019 mostra como a popularidade dessa fonte de energia vem, entre outros motivos devido, seu baixo impacto ambiental, sua durabilidade e sua capacidade de produção e viabilidade econômica.

É importante, ainda, reforçar a importância da água e que a mesma é fundamental para que exista vida na terra. Quando nos referimos a água, estamos nos referindo a um elemento básico cuja falta impede a manutenção de vida no planeta. A Terra possui cerca de dois terços de sua superfície recoberta de água, são aproximadamente 350 milhões de km<sup>2</sup> de um total aproximado de 500 milhões. Entretanto, existem apenas 2% de água doce, os outros 98% são consideradas águas salgadas, estima-se, ainda, que destes 2% de água doce disponível, apenas 0,002% apresentam-se próprias para o consumo humano (água potável), os outros 1,998% de água doce são considerados contaminadas ou poluídas (COSTA *et al.*, 2016).

A dessalinização é um processo muito antigo que soluciona muito bem a problemática do maciço purificando a água e utilizando uma energia que é extremamente abundante, a energia térmica-solar. A dessalinização térmica-solar inicia-se por volta do século IV a.C., com Aristóteles. A metodologia apresentada por ele é baseada na evaporação da água impura e posteriormente condensá-la, obtendo dessa forma água potável, já a primeira aplicação do processo de dessalinização para separar água e sal, por destilação, foi em aproximadamente em 200 d.C., a técnica foi

aplicada por marinheiros, que devido as grandes viagens da época, sentiram necessidade de produzir água doce (DANTAS, 2021).

Diante desse contexto, a pesquisa foi norteadada a partir da necessidade da retirada do sal da água, utilizando baixos recursos financeiros e poucos impactos ambientais e pela identificação do seguinte problema: Qual a solução social/técnica que pode suprir a necessidade local alinhada ao desenvolvimento sustentável?

Como objetivo geral, esse trabalho vem fazer a modelagem matemática de um protótipo de um dessalinizador que utiliza a energia solar térmica para a dessalinização da água, calculando todas as partes necessárias para a sua construção, que teve como foco a região do maciço de Baturité, no entanto com as devidas alterações poderá ser aplicado em qualquer região com clima semiárido. Como objetivo específico tem-se a apresentação dos cálculos de todas as peças para a fácil replicação do mesmo por qualquer um que tenha o interesse.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é abordado a viabilidade técnica do dessalinizador para a região do maciço de Baturité, é apresentado também os principais tipos de dessalinizadores solares e seu funcionamento. O conhecimento mostrado nesse capítulo serve como embasamento básico para entender o dessalinizador e o projeto realizado no capítulo 3 e 4.

### 2.1 Dessalinizadores solares: Uma tecnologia viável para o campo

A necessidade de preservação da água e o seu uso sustentável são elementos essenciais para garantia da qualidade de vida do ser humano e são fundamentais para o desenvolvimento social e econômico da humanidade. Entretanto, o crescimento da população, a poluição e o uso ineficiente da água têm limitado o seu acesso em quantidade e qualidade. A procura de água potável está a crescer constantemente e a sua distribuição de forma equilibrada está a tornar-se um dos maiores desafios à população mundial (SAMPAIO, 2016).

Existem diversos métodos de transformação de água salgada em água potável. A este processo é chamado dessalinização, ou seja, a remoção de sais minerais da água salgada. A dessalinização tem-se demonstrado cada vez mais como uma alternativa viável para o fornecimento de água potável (PINHO, 2009).

A dessalinização é uma das alternativas para a produção de água potável para consumo humano e irrigação. Já existem países a utilizar esta forma de obtenção de água, principalmente no Médio Oriente (PINHO, 2009).

A dessalinização representará uma das principais fontes de recursos hídricos, principalmente para países com carências naturais em água potável. É uma tecnologia para responder de uma forma ampla ao fornecimento de água potável para fins domésticos, agrícolas e pecuária (SAMPAIO, 2016).

Como aliado, tem-se o Sol. Segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2017, a região Nordeste do Brasil mantém valores uniformes de irradiação, o mesmo atlas ainda destaca o Nordeste como maior potencial solar do Brasil, com valor médio do total diário da irradiação global horizontal de 5,49 kWh/m<sup>2</sup> e da componente direta normal de 5,05 kWh/m<sup>2</sup>.

Aliando a problemática, necessidade de purificação da água das comunidades do Maciço de Baturité, e as boas incidências solares na região do Nordeste, é natural tentar relacionar os dois pontos, levar esse tratamento de forma descentralizada para o campo.

## **2.2 O Maciço de Baturité.**

O Maciço de Baturité está localizado no Estado do Ceará, formado pelos municípios: Acarape, Aracoiaba, Aratuba, Barreira, Baturité, Capistrano, Guaramiranga, Itapiúna, Mulungu, Ocara, Pacoti, Palmácia e Redenção, totalizando 13 municípios, a Figura 1 mostra de forma clara as regiões do maciço. A região ocupa um território de área igual a 3.707 km<sup>2</sup>, como o Ceará tem um total de 148.826km<sup>2</sup>, o Maciço corresponde a 2,49% de todo o território cearense. No aspecto demográfico, apresenta uma população estimada de 243.982 habitantes, com densidade demográfica de 65,8 hab./km<sup>2</sup> (IPECE, 2019). A população concentra-se principalmente na área urbana da região, com 54,4%, enquanto a área rural permanece com 45,6% da população total (IPECE, 2021).

**Figura 1** - Mapa do Ceará com destaque para o maciço de Baturité



Fonte: IPECE (2017).

A agricultura, a pecuária e o extrativismo são grande parte da ocupação daqueles que vivem no Maciço de Baturité. Ao que se trata das pessoas que vivem

no campo, e assim mais próximas dos recursos naturais, que lidam diretamente com as várias dificuldades de morar longe dos centros urbanos, a este público é necessária uma atenção especial principalmente nas questões de qualidade de vida, e no direito básico que é acesso a água.

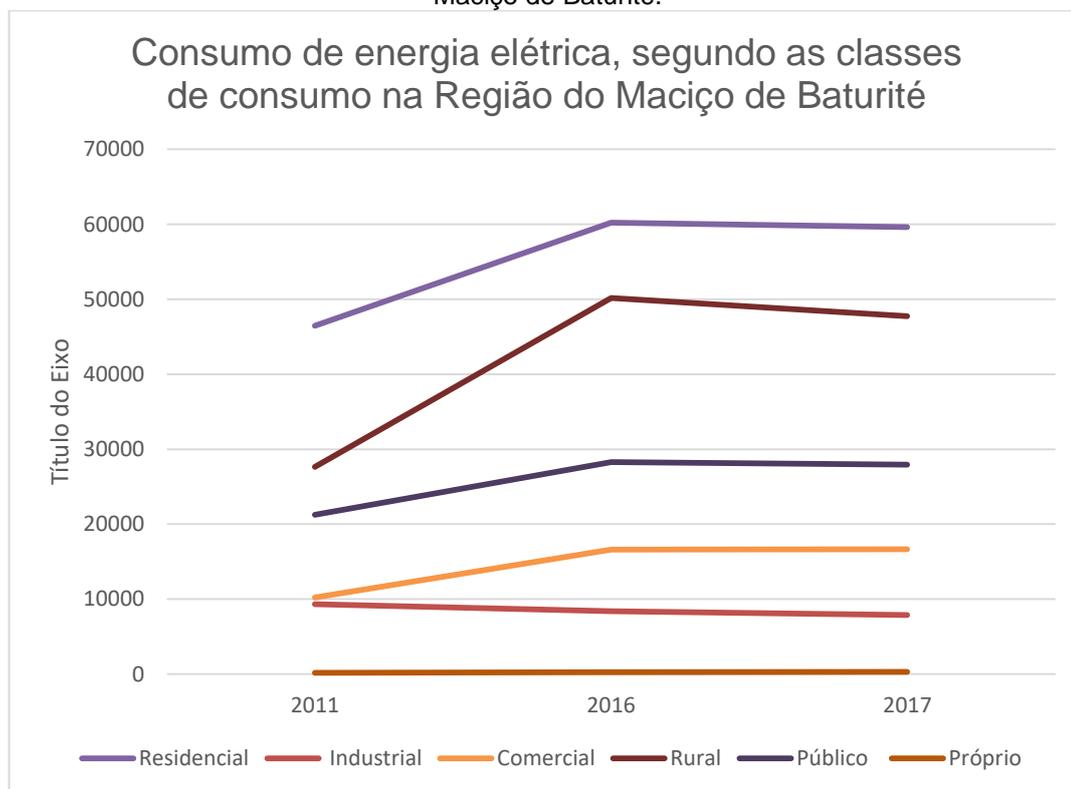
É necessário trabalhar a conscientização de qualquer recurso é finito e que as atividades que são corriqueiras, como a agropecuárias, podem trazer consequências adversas ao meio ambiente se não forem adotados os cuidados necessários. A poluição, a geografia do local e outros aspectos influenciam na potabilidade dessas águas. É fundamental apresentar metodologias alternativas e tecnologias sustentáveis em todo seu conceito: eficiência econômica com justiça social e prudência ecológica (ROMEIRO, 2011), aos moradores da região. Tais tecnologias e conceitos devem ser difundidos a todos, visto as limitações que temos em todo o país, e no mundo, relativos ao acesso a esse que é o direito humano a Água (SUDRÉ, 2020).

Às características geoambientais predominantes da região, são serras úmidas e secas e sertões (FREIRE e LIMA, 2014). As pessoas que vivem na zona rural do Maciço de Baturité não têm domínio das tecnologias ideais para captação da água local, ocorrendo repetidas vezes o prejuízo ao ecossistema e aos recursos naturais e os indivíduos.

O consumo de energia elétrica é um dos vários indicadores de desenvolvimento e no Maciço de Baturité, esse indicador demonstra crescimento nos últimos anos, conforme observa-se na Figura 2. Dados da Companhia Energética do Ceará mostram que em 2011 o território consumiu 115.062 MWh, enquanto em 2017 o consumo da região chegou a 160141 MWh. Oportunamente observa-se que dentre as classes de consumo da região, a rural classificou-se em 1º lugar (42%) em nível de crescimento do consumo no período de 2011 a 2017, importante observar que a indústria local teve uma redução de 18% em seu consumo, isso pode indicar indústrias que fecharam ou investimento em eficiência energética (SPG, 2019).

A Figura 2 mostra de maneira simples como quase todas as classes de consumo da região tiveram crescimento no consumo com o passar dos anos, a exceção é a classe industrial, devido ao evento pontual que provavelmente se deve por fechamento de indústria local, ou investimento em eficiência energética.

**Figura 2** - Gráfico do consumo de energia elétrica, segundo as classes de consumo na região do Maciço de Baturité.



Fonte: O autor (2021)<sup>1</sup>

Os dados da Tabela 1 foram repassados primeiramente pela empresa COELCE (2011 e 2016) e em 2019 pela empresa ENEL. É interessante relatar também que embora a região apresente uma concentração demográfica maior residencial em 2017, o maior crescimento de consumo de energia ainda aparece na região rural. Considerando o teor populacional e o crescimento de consumo de energia da região, é percebido um potencial para estudos socioambientais tecnológicos.

Classe de consumo	Consumo em (MWh)			
	2011	2016	2017	Crescimento Nominal 2011/2017
Residencial	46469	60242	59625	22%
Industrial	9329	8382	7896	-18%
Comercial	10206	16595	16639	39%
Rural	27642	50187	47740	42%
Público	21233	28290	27952	24%

<sup>1</sup> Baseado nos dados fornecidos pelo IPECE referente ao relatório 2017 e 2019.

Próprio	183	246	289	37%
Total	115062	163942	160141	28%

Fonte: O autor (2021)<sup>2</sup>

## 2.3 Energia e radiação

A radiação solar é o fluxo de energia emitida pelo Sol e enviada sob a forma de radiação eletromagnética. Durante muitos anos considerou-se que a energia enviada do Sol até a Terra era, constante, e em torno de  $1.365 \text{ Wm}^{-2}$ . Contudo, observações demonstraram a variação em escalas de tempo em minutos e décadas. A radiação solar é medida e conhecida, principalmente, por duas variáveis: Irradiância Solar Total (TSI - *Total Solar Irradiance*) e Irradiância Solar Espectral (SSI - *Solar Spectral Irradiance*). A primeira é caracterizada como a potência total da energia proveniente do Sol por unidade de área a 1 UA. Sua medida pode ser obtida em função do comprimento de onda [ $\text{W m}^{-2} \text{ nm}^{-1}$ ] integrada para determinar a TSI. A segunda está relacionada às características de absorção na atmosfera terrestre e há uma correlação entre comprimento de onda e a altitude (GÓMEZ *et al.*, 2018).

### 2.3.1 Fototérmica

O termo fototérmica é definido como a capacidade de uma matéria absorver a radiação solar, ou seja, a razão entre a radiação solar total absorvida pela radiação incidente. A energia do fóton é transferida para o ambiente de várias formas diferentes, em particular, temos quando uma matéria é submetida a radiação eletromagnética durante um período, assim ocorre a troca de calor. (BATTISTI *et al.*, 2014)

A absorção solar total está diretamente ligada ao comprimento do ângulo de incidência  $\lambda$  e é determinada considerando a absorção espectral e a distribuição de irradiância espectral solar de um espectro solar padrão, esse espectro deve ser analisado ao longo dos comprimentos de onda nas quais a radiação solar atinge a superfície do material (ZHU *et al.*, 2018).

De forma matemática a absorção solar total ( $\alpha$ ) de um absorvedor solar, para um ângulo de incidência de  $\lambda$ :

<sup>2</sup> Baseado nos dados do IPECE referente ao relatório de 2017 e 2019.

$$\alpha(\theta) = \frac{\int_{\lambda_{\text{mín}}}^{\lambda_{\text{max}}} (1 - R(A, \lambda)) A(\theta, \lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{\text{mín}}}^{\lambda_{\text{max}}} A(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

Onde  $\lambda_{\text{min}}$  e  $\lambda_{\text{max}}$  são 0,3 mm e 2,5 mm, respectivamente,  $\theta$  é o ângulo de incidência da luz medido a partir da superfície normal do absorvedor,  $A(\lambda)$  é a irradiância espectral solar dependente do comprimento de onda e  $R(\theta, \lambda)$  é a refletância total no comprimento de onda  $\lambda$  (ZHU *et al.*, 2018).

## 2.4 Energia solar.

A energia solar é abundante e pode ser utilizada de diversas maneiras. A forma mais simples e primitiva de aproveitamento dessa energia é através de soluções de arquitetura que privilegiem a iluminação solar ou o controle natural da temperatura, outra possibilidade é utilizar sistemas de captação da energia solar para depois utilizá-la. (FRACCANABBIA e MARIANI, 2020)

Hoje existem três tipos principais sistema de energia solar: Sistema Solar Térmico, Sistema Solar Fotovoltaico e Sistema Termossolar.

### 2.4.1 Energia solar térmica

Nestes sistemas, a energia é captada através de coletores solares. São os sistemas mais simples, econômicos e conhecidos de aproveitar o sol, sendo utilizados em casas, hotéis e empresas para o aquecimento de água para chuveiros ou piscinas, aquecimentos de ambientes ou até em processos industriais. Os sistemas são simples e têm a função de transferir o calor da radiação solar para a água ou óleo que passa por dentro deles para então ser utilizado como fonte de calor (NASCIMENTO, 2020).

### 2.4.2 Energia solar fotovoltaica

Estes sistemas são capazes de gerar energia elétrica através das chamadas células fotovoltaicas. As células fotovoltaicas são geralmente montadas em módulos ou painéis solares fotovoltaicos e são capazes de transformar a radiação solar diretamente em energia elétrica através do chamado “efeito fotovoltaico”, presente em alguns materiais, sendo o mais utilizado o silício (PEREIRA, 2019).

#### 2.4.3 Energia termossolar ou energia solar concentrada

Os sistemas termossolares produzem inicialmente calor, através de um sistema de espelhos (ou concentradores) que concentram a radiação solar, e só então transformam este calor em energia elétrica. Não deixam de ser um tipo de energia solar térmica, porém o seu propósito final é gerar energia elétrica. Este é o tipo menos difundido de energia solar devido ao alto custo e complexidade (NeoSolar, 2017).

Comparando os três sistemas, a energia solar térmica é a mais eficiente e econômica. Já a energia fotovoltaica é muito versátil e confiável, sendo utilizada até mesmo em satélites. Sua principal desvantagem é o alto custo, apesar da constante queda de preços. Uma segunda desvantagem é a dificuldade de armazenar a energia. Finalmente, a energia solar concentrada que também tem restrições devido ao alto custo, é mais adequada para grandes instalações. Por outro lado, ela une vantagens da energia solar térmica, por possibilitar a armazenagem do calor, enquanto também apresenta a versatilidade da energia elétrica (NeoSolar, 2017).

## 2.5 Dessalinização

A dessalinização da água é um processo físico-químico que possui como objetivo a retirada de sais da água, transformando-a em água doce, ou potável.

Existem dois processos gerais de dessalinizações: Processos térmicos e Processos por Membranas, ambos serão descritos em detalhes a seguir.

#### 2.5.1 Processos térmicos

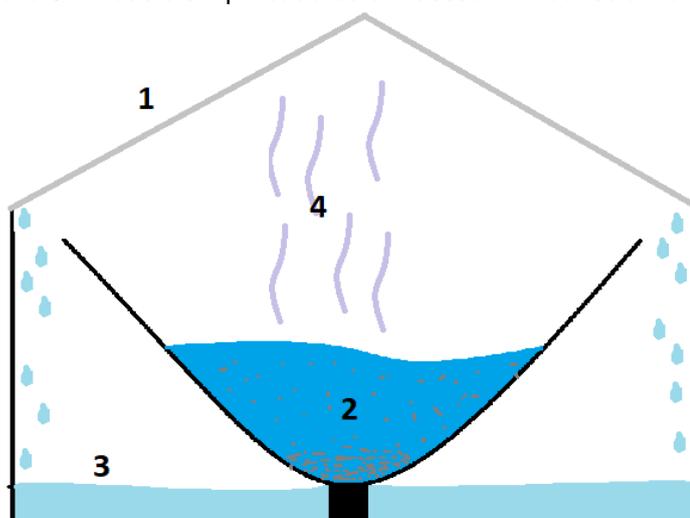
Os processos térmicos são divididos principalmente em cinco métodos: Destilação Solar Térmica (DS), Destilação Flash de Múltiplos Estágios (MSF), Destilação de Múltiplo Efeito (MED), Destilação por Compressão de Vapor (VC) e

Congelamento. O que todos tem em comum é o foco da dessalinização ser a variação da temperatura.

### 2.5.1.1 Dessalinização Térmica:

O modo mais simples, conhecido como dessalinização por simples efeito, detalhado na Figura 3. Esse modelo é utilizado em lugares quentes, com a construção de grandes tanques cobertos com vidro ou outro material transparente, normalmente suas paredes pintadas de preto. A luz solar atravessa o vidro, a água do líquido bruto evapora, os vapores se condensam na parte interna do vidro, transformando-se novamente em água, que escorre para um sistema de recolhimento. Dessa forma, separa-se a água de todos os sais e impurezas. Em lugares frios esse processo pode ser feito gerando-se calor através de energia elétrica (PORTELA *et al.*, 2020).

