



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA – UEPB
PRÓ - REITORIA DE PÓS - GRADUAÇÃO E PESQUISA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL
MESTRADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL**

DAIANE SILVA DE ABREU BENEDITO

**MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UM
DESSALINIZADOR SOLAR TIPO CASCATA**

CAMPINA GRANDE - PB

2023

DAIANE SILVA DE ABREU BENEDITO

**MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UM
DESSALINIZADOR SOLAR TIPO CASCATA**

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

Área de concentração: Tecnologias de Tratamento de Água e de Resíduos.

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

Coorientador: Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira.

CAMPINA GRANDE - PB

2023

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

B463m Benedito, Daiane Silva de Abreu.

Modelagem matemática e simulação numérica de um dessalinizador solar tipo cascata [manuscrito] / Daiane Silva de Abreu Benedito. - 2023.

69 p. : il. colorido.

Digitado.

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

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

"Coorientação: Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira , Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT."

1. Escassez hídrica. 2. Dessalinização solar. 3. Transferência de calor. 4. Água. 5. Potabilidade de água. I. Título

21. ed. CDD 628.162

DAIANE SILVA DE ABREU BENEDITO

**MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UM
DESSALINIZADOR SOLAR TIPO CASCATA**

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

Área de concentração: Tecnologias de Tratamento de Água e de Resíduos

Aprovada em: 13/ 02/2023.

BANCA EXAMINADORA



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



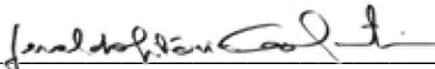
Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira
(Coorientador/UEPB)



Prof. Dr. Enivaldo Santos Barbosa
(Examinador Externo/UFPE)



Profa. Dra. Marcia Ramos Luiz
(Examinadora Interna/UEPB)



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

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo carinho e apoio, aos amigos pelo companheirismo e compreensão.

À Carlos Antônio Pereira de Lima, coordenador do curso de Mestrado, por seu empenho e orientação.

Ao professor Fernando Fernandes Vieira pelas leituras sugeridas ao longo dessa orientação e pela dedicação.

Aos professores do Curso de Mestrado da UEPB, que contribuíram por meio das disciplinas e debates, para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos colegas de classe pelos momentos de amizade e apoio.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de auxílio.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo a modelagem matemática e simulação numérica de um dessalinizador solar tipo cascata. Para verificar o melhor tipo de dessalinizador solar, com base nos parâmetros de simulação adotados para obtenção de uma melhor produção e eficiência do objeto em estudo, utilizando processos de transferência de calor, foram consideradas as especificações e propriedades dos materiais para o protótipo. A análise paramétrica através dos resultados do software Autodesk CFD permitiu a conclusão de algumas características indispensáveis para um bom e eficiente funcionamento do dessalinizador solar. Foi obtida na saída para a água dessalinizada uma produção acumulada para o Protótipo 1, 2 e 3 de $1.873 \text{ mL.m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, $1.843 \text{ mL.m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e $1.748 \text{ mL.m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. O melhor protótipo exposto com as distâncias de 4, 5, 6 cm é o Protótipo 1 e 2 de 4cm, 5cm de lâmina de água para a placa de vidro, justamente por ter uma maior transferência de calor da placa do vidro para o fluido. Foram criados cenários para verificar a convergência do dessalinizador, notou-se que houve convergência em seus gráficos, pois os valores se aproximavam do esperado, pôde-se concluir que de fato houve convergência e que os valores obtidos corroboram para esta pesquisa.

Palavras-Chave: escassez hídrica; dessalinização solar; transferência de calor; água; potabilidade de água.

ABSTRACT

The objective of this work is the mathematical modeling and numerical simulation of a cascade solar desalinator. In order to verify the best type of solar desalinator, based on the adopted simulation parameters to obtain a better production and efficiency of the object under study, using heat transfer processes, the specifications and properties of the materials for the prototype were considered. The parametric analysis through the results of the Autodesk CFD software allowed the conclusion of some indispensable characteristics for a good and efficient operation of the solar desalinator. An accumulated production for Prototypes 1, 2 and 3 of $1,873 \text{ mL.m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, $1,843 \text{ mL.m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ and $1,748 \text{ mL.m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ was obtained at the end for desalted water. The best prototype exposed with the distances of 4, 5, 6 cm is Prototype 1 and 2 with 4 cm, 5 cm of water layer for the glass plate, precisely because it has a greater transfer of heat from the glass plate to the fluid. Scenarios were created to verify the convergence of the desalinator, it was noted that there was convergence in its graphs, as the values were close to the expected, it could be concluded that there was indeed convergence and that the values obtained corroborate for this research.