**Figura 3** - Modelo simplificado de um dessalinizador solar térmico



Fonte: O autor (2021)<sup>3</sup>

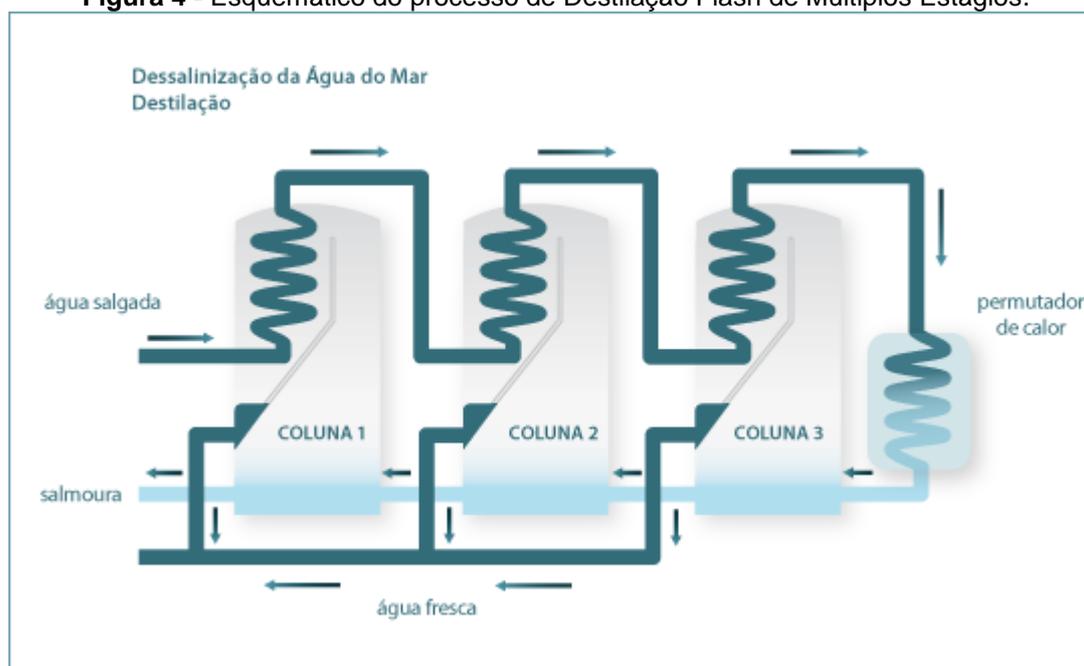
- 1 – Tampa de vidro para deixar passar o calor do sol.
- 2 – Recipiente interno que contém a água salobra, à medida que a mesma evapora o sal vai se concentrando no fundo.
- 3 – Água após a condensação, logo sem o sal.
- 4 – Vapor da água, que ao bater no teto de vidro condensa e escorre para as laterais.

<sup>3</sup> Baseado na descrição de tipos de Dessalinização, 2014.

### 2.5.1.2 Destilação Flash de Múltiplos Estágios (MSF)

O processo de Destilação Flash de Múltiplos Estágios (MSF) se faz através do aquecimento da salmoura seguido pela destilação flash, por conseguinte a recuperação de calor, a Figura 4 demonstra o modelo para melhor entendimento. O processo consiste em repetir os estágios várias vezes, quanto mais estágios, mais pura a água sai. O método tem sido usado por muitos anos na área e hoje representa 56% do total de água doce produzida através da dessalinização. O método é o que mais gera pureza da água tendo como desvantagem o custo (MOCOOCK *et al.*, 2019).

**Figura 4** - Esquemático do processo de Destilação Flash de Múltiplos Estágios.



Fonte: Portal Laboratórios Virtuais de Processos Químicos<sup>4</sup>

### 2.5.1.3 Destilação de Múltiplo Efeito (MED)

O processo de Destilação de Múltiplo Efeito - MED é parecido com o método MSF, o que diferencia um método do outro é que no segundo em cada estágio

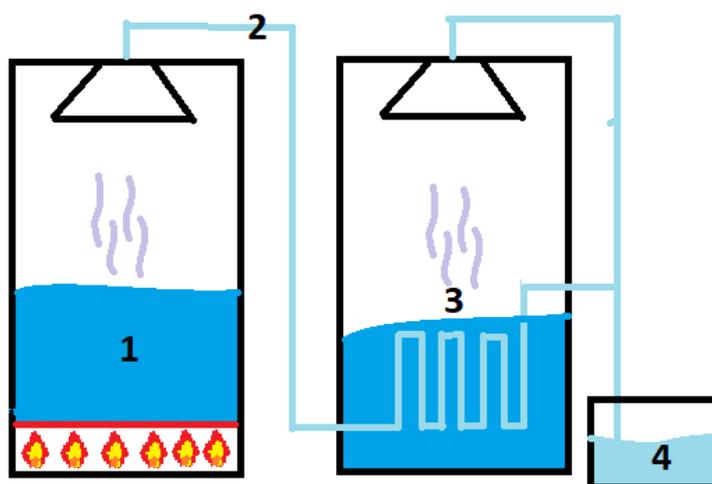
<sup>4</sup> Disponível em:

<[http://labvirtual.eq.uc.pt/site/Joomla/index.php?option=com\\_content&task=view&id=223&Itemid=413](http://labvirtual.eq.uc.pt/site/Joomla/index.php?option=com_content&task=view&id=223&Itemid=413)>  
. Acesso em 11 out. 2021.

o sistema recebe reaquecimento externamente, no primeiro o reaquecimento é realizado através do vapor que sobra do estágio anterior (SOUZA, 2004).

A Figura 5 mostra o funcionamento o processo ocorre todo em paralelo mas para melhor descrição trataremos com etapas para simplificar. No instante 1, o sistema é aquecido externamente e a água salobra evapora, deixando o sal no primeiro sistema e a água que não evaporou. Quando passa para o instante 2 o vapor de água vai caminhar para o sistema 2 onde o vapor que fará a função de aquecer o sistema onde irá evaporar a água salobra novamente repetir o ciclo várias vezes, por fim, o instante 4 é o recipiente da água destilada (SOUZA, 2004).

**Figura 5** - Esquemático simples do processo de Destilação de Múltiplo Efeito



Fonte: O autor (2021)<sup>5</sup>

#### 2.5.1.4 Destilação por Compressão de Vapor (CV)

A Destilação por Compressão de Vapor (DCV) é um processo termomecânico para a purificação de água. A purificação de água da tecnologia DCV, consiste em comprimir o vapor (atividade realizada pelo compressor), em seguida esse vapor é inserido em pelo menos duas câmaras de evaporação e, por conseguinte, na de condensação, esse processo em múltipla escala contribui para o aumento da taxa de evaporação da água. Após o processo, será gerada uma água

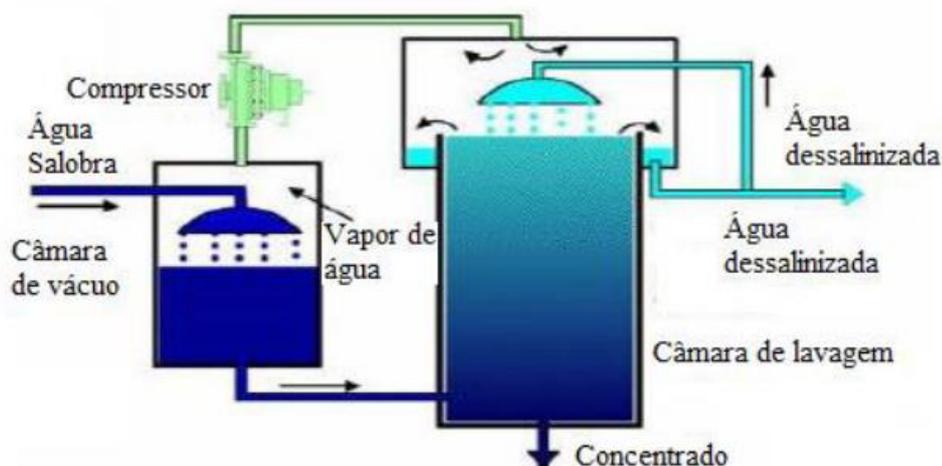
<sup>5</sup> Baseado na descrição de (Souza, 2004).

residual, e estudos apontam um rendimento de até 98 % da água de alimentação, um valor significativo de aproveitamento da água a ser purificada (GADELHA *et al.*, 2018).

### 2.5.1.5 Congelamento

O processo de congelamento consiste em pegar a água do mar ou salobra e congelar. Quando a água salobra é congelada, produz gelo puro, sem sal, isto é, congelando/descongelando obtêm-se água doce. De forma mais detalhada, a água do mar é injetada em uma câmara de vácuo a uma pressão aproximadamente 0,004 atm. Em baixa pressão, ocorre subitamente uma evaporação parcial da água injetada e ocorre também a perda de calor da água, provocando o surgimento de cristais de gelo. Esses cristais são menos densos que a água salina fazendo os mesmos flutuarem. Por conseguinte, esses cristais são lavados com água doce, para remoção dos sais restantes e depois fundidos em água dessalinizada. Por fim, sendo menos densa que a água do mar, essa água é removida facilmente da câmara de lavagem e fusão. A Figura 6 mostra o esquemático completo (Tipos de Dessalinização, 2014).

**Figura 6** - Esquemático de um dessalinizador por congelamento.



Fonte: Flávio Melo de Luna (2018, apud CRUZ, 2012).

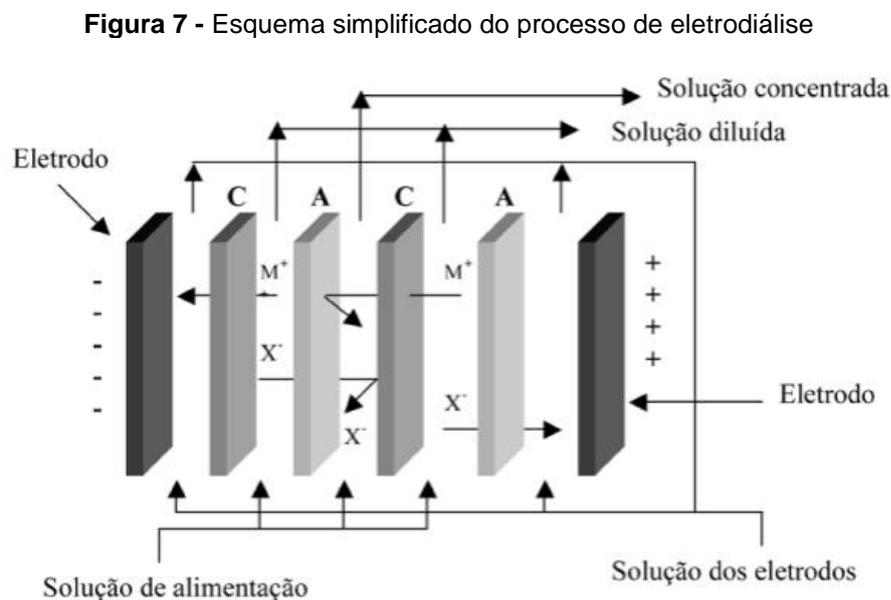
O processo é demasiadamente caro e só seria utilizado como última opção (Tipos de Dessalinização, 2014).

### 2.5.2 Processos por Membranas

Existem muitas formas de tratamento da água por membranas que serão descritos mais a diante. Existem vários materiais semipermeáveis para a fabricação de membranas, alguns deles são: polímeros, cerâmicas, carbono, metais e óxidos metálicos. Os materiais mais comuns na fabricação de membranas para dessalinização, são as poliamidas, a polissulfona e o acetato de celulose, devido às características mecânicas, biocompatibilidade, alto fluxo e baixo custo. No Brasil, ainda se utiliza para a dessalinização, em sua maior parte, membranas importadas, elevando os custos (MOREIRA *et al.*, 2020).

### 2.5.2.1 Eletrodialise (ED)

A eletrodialise é um processo de separação que utiliza a membrana e a energia elétrica, baseia-se na migração de íons em solução através de membranas de troca iônica, estando o sistema sob um campo elétrico. A Figura 7 representa um esquema simplificado do processo (GOMES, 2020).



Fonte: Gomes, Brena C. C. (2020, apud AMORIM et al, 2005)

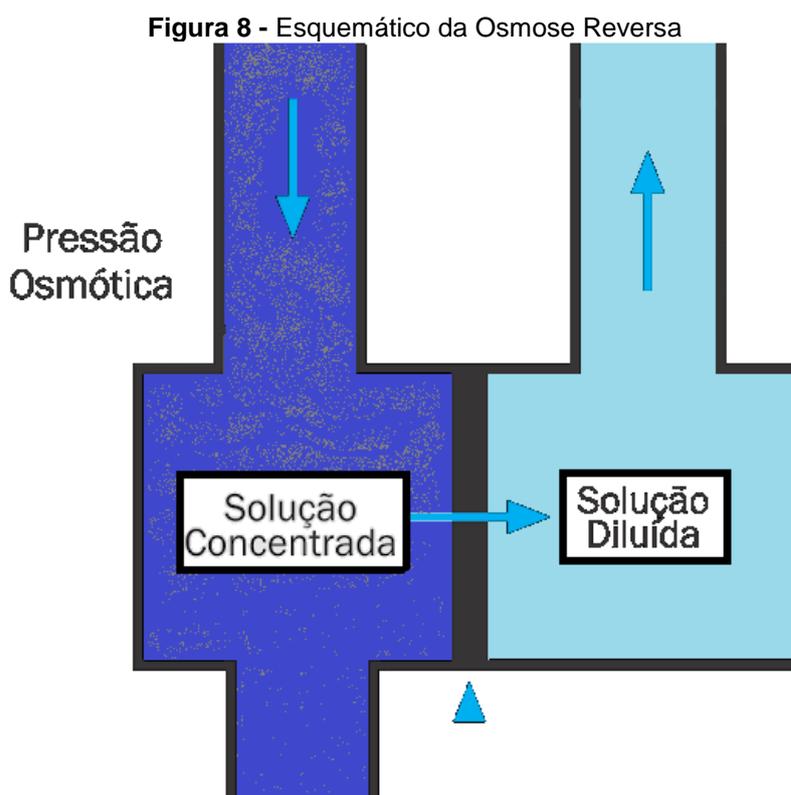
Na figura,  $M^+$  são os cátions e  $X^-$  os ânions. O sistema de eletrodialise consiste em membranas intercaladas para a troca de ânions e cátions que são espaçadas alternadamente entre dois eletrodos, resultando na formação de concentrado e setores de solução diluída. Ao aplicar uma diferença de potencial

(DDP), e em resposta à presença do campo elétrico, tem-se um circuito elétrico e os cátions migram em direção ao cátodo, e os ânions migram para o ânodo. Contudo, as membranas atuam como barreiras físicas à migração, impedindo ou permitindo a passagem de íons de acordo com sua carga elétrica. À medida que o tempo passa, um dos compartimentos fica praticamente sem íons, enquanto o outro tem uma concentração iônica (GOMES, 2020).

### 2.5.2.2 Osmose Reversa (OR)

A água atravessa uma membrana semipermeável, dotada de poros microscópicos, responsáveis por reter os sais. Com isso, o líquido se separa da solução salgada, passando para uma região com apenas água pura. As estações de dessalinização atuais utilizam membranas osmóticas sintéticas (CAETANO e NETO, 2018).

A Figura 8 mostra o esquema da osmose reversa. Primeiro a água salobra é jogada em alta pressão para circular em um sistema fechado (lado esquerdo). Ao estar em alta pressão essa água é forçada a passar pela membrana semipermeável, assim o lado direito só contém a água destilada (os sais não conseguem atravessar a membrana).



Fonte: O autor (2021)<sup>6</sup>

---

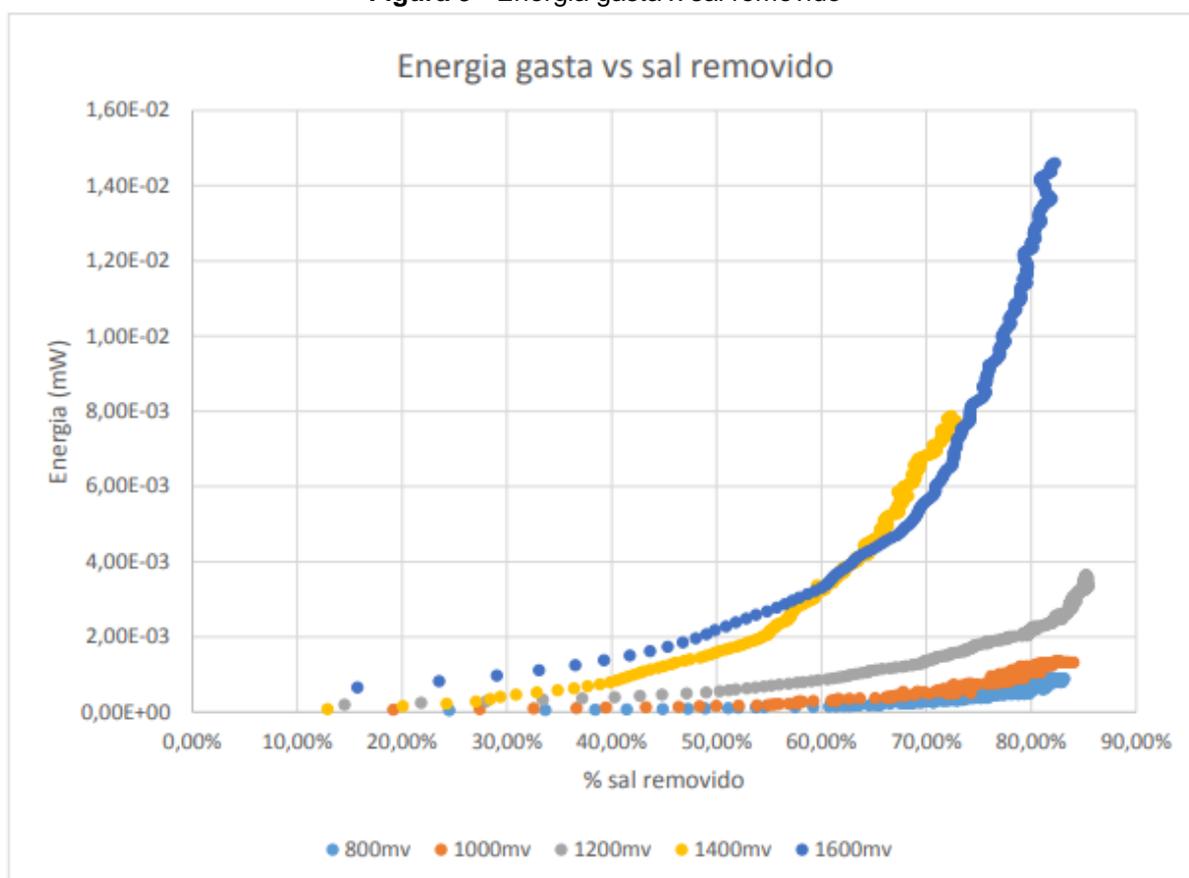
<sup>6</sup> Baseado na descrição do texto de Tipos de Dessalinização, 2014.

### 3 PRINCÍPIO TEORICO DO DESSALINIZADOR

#### 3.1 Energia Gasta para dessalinização.

Pedro Filipe Coelho Rocha, 2014 realiza uma pesquisa onde realiza inúmeros testes para dessalinização da água do mar e demonstra que para a dessalinização da água gasta-se 1/3 da energia utilizada para retirar 65% dos sais e os outros 2/3 de energia são para retirar apenas os 35% dos sais que sobram. Como mostra a Figura 9. (ROCHA, 2014):

**Figura 9 - Energia gasta x sal removido**



Fonte: Trabalho de mestrado do Pedro Filipe Coelho Rocha, 2014.

Pensando na diminuição da energia necessária para o dessalinizador, utilizaremos essa informação para a definição dos rejeitos e do tamanho das caixas.

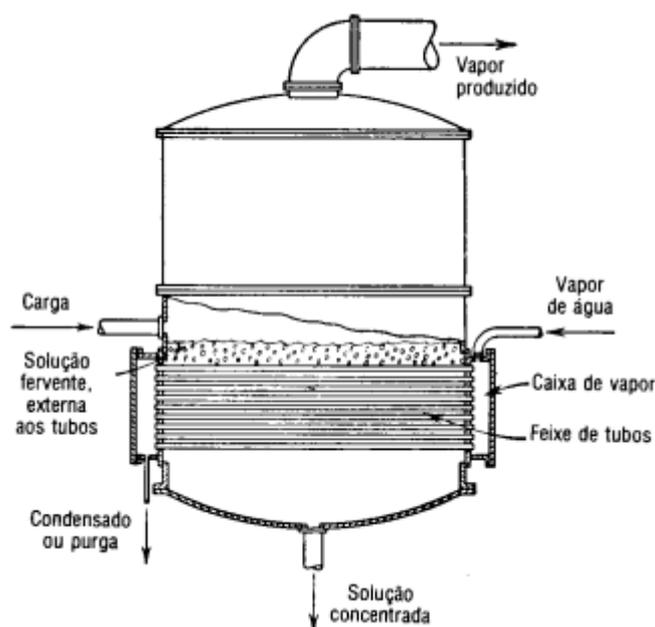
#### 3.2 Evaporador

Um evaporador é um trocador de calor projetado especificamente para fornecer a um fluido o seu calor latente de vaporização, conforme Figura 10. Quando o fluido a ser evaporado é a água o evaporador pode ser chamado também de vaporizador. Existem muitos modelos que são apropriados para aplicações diferentes (FOUST, 1982).

Evaporadores são equipamentos constituídos por um trocador de calor que eleva a temperatura da solução que se quer evaporar até a sua fervura e, por conseguinte, é capaz de realizar a separação da fase vapor do líquido em ebulição (FOUST, 1982).

Existem vários tipos de evaporadores; evaporadores de simples efeito, múlti-efeito. Existem evaporadores de tubos horizontais e verticais. O projeto utilizará o evaporador de simples efeito de tubos horizontais, bem representado pela Figura 10.

**Figura 10** - Evaporador simples efeito, tubos horizontais



Fonte: Princípios de Operações Unitárias – Foust (1983)

Para dimensionamento de um evaporador desse tipo, o primeiro entendimento é que se trata de um sistema fechado. Devido a essa característica é fácil entender as relações matemáticas apresentadas a seguir (FOUST, 1982):

O balanço de massa do líquido é constante;

$$m_c = m_v + m_r \quad (2)$$

Onde:

- $m_c$  – Massa da carga.
- $m_v$  – Massa do vapor.
- $m_r$  – Massa do rejeito.

Seguindo o princípio anterior, o balanço de massa do sal é constante. Com isso, tem-se:

$$C_r^s * m_r = C_{ent}^s * m_c - C_v^s * m_v \quad (3)$$

Onde:

- $C_r^s$  - Concentração de sais do rejeito.
- $C_{ent}^s$  - Concentração de sais da entrada.
- $C_v^s$  - Concentração de sais do vapor.

Note que na equação anterior o volume de sais do vapor é próximo a zero, podendo assim, anular o termo.

Já no que se refere a pressão de trabalho dos evaporadores eles podem trabalhar em várias pressões internas, no caso do projeto, como pretende-se ser o mais simples e seguro possível, a pressão que utilizaremos será a pressão a nível do mar 101,325 kPa.

Ainda no evaporador, o balanço de energia também se mantém constante, isto é a energia que entra no sistema é igual à que sai do sistema, a equação do balanço de energia fica escrita da seguinte forma (FOUST, 1982):

$$U_c + U_{tc} = U_r + U_v \quad (4)$$

$$m_c * H_c + m_{l_{tc}} * H_{tc} = m_r * H_r + m_v * H_v \quad (5)$$

Onde:

- U - Energia das partes no evaporador.

- $H_c$  - Entalpia específica carga.
- $H_{tc}$  - Entalpia específica do trocador de calor.
- $H_r$  - Entalpia específica do rejeito.
- $H_v$  - Entalpia específica do vapor.
- $m_{l_{tc}}$  - Massa de líquido do trocador de calor.

É importante saber que a definição de entalpia é dado por:

$$H = C_p * \Delta T \quad (6)$$

Onde:

- $H$  - Entalpia.
- $c_p$  - Calor específico.
- $\Delta T$  - Variação de temperatura.

Ainda para o evaporador, a troca de calor, do trocador de calor e do líquido a ser evaporado está regido pela fórmula termodinâmica da troca de calor de um trocador de calor, bem como pela fórmula de troca de calor (FOUST, 1982);

$$q = U * A * (T_{tc} - T) \quad (7)$$

$$q = m_{tc} * H_{tc} \quad (8)$$

Onde:

- $q$  - quantidade de calor.
- $U$  - Coeficiente total de troca térmica.
- $A$  - área de contato do trocador de calor.
- $T$  - Temperatura.
- $M_{tc}$  - vazão mássica do líquido do trocador de calor.
- $H_{tc}$  - Calor latente do líquido trocador de calor.

Já o coeficiente total de troca térmica relaciona os dois materiais que estão trocando calor, bem como a parede que separa os dois, ficando a fórmula definida como (COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR, 2022):

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{L}{\lambda} + \frac{1}{h_2} \quad (9)$$

Onde:

- h - Coeficiente de transferência de calor por convecção
- L - Espessura da parede.
- $\lambda$  - Condutividade térmica.

Quando a espessura da parede for pequena e a condutividade térmica for alta, a resistência do tubo pode ser desprezada, reduzindo a fórmula para:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} \quad (10)$$

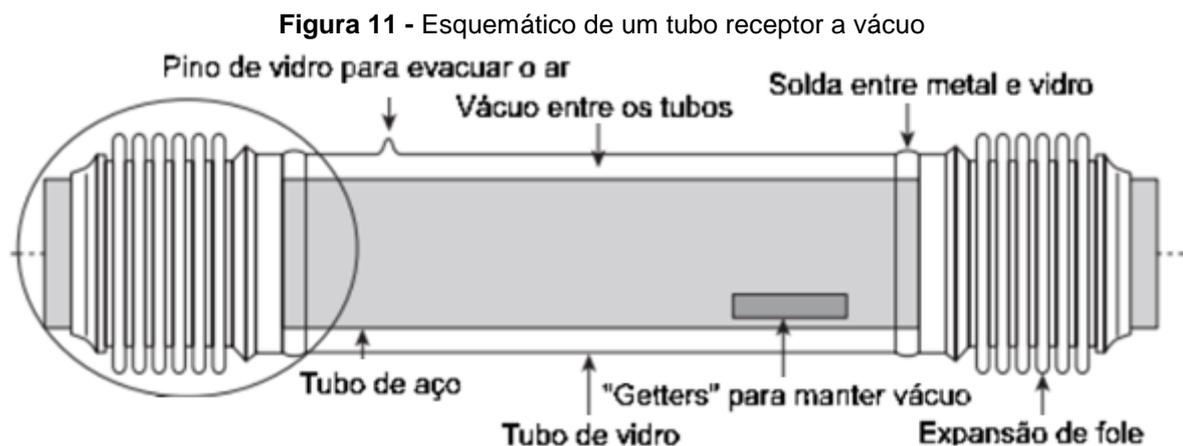
### 3.3 Tubo Receptor

O tubo receptor escolhido para diminuição de custos, o tubo que é já é utilizado no mercado, o tubo é composto por dois tubos concêntricos. O tubo interno onde passa o fluido é de aço, assim a superfície possui alta absorção térmica e baixa emissividade, e o tubo externo de vidro feito com material com elevada transmitância à radiação solar e revestida com material antirreflexo.

Esses tubos receptores são comumente apresentados em duas formas: Com ou sem vácuo. Os receptores que apresentam a característica a vácuo são principalmente utilizados para temperaturas acima de 300°C, isso devido o vácuo entre os dois tubos aumenta a eficiência do coletor parabólico.

Os dois tubos são conectados por meio de expansão de fole de aço inoxidável, essa forma de conexão controla as diferentes dilatações do tubo externo de vidro e do tubo interno e, ainda, ajuda a manter o vácuo entre os tubos.

A Figura 11 apresenta o esquemático do tubo receptor para melhor entendimento. Os Getters são moléculas que tem a função de eliminar o gás que surge da solda entre o metal e vidro, e assim manter a zona de vácuo.



Fonte: Adaptado de MOYA, 2012

### 3.4 Fluido de Transferência de Calor (FTC) do trocador de calor.

O FTC é um fator fundamental em um equipamento de troca de calor, pois tem influência direta a eficiência do tubo receptor, é o fluido que determina o tipo de ciclo termodinâmico, bem como a tecnologia que deve ser adotada para o armazenamento de energia térmica. Um dos fatores limitantes para a temperatura de operação do trocador de calor da térmico-solar é, principalmente, a estabilidade térmica do FTC do receptor de tubo (EVANGELOS *et al.*, 2017).

O óleo térmico sintético é comumente usado como um FTC no tubo receptor de plantas que utilizam aquecimento solar térmico, os tipos mais conhecidos são das marcas Therminol VP-1, Therminol D-12 e Dowtherm A (MALIKA O, 2013). Esses óleos térmicos sintéticos são usado em plantas solares na Califórnia, há duas décadas. No entanto, foi encontrado na no anel de vácuo um acúmulo de hidrogênio, que aumenta significativamente as perdas de calor dos receptores de tubo. O hidrogênio encontrado é gerado a partir da degradação do FTC (BENOIT H, 2016).

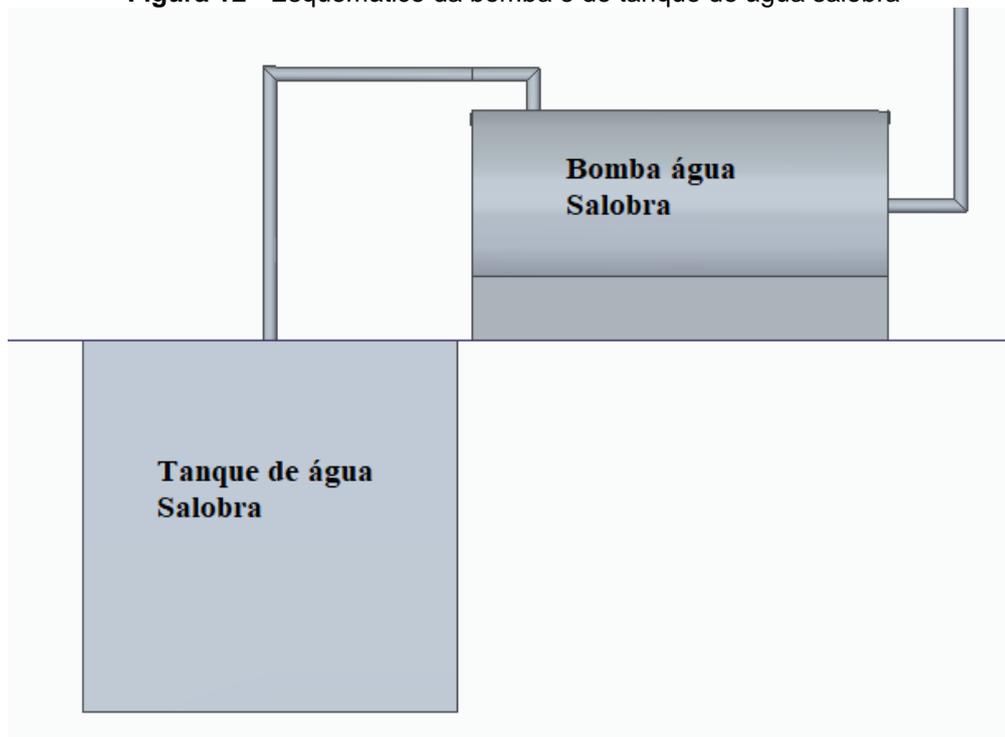
O óleo térmico sintético tem um limite de trabalho em 400 °C, e assim a eficiência alcançável é limitada a aproximadamente 38%. Quando óleo térmico sintético operando acima de 400 °C, os hidrocarbonetos se decompõem rapidamente e geram hidrogênio, o que reduziria a vida útil geral do sistema e induz o acúmulo de lodo ou outros subprodutos que reduzem a eficiência de transferência de calor do sistema e aumentam o custo de manutenção (GUO *et al.*, 2016).

### 3.5 Dimensionamento das bombas

#### 3.5.1 Dimensionamento da bomba do tanque

A Figura 12 está apresentando o dimensionamento da bomba do tanque.

**Figura 12** - Esquemático da bomba e do tanque de água salobra



Fonte: O autor, 2022

Para dimensionamento da bomba, é necessária a vazão de entrada do evaporador para esse sistema ( $\text{m}^3/\text{s}$ ). Estamos calculando a bomba dos tanques, mas precisaremos da informação da vazão mássica que se encontra no item 4.3.2 deste trabalho, por ser uma informação principalmente do evaporador. Para o cálculo da vazão (CAMPESE e PASSINI, 2015):

$$Q = \frac{V_{entEvap}}{\rho_{as}} \quad (11)$$

Onde:

- $Q$  - Vazão da bomba em [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- $V_{entEvap}$  - Vazão mássica de entrada do evaporador em [ $\text{kg}/\text{s}$ ]
- $\rho_{as}$  - Massa específica da água salobra em [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

Com o resultado da equação (11), podemos calcular a velocidade do fluido.

$$V_{\text{aguasalobra}} = \frac{Q}{A_{\text{tub}}} \quad (12)$$

Onde:

- $V_{\text{aguasalobra}}$  - Velocidade do fluido (que no caso é água salobra) em [m/s]
- $A_{\text{tub}}$  - Área da tubulação da bomba em [m<sup>2</sup>]

Considerando que a máquina vai precisar de um escoamento contínuo (CAMPESE e PASSINI, 2015):

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + H_m = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (13)$$

Onde, os valores 1 são para o ponto exatamente antes da bomba e o 2 para o ponto depois da bomba.  $P_i$  é pressão,  $V_i$  é a velocidade do fluido,  $Z_i$  é relativo a altura da tubulação,  $\gamma$  é a viscosidade dinâmica e  $H_m$  a altura manométrica.

Por fim, ao calcular a altura manométrica, calcula-se a potência da bomba (CAMPESE e PASSINI, 2015).

$$P_{\text{bsalobra}} = \gamma * Q * H_m \quad (14)$$

- $P_{\text{bsalobra}}$  - Potência da bomba de água salobra em [W]
- $\gamma$  - Viscosidade dinâmica em [g/(cm \* s)]

### 3.5.2 Bomba do fluido de transferência de calor.

Para o dimensionamento da bomba de transferência de calor, é muito parecido os cálculos, com o cuidado de utilização dos dados em vez de serem de água salobra ser do fluido trocador de calor.

Primeiramente calcula-se a vazão (CAMPESE e PASSINI, 2015):

$$Q_{ftc} = V_{fluido} / \rho_{as} \quad (15)$$

Onde:

- $Q_{ftc}$  - Vazão da bomba do fluido trocador de calor em [m<sup>3</sup>/s]
- $V_{ftc}$  - Vazão mássica do fluido trocador de calor em [kg/s]
- $\rho_{ftc}$  - Massa específica do fluido trocador de calor em [kg/m<sup>3</sup>]

Com o resultado da equação (15), podemos calcular a velocidade do fluido.

$$V_{ftc} = Q / A_{tubftc} \quad (16)$$

Onde:

- $Q_{ftc}$  - Vazão da bomba do fluido trocador de calor em [m<sup>3</sup>/s]
- $v_{ftc}$  - Velocidade do fluido trocador de calor em [m/s]
- $A_{tubftc}$  - Área da tubulação da bomba em [m<sup>2</sup>]

Considerando que a máquina vai precisar de um escoamento contínuo (CAMPESE e PASSINI, 2015):

$$\frac{P_3}{Y} + z_3 + \frac{v_3^2}{Y} + H_{mftc} = \frac{P_4}{Y} + z_4 + \frac{v_4^2}{Y} \quad (17)$$

Onde, os valores 3 são para o ponto exatamente antes da bomba e o 4 para o ponto depois da bomba do fluido trocador de calor.  $P_i$  é pressão,  $v_i$  é a velocidade do fluido,  $Z_i$  é relativo à altura da tubulação,  $Y$  é a viscosidade dinâmica e  $H_{mftc}$  a altura manométrica.

Por fim, ao calcular a altura manométrica, calcula-se a potência da bomba (CAMPESE e PASSINI, 2015).

$$P_{bftc} = Y * Q_{ftc} * H_{mftc} \quad (18)$$

- $P_{bftc}$  - Potência da bomba de água salobra em [W]
- $Y$  - Viscosidade dinâmica em [g/(cm \* s)]

- $Q_{ftc}$  - Vazão da bomba do fluido trocador de calor em  $[m^3/s]$
- $H_{mftc}$  - Altura manométrica da bomba em  $[m]$

### 3.6 Concentrador cilíndrico parabólico

#### 3.6.1 Critérios de partida

Para a definição da superfície coletora deve-se considerar a área de forma que: o fornecimento solar total, no período considerado, seja equivalente ao consumo requerido para um valor médio mensal de incidência. É importante salientar que o período de referência é denominado mês médio e é considerado como 30 dias de duração. Já para a determinação do dimensionamento, são considerados os seguintes aspectos: Produção de água quente: vazão (litros/dia), temperatura de consumo e da água fria, consumo conforme horário e consumo médio mensal. (VAZZOLER, 2021b)

Os dados meteorológicos necessários para os cálculos e as condições ambientais da zona:

- Temperatura ambiente em hora solar;
- Temperatura da água fria;
- Latitude;
- Duração do período de insolação e noturno.

#### 3.6.2 Intensidade útil e rendimento do coletor

##### 3.6.2.1 Cálculo da intensidade útil

A intensidade luminosa que incide sobre a superfície do coletor varia ao longo do dia. Para efeitos práticos de cálculo, utilizaremos a intensidade média, que é o quociente entre a energia útil (e incidente) ao longo do dia dividida pelo tempo útil do dia, ou seja, o tempo que o sol estará sobre o horizonte. É, portanto, natural desconsiderar, os dois intervalos de tempo referentes ao início e final do dia em que as alturas solares estão tão baixas que a intensidade se situará abaixo da sombra. A Tabela 2 abaixo resume o número de horas úteis de sol em um dia médio por mês. (VAZZOLER, 2021b)

**Tabela 1** - Número de horas de sol úteis (intensidade acima da sombra)

JAN	FEV	MAR	ABR	MAIO	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
<b>Hemisfério Norte</b>											
8	9	9	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9	9	8	7,5
<b>Hemisfério sul</b>											
9,5	9,5	9,5	9	9	8	7,5	8	9	9	9,5	9,5

Fonte: Vazzoler (2021), pg 143.

Para aplicar na equação do rendimento do coletor, a intensidade deve ser utilizada o SI ( $W/m^2$ ), isto é, tanto a energia como o tempo devem ser expressos pelo sistema interacional, ou seja, energia deve estar em Joules e o tempo deve estar em segundos. Portanto, o número de horas deverá ser multiplicado por 3600.