Keywords: water scarcity; solar desalination; heat transfer; water; water potability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Disponibilidade de água em comparação com a população	16
Figura 2 - Processos de Dessalinização	17
Figura 3 - Osmose Reversa	18
Figura 4 - Processo de eletrodialise	19
Figura 5 - Diagrama de um Sistema de Destilação Solar.....	21
Figura 6 – Mecanismos de transferência de calor.....	24
Figura 7 – Etapas para obtenção da solução numérica de um problema de fluidos .	27
Figura 8 – Dessalinizador solar do tipo cascata	32
Figura 9 – Protótipo com distâncias variáveis	33
Figura 10 – Parâmetros para análise CFD.....	34
Figura 11 – Estrutura do processo de solução de um problema em CFD	35
Figura 12 – Etapas dos processos de análise CFD	35
Figura 13 – Modelos Tridimensionais e Bidimensionais.....	36
Figura 14 – Condições de fronteira	40
Figura 15 – Sequência de operações no solver	41
Figura 16 – Balanço de energia no vidro.....	42
Figura 17 – Balanço de energia da água	44
Figura 18 – Protótipo 3D do dessalinizador solar.....	49
Figura 19 – Fluxo de critério para análise CFD	52
Figura 20 – Representação da distribuição de temperatura no protótipo em malha .	53
Figura 21 – Distribuição de temperatura no protótipo 1	53
Figura 22 – Distribuição de temperatura no protótipo 2	54
Figura 23 – Distribuição de temperatura no protótipo 3	54
Figura 24 – Inferência da Temperatura na placa absorvedora.....	55
Figura 25 – inferência da Temperatura na placa de vidro	56
Figura 26 – Inferência da Temperatura na água	57
Figura 27 – Inferência do fluxo de calor solar.....	59
Figura 28 – Validação da temperatura na placa absorvedora Protótipo 1.....	60
Figura 29 – Validação da temperatura na placa de vidro Protótipo 1	61
Figura 30 – Validação da temperatura na água Protótipo 1	61
Figura 31 – Validação da temperatura na placa absorvedora Protótipo 2.....	62
Figura 32 – Validação da temperatura na placa de vidro Protótipo 2.....	62

Figura 33 – Validação da temperatura na água Protótipo 2	63
Figura 34 – Validação da temperatura na placa absorvedora Protótipo 3.....	63
Figura 35 – Validação da temperatura na placa vidro Protótipo 3.....	64
Figura 36 – Validação da temperatura na água Protótipo 3	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre as três técnicas de solução.....	26
Tabela 2 – Valores de ϕ , τ e S para equações de conservação	40
Tabela 3 – Especificações e Propriedades da placa de vidro utilizada	47
Tabela 4 – Especificações e Propriedades da água salobra utilizada.....	47
Tabela 5 – Especificações e Propriedades placa absorvedora utilizada.....	47
Tabela 6 – Especificações e Propriedades placa isolante utilizada	48
Tabela 7 – Condições de fronteira	50
Tabela 8 – Informações de execução dos protótipos	51
Tabela 9 – Parâmetros iniciais para os protótipos.....	51

LISTA DE SÍMBOLOS

A_b	Área da bandeja ou placa absorvedora (m ²)
A_v	Área do vidro (m ²)
C_a	Calor específico da água [W.s.Kg ⁻¹ .K ⁻¹]
$e_{isol,fundo}$	Espessura do isolamento do fundo (m)
$e_{isol,lateral}$	Espessura do isolamento da lateral (m)
g_x	Componentes de aceleração e campo gravitacional
g_y	Componentes de aceleração e campo gravitacional
g_z	Componentes de aceleração e campo gravitacional
h_{conv-a}	Coefficiente de convecção na água [W.m ⁻² .k ⁻¹]
h_{conv-r}	Coefficiente de transferência de calor convectivo e radiativo [W.m ⁻² .k ⁻¹]
h_{e-a}	Coefficiente de evaporação na água [W.m ⁻² .k ⁻¹]
h_{fg}	Calor latente de vaporização (J.kg ⁻¹)
h_{ta}	Coefficiente total de transferência de calor [W.m ⁻² .k ⁻¹]
h_{r-a}	Coefficiente de radiação na água [W.m ⁻² .k ⁻¹]
I_s	Radiação solar (W.m ⁻²)
K_{isol}	Coefficiente de isolamento [W. m ⁻¹ .K ⁻¹]
m_a	Massa da água (kg)
M_{e-a}	Rendimento diário do destilador solar (kg.m ⁻² . Dia ⁻¹)
\dot{m}_{e-a}	Rendimento diário do destilador solar (kg.m ⁻² . Dia ⁻¹)
η_i	Eficiência instantânea
$\eta_{passiva}$	Eficiência passiva
P	Pressão
P_a	Pressão da água (N.m ⁻²)
P_v	Pressão do vidro (N.m ⁻²)
\dot{q}_{e-a}	Taxa de transferência de calor evaporativo (W/m ²)
T_a	Temperatura da água (°C)
T_{am}	Temperatura ambiente (°C)
T_v	Temperatura do vidro (°C)
T_{ve}	Temperatura do vidro externo (°C)