Ainda para o cálculo da energia aproveitável que incide em um dia médio de cada mês sobre os coletores, ainda devemos considerar o local de instalação em função da área geográfica (cidade ou estado) e da inclinação proporcionada às placas. Deve-se aplicar os seguintes fatores de correção (VAZZOLER, 2021b):

- Caso a instalação seja na montanha ou com atmosfera muito limpa, se multiplicará o valor da tabela pelo fator 1,05.

- Caso a instalação seja em uma instalação em uma zona fortemente poluída, se multiplicará por 0,95.

Empiricamente, se tem verificado que, tanto à primeira quanto à última hora do dia, a energia recebida pelo coletor não é aproveitável, por ser inferior a  $200 W/m^2$ . Como essas duas horas diárias a menos, influenciam o total de radiação utilizável durante o dia, multiplica-se os valores por 0,94 para ajustar o coeficiente. Em seguida, se terá em conta a variação da radiação captada, que supõe o desvio com respeito ao sul da orientação de nossa instalação. Por conseguinte, deve-se considerar o ângulo de instalação em referência a orientação sul da nossa instalação, conforme a Tabela 3 que se apresenta abaixo (VAZZOLER, 2021b):

**Tabela 2** - Fator de correção a aplicar em função do ângulo de orientação das placas

Ângulo de desvio (°)	Fator de correção
5	0,99
10	0,98
15	0,96
20	0,94
25	0,90

Fonte: Vazzoler (2021b), pg 144.

### 3.6.2.2 Passos para o cálculo da Energia útil e determinação da superfície necessária

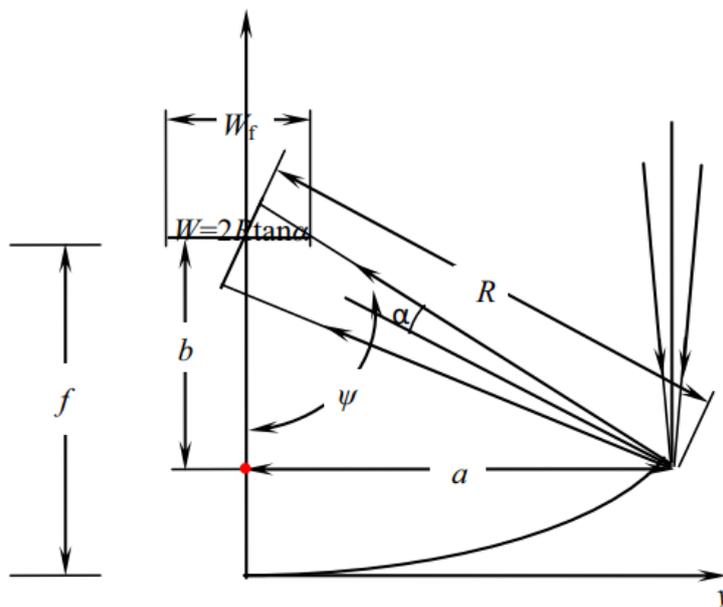
Vazzoler, 2021a descreve perfeitamente os passos para o cálculo da superfície, são eles:

- I) Determinar a energia útil, que é determinado no evaporador, com a energia necessária para a evaporação da água salobra.
- II) Determinar a radiação, para isso usa-se a localização e a inclinação selecionadas;
- III) Aplicar-se os coeficientes considerando a situação da instalação, isto é, se está situada em zona e montanha ou em uma zona poluída, e o fator de desvio da orientação;
- IV) Aplica-se o fator de rendimento que pode variar entre 0,9 a 0,97;
- V) Determina-se a energia aproveitável, multiplicando o valor até então obtido, pelo rendimento do coletor, em geral, 0,60;
- VI) Determina-se a energia útil, multiplicando o valor do ponto (v) pelo fator de perdas 0,85;
- VII) Por fim, encontrar-se a área da superfície do coletor, dividindo as necessidades encontradas no ponto (i) pela energia útil do ponto (vi);

### 3.6.3 Definições para a parabólica cilíndrica.

Em seu artigo FUQIANG *et al.* (2017), exemplifica bem o projeto da parabólica (Figura 13):

**Figura 13** - Diagrama esquemático de raios solares no plano focal do concentrador parabólico.



Fonte: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, modificado pelo autor.

Onde  $W_f$ , representa a largura do tubo receptor,  $f$  a distância da parábola ao tubo (distância focal),  $R$  o raio da parábola,  $b$  a distância de sombra para o tubo receptor,  $a$  é a distância do centro até o fim da parábola,  $\psi$  ângulo entre a normal e o fim da parábola e  $\alpha$  metade do ângulo entre as extremidades do tubo receptor e o fim da parábola.

Aplicando com essas definições conseguimos dimensionar o tamanho lateral da parábola e a distância ao ponto focal.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

O projeto tem como parâmetros iniciais os dados de climas, luminosidade, incidência solar e posição geográfica do Maciço de Baturité focando, mas não limitando, sua aplicabilidade na região.

Foi utilizada uma abordagem totalmente quantitativa e com métodos do tipo descritivo/expositivo, tendo como base a literatura das áreas de engenharia e física, para a obtenção de dados concretos.

O trabalho focou no projeto de um dessalinizador solar, via concentrador parabólico cilíndrico. Desconsiderando, por exemplo, as dessalinizações que utilizam de pressão para realizar a tarefa.

Foram utilizados softwares especializados para ajudar tanto nos cálculos como nos desenhos, para melhor entendimento do projeto. O primeiro a ser utilizado foi o *fusion 360*, licença de estudante que permite 1 ano de acesso para estudantes e educadores, o *software* é da empresa Autodesk, e seu objetivo principal é para modelações 3D CAD/CAM. O segundo *software* a ser utilizado foi o *excel* da empresa Microsoft versão pessoal do autor, mas devido as funcionalidades utilizadas pode-se facilmente substituído pelo *Google planilhas* ou *BR-office/Open Office* que é software gratuitos, principal função é a criação de planilhas e gráficos. O terceiro *software* a ser utilizado foi o *PTC Mathcad* que disponibiliza versão completa por 30 dias, após esse prazo pode continuar usando o software com algumas limitações, a principal utilidade foi a resolução de integral e ajuda no momento de interação matemática. O quarto software utilizado foi o *Scheme Editor 6*, *software* da companhia Rexroth – A Bosch Company, gratuito e muito útil na criação de esquemático.

Para os cálculos foi utilizado a metodologia descrita por Foust, (1982), que de utiliza as fórmulas clássicas de conservação de energia, conservação de massa, equilíbrio. Já para os cálculos das bombas foi utilizado a metodologia de CAMPESE e PASSINI, (2015) que considera pressão, vazão e viscosidade para o calculo da potencia da bomba. Já para o concentrador cilíndrico a metodologia utilizada foi a de VAZZOLER, (2021) que considera localização geográfica, área de captação e rendimentos de captação de energia.

### 4.1 Descrição dessalinizador solar parabólico

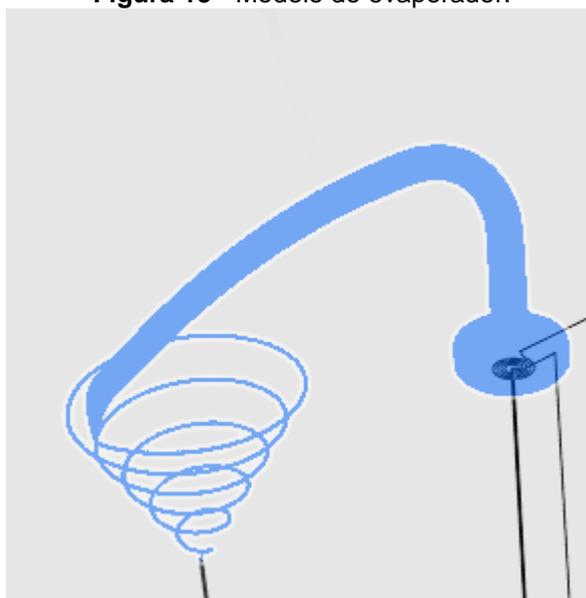
Desenvolveremos um projeto de um dessalinizador solar, e para tal pretende-se validar o modelo criado pelo professor Ruoso, conforme a Figura 14 abaixo.

**Figura 14** - Vista completa das partes do dessalinizador.



Fonte: O autor, baseado no esquema proposto, 2022

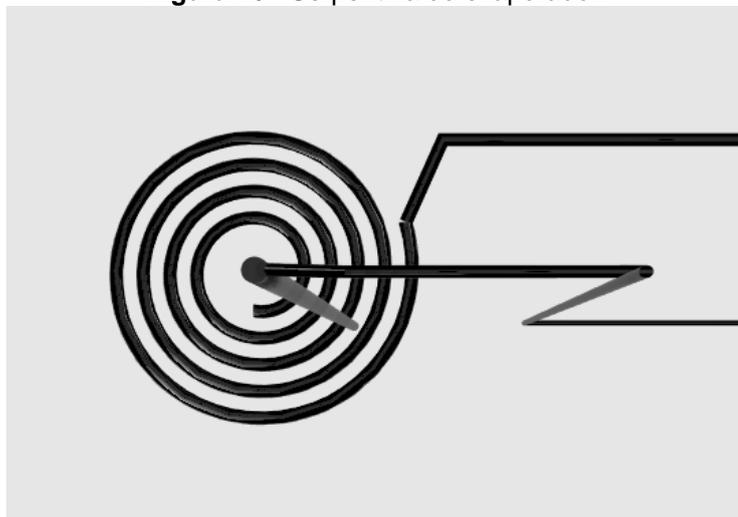
O modelo base consiste em termos uma caixa A (Caixa da direita na Figura 14) com água salgada, conectada por um tubo de 50 mm que conecta, essa caixa ao evaporador, que a princípio terá 4,0 m de diâmetro e altura de 0,5m, na parte reta, mais 1,5m de afunilamento, até chegar no cano de 150mm que sai da parte superior do evaporador com uma inclinação de  $-15^\circ$ , para evitar o retorno do vapor no início da condensação. A Figura 15 apresenta o evaporador destacado.

**Figura 15 - Modelo do evaporador.**

Fonte: O autor, baseado no esquema proposto.

O fundo do evaporador deve ser de tal forma que facilite o esgotamento dos rejeitos, seja por uma pequena inclinação lateral ou um afunilamento, em direção ao registro de soltura dos rejeitos.

Dentro do evaporador, temos a serpentina espiral/retangular, de 25mm de diâmetro construída cobrindo os 2x2m do evaporador, em função da facilidade construtiva e que fica a uma profundidade na água salgada, de 5cm, dentro do evaporador, essa profundidade da serpentina na água é feita por um sensor de nível da água. A Figura 16 apresenta o esquema da serpentina que se encontra dentro do evaporador.

**Figura 16 - Serpentina do evaporador.**

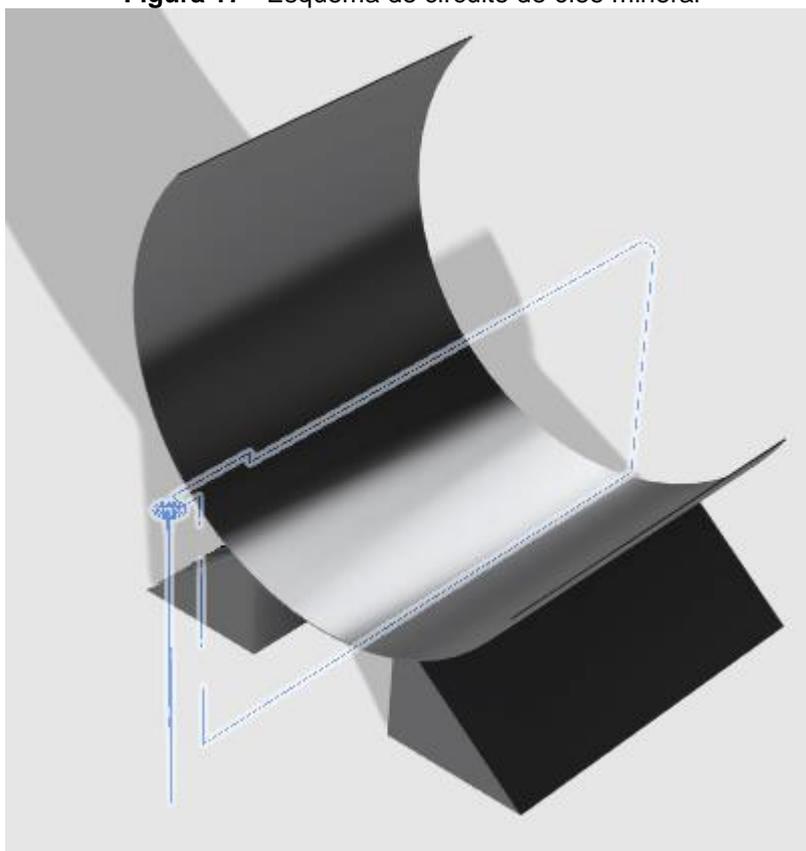
Fonte: O autor, baseado na proposta do projeto.

Como visto na Figura 16, a serpentina é conectada na parte superior central e na parte lateral, permanecendo o óleo que tem dentro em ciclo fechado. O tubo abaixo da serpentina vem da caixa A com água salobra e será o responsável por manter o nível interno de água no evaporador. O sensor pode ser do tipo “boia” conectado a bomba de elevação da água, na caixa A de água salgada. Na parte de baixo do evaporador, há um registro de saída dos rejeitos, da água, que no fim do dia está muito salgada, e que ao abrir esse registro, vai em direção a um tabuleiro, de aproximadamente 200m<sup>2</sup> de área para que os rejeitos sejam evaporados, no dia seguinte, de sol, restando somente sal, que pode ser coletado e armazenado.

Conectada a serpentina espiralada, temos o circuito fechado que passa pelo coletor de calor na parábola longitudinal, “hélotérmica” que fica no mesmo nível do evaporador, e possui um conjunto de sensores de temperatura que, acionam a bomba para circular o óleo mineral, através do respectivo circuito, o coletor solar está no foco da parábola longitudinal e, é controlado por um servo mecanismo, “girassol eletrônico”, que mantém a parabólica sempre direcionada para o sol.

A Figura 17, mostra como é circuito de óleo e com o mesmo passa pelo concentrador solar parabólico cilíndrico. Com a circulação do óleo quente, a água ferve provocando a evaporação, efetuando assim o processo de destilação. O vapor se desloca por convecção, no tubo acima do evaporador, em direção à serpentina helicoidal, nela, ocorre a condensação por resfriamento transformando do vapor, em água destilada.

**Figura 17** - Esquema do circuito de óleo mineral



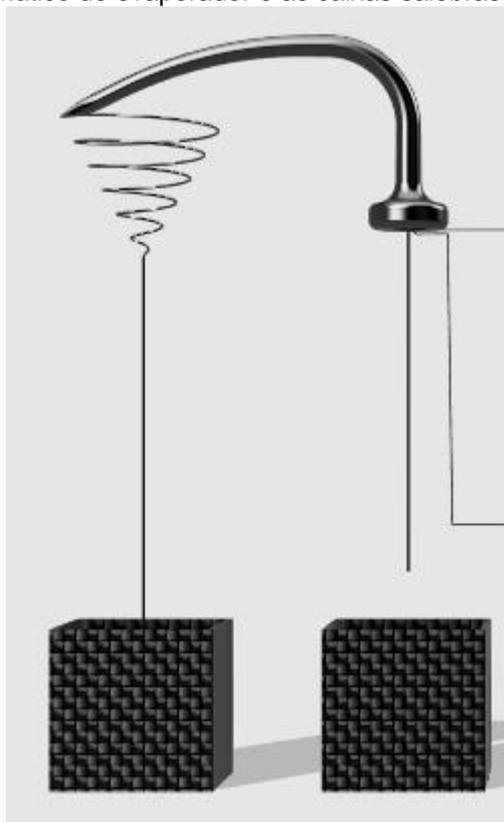
Fonte: O autor (2021)<sup>7</sup>

Na caixa B, de água destilada (caixa mais à esquerda da Figura 18), será implantado uma boia elétrica, que, liga uma bomba para enviar a água a um depósito definitivo.

---

<sup>7</sup> Baseado na ideia do professor Sérgio Ruoso.

**Figura 18** - Esquemático do evaporador e as caixas salobras e de água destilada.



Fonte: O autor (2021)<sup>8</sup>

Estima-se que para tal projeto, a capacidade de produção seja de 2.000 litros de água por dia, considerando que temos sol, com calor pelo período de 7 horas, precisamos destilar uma média de 290 litros por hora.

Para que isso seja possível, estima-se uma parabólica héliotérmica de 12m de comprimento por 4m de largura.

O projeto modelo, para a montagem, desse equipamento será necessário um espaço plano de no mínimo 15m de comprimento e 5m de largura, onde será montada a parabólica e o evaporador, mais o espaço para o tabuleiro de evaporação dos rejeitos.

## 5 RESULTADOS E DISCURSÃO

### 5.1 Estudo Prospectivo

Para o estudo prospectivo tecnológico da utilização de *concentradores solares* para dessalinização, foram realizadas buscas de patentes nas bases: World

---

<sup>8</sup> Baseado na ideia do professor Sérgio Ruoso.

Intellectual Property Organization (WIPO), European Patent Office do Instituto Europeu de Patentes (EPO). As palavras chaves utilizadas foram: “*parabolic solar concentrator*”.

Utilizando o WIPO foram encontrados 616 resultados para as buscas. Dos quais apenas um apresentam a tecnologia de concentrador solar para a dessalinização. O Quadro 1 apresenta a única patente de “*FP:(parabolic solar concentrator) AND (desalinator)*” cadastradas no banco de dados no WIPO.

**Quadro 1** - Patentes do WIPO que relacionam concentrador parabólico e dessalinização.

Título	IPC	Inventores	Nº de publicação
Solar desalinator with parabolic-cylinder reflectors	C02F 1/14	Попов Александр Ильич (RU)	2017137089

Fonte: O Autor (2021)<sup>9</sup>

A tecnologia utilizada é de um cilindro parabólico para dessalinização que utiliza de óleo mineral para ativação dos pistões do projeto tanto quanto é o fluido que passa dentro do aquecedor. Posteriormente é posto um tecido resistente no topo do evaporador.

Na base de dados do EPO foram encontrados primeiramente 6098 para a busca padrão de “*parabolic solar concentrator*”, mas quando essa busca é refinada para buscar, também, “*desalinator*” a quantidade de patentes encontradas é reduzida a 4. Que estão listadas no Quadro 2 abaixo.