T_{vi}	Temperatura do vidro interno (°C)
U_f	Coeficiente de perdas de calor para o solo pelo fundo [W.m ⁻² .k ⁻¹]
U_l	Coeficiente de perdas de calor para o solo pela lateral [W.m ⁻² .k ⁻¹]
U_s	Coeficiente de perdas de calor para o solo [W.m ⁻² .k ⁻¹]
α_v	Absortividade do vidro
α_a	Absortividade da água
σ	Constante de Stefan-Boltzmann [W(m ² K ⁴)]
ε_{eff}	Emissividade efetiva
ε_a	Emissividade da água
ε_c	Emissividade do vidro
μ	Viscosidade dinâmica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	15
2.1 Objetivo Geral	15
2.2 Objetivos Específicos	15
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1 Escassez da Água	16
3.2 Energia Solar	17
3.3 Processos de Dessalinização	17
3.3.1 Processos de Dessalinização por Membrana	18
3.3.2 Processo de Dessalinização Térmico	20
3.4 Dessalinização Solar	21
3.5 Transferência de Calor no Processo de Dessalinização Solar	22
4 DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)	25
4.1 Etapas para Solução Numérica	26
5 ESTADO DA ARTE	28
6 METODOLOGIA	32
6.1 Método de Dessalinização Proposto	32
6.2 Sistema Computacional Utilizado	33
7 MODELAGEM MATEMÁTICA	37
7.1 Equações governantes	37
7.1.1 Condições Iniciais e de Contorno	40
7.1.2 Método de Solução	41
7.2 Balanço de Energia	41
7.2.1 Balanço de Energia no Vidro	42
7.3 Balanço de Energia da Água	44
7.4 Massa Evaporada	45
7.5 Eficiência	46
7.6 Propriedades dos materiais para simulação	46
8 SIMULAÇÃO	49

8.1 Geometria	49
8.2 Condições de Fronteira.....	50
8.3 Fluidodinâmica computacional.....	50
8.4 Critério de análise	51
9 RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
10 VALIDAÇÃO	60
11 CONCLUSÃO.....	65
REFERÊNCIAS.....	66

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial para a vida, sendo considerado um suprimento extremamente satisfatório e fonte de vida, devendo ser suficiente, segura, acessível e disponível a todos (WHO, 2011).

Segundo Razzolini e Gunther (2008), o acesso à água potável é uma preocupação devido ao crescimento populacional e à dificuldade de atender as necessidades básicas diárias. O fornecimento adequado, tanto em qualidade quanto em quantidade, pode trazer benefícios significativos no controle e prevenção de doenças, expectativa de vida da população e poder econômico.

Algumas cidades na região nordeste do Brasil com pouca chuva ao ano têm se tornado uma preocupação, pois cada vez mais pessoas buscam abastecimento em nascentes distantes devido à poluição dos rios próximos aos centros urbanos, o que torna caro o processo de tratamento e distribuição. Como alternativa, muitas pessoas utilizam de água de poço para beber, mas na maioria das comunidades brasileiras essa água é salobra, sendo necessário realizar um pré-tratamento.

Segundo a Resolução do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) nº 357/2005 a água pode ser classificada de acordo com suas características, podendo ser água doce, salobra e salina. A água doce possui salinidade igual ou inferior a 0,5 partes por mil, que refere apenas por conta da baixa concentração de sal. A água salobra contém salinidade superior a 0,5 partes por mil e inferior a 30 partes por mil, com aparência turva e possui uma grande quantidade de substâncias dissolvidas, não é considerada própria para consumo humano. Assim como a água com salinidade igual ou superior a 30 partes por mil, devido ao seu alto teor de sal não é considerada própria para consumo humano.

A água salobra é toda e qualquer água que não serve para consumo humano devido seu teor de sal. Na maioria das vezes é uma água utilizada para finalidades não nobres como (descargas, lavagem de pisos, entre outros).

Uma solução economicamente viável para comunidades que possuem poços artesianos com águas salobras com visão sustentável é a dessalinização com uso de dessalinizador solar além de ser de baixo custo a depender do tipo é de fácil manutenção e sustentável.

São necessárias tecnologias avançadas ou alternativas que possam garantir a qualidade da água principalmente para uso doméstico. O Brasil é fortemente favorecido por fontes naturais de energia renovável, que possam ser utilizadas em tecnologias alternativas. Em particular, a energia solar evita o uso de combustível e eletricidade, o que a torna econômica e ambientalmente vantajosa (ALBUQUERQUE et al, 2022).

A dessalinização solar é uma das metodologias mais promissoras para fornecer água de alta qualidade para a comunidade humana utilizando como fonte a energia solar para produzir água dessalinizada. Existem diversos tipos de dessalinizadores solares podendo ser por processos direto ou indireto.

A dessalinização se dá por meio da energia solar nas placas de vidro do dessalinizador, onde vai ocorrer o processo, depois que a água é dessalinizada será encaminhada para um reservatório e posteriormente são feitas as análises correlatas, com a finalidade de proporcionar uma dessalinização efetiva, prática e segura.

Existem muitos fatores que afetam a produtividade dos dessalinizadores solares. Os parâmetros metrológicos não podem ser controlados. Em contraste, a diferença de temperatura água-vidro, área de superfície livre de água, área da placa absorvedora, temperatura de água de entrada, ângulo de vidro e profundidade da água podem ser alteradas para aumentar a produção (BOUZAIID et al, 2019).

Os modelos térmicos possuem uma grande vantagem de prever o desempenho de dessalinizadores solares podendo ser projetados por meio da utilização de simulação sem perda de tempo ou custo (ELANGO et al, 2015).

Uma solução economicamente viável para comunidades que enfrentam problemas com água salgada e/ou salina e problemas com seca, muitas dessas comunidades enfrentam uma alta intensidade de radiação. O problema da falta de água potável poderia ser reduzido com o uso de uma tecnologia muito popular o dessalinizador solar para converter água salina em água potável. Além de apresentar maior sustentabilidade em seu processo por utilizar uma energia limpa e renovável para a potabilidade da água, propõe uma solução sustentável e economicamente viável para a escassez de água potável.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Realizar uma análise paramétrica e dimensional de um dessalinizador solar tipo cascata por meio de modelagem matemática e simulação numérica.

2.2 Objetivos Específicos

- Construir um modelo matemático e aplicar a modelagem matemática e simulação do dessalinizador solar tipo cascata;
- Avaliar as vantagens e desvantagens dos parâmetros adotados no modelo matemático;
- Realizar uma análise paramétrica.

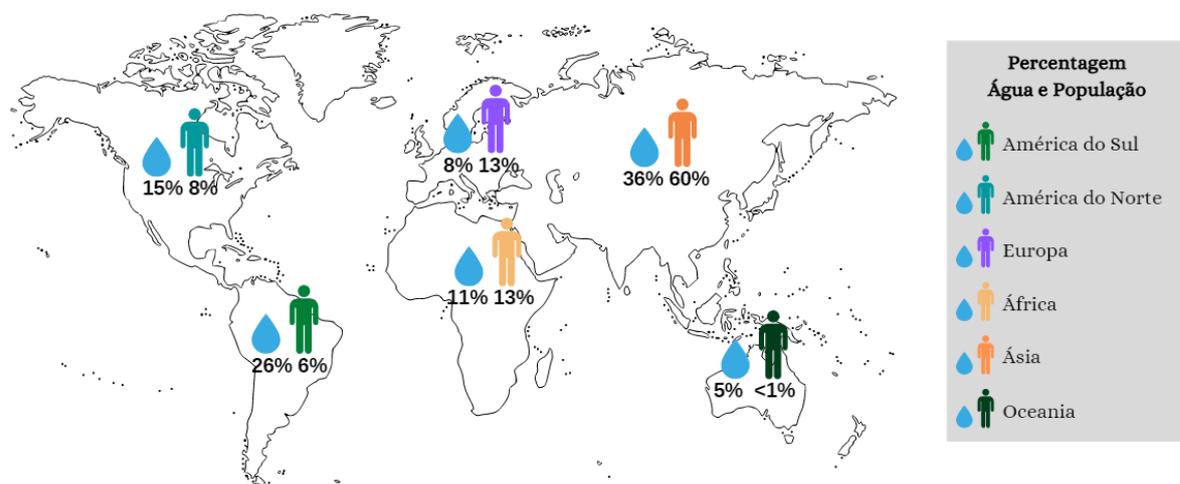
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Escassez da Água

O homem primitivo não fixava moradia devido a limitação hídrica, ou seja, se deslocava constantemente em busca de água, porém esse deslocamento tornou-se limitante em razão do crescimento populacional, que limitou a disponibilidade de água doce em algumas regiões do planeta, ao associar a disparidade entre regiões com grande precipitação pluviométrica e de disponibilidade hídrica muito escassa, surgiu a necessidade de a população racionalizar a água (MANCUSO; SANTOS, 2003).

A Figura 1 apresenta a relação entre a disponibilidade de água global e a população do planeta. O continente asiático abrange mais de metade da população mundial, contudo existem apenas 36% de recursos hídricos nessa região. Ao contrário do que é apresentado no sul da América, onde cerca de 6% da população do planeta tem disponível mais de um quarto dos recursos hídricos existentes no mundo (UNESCO, 2003).

Figura 1 – Disponibilidade de água em comparação com a população



Fonte: Adaptado de UNESCO (2003).

O problema da falta de água potável poderia ser reduzido com o uso de uma tecnologia muito popular a dessalinização solar para converter água salina em água potável, pois além de apresentar maior sustentabilidade em seu processo por utilizar uma energia limpa e renovável para a potabilidade da água, propõe uma solução sustentável e economicamente viável para a escassez de água potável.

3.2 Energia Solar

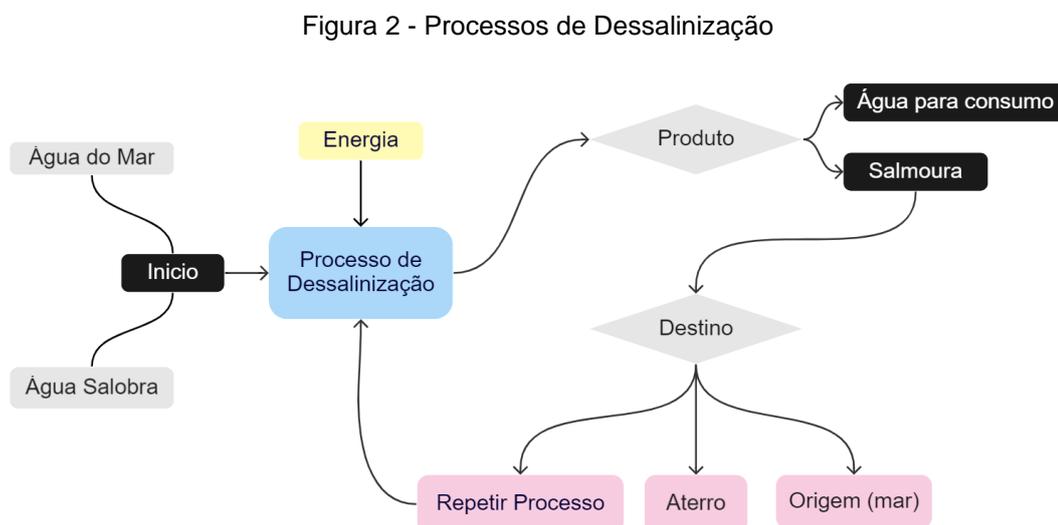
Energia solar é uma energia proveniente da luz do sol, gratuita, renovável e sustentável e é uma alternativa que pode ser aproveitada em diversas tecnologias dentre elas aquecedores solares, energia fotovoltaica, dessalinizadores, entre outros.