**Quadro 2** - Patentes do EPO que relacionam concentrador parabólico e dessalinização

Título	IPC	Inventores	Nº de publicação
Sistema de dessalinização de águas salinas com captação solar contendo préaquecedor evaporativo e concentrador parabólico	C02F1/14; C02F9/12;	Claudio Truchlaeff	BRPI0902102A2

<sup>9</sup> Elaborado através do WIPO.

de raios com possibilidade de geração de energia elétrica fotovoltaico			
Desalination-solar generator	C02F1/48;	Ortega Casanovas Julio [Es]	ES1158233U; ES1158233Y
Solar desalinator with parabolic-cylinder reflectors	C02F1/14;	Popov Aleksandr Ilich [Ru]; Shcheklein Sergej Evgenevich [Ru]	RU2668249C1
Phase Change Liquid Purifier and Pump	C02F1/14;	Steinhour Leif Alexi [Us]	US2014284200A1; US9656881B2

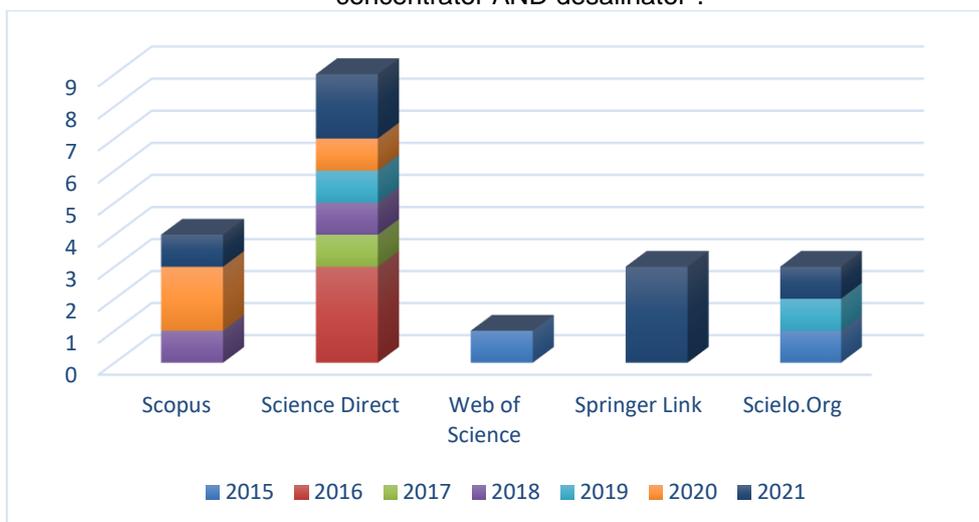
Fonte: O autor (2021)<sup>10</sup>

Entre as tecnologias verificadas, enfatizar a tecnologia do Claudio Truchlaeff que é um dessalinizador que contém pré aquecedor evaporativo e o concentrador parabólico que tem a função de recuperar o calor latente e parte do calor sensível. Além disso sua tecnologia apresenta a possibilidade de geração de energia elétrica fotovoltaica.

Pesquisas também foram realizadas nas bases de trabalhos acadêmicos: Scopus, Science Direct, Web of Science, Springer Link e Scielo.Org utilizando as palavras chaves: *parabolic solar concentrator* AND *desalinator*. Ainda foi selecionado apenas os trabalhos realizados do ano de 2015 até 2021. O Gráfico 1 com as bases utilizadas, o número de trabalhos encontrados por anos encontra-se abaixo.

<sup>10</sup> Elaborado através do EPO

**Gráfico 1** - Resultados das pesquisas nas 5 bases, utilizando como palavra-chave "parabolic solar concentrator AND desalinator".



Fonte: O autor (2021)<sup>11</sup>

Utilizando o padrão de busca, foi verificado que nos últimos 7 anos gerou-se 20 documentos no total, onde a plataforma com menos representatividade de documentos foi a Web of Science com apenas 1 documento de 2015 e a com maior representatividade o Science Direct com quase 50% dos documentos (9). O Web of Science apresentou um padrão contrário às outras bases, ou seja, redução no número de pesquisa no assunto. Observando todas as outras plataformas verificou-se que a quantidade de pesquisa no assunto é constante e para o Science Direct e Scopus este interesse teve um pequeno aumento, reforçando que se tem uma grande área para estudo no assunto e que o interesse por esta tecnologia está em crescimento.

## 5.2 Projeto dos tanques.

O consumo de água *per capita* do Nordeste é de 83 litros diários de água. (ANA e IBGE, 2020). É considerado no projeto uma família de quatro pessoas, dando uma margem de folga na média de pessoas. Essa margem é baseada na quantidade de pessoas por residência no Ceará são de 3 pessoas (IPECE, 2018b).

No projeto dos tanques será o suficiente para suprir o volume médio de água desse tipo de família por uma semana.

<sup>11</sup> Através das bases de dados Scopus, Science Direct, Web of Science, Springer Link e Scielo.

### 5.2.1 Tanque de água dessalinizada.

Para o tanque de água dessalinizada é necessário calcular o volume, sabendo que:

$$V_{tan} = Q_{apc} * Q_{pf} * Q_{drs} \quad (19)$$

- $Q_{apc}$  - Quantidade de água *per capita* = 83 litros;
- $Q_{pf}$  - Quantidade de pessoas por família = 4 pessoas;
- $Q_{drs}$  - Quantidade de dias que o reservatório irá suprir = 7 dias;
- $V_{tan}$  - Volume total de água necessário.

$$V_{tan} = 83 * 4 * 7 \quad (20)$$

$$V_{tan} = 2.324 [l] \quad (21)$$

$$V_{tan} = 2,324 [m^3] \quad (22)$$

Para calcular as medidas necessárias do reservatório, prioriza-se então a distribuição mais isométrica facilitando a construção.

No caso, optou-se por um caixa cúbica sob o solo:

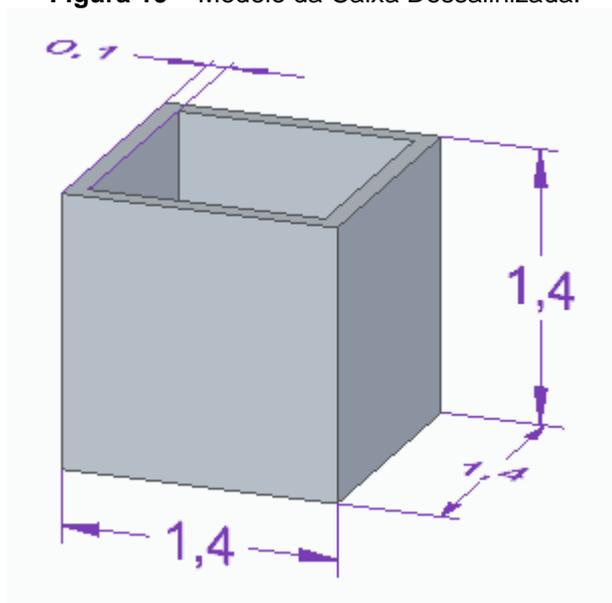
$$Aresta^3 = Volume\ do\ cubo \quad (23)$$

$$Aresta^3 = 2,324[m^3] \quad (24)$$

$$Aresta = 1,4 [m] \quad (25)$$

Ficando assim no projeto (Figura 19):

**Figura 19** – Modelo da Caixa Dessalinizada.



Fonte: Desenho do autor.

### 5.2.2 Tanque de água salobra.

Considerando que o projeto busca ser o mais acessível a comunidade, optaremos por dessalinizar 60% da água salobra. Os outros 40% serão rejeitos.

Assim:

O tanque de água salobra deve ser calculado da seguinte forma:

$$V_{tan} = 0,6V_{tansal} \quad (26)$$

Onde:

- $V_{tan}$  - Volume total de água necessário.
- $V_{tanSal}$  - Volume tanque de água salgada.

$$V_{tansal} = V_{tan}/0,6 \quad (27)$$

$$V_{tansal} = 3.873,3 [l] \quad (28)$$

$$V_{tansal} = 3,8733 [m^3] \quad (29)$$

Seguindo o mesmo princípio do tanque de água dessalinizada, optou-se por uma caixa cúbica.

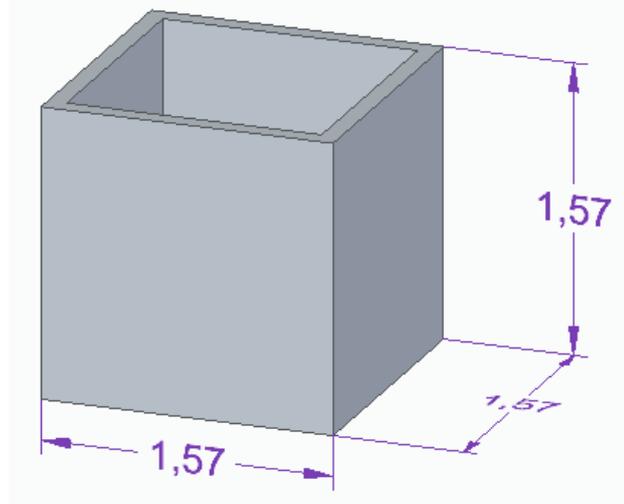
$$\text{Aresta}^3 = \text{Volume do cubo} \quad (30)$$

$$\text{Aresta}^3 = 3,8733[\text{m}^3] \quad (31)$$

$$\text{Aresta} = 1,57[\text{m}] \quad (32)$$

Ficando assim a caixa da de água salobra (Figura 20):

**Figura 20** - Caixa de armazenamento da água Salobra



Fonte: O autor.

### 5.2.3 Bomba de água salobra

A bomba de água salobra ficará instalada a nível do solo, e tem como a finalidade bombear a água para o evaporador que se encontra a 4 metros de altura do solo. O cálculo do dimensionamento da bomba vai utilizar informações que são calculados nos passos futuros, para mais informações ir ao tópico de evaporador.

A primeira informação para o dimensionamento é densidade da água que é amplamente conhecida, a Tabela 4 abaixo apresenta a densidade da água relacionada com a temperatura e a salinidade:

**Tabela 3** - Densidade da água do mar ( $\text{g/cm}^3$ ) para várias temperaturas e salinidade.

SALINIDADE	TEMPERATURA ( $^{\circ}\text{C}$ )						
	0	5	10	15	20	25	30
5	1,00397	1,00401	1,00367	1,00301	1,00207	1,00087	0,99943
10	1,00801	1,00796	1,00756	1,00684	1,00585	1,00461	1,00314
15	1,01204	1,01191	1,01144	1,01067	1,00964	1,00836	1,00686
20	1,01606	1,01585	1,01531	1,01449	1,01341	1,01210	1,01057
25	1,02008	1,01980	1,01920	1,01832	1,01720	1,01585	1,01429
30	1,02410	1,02374	1,02308	1,02215	1,02099	1,01960	1,01801
35	1,02813	1,02770	1,02697	1,02600	1,02479	1,02337	1,02176
40	1,03216	1,03166	1,03088	1,02985	1,02860	1,02715	1,02551

Fonte: eFlora<sup>12</sup>

Utilizando a tabela, e mantendo a coerência do trabalho, utilizaremos a salinidade 30, o que dá a densidades na faixa de 1,024 até 1,018. Com os valores tão próximos, temperatura de  $30^{\circ}\text{C}$  ser uma média razoável para região e a densidade participar como denominador na equação, utilizaremos a densidade igual a 1,01801.

O cálculo para o dimensionamento da vazão é:

$$Q = \frac{V_{entEvap}}{\rho_{as}} \quad (33)$$

$$Q = \frac{23,05 \text{ [kg/h]}}{1,01801 \text{ [g/cm}^3\text{]}} \quad (34)$$

$$Q = \frac{\frac{23,05 \cdot 1000}{3600} \text{ [g/s]}}{1,01801 \text{ [g/cm}^3\text{]}} \quad (35)$$

$$Q = 6,29 \text{ [cm}^3\text{/s]} \quad (36)$$

Como as bombas normalmente tem suas especificações em  $[\text{m}^3/\text{s}]$ :

$$Q = 6,29 * 10^{-6} \text{ [m}^3\text{/s]} \quad (37)$$

Para definir a velocidade do fluido:

<sup>12</sup> Disponível em: <<https://www.efloraweb.com.br/propriedades-fisico-quimicas-da-agua-do-mar/>>. Acesso em 23 março 2022.

$$v_{aguasalobra} = \frac{Q}{Atub} \quad (38)$$

O tubo da bomba é o tubo de 50mm como descrito no item 3.1 deste trabalho.

$$v_{aguasalobra} = \frac{6,29 [cm^3/s]}{(\pi * 25^2) [mm^2]} \quad (39)$$

$$v_{aguasalobra} = \frac{6,29 * 10^3 [mm^3/s]}{(\pi * 625) [mm^2]} \quad (40)$$

$$v_{aguasalobra} = 3,2 [m/s] \quad (41)$$

Agora, como o escoamento é contínuo:

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + H_m = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (42)$$

Podemos considerar que a pressão antes e depois da bomba se mantém igual, tal como a velocidade da água antes da bomba seja de água parada, por tanto, zero. Assim reduzimos nossa equação para:

$$z_1 + H_m = z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (43)$$

$$-1,57 + H_m = 4 + \frac{3,2^2}{2 * 9,8} \quad (44)$$

$$H_m = 6,09 [m] \quad (45)$$

Continuando calcula-se a potência da bomba:

$$P_{bsalobra} = \gamma * Q * H_m \quad (46)$$

$$P_{bsalobra} = \gamma * 6,29 * 10^{-6} * 6,09 \quad (47)$$

Luciano Galdino, 2021, mostra no seu artigo uma tabela com foi retirada do Bird, Stewart e Lightfoot (1987). Esta Tabela 5 mostra a viscosidade dinâmica da água em centipoise (cP) me função da temperatura.

**Tabela 4** - Viscosidade dinâmica da água em relação a temperatura em 1 atm.

Temperatura	Viscosidade dinâmica da água
0	1,787
20	1,0019
40	0,653
60	0,4665
80	0,3548
100	0,2821

Fonte: O autor, modificado de Galdino, Luciano (2021).

Transformando a viscosidade dinâmica para o SI, e aplicando na equação 30.

$$P_{bsalobra} = 0,8274 * 10^{-3} * 6,29 * 10^{-6} * 6,09 \quad (48)$$

$$P_{bsalobra} = 3,17 * 10^{-7} [W] \quad (49)$$

$$P_{bsalobra} = 4,3 * 10^{-10} [cv] \quad (50)$$

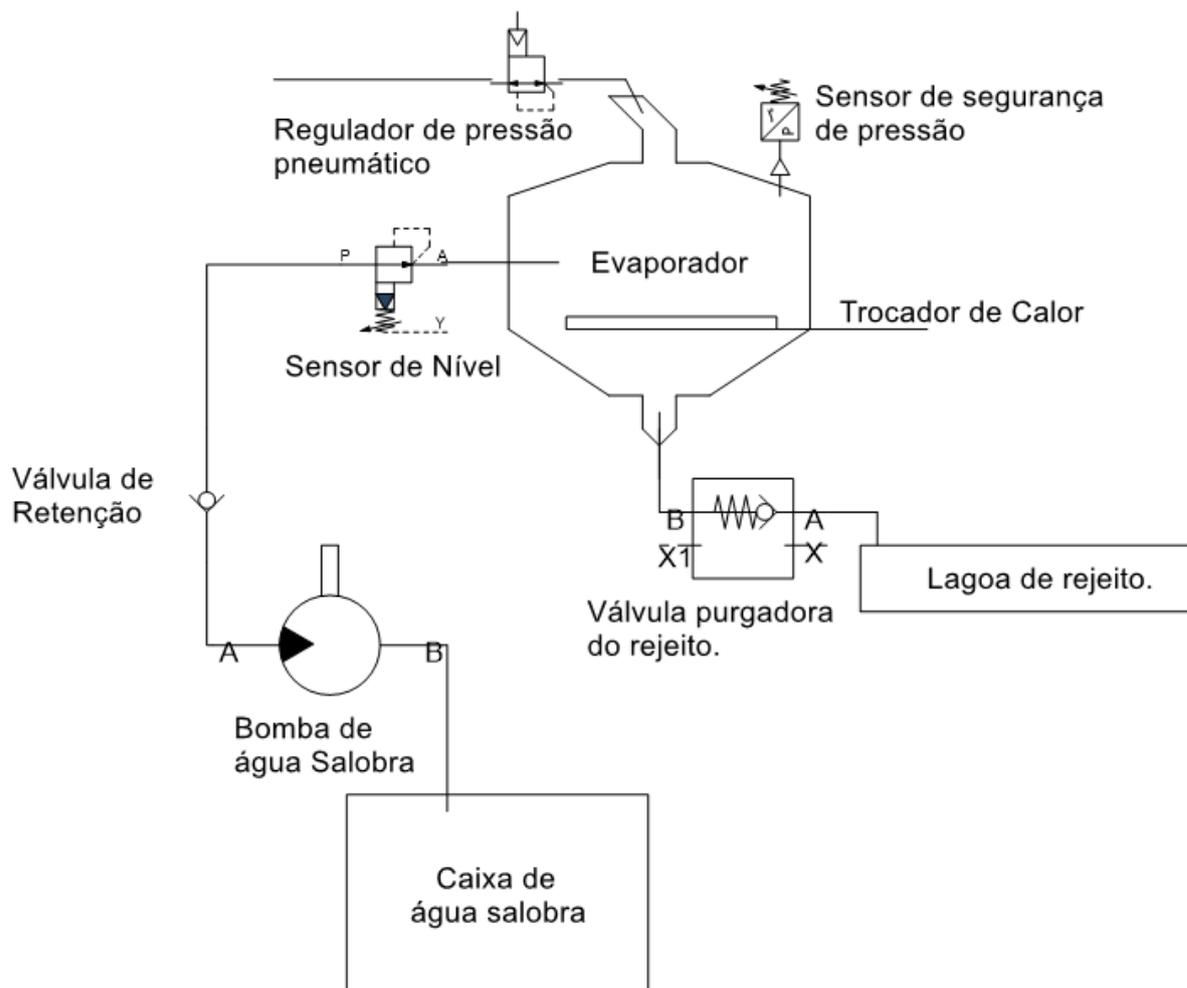
Existem várias bombas que suprem a potência e vazão que é necessário para o tanque de água salobra-evaporador.

### 5.3 Projeto do Evaporador

Para o projeto do Evaporador vamos dividi-lo em várias partes para melhor acompanhar o projeto.

O evaporador é constituído por vários equipamentos e sensores. O evaporador projetado é dimensionado seguindo o princípio da Figura 21 abaixo:

**Figura 21** - Modelo do evaporador projetado.



Fonte: O autor (2022).

O evaporador é constituído primeiramente pela bomba que envia a água salobra para ele, em consequente tem a válvula de retenção para não ter o retorno do líquido para o tanque, visto que o evaporador se encontra em uma altura superior a bomba chegando no evaporador o sensor de nível que controla a altura da água no evaporador.

Chegando ao evaporador deve-se ter um sensor de segurança manométrico, isto é, ele controla a pressão e caso a mesma esteja superior a pressão interna de trabalho do evaporador ela deve abrir e liberando a pressão interna.

A válvula purgadora de rejeito trabalha de forma casada com o a válvula de nível, sendo ativada apenas depois que o nível da água cai até um nível de 40% da água que entra no evaporador.

Por fim, no ponto superior tem o sensor de pressão, que funciona de forma a chegar à pressão de trabalho do evaporador ele é ativado deixando o vapor sair para o condensador.

Ainda dentro do evaporador se tem o trocador de calor (serpentina) que está projetada de forma horizontal.

### 5.3.1 Vazão mássica de saída do evaporador.

O tanque do evaporador vai conter uma quantidade de água suficiente para manter um fluxo de evaporação do  $V_{tan}$  no período de uma semana para condizer com o tanque anterior.

Com isso, a vazão de saída do evaporador ( $V_{sEvap}$ ), em horas, tem de ser de:

$$V_{tan}/semana = V_{sEvap} \quad (51)$$

$$2,324/7[dias] = V_{sEvap} \quad (52)$$

$$2,324/7 * 24[h] = V_{sEvap} \quad (53)$$

$$V_{sEvap} = 0,01384 [m^3/h] \quad (54)$$

Transformando em kg/h, e sabendo que o material evaporado é a água (1m<sup>3</sup> equivale a 1000kg):

$$V_{sEvap} = 13,84 [kg/h] \quad (55)$$

### 5.3.2 Vazão mássica de entrada.

Seguindo o mesmo princípio de saída, calcula-se a vazão mássica de entrada do evaporador ( $V_{entEvap}$ ) considerando o tamanho do tanque de entrada, tanque de água salgada, e o período de trabalho de 7 dias.