A energia solar é uma fonte de energia ilimitada e especialmente limpa, com potencial para suprir uma parte considerável da demanda energética futura do mundo (ZOORI et al., 2013).

Segundo Setoodeh et al. (2011), a energia solar pode ser usada como uma fonte útil permanente porque seu uso não tem impacto prejudicial ao meio ambiente. Portanto uma energia que pode ser aplicada para fins de dessalinizadores solares para destilação de água do mar ou salgada na produção de água doce para comunidades que enfrentar problemas com a falta de água potável.

3.3 Processos de Dessalinização

Na Figura 2 está representado o processo de dessalinização de água. Na esquematização é apresentada a origem da água, o produto final após o processo de dessalinização e o destino do rejeito.



Fonte: Adaptado de Levy (2008).

Quanto ao rejeito, este pode ter vários fins, como reintrodução no processo de dessalinização, deposição em aterro ou devolução ao local de origem. Caso a água seja proveniente de um reservatório, o seu destino final não deverá ser o local de captação, devendo ser dada preferência às restantes opções (LEVY, 2008).

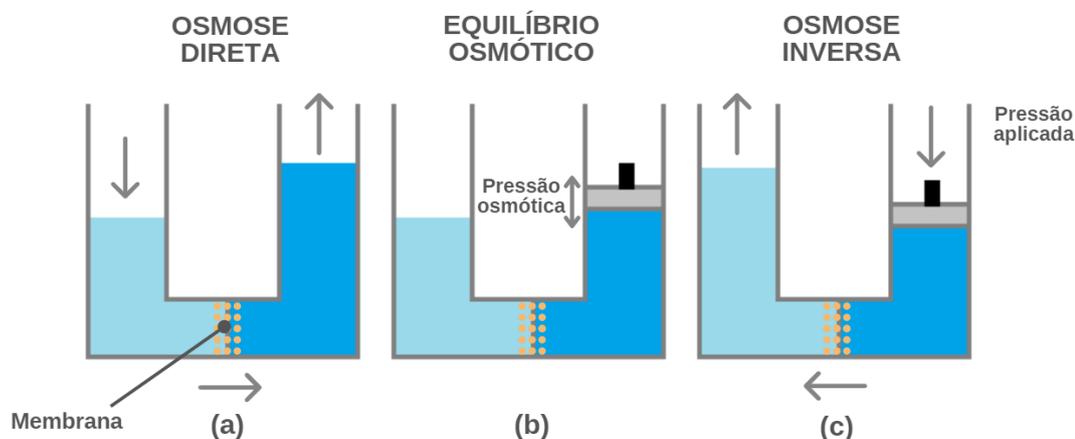
3.3.1 Processos de Dessalinização por Membrana

Os processos de dessalinização por membrana correspondem a um sistema pressurizado em que a membrana é semipermeável como uma espécie de barreira física para filtrar e/ou separar água dos sais dissolvidos com a finalidade de obter uma solução de água potável e outra com alto teor de sais.

Para Mathioulakis et al. (2007), existem dois processos principais de membranas por eletrodialise (ED) e por osmose reversa (RO).

No processo de osmose reversa faz a utilização de uma membrana semipermeável que possui um elevado grau de permeabilidade à água, mas é uma barreira impenetrável aos sais. Esta membrana separa as duas soluções com concentrações diferentes. Na Figura 3 pode observar de forma simplificada os tipos de osmose reversa.

Figura 3 - Osmose Reversa



Fonte: adaptado de Barraza (2011).

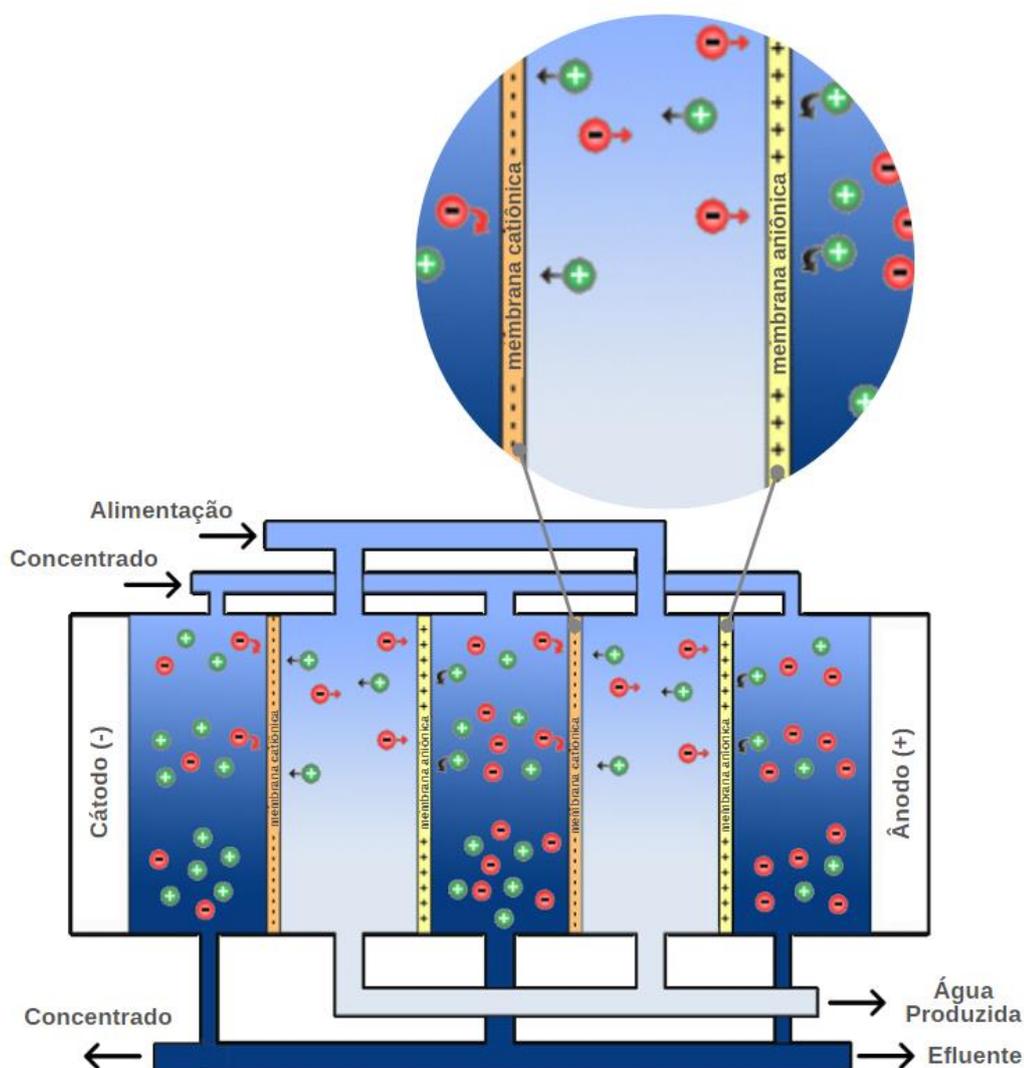
(a) Osmose direta: a água migra para o lado onde a solução está mais concentrada de forma a equilibrar a concentração das duas soluções.

b) Equilíbrio osmótico: alta pressão no líquido concentrado, o fluxo pode ser separado e estabilizado, desde que a pressão seja suficientemente proporcional à concentração da solução.

(c) Osmose inversa: quando a pressão aplicada é maior que a pressão osmótica, o fluxo pode ser separado e estabilizado, desde que a pressão seja suficientemente proporcional à concentração da solução.

No processo eletrodialise a solução iônica é bombeada através da membrana em forma de troca cátions e ânions dispostos em uma alternância, quando aplicado um potencial elétrico entre os dois eletrodos, uma parte da água é parcialmente retido (salmoura) e a outra passa através da membrana (água para abastecimento) como apresentado na Figura 4 (Mathioulakis et al, 2007).

Figura 4 - Processo de eletrodialise



Fonte: Adaptado de Waterions (2022).

3.3.2 Processo de Dessalinização Térmico

O processo de dessalinização térmico consiste na destilação da água salobra ou salgada através de um processo de mudança de fase, no qual a água sob condições de temperatura e pressão evapora, condensa obtendo uma água destilado ao final do processo tornando uma água adequada e ou própria para irrigação e/ou abastecimento.

As tecnologias mais modernas de base térmica são desenvolvidas com dupla finalidade na obtenção de energia e água destilada. Estas tecnologias são aplicadas à dessalinização da água do mar. Os principais processos de dessalinização térmica incluem dessalinização térmica nas quais destacam-se segundo segundo Younos e Tulou (2005):

- Destilação Flash Multiestágio - *Multistage Flash Distillation* (MSF): ocorre uma evaporação instantânea ou flash da água do mar ou salobra que circula dentro de tubos envoltos em vapor, através de uma série de fases, em pressões e temperaturas relativamente baixas e na posterior formar a condensação do vapor gerado e obter água potável.
- Destilação Multiefeito - *Multieffect Distillation* (MED): processo semelhante ao MSF, com base nos mesmos princípios de evaporação e condensação. As diferenças neste processo residem na aspensão da água salgada fria sobre um conjunto de tubos com vapor dentro, no qual parte da água que evapora segue para o efeito seguinte e água que não evaporou cai no fundo e assim inicia novamente o processo.
- Compressão de Vapor - *Vapor Compression* (VC): tem um funcionamento semelhante ao do MED, com a diferença de que este processo tem por base a compressão do vapor gerado na evaporação da água salgada fria a altas pressões. Sendo duas formas possíveis de operação, *Thermal Vapor Compression* (TVC), etapa no qual o vapor é comprimido por um compressor mecânico; e *Mechanical Vapor Compression* (MVC) consiste em várias etapas, onde são adicionadas pequenas quantidades de vapor a alta pressão.
- Dessalinização Solar: utiliza-se energia térmica do sol para dessalinizar a água salgada ou salobra.

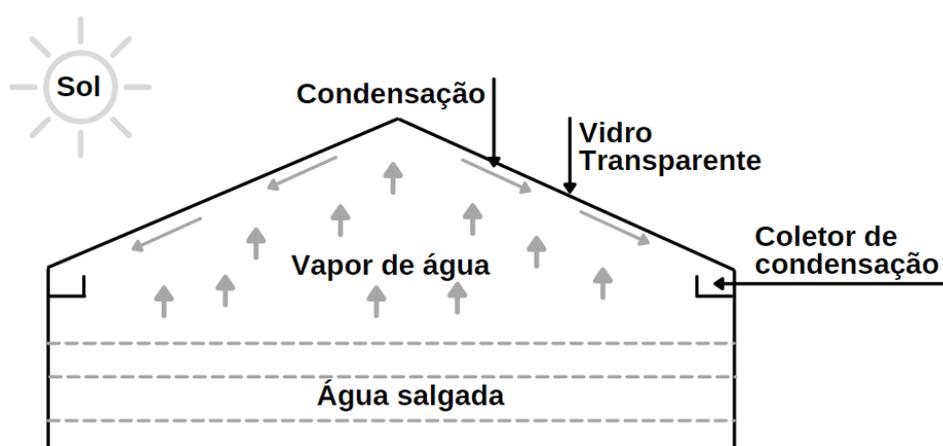
3.4 Dessalinização Solar

Em regiões que sofrem com secas, populações recorrem a perfuração de poços artesianos em pontos que possibilitem a disponibilidade de água, seja para apenas um proprietário ou para uma comunidade partilharem esse bem precioso, com isso há preocupações em relação a essa água extraída do subsolo e depois ser consumida, pois nem sempre é uma água própria para consumo humano, na maioria das vezes são salobras, ou precisam ser feito um pré-tratamento antes, para que seja própria para consumo humano (GOMES et al., 2016).

A destilação solar é uma tecnologia muito popular para converter água salina em água potável. É muito fácil fabricar com materiais disponíveis localmente e requer muito pouca manutenção (PANCHAL; PATEL, 2018).

Dessalinização solar direta ocorre de forma que todas as partes do dessalinizador são integrados em sistema único, através da energia solar, no qual a água destilada é produzida diretamente no coletor. De forma detalhada a dessalinização solar direta acontece em uma base ou tanque contendo um volume de água salgada ou salobra tampado por uma ou mais placas de vidro formando uma superfície transparente como apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Diagrama de um Sistema de Destilação Solar



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

A radiação solar atravessa essa superfície, aquece a água e eleva a taxa de evaporação, o vapor de água é formado, com a mudança de fase tende a se condensar e coletada por uma calha de coleta na obtenção de uma água limpa sem presença de sais ou microrganismos nocivos (BISWAS; RUBY, 2012).

Dessalinização solar indireta consiste em um processo via energia solar proveniente de um sistema de coleta de energia solar, em que parte é transformada em energia elétrica ou térmica e a outra parte é recolhida em forma de água dessalinizada.

Os sistemas indiretos se dividem em dois subsistemas: uma unidade de dessalinização e uma unidade de produção de energia. A energia produzida utiliza-se de tecnologias como coletores solares em placa, tubo em vácuo ou centrais de energia solar concentrada (MAHMOUD et al., 2013).

Esses coletores solares térmicos captam o calor absorvendo a radiação solar, onde podem ser ligados a qualquer unidade de dessalinização que utilize os processos de evaporação e condensação, como multistageflash distillation (MSF), vapour compression (VOC), multiple effectevaporation (MED), e dessalinização por membrana (MD), para possíveis combinações de dessalinização térmica com a energia solar. Sistemas que usam dispositivos fotovoltaicos (PV) tendem a gerar eletricidade para operar osmose reversa (RO) e dessalinização por eletrodialise (ED) (MAHMOUD et al., 2013).

3.5 Transferência de Calor no Processo de Dessalinização Solar

Transferência de calor é uma ciência que determina as taxas de transferência de calor entre um sistema e vizinhança, assim como as variações de temperatura, que ocorre durante estes processos.

A transferência de calor pode ser permanente ou transitória, no meio permanente a temperatura ou fluxo de calor permanece inalterada com o tempo, já em meio transitório essas propriedades são dependentes do tempo, e a maioria dos processos de transferência de calor são transitórias. A transferência de calor em um dessalinizador solar é considerada como um processo transitório, justamente por causa das variações de temperatura ou de fluxo de calor em relação ao tempo (ELANGO et al., 2015).