Com isso, a entrada do evaporador é de:

$$\frac{V_{tanSal}}{[semana]} = V_{entEvap} \quad (56)$$

$$\frac{3,8733}{7[dias]} = V_{entEvap} \quad (57)$$

$$\frac{3,8733}{7 * 24[h]} = V_{entEvap} \quad (58)$$

$$V_{entEvap} = 0,023055 [m^3/h] \quad (59)$$

Como o material de entrada é a água, transformando em kg/h:

$$V_{entEvap} = 23,05 [kg/h] \quad (60)$$

### 5.3.3 Quantidade de sais que entram no evaporador:

Segundo a resolução do CONAMA n° 357, de 17 de março de 2005 para a água ser considerada salobra seu valor de salinidade está contido entre 0,5% até 30% (CONAMA, 2005).

Trazendo a aplicabilidade em qualquer espectro da água salobra, projeta-se a entrada de água com valor de salinidade de 30%.

### 5.3.4 Quantidade de sais no rejeito do evaporador:

Para entrar em acordo com as partes anteriores do projeto o rejeito de água deve ser de 40%. Esses 40% conterà os sais de todo o líquido de entrada, visto que o líquido após evaporar leva uma concentração aproximada de 0%.

Assim, como a quantidade de massa de sais da entrada e do rejeito são iguais:

$$C_r^S * V_{rejeito} = C_{ent}^S * V_{entrada} \quad (61)$$

Onde:

- $C_r^S$  - Concentração de sais do rejeito.
- $C_{ent}^S$  = Concentração de sais da entrada.
- $V_{rejeito}$  = volume do rejeito.

- $V_{entrada} = \text{Volume de entrada.}$

Quantidade de rejeito vai ser de 40%, do líquido de entrada:

$$V_{rejeito} = 0,4V_{entrada} \quad (62)$$

Substituindo a equação (62) na (61):

$$C_r^s * 0,4V_{entrada} = C_{ent}^s * V_{entrada} \quad (63)$$

$$C_r^s * 0,4 = C_{ent}^s \quad (64)$$

$$C_r^s = 2,5C_{ent}^s \quad (65)$$

### 5.3.5 Vazão mássica do rejeito.

Para o cálculo da vazão mássica do rejeito aplicamos a equação (65) na equação 3, balanço de massa de sal, a quantidade de sal que se espera ter no vapor é zero, podendo anular o termo;

$$C_r^s * m_r = C_{ent}^s * m_c \quad (66)$$

$$2,5C_{ent}^s * m_r = 23,05C_{ent}^s \quad (67)$$

$$m_r = 9,22 \text{ [kg/h]} \quad (68)$$

A Vazão mássica que saí do rejeito do evaporador é de 9,22 kg/h de água concentrada de sal.

### 5.3.6 Balanço de Energia do Evaporador.

Para o evaporar, podemos utilizar a equação (5), interpretada:

$$V_{entEvap} * H_c + V_{tc} * H_{tvc} = V_{sEvap} * H_r + m_v * H_v \quad (69)$$

Para definir todos os valores, iniciamos definindo a referência com sendo dentro do evaporador, onde sua pressão é de 1 atm ou 101.325kPa o sistema está em trabalho contínuo, ou seja, a água que está dentro do evaporador está evaporando e por fim a referência é o momento onde a água está líquida e saturada.

Com isso, para água líquida saturada, o seu valor de entalpia específica será zero ( $H_r = \text{zero}$ ).

A primeira entalpia a ser encontrada é o da Água líquida saturada → Vapor Saturado. Procurando na Tabela 6 a termodinâmica da água saturada encontramos:

**Tabela 5 - Termodinâmica da água saturada**  
**Propriedades termodinâmicas da água saturada**

Temp. °C	Pressão kPa	Volume específico (m <sup>3</sup> /kg)		Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/(kg K))		
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.
<i>T</i>	<i>p</i>	<i>v<sub>f</sub></i>	<i>v<sub>g</sub></i>	<i>u<sub>f</sub></i>	<i>u<sub>g</sub></i>	<i>u<sub>g</sub></i>	<i>h<sub>f</sub></i>	<i>h<sub>g</sub></i>	<i>h<sub>g</sub></i>	<i>s<sub>f</sub></i>	<i>s<sub>g</sub></i>	<i>s<sub>g</sub></i>
0,01	0,61	0,001000	205,991	0,00	2374,92	2374,92	0,00	2500,91	2500,92	0,0000	9,1555	9,1555
5,00	0,87	0,001000	147,011	21,02	2360,76	2381,78	21,02	2489,04	2510,06	0,0763	8,9486	9,0248
6,97	1,00	0,001000	129,178	29,30	2355,19	2384,49	29,30	2484,37	2513,67	0,1059	8,8690	8,9749
10,00	1,23	0,001000	106,303	42,02	2346,63	2388,65	42,02	2477,19	2519,21	0,1511	8,7487	8,8998
13,02	1,50	0,001001	87,9585	54,68	2338,10	2392,78	54,68	2470,04	2524,72	0,1956	8,6314	8,8270
15,00	1,71	0,001001	77,8755	62,98	2332,51	2395,49	62,98	2465,35	2528,33	0,2245	8,5558	8,7803
17,49	2,00	0,001001	66,9869	73,43	2325,48	2398,90	73,43	2459,45	2532,88	0,2606	8,4620	8,7226
20,00	2,34	0,001002	57,7567	83,91	2318,41	2402,32	83,91	2453,52	2537,43	0,2965	8,3695	8,6660
21,08	2,50	0,001002	54,2399	88,42	2315,37	2403,79	88,42	2450,97	2539,39	0,3118	8,3302	8,6420
24,08	3,00	0,001003	45,6532	100,97	2306,90	2407,88	100,98	2443,86	2544,84	0,3543	8,2221	8,5764
25,00	3,17	0,001003	43,3373	104,83	2304,30	2409,13	104,83	2441,68	2546,51	0,3672	8,1894	8,5566
26,67	3,50	0,001003	39,4663	111,82	2299,58	2411,40	111,82	2437,71	2549,53	0,3906	8,1305	8,5211
28,96	4,00	0,001004	34,7911	121,38	2293,12	2414,50	121,39	2432,28	2553,67	0,4224	8,0510	8,4734
30,00	4,25	0,001004	32,8783	125,73	2290,18	2415,91	125,73	2429,81	2555,55	0,4368	8,0152	8,4520
31,01	4,50	0,001005	31,1309	129,96	2287,32	2417,28	129,96	2427,41	2557,37	0,4507	7,9806	8,4313
32,87	5,00	0,001005	28,1853	137,74	2282,06	2419,80	137,75	2422,98	2560,73	0,4762	7,9176	8,3938
35,00	5,63	0,001006	25,2053	146,63	2276,04	2422,67	146,63	2417,91	2564,55	0,5051	7,8466	8,3517
36,16	6,00	0,001006	23,7334	151,47	2272,76	2424,23	151,48	2415,15	2566,63	0,5208	7,8082	8,3290
39,00	7,00	0,001008	20,5245	163,34	2264,71	2428,05	163,35	2408,37	2571,72	0,5590	7,7154	8,2745
40,00	7,38	0,001008	19,5151	167,53	2261,87	2429,39	167,53	2405,98	2573,51	0,5724	7,6831	8,2555
41,51	8,00	0,001008	18,0989	173,83	2257,58	2431,41	173,84	2402,37	2576,21	0,5925	7,6348	8,2273
43,76	9,00	0,001009	16,1992	183,24	2251,18	2434,43	183,25	2396,97	2580,22	0,6223	7,5635	8,1858
45,00	9,59	0,001010	15,2521	188,43	2247,66	2436,08	188,43	2393,99	2582,43	0,6386	7,5247	8,1633
45,81	10,00	0,001010	14,6701	191,80	2245,36	2437,16	191,81	2392,05	2583,86	0,6492	7,4996	8,1488
50,00	12,35	0,001012	12,0269	209,33	2233,40	2442,73	209,34	2381,95	2591,29	0,7038	7,3710	8,0748
53,97	15,00	0,001014	10,0201	225,93	2222,05	2447,98	225,94	2372,34	2598,28	0,7549	7,2522	8,0071
55,00	15,76	0,001015	9,56428	230,24	2219,10	2449,34	230,26	2369,84	2600,09	0,7680	7,2218	7,9898
60,00	19,95	0,001017	7,66723	251,16	2204,74	2455,90	251,18	2357,65	2608,83	0,8313	7,0769	7,9081
60,06	20,00	0,001017	7,64795	251,40	2204,57	2455,98	251,42	2357,51	2608,94	0,8320	7,0752	7,9072
64,96	25,00	0,001020	6,20321	271,93	2190,43	2462,36	271,96	2345,48	2617,44	0,8932	6,9370	7,8302
65,00	25,04	0,001020	6,19354	272,09	2190,32	2462,41	272,12	2345,39	2617,50	0,8937	6,9359	7,8296
69,10	30,00	0,001022	5,22841	289,24	2178,45	2467,70	289,27	2335,27	2624,55	0,9441	6,8234	7,7675
70,00	31,20	0,001023	5,03954	293,03	2175,82	2468,86	293,07	2333,03	2626,10	0,9551	6,7989	7,7540
72,68	35,00	0,001024	4,52508	304,27	2168,02	2472,29	304,30	2326,37	2630,67	0,9877	6,7269	7,7146
75,00	38,60	0,001026	4,12894	313,99	2161,25	2475,24	314,03	2320,57	2634,60	1,0158	6,6654	7,6812
75,86	40,00	0,001026	3,99298	317,58	2158,75	2476,33	317,62	2318,43	2636,05	1,0261	6,6429	7,6690
78,71	45,00	0,001028	3,57594	329,57	2150,37	2479,94	329,62	2311,25	2640,86	1,0603	6,5686	7,6288
80,00	47,41	0,001029	3,40516	334,96	2146,60	2481,56	335,01	2308,00	2643,02	1,0756	6,5355	7,6111
81,32	50,00	0,001030	3,24003	340,49	2142,72	2483,21	340,54	2304,67	2645,22	1,0912	6,5018	7,5930
85,00	57,87	0,001032	2,82584	355,95	2131,85	2487,81	356,01	2295,31	2651,33	1,1346	6,4088	7,5434
85,93	60,00	0,001033	2,73171	359,84	2129,11	2488,95	359,91	2292,95	2652,86	1,1454	6,3857	7,5311
89,93	70,00	0,001036	2,36479	376,68	2117,20	2493,88	376,75	2282,67	2659,42	1,1921	6,2869	7,4790
90,00	70,18	0,001036	2,35906	376,97	2117,00	2493,97	377,04	2282,49	2659,53	1,1929	6,2853	7,4781
93,49	80,00	0,001039	2,08708	391,63	2106,58	2498,21	391,71	2273,47	2665,18	1,2330	6,2009	7,4339
95,00	84,61	0,001040	1,98056	398,00	2102,04	2500,04	398,09	2269,52	2667,61	1,2504	6,1647	7,4151
96,69	90,00	0,001041	1,86936	405,10	2096,97	2502,07	405,20	2265,12	2670,31	1,2696	6,1246	7,3943
99,61	100,00	0,001043	1,69393	417,40	2088,16	2505,55	417,50	2257,44	2674,95	1,3028	6,0561	7,3588
99,97	101,33	0,001043	1,67320	418,95	2087,04	2505,99	419,06	2256,47	2675,53	1,3069	6,0475	7,3544

Fonte: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo<sup>13</sup>

Para a pressão de 101,325, encontramos que a temperatura é de 99,97°C e a entalpia de evaporação de 2256,47 [kJ/kg].

Por conseguinte, vamos em busca da entalpia da entrada, ou entalpia da carga. A carga é a água que vem do tanque de água salobra, portanto sua temperatura é a temperatura ambiente, para Baturité a temperatura média de 24,6°C (CLIMATE-DATA.ORG, 2022). Com posse dessa temperatura média, aplicaremos um fator de segurança arbitrário, de aproximadamente 30%, para utilização do sistema nos dias mais frios, utilizando assim o valor de 16°C nas contas de entalpia.

A água em seu estado líquido tem seu calor específico como mostrado na Quadro 3 abaixo:

**Quadro 3** - Calor específico de alguns materiais em (cal/g. °C) e (J/kg.K)

<b>SUBSTÂNCIA</b>	<b>c (cal/g.°C)</b>	<b>c (J/kg.K)</b>
Água	1,0	4,2.10 <sup>3</sup>
Gelo	0,55	2,3.10 <sup>3</sup>
Alumínio	0,22	9,2.10 <sup>2</sup>
Ferro	0,11	4,6.10 <sup>2</sup>
Latão	0,094	3,9.10 <sup>2</sup>
Cobre	0,092	3,9.10 <sup>2</sup>
Prata	0,056	2,3.10 <sup>2</sup>
Chumbo	0,031	1,3.10 <sup>2</sup>

Fonte: Calor sensível: Calorimetria<sup>14</sup>

O calor específico da água é 4,2 [kJ/kg.K], aplicando então a temperatura e o calor específico na formula

$$H_c = 4,2 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right] * (16 - 99,97) [^\circ\text{C}] \quad (70)$$

$$H_c = -1499,9 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \quad (71)$$

<sup>13</sup> Site: <FILE:///C:/USERS/CLAUD/DOWNLOADS/PME3398%20-%20TABELAS%20TERMODINÂMICAS.PDF> – Acessado em 02 de Abril 2022.

<sup>14</sup> Disponível em [http://www2.pelotas.ifsul.edu.br/denise/caloretemperatura/caloretemperatura\\_texto.pdf](http://www2.pelotas.ifsul.edu.br/denise/caloretemperatura/caloretemperatura_texto.pdf) . Acessado dia 02 de Abril 2022.

Para o cálculo no trocador de calor, verificar a tabela do fluido, no item 5.4.2 deste trabalho, que apresenta as características do fluido trocador de calor. Com as informações do fluido podemos ir em busca da sua entalpia. Aplica-se mais uma vez a equação 6.

$$H_{tc} = 2,544 \left[ \frac{kJ}{kg \cdot K} \right] * (360 - 99,97) [^{\circ}C] \quad (72)$$

$$H_{tc} = 1356,41 \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \quad (73)$$

Com essas informações podemos agora aplicar a fórmula 5:

$$23,05 * (-1499,9) + m_{tc} * 1356,41 = 13,84 * 2256,47 \quad (74)$$

$$m_{tc} = 48,512 \left[ \frac{kg}{h} \right] \quad (75)$$

### 5.3.7 Dimensionamento do trocador de calor.

Finalizando o dimensionamento do evaporador é necessário definir o trocador de calor, para isso usa-se as equações 7 e 8 em conjunto:

$$48,512 * 1356,41 = U * A * (360 - 99,97) \quad (76)$$

Ainda falta calcular a U, para fazer o cálculo do mesmo, podemos utilizar a equação 9:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} \quad (77)$$

$h_1$  é o coeficiente da água que 1000 [W/(m<sup>2</sup> °C)] e  $h_2$ , é o fluido de transferência definido no item 4.4.2, DOWTHERM A. Podemos verificar no Quadro 4 abaixo que define o seu valor de  $h_2$ .

Quadro 4 - Fluidos X Coeficiente de Transferência

Fluidos	Coeficientes de transferência ( $W m^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$ )	Fator de incrustação ( $m^2 \text{ } ^\circ C W^{-1}$ )
Água de rio	3000 a 12000	0,0003 a 0,0001
Água do mar	1000 a 3000	0,001 a 0,0003
Água de resfriamento (torres)	3000 a 6000	0,0003 a 0,00017
Água de abastecimento urbano	3000 a 5000	0,0003 a 0,0002
Água de abastecimento dura (acima de 3,9 g/litro)	1000 a 2000	0,001 a 0,0005
Condensado do vapor	1500 a 5000	0,00067 a 0,0002
Vapor (sem óleo)	4000 a 10000	0,0025 a 0,0001
Vapor (contaminação com óleo)	2000 a 5000	0,0005 a 0,0002
Salmoura para refrigeração	3000 a 5000	0,0003 a 0,0002
Ar e gases industriais	5000 a 10000	0,0002 a 0,0001
Gases ácidos	2000 a 5000	0,0005 a 0,0002
Vapores orgânicos	5000	0,0002
Líquidos orgânicos	5000	0,0002
Hidrocarbonetos leves	5000	0,0002
Hidrocarbonetos pesados	2000	0,0005
Orgânicos em ebulição	2500	0,0004
Orgânicos em condensação	5000	0,0002
Fluidos térmicos até 250 °C (ex. Dowtherm ou Paratherm)	5000	0,0002
Fluidos térmicos entre 250 e 370 °C	3000	0,0002
Soluções aquosas salinas	3000 a 5000	0,0003 a 0,0002
Metais líquidos (torres concentradoras)	50000 a 100000	0,0001
Sais fundidos (torres concentradoras)	1300 a 2700	0,0007 a 0,0002

Fonte: (VAZZOLER, 2021a)

Aplicando a os valores de h1 e h2 na equação (77):

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{1000} + \frac{1}{3000} \quad (78)$$

$$U = 750 [W/m^2 \cdot ^\circ C] \quad (79)$$

Aplicando a equação (79) na equação (76):

$$48,512 * 1356,41 = 750A * (360 - 99,97) \quad (80)$$

É importante lembrar que vazão está em horas e entalpia em quilo-Joules, para corrigir e permanecer tudo nas mesmas unidades devemos transformar para s e J

$$A = 0,3374 * \left(\frac{1000}{3600}\right) [m^2] \quad (81)$$

$$A = 0.0937 [m^2] \quad (82)$$

Sabendo que o tubo apresenta diâmetro de 70mm, verificar item 4.4.1. e que a área externa do cilindro é dado pela fórmula:

$$2\pi RL = 0.0937 \quad (83)$$

$$L = 0.4264 [m] \quad (84)$$

Isto é, a tubulação para troca de calor (serpentina) dentro do evaporador, usando tubulação de 70mm, deve ter um comprimento de 0,43m no mínimo.

## 5.4 Concentrador de calor.

### 5.4.1 Tubo Receptor

A Figura 22 apresenta como é o tubo receptor parabólico escolhido:

**Figura 22** - Modelo do tubo receptor da empresa Gaia Solar



Fonte: Site Made-in-China<sup>15</sup>

O modelo é vendido comercialmente, a escolha feita foi a do tubo da empresa Gaia Solar, com as referências técnicas apresentadas no Quadro 5:

<sup>15</sup> [https://pt.made-in-china.com/co\\_gaiasolar/product\\_Parabolic-Trough-Receiver-Concentrator-Tube-125mm-70m\\_rsyieishg.html](https://pt.made-in-china.com/co_gaiasolar/product_Parabolic-Trough-Receiver-Concentrator-Tube-125mm-70m_rsyieishg.html)

**Quadro 5** - Informações técnicas tubo receptor da empresa Gaia Solar.**Informação Básica.**

N ° de Modelo.	RT-4060	Outer Tube	High Borosilicate 3.3glass
Inner Tube	Ss316	Length	4060mm
Effective Absorber Length	3860mm	Diameter of Outer Tube	125mm
Diameter of Inner Tube	70mm	Operating Temperature	400~500 Degree Centigrade
Absorption Rate	Greater Than 95.5%	Vacuum Rates	P<0.01PA
Life Span	25 Years	Pacote de Transporte	Export Standard Packing
Especificação	4060mm length	Marca Registrada	Gaia Solar / OEM
Origem	Dezhou, Shandong	Código HS	8419901000
Capacidade de Produção	10pieces/Day		

Fonte: Site Made-in-China<sup>16</sup>

O quadro 5 mostra as informações básicas do tubo, e salientamos aqui o diâmetro interno do mesmo sendo de 70mm, essa espessura server para cálculos de troca de calor.

#### 5.4.2 Fluido de transferência de Calor.

Vamos manter a temperatura de trabalho do projeto no limite de 360°C para deixar aproximadamente 10% do trabalho de folga, para segurança. O valor de trabalho escolhido é menor que os 400°C indicados pela literatura e o catálogo do fabricante. Com esses valores definidos, o fluido escolhido foi o óleo sintético DOWTHERM A. Este óleo tem estabilidade térmica em estado líquido de 15°C a 400°C, apresentando um comportamento crítico apenas quando alcança a temperatura de 497°C e sua temperatura de autoignição é a 599°C. Sendo aplicável no nosso projeto (PALMEIRA, 2017).

O Quadro 6, do Dowtherm A, mostra as principais informações do óleo, para várias temperaturas de trabalho. De forma mais importante tem a viscosidade e calor específico. Que são utilizados nos cálculos de troca de calor e cálculo da bomba.

**Quadro 6** - Características de líquido saturado do fluido DOWTHERM A (Unidades Internacional)

TEMPERATURA °C	PRESS. DE VAPOR bar	VICOSIDADE mPa seg	CALOR ESPECÍFICO kJ/kg K	COND. TÉRMICA W/mK	DENSIDADE kg/m <sup>3</sup>	TEMPERATURA °C	PRESS. DE VAPOR bar	VICOSIDADE mPa seg	CALOR ESPECÍFICO kJ/kg K	COND. TÉRMICA W/mK	DENSIDADE kg/m <sup>3</sup>
12	0,00	5,52	1,550	0,1400	1065,9	225	0,48	0,33	2,148	0,1059	883,5

<sup>16</sup> Site: [https://pt.made-in-china.com/co\\_gaiasolar/product\\_Parabolic-Trough-Receiver-Concentrator-Tube-125mm-70m\\_rsyieishg.html](https://pt.made-in-china.com/co_gaiasolar/product_Parabolic-Trough-Receiver-Concentrator-Tube-125mm-70m_rsyieishg.html)

15	0,00	5,00	1,558	0,1395	1063,5	230	0,54	0,32	2,162	0,1051	878,7
20	0,00	4,29	1,573	0,1387	1059,6	235	0,61	0,31	2,176	0,1043	873,8
25	0,00	3,71	1,587	0,1379	1055,7	240	0,69	0,30	2,190	0,1035	868,9
30	0,00	3,25	1,601	0,1371	1051,7	245	0,77	0,29	2,204	0,1027	864,0
35	0,00	2,87	1,616	0,1363	1047,8	250	0,87	0,28	2,218	0,1019	859,0
40	0,00	2,56	1,630	0,1355	1043,8	255	0,97	0,27	2,231	0,1011	854,0
45	0,00	2,30	1,644	0,1347	1039,8	257,1	1,01	0,27	2,237	0,1008	851,9
50	0,00	2,07	1,658	0,1339	1035,8	260	1,08	0,27	2,245	0,1003	849,0
55	0,00	1,88	1,673	0,1331	1031,8	265	1,20	0,26	2,259	0,0995	843,9
60	0,00	1,72	1,687	0,1323	1027,8	270	1,33	0,25	2,273	0,0987	838,7
65	0,00	1,58	1,701	0,1315	1023,7	275	1,48	0,24	2,288	0,0979	833,6
70	0,00	1,46	1,715	0,1307	1019,7	280	1,63	0,24	2,302	0,0971	828,3
75	0,00	1,35	1,729	0,1299	1015,6	285	1,80	0,23	2,316	0,0963	823,0
80	0,00	1,25	1,744	0,1291	1011,5	290	1,98	0,22	2,330	0,0955	817,7
85	0,00	1,17	1,758	0,1283	1007,4	295	2,17	0,22	2,344	0,0947	812,3
90	0,00	1,09	1,772	0,1275	1003,2	300	2,38	0,21	2,359	0,0939	806,8
95	0,00	1,03	1,786	0,1267	999,1	305	2,60	0,20	2,373	0,0931	801,3
100	0,01	0,97	1,800	0,1259	994,9	310	2,84	0,20	2,388	0,0923	795,8
105	0,01	0,91	1,814	0,1251	990,7	315	3,10	0,19	2,403	0,0915	790,1
110	0,01	0,86	1,828	0,1243	986,5	320	3,37	0,19	2,417	0,0907	784,4
115	0,01	0,82	1,842	0,1235	982,3	325	3,66	0,18	2,432	0,0899	778,6
120	0,01	0,77	1,856	0,1227	978,1	330	3,96	0,18	2,448	0,0891	772,8
125	0,02	0,73	1,870	0,1219	973,8	335	4,29	0,17	2,463	0,0883	766,9
130	0,02	0,70	1,884	0,1211	969,5	340	4,64	0,17	2,479	0,0875	760,9
135	0,03	0,67	1,898	0,1203	965,2	345	5,00	0,17	2,494	0,0867	754,8
140	0,03	0,64	1,912	0,1195	960,9	350	5,39	0,16	2,511	0,0859	748,6
145	0,04	0,61	1,926	0,1187	956,6	355	5,80	0,16	2,527	0,0851	742,3
150	0,05	0,58	1,940	0,1179	952,2	360	6,24	0,15	2,544	0,0843	735,9
155	0,06	0,56	1,954	0,1171	947,8	365	6,69	0,15	2,561	0,0835	729,4
160	0,07	0,53	1,968	0,1163	943,4	370	7,18	0,15	2,579	0,0827	722,8
165	0,08	0,51	1,982	0,1155	938,9	375	7,68	0,14	2,597	0,0819	716,1
170	0,09	0,49	1,996	0,1147	934,5	380	8,22	0,14	2,616	0,0811	709,2
175	0,11	0,47	2,010	0,1139	930,0	385	8,78	0,14	2,636	0,0803	702,2
180	0,13	0,46	2,023	0,1131	925,5	390	9,37	0,13	2,657	0,0795	695,0
185	0,15	0,44	2,037	0,1123	920,9	395	9,99	0,13	2,678	0,0787	687,7
190	0,18	0,42	2,051	0,1115	916,4	400	10,64	0,13	2,701	0,0779	680,2
195	0,21	0,41	2,065	0,1107	911,8	405	11,32	0,12	2,725	0,0771	672,5
200	0,24	0,39	2,079	0,1099	907,1	410	12,03	0,12	2,751	0,0763	664,6
205	0,28	0,38	2,093	0,1091	902,5	415	12,78	0,12	2,779	0,0755	656,5
210	0,32	0,37	2,107	0,1083	897,8	420	13,56	0,11	2,809	0,0747	648,1
215	0,37	0,35	2,120	0,1075	893,1	425	14,38	0,11	2,842	0,0739	639,4
220	0,42	0,34	2,134	0,1067	888,3						

Fonte: Ficha técnica do óleo sintético DOWTHERM A<sup>17</sup>

### 5.4.3 Área do Concentrador Cilíndrico Parabólico.

<sup>17</sup> Disponível: <https://silو.tips/download/o-fluido-de-transferencia-de-calor-dowtherm-a>

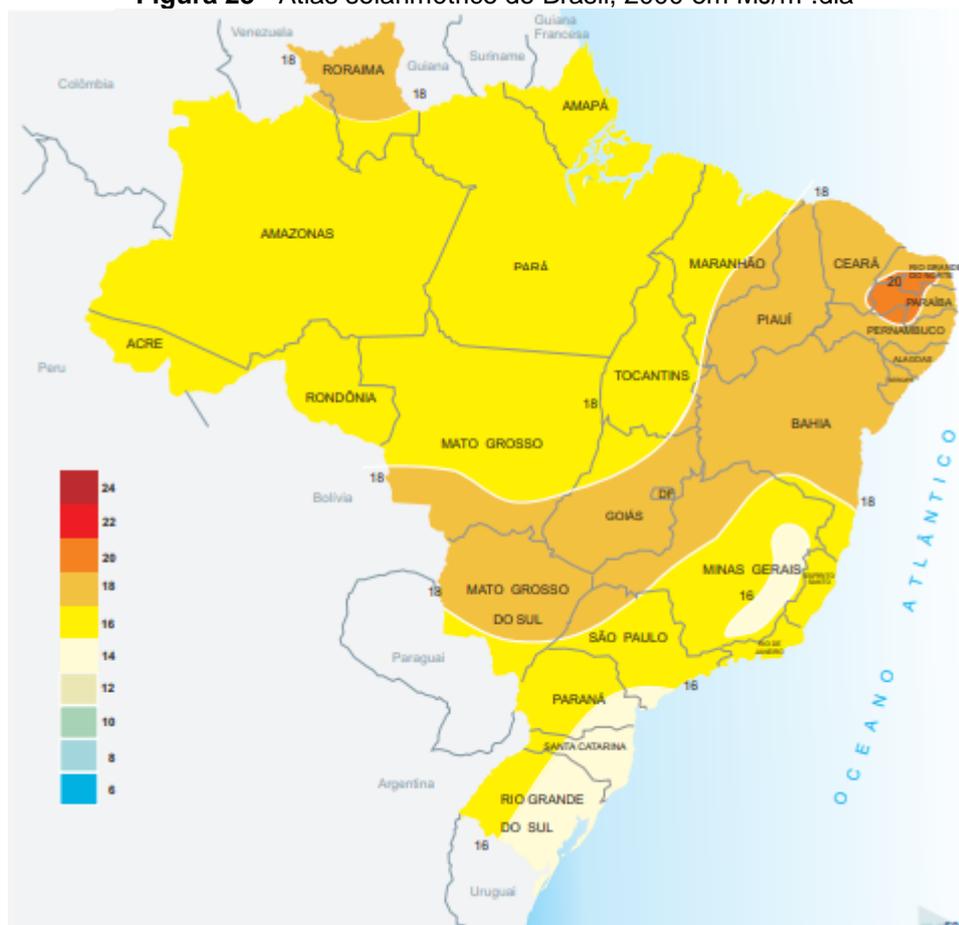
O concentrador parabólico para seu dimensionamento tem como finalidade suprir a energia necessária no evaporador, no capítulo do cálculo do evaporador é verificado o balanço de energia, e temos então todas as variáveis para o cálculo da energia necessária a cada hora.

$$E_{fdt} = 13,84 * 2256,47 \quad (85)$$

$$E_{fdt} = 31229,55 \text{ [kJ/h]} \quad (86)$$

O passo seguinte a ter a quantidade de energia necessária a ser produzida pelo concentrador cilíndrico é ter as definições; O ATLAS Solarimétrico do Brasil, 2000 nos dá as devidas informações (Figura 23):

**Figura 23 - Atlas solarimétrico do Brasil, 2000 em MJ/m<sup>2</sup>.dia**



Fonte: Modificado pelo autor, retirado de Atlas Solarimétrico do Brasil, visitado em 02 maio 2022<sup>18</sup>

Segundo o atlas, o Ceará tem a sua disposição 20MJ/m<sup>2</sup>.dia, deixando todas as unidades no sistema que utilizamos até agora:

$$E_{\text{disponívelCe}} = 916,67 \text{ [kJ/h. m}^2\text{]} \quad (87)$$

Com o valor disponível, segue-se ao próximo passo que é a aplicação dos modificares, o primeiro modificar relacionado ao local de instalação, como o projeto prevê a instalação no maciço de Baturité a região apresenta pouca poluição, mas considerando o potencial de crescimento da região seremos conservadores e, observando a tabela para ângulos, manteremos o modificador em 1, compensando o local com ângulo aplicado. Em sequência deve-se aplicar o modificador por rendimento, para robustez e garantias do projeto aplicaremos o menor valor, ou seja, 0,9. Por conseguinte, como definido explanado pelo Vazzoler, 2021 esse valor encontra-se próximo a 60% e por fim, a energia útil, que devesse prever em torno de 85%. Aplicando todos os modificadores temos que a energia aproveitada pelo concentrador é:

$$E_{\text{disponívelreal}} = 916,67 * 1 * 0,9 * 0,6 * 0,85 \text{ [kJ/h. m}^2\text{]} \quad (88)$$

$$E_{\text{disponívelreal}} = 420,75 \text{ [kJ/h. m}^2\text{]} \quad (89)$$

Para descobrir então a área necessária para o concentrador cilíndrico devemos então aplicar a equação (86) e dividir pela equação (89).

$$Ac = \frac{31229,55 \text{ [kJ/h]}}{420,75 \text{ [kJ/h. m}^2\text{]}} \quad (90)$$

$$Ac = 74.224 \text{ [m}^2\text{]} \quad (91)$$

#### 5.4.4 Largura do Concentrador Cilíndrico Parabólico

Com a definição da área necessária para concentrador, precisamos definir a parábola. Com isso, pode-se acompanhar a vista lateral no item 3.7.3 deste trabalho. Como já temos o dimensionamento do tubo,  $W_f = 70\text{mm}$ ,  $a = R\cos\psi$  e  $b = R \sin\psi$ .

Da geometria analítica é sabido que o foco de uma parábola é dado por:

$$R \cos \psi^2 = 4f(f - R \sin \psi) \quad (92)$$

$$(1 - \cos^2 \psi)R^2 + 4fR \cos \psi - 4f^2 = 0 \quad (93)$$

Resolvendo a equação:

$$R = \frac{2f(1 - \cos \psi)}{1 - \cos^2 \psi} \quad (94)$$

$$R = \frac{2f}{1 + \cos \psi} \quad (95)$$

Em complemento é necessário fazer o cálculo do comprimento da parábola. Como a parábola é um arco, da geometria analítica, sabemos que as equações são:

$$S(x) = \int_k^x \sqrt{1 + (f'(t))^2} dt \quad (96)$$

$$f(t) = t^2 \quad (97)$$

$$f'(t) = 2t \quad (98)$$

Logo, aplicando equação 98 na equação 96:

$$S(x) = \int_k^x \sqrt{1 + (2t)^2} dt \quad (99)$$

$$S(x) = \int_k^x \sqrt{1 + 4t^2} dt \quad (100)$$

Como  $S(x)$  deve ser próximo de 2m devido a medidas construtivas, facilitando a instalação e locomoção das peças,  $k$  e  $x$  da equação 100 devem ter aproximadamente 0,8m resultando em:

$$S(x) \cong 2,134m \quad (101)$$

Com isso:

$$a = R \cos \psi \quad (102)$$

$$0,8 = R \cos \psi \quad (103)$$

$$\cos \psi = \frac{0,8}{R} \quad (104)$$

Aplicando a equação 104 na equação 95:

$$R = \frac{2f}{1 + \frac{0,8}{R}} \quad (105)$$

$$R = \frac{2fR}{R + 0,8} \quad (106)$$

$$R + 0,8 = 2f \quad (107)$$

Agora temos a dependência do R, com a distância do foco. Voltando a equação do foco, já que temos a distância “a”, fica:

$$0,8^2 = 4f(f - R \sin \psi) \quad (108)$$

Sabendo:

$$R^2 = (R \cos \psi)^2 + (R \sin \psi)^2 \quad (109)$$

Substituindo 109 e 107 na equação 108:

$$0,8^2 = 4f(f - (2f - 0,8)^2 + 0,8^2) \quad (110)$$

$$f = 0,7259 \text{ [m]} \quad (111)$$

$$R = 0,65 \text{ [m]} \quad (112)$$

Com isso temos a distância focal, o raio para a extremidade da parábola e a distância focal, para concluir o concentrador falta apenas definir o comprimento do mesmo. Para tal, utilizaremos a área que já achamos e a largura da parábola, assim:

$$\text{Comprimento do concentrador} = \frac{74,224}{2,134} = 34,79 \text{ [m]} \quad (113)$$

#### 5.4.5 Bomba do fluido de transferência de calor

Para o cálculo da bomba do fluido a ideia principal igual à da bomba de água salobra, então começaremos pelo volume de fluido, que será fluido suficiente para ficar rodando em toda a tubulação em circuito fechado sendo o tamanho da serpentina, ida e volta do concentrador e as duas decidas do evaporador isso multiplicado pelo diâmetro do tubo:

$$Vol_{fluido} = (d_{serp} + 2d_{conc} + 2a_{evap}) * \frac{\pi * 0,07^2}{4} \quad (114)$$

$$Vol_{fluido} = (34,79 * 2 + 4 * 2 + 0,42) * 0,055 \quad (115)$$

$$Vol_{fluido} = (78) * 0,055 \quad (116)$$

$$Vol_{fluido} = 4,2861 [m^3] \quad (117)$$

Com o volume do líquido podemos calcular a vazão:

$$Q_{fluido} = \frac{V_{fluido}}{\rho_{fluido}} \quad (118)$$

$$Q_{fluido} = \frac{4,2861}{735,9} \quad (119)$$

$$Q_{fluido} = \frac{4,2861}{735,9} \quad (120)$$

$$Q_{fluido} = 0,005824 [m^3/s] \quad (121)$$

Para definir a velocidade do fluido:

$$V_{fluido} = \frac{Q}{A_{tub}} \quad (122)$$

$$V_{fluido} = \frac{0,005824}{\pi 35^2} \quad (123)$$

$$V_{fluido} = 1,5142 \left[\frac{m}{s}\right] \quad (124)$$

Agora, como o escoamento é contínuo:

$$\frac{P_5}{\gamma} + z_5 + \frac{v_5^2}{2g} + Hm = \frac{P_6}{\gamma} + z_6 + \frac{v_6^2}{2g} \quad (125)$$

Podemos considerar que a pressão antes e depois da bomba se mantém igual, tal como a velocidade da água antes da bomba seja de água parada, por tanto, zero. Assim reduzimos nossa equação para:

$$z_5 + Hm = z_6 + \frac{v_6^2}{2g} \quad (126)$$

$$0 + Hm = 78 + \frac{1,5142^2}{2*9,8} \quad (127)$$

$$Hm = 78 + \frac{1,5142^2}{2*9,8} \quad (128)$$

$$Hm = 78,117 \quad (129)$$

Continuando calcula-se a potência da bomba:

$$Pb_{fluido} = \gamma * Q * Hm \quad (130)$$

$$Pb_{fluido} = 0,15 * 10^{-3} * 0,005824 * 78,117 \quad (131)$$

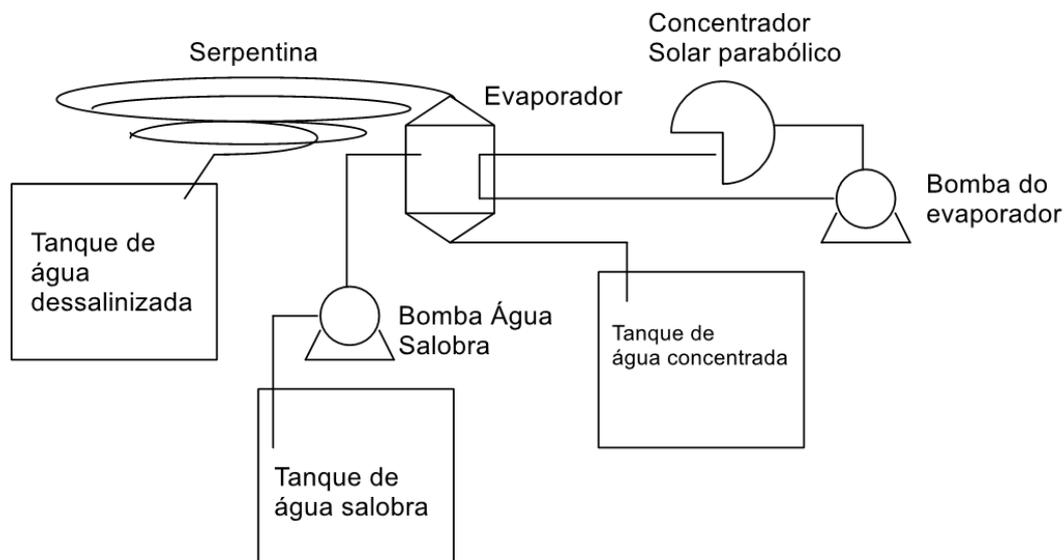
$$Pb_{fluido} = 0,682 [W] \quad (132)$$

$$Pb_{fluido} = 0,93 [cv] \quad (133)$$

## 5.5 Modelo do Projeto.

Após a modelagem do concentrador, criou-se o fluxograma com as partes modeladas para melhor entendimento, apresentado abaixo.