A transferência de calor tem influência direta relacionada a temperatura, energia térmica e calor, no qual a temperatura é uma propriedade da matéria que interfere na sensação de calor ou frio. Energia térmica se deve ao movimento de partículas que constituem a matéria. E calor por sua vez é a energia térmica que se

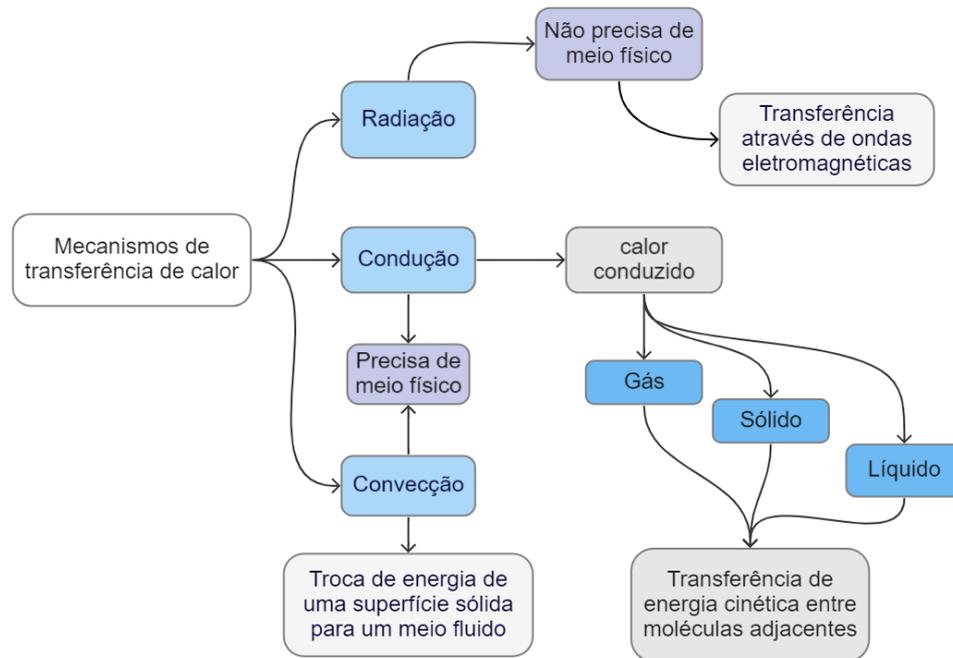
dá entre diferentes corpos ou diferentes zonas de um mesmo corpo que se encontra a diferentes temperaturas. Ambos inferem nos mecanismos de transferência de calor.

Quando sistemas com temperaturas diferentes são aproximados, ocorre transferência de energia do sistema de maior temperatura para o de menor temperatura, até que se atinja o equilíbrio térmico, ou seja, até que os sistemas alcancem a mesma temperatura. Essa energia em movimento é denominada de calor e sua propagação pode ocorrer de três formas (THEODORE et al., 2014):

- **Condução:** promove a transferência de calor que se dá por transferência de energia entre as partículas, necessitando de um meio para que ocorra.
- **Convecção:** promove a transferência de calor entre um contorno sólido e um fluido em movimento envolvendo uma combinação de condução, levando em consideração que quanto mais rápido a movimentação desse fluido, conseqüentemente maior sua taxa de transferência de calor.
- **Radiação:** ocorre através de um mecanismo em que a energia é emitida pelos corpos na forma de ondas eletromagnéticas, a mais rápida e não sofre atenuação no vácuo. A radiação é usualmente considerada um fenômeno volumétrico, e todos os sólidos, líquidos e gases emitem, absorvem e transmitem radiação em que todos os corpos com temperaturas superiores de zero absoluto emitem radiação eletromagnética de forma contínua e não precisa de um meio material para que aja sua propagação.

Na Figura 6 um fluxograma dos mecanismos de transferência de calor são apresentados.

Figura 6 – Mecanismos de transferência de calor



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

4 DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

Historicamente, a mecânica dos fluidos preocupou-se em estudar o comportamento desses elementos de forma experimental muito antes do que de forma matemática. Isso explica o surgimento da hidráulica antes da hidrodinâmica. Dependendo das propriedades do fluido e do escoamento, as Equações de Navier-Stokes podem ser escritas de muitas formas e em coordenadas cartesianas (FORTUNA, 2000).

Há um interesse mundial nas tecnologias de dessalinização solar para pequenas comunidades com aplicação promissora. Com a utilização de simulação CFD (Dinâmica dos Fluidos Computacional) comparando seus resultados com os experimentais possibilita prever de forma inteligente o desempenho dos mais diversos tipos de sistemas de dessalinização.

Pesquisadores e engenheiros aplicam essa técnica de simulação para minimizar a necessidade de protótipos físicos enquanto fornece uma visão mais profunda do desempenho do projeto, poupando tempo e dinheiro, garantindo uma boa variabilidade de sua utilização.

CFD se baseia em uma técnica que simula matematicamente através de algoritmos o fluxo de fluido e a transferência de energia na forma de calor. Então todos os programas que utilizam o software CFD, possuem uma interface tanto para inserção dos parâmetros de entrada quanto para análise de resultados (CIPOLLA et al, 2011).

O software Autodesk® CFD transforma sua estação de trabalho CAD 3D em uma bancada de fluxo totalmente interativo. Suas montagens 3D tornam-se protótipos associativos de custo zero, revelando informações críticas de engenharia não disponíveis em testes físicos.

O objetivo primordial do CFD é reduzir o número de experimentos em laboratórios e explorar fenômenos que não poderiam ser estudados antes em laboratórios de forma prática.

O CFD pode ser facilmente alterado até que o resultado da simulação atenda às exigências do modelo, de forma mais conveniente e a custos e tempos menores do que utilizando