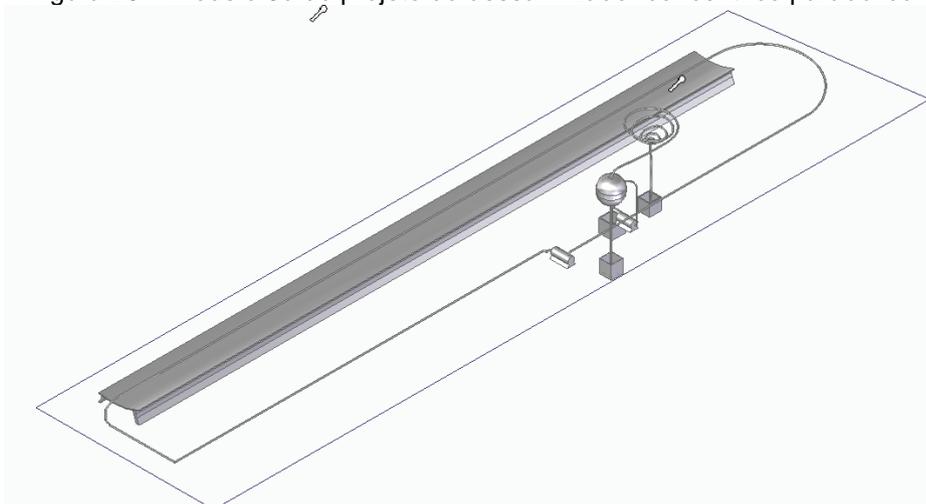
Figura 24 – Fluxograma do projeto do dessalinizador.



Fonte: O autor (2022).

Juntamente com o fluxograma, criou-se o modelo em 3D do projeto. Para melhorar a compreensão em ter uma melhor noção de tamanho.

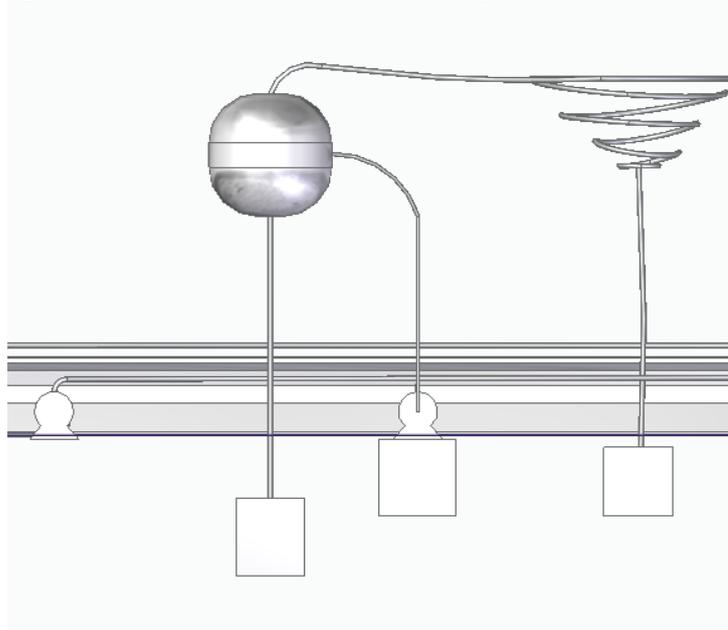
Figura 25 – Modelo 3d do projeto do dessalinizador concentrico parabólico



Fonte: O autor (2022).

A figura a seguir mostra a parte que fica a bomba, evaporador, condensador mais próximo, podemos setorizar chamando de estação de dessalinização. A visão 2d mostrará de forma a ter a melhor visualização.

Figura 26 – Modelo que que seria a estação de dessalinização.



Fonte: O autor (2022).

A tabela abaixo unifica as informações mais importantes do projeto, ficando assim:

<b>Inforamações iniciais:</b>		<b>UNIDADE</b>
Volume de água dia	83	l
Quantidade de pessoas	3	unid
Período	7	dias
Altura do evaporador	4	m
Tubulação da serpentina	25	mm
Área da serpentina	4	m <sup>2</sup>
<b>Tanque de água dessalinizada</b>		<b>UNIDADE</b>
Volume	2.324	m <sup>3</sup>
Aresta	1.4	m
<b>Tanque de água salobra</b>		<b>UNIDADE</b>
Volume	3.8733	m <sup>3</sup>
Aresta	1.57	m
<b>Bomba da água Salobra</b>		<b>UNIDADE</b>
Vazão:	6.29*10-6	m <sup>3</sup> /s
Velocidade fluido salobra	3.2	m/s
Potência da bomba	4.3*10-10	cv
<b>Evaporador</b>		<b>UNIDADE</b>
Vazão saída do evaporador	13.84	kg/h
Vazão entrada do evaporador	23.05	kg/h
Vazão mássica do rejeito	9.22	kg/h
Vazão mássica do trocador de calor	48.512	kg/h

Área do trocador de calor	0.0937	m <sup>2</sup>
Comprimento do trocador de calor	0.4264	m
Tubulação	70	mm
<b>Concentrador Cilíndrico Parabólico</b>		<b>UNIDADE</b>
Área do concentrador	74.224	m <sup>2</sup>
Comprimento do concentrador	34.79	m
Comprimento arco do concentrador	2.134	m
<b>Bomba do fluido de transferência</b>		<b>UNIDADE</b>
Vazão:	0.005824	m <sup>3</sup> /s
Velocidade fluido	1.5142	m/s
Potência da bomba	0.93	cv

## 6 CONCLUSÃO

A dessalinização é um processo antigo que foi se modernizando com o tempo, hoje existem várias técnicas para a dessalinização. O estudo prospectivo mostra que a técnica de dessalinização, utilizando concentrador solar cilíndrico, ainda é muito pouco estudado no Brasil e no mundo. Essa esfera de estudo não tendo recebido a atenção que merece, cria expectativas de que existe muito conhecimento a ser trabalhado na área, enfatizando a escolha do tema.

Através dos resultados da modelagem apresentada, constatou-se que o sistema é funcional para o local escolhido, bem como, pode ser utilizado em outros locais que apresentam radiação parecida. O projeto também apresenta uma versatilidade grande, caso queria modificar o local aplicado, pode-se facilmente alterar as variáveis de angulação, de radiação etc. O trabalho, por vezes preocupou-se no quesito econômico, prezando em suas escolhas por medidas construções que fornecessem o menor custo e dificuldade para a implantação.

Esta modelagem fornece uma solução para a região do maciço de Baturité no que compete ao problema de água salobra da região, fazendo-a poder ser dessalinizada utilizando apenas a energia solar. Contudo, constatou-se que o comprimento do concentrador, mais o restante dos equipamentos, vai precisar de uma área considerável (aproximadamente 80m<sup>2</sup>) para instalação. Sendo então melhor aplicável para uma comunidade, ou para famílias que dispõem de tal espaço.

Por fim, conseguiu-se mostrar como executar todos os cálculos para o projeto do dessalinizador buscando ser o mais simples possível e utilizando os caminhos mais fáceis que se tem na literatura, assim o conhecimento pode, ainda, ser disseminado mais facilmente.

## REFERÊNCIAS

ÁGUA, P. T. D. Fluence. **Determinação da Alcalinidade**, 2008. Disponível em: <<https://www.tratamentodeagua.com.br/artigo/determinacao-da-alcalinidade/>>.

Acesso em: 10 out. 2019.

ANA e IBGE, Atualizam levantamento que aponta o papel da água na economia brasileira *In: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA)*, 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias/ana-e-ibge-atualizam-levantamento-que-aponta-o-papel-da-agua-na-economia-brasileira>>. Acesso em: 27 Janeiro 2022.

BATTISTI, Natan; OLIVEIRA, Mateus C. de; BARUM, Amilcar; LUZ, Maria Laura G. S. **Projeto de utilização da energia solar para o aquecimento da água do chimarrão no prédio das engenharias de petróleo, geológica e tecnólogo em geoprocessamento-ufpel** *In: XXIII congresso de iniciação científica da universidade federal de pelotas*, Pelotas, 2014.

BENOIT H, SPREAFICO L, GAUTHIER D, FLAMANT G.. **Review of heat transfer fluids in tube–receivers used in concentrating solar thermal systems: properties and heat transfer coefficients**. *Renew Sustain Energy*, n. 55, p. 298–315, 2016.

CAETANO, Elvio; NETO, Romeu e Silva. **Desenvolvimento de protótipo experimental de dessalinizador por osmose reversa para o tratamento em água salobra em áreas rurais**. *Águas Subterrâneas*, v. 32, p. 372-379, 2018.

CAMPESE, G. B.; PASSINI, R. J. **Estudo de evaporadores de múltiplos efeitos**. Poços de Caldas: Universidade Federal De Alfenas, 2015.

CLIMATE-DATA.ORG, 2022. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/ceara/baturite-25757/#:~:text=24.6%20°C%20é%20a,média%20anual%20de%20871%20mm.>>.

Acesso em: 02 Abril 2022.

COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR. **TLV**, 2022. Disponível em: <https://www.tlv.com/global/BR/steam-theory/overall-heat-transfer-coefficient.html>. Acesso em: 03 Abril 2022.

CONAMA. **Resolução conama n° 357**. [S.l.]: [s.n.], 2005.

COSTA, Hudson Pimentel; GILDO, Maria Gomes Pereira; SANTOS, Rogério Nunes. **Avaliação Físico-Química e Microbiológica da Água de Poços Profundos da Macroregião do Maciço de Baturité-CE**. v. I, 2016. p. 39-42, ISBN 2526-964X.

DANTAS, Lonan Jerônimo. **Desempenho de um sistema de purificação e dessalinização de águas salobras através de membranas de ultrafiltração/osmose inversa**. Campina Grande: [s.n.], 2021.

EVANGELOS B; CHRISTOS T; KIMON A. Antonopoulos. **A detailed working fluid investigation for solar parabolic trough collectors**. Appl Therm Eng. [S.l.]: [s.n.]. 2017. p. 114:374–86.

FERREIRA, José Gomes. A transposição das águas da bacia do rio São Francisco no contexto da resposta à seca do Nordeste. **ANPPAS**, Lisboa, p.1-16, 08 outubro 2017.

FOUST, A.S., WENZEL, L. A., CLUMP, C.W., MAUS, L., ANDERSEN, L.B. **Princípio das Operações Unitárias**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982.

FRACCANABIA, Naylene; MARIANI, Viviana Cocco. **Previsão de energia solar utilizando perceptron multicamadas com regularização bayesiana** *In*: Anais do X Encontro Regional de Matemática Aplicada e Computacional do Rio Grande do Sul – ERMAC-RS, 2020.

FREIRE, L. M.; LIMA, J. S. Caracterização Geomorfológica da Serra de Baturité - Ceará. **SINAGEO**, 2014. Disponível em: <http://www.sinageo.org.br/2014/trabalhos/5/5-593-14.html>. Acesso em: 11 Outubro 2021.

FUQIANG, Wang; ZIMING, Cheng; JIANYU, Tan; YUAN, Yuan; YONG, Shuai; LINHUA, Liu, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, p. 1314-1328, maio 2017.

GADELHA, Valdirio Alexandre Segundo; CAVALCANTI, Mônica Tejo; SILVA, José Nilton. **Estudo e Monitoramento Tecnológico de Dessalinização via Destilação por Recompressão Mecânica de Vapor**, p. 13, 2018.

GOMES, Brenda Carolina de Carvalho. **Avaliação teórica do processo de Eletrodiálise**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2020.

GÓMEZ, J.M. Rodríguez; CARLESSO, F.; VIEIRA, L. E.; SILVA, L. Da. **A irradiância solar: conceitos básicos**, São José dos Campos, SP, v. 40, n. 3, 2018. ISSN e3312.

GUO, JF; HUAI, XL; LIU, ZG. **Performance investigation of parabolic trough solar receiver**. Appl Therm Eng, n. 95, p. 357–364, 2016.

INPE. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos, 2017.

IPECE. Perfil Geossocioeconômico: um olhar para as Macrorregiões de Planejamento do Estado do Ceará, 2016. Disponível em: [http://www.ipece.ce.gov.br/publicacoes/Perfil\\_Geossocioeconomico.pdf](http://www.ipece.ce.gov.br/publicacoes/Perfil_Geossocioeconomico.pdf). Acesso em: 01 dez. 2019.

IPECE. Ceará ocupa o 13º lugar no ranking energético nacional e tem como principais matrizes de energia a termelétrica e a eólica. IPECE, 2018. Disponível em: <https://www.ipece.ce.gov.br/2018/12/12/ceara-ocupa-o-13o-lugar-no-ranking-energetico-nacional-e-tem-como-principais-matrizes-de-energia-a-termeletrica-e-a-eolica/>. Acesso em: 04 abril 2019.

IPECE. **Indicadores Sociais do Ceará**. Instituto De Pesquisa E Estratégia Econômica Do Ceará. Fortaleza, p. 80. 2018.

IPECE, Pesquisa revela que dos 9,1 milhões de habitantes no Ceará, 77,4% estão em áreas urbanas e 22,6% em áreas rurais, 29 Janeiro 2021. Disponível em: <https://www.ipece.ce.gov.br/2021/01/29/pesquisa-revela-que-dos-91-milhoes-de-habitantes-no-ceara-774-estao-em-areas-urbanas-e-226-em-areas-rurais/#:~:text=29%20de%20janeiro%20de%202021,11%2C2%25%20do%20total>. Acesso em: 26 maio 2021.

ZHU, Liangliang; GAO, Minmin; PEH, Connor Kang Nuo; HO, Ghim Wei. **Solar-driven photothermal nanostructured materials designs and prerequisites for evaporation and catalysis applications**. Royal Society of Chemistry, p. 22, 2018.

LUCENA, C, Y, S.; SANTOS, D, J, R.; SILVA, P, L, S.; COSTA, E, D.; LUCENA, R, L,. O reuso de águas residuais como meio de convivência com a seca no semiárido do Nordeste Brasileiro. **REGNE**, v. 4, p. 1-17, 2018.

MALIKA O, ABDALLAH K, LARBI L. Estimation of the temperature, heat gain and heat loss by solar parabolic trough collector under Algerian climate using different thermal oils. **Energy Convers Manage** , n. 75, p. 191–201., 2013.

MOCOCK, Juliana Ferreira Bezerra; PESSÔA, Clarissa Nogueira; MONTEIRO, Ângela Tainá da Silva; TORRES, Antônio Sérgio Caseira Gonçalves; RABBANI, Emilia Rahnemay Kohlman. **Estudo comparativo entre os principais métodos de dessalinização de águas subterrâneas: revisão de literatura** In: XX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 23 jan. 2019.

MOREIRA, Fabrícia de Souza; RANGEL, Andrezza Lemos; ANTUNES, Adelaide Maria. **Membranas poliméricas para dessalinização da água: uma avaliação da balança comercial brasileira**. Portal tratamento de água, 14 fev. 2020. Disponível em: <<https://tratamentodeagua.com.br/artigo/membranas-polimericas-dessalinizacao-agua/>>.

MOYA, E. Z. Concentrating Solar Power Technology. In: STEIN, K. L. A. W. Parabolic-trough concentrating solar power (CSP) systems. Philadelphia: Woodhead Publishing Limited, 2012. Cap. 7, p. 197-239.

NASCIMENTO, Celso Ferreira do. **Implantação de sistema de aquecimento de água por energia solar térmica em uma organização militar do exército**. Salvador: Escola de Formação Complementar do Exército, 2020.

NEOSOLAR. Energia solar térmica, 2017. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/energia-solar-termica>>. Acesso em: 13 outubro 2019.

OLIVEIRA, Jangirglédia de; ALCÓCER, Juan Carlos Alvarado; XAVIER, Antônio Roberto. Produção de biogás a partir de biodigestores: estratégia sustentável para a Macrorregião do Maciço de Baturité-Ce. In: OLIVEIRA, Jangirglédia de; ALCÓCER, Juan Carlos Alvarado; XAVIER, Antônio Roberto. **Educação, Ciência, Tecnologia e Inovação**. Fortaleza: Impreco, 2016. p. 146-161.

PALMEIRA, Marcela Barroso. Silo.Tips. O fluido de transferência de calor DOWTHERM A, 2017. Disponível em: <<https://silo.tips/download/o-fluido-de-transferencia-de-calor-dowtherm-a>>. Acesso em: 14 mar. 2022.

PEREIRA, Narlon Xavier. **Desafios e perspectivas da energia solar fotovoltaica no brasil: geração distribuída vs geração centralizada**. 2019 Sorocaba: UNESP - Universidade Estadual Paulista, 2019.

PINHO, Miguel Ângelo. **Meio de cultivo a base de concentrado de dessalinização obtido por osmose inversa para Arthrospira (Spirulina) platensis**. Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

PORTELA, Lino Wagner Castelo Branco; ALMEIDA, Ana Fabíola Leite; BARBOSA, Erilson de Sousa; CEZAR, Kleber Lima. **Uma revisão sobre as tecnologias de dessalinização térmica associadas a concentradores solares parabólicos** In: Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza, v. VIII, 2020.

ROCHA, Pedro Filipe Coelho. **Dessalinização de água do mar**. Universidade do Minho - Escola de Engenharia. Braga, p. 88. 2014.

ROMEIRO, Ademar Ribeiro. **Desenvolvimento sustentável: uma perspectiva econômico-ecológica**, 2011.

SAMPAIO, Cidália Marisa dos Santos. **Dessalinização da água através de painéis solares fotovoltaicos**. Universidade de Aveiro, 2016.

SOUZA, José Welhigton Moraes de. **Análise térmica de uma planta de dessalinização de múltiplo efeito (med) com alimentação paralela**. Paraíba, 2004.

SPG. **Caderno regional maciço de baturité 2019. Planejamento participativo & regionalizado**. [S.l.]: [s.n.]. 2019. p. 48.

SUDRÉ, Lu. Brasil de Fato, 28 Julho 2020. Disponível em: <<https://www.brasildefato.com.br/2020/07/28/ha-dez-anos-onu-declarava-acesso-a-agua-e-saneamento-como-direito-humano>>. Acesso em: 26 maio 2021.

THAKKAR, Vanita. **Status of Parabolic Dish Solar Concentrators**. [S.l.]: [s.n.], v. II, 2013. 42-50 p. ISBN 2319-7463.

TIPOS DE DESSALINIZAÇÃO, Dessalinizadores e seus sensores, 2014. Disponível em: <<https://sites.google.com/site/dessalinizacaosensores/tipos-de-dessalinizacao>>. Acesso em: 13 outubro 2019.

VAZZOLER, A. **Fundamentos de Sistemas Solares Térmicos**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2021a. p. 3007.

VAZZOLER, A. **Fundamentos de sistemas solares térmicos: Um guia**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2021b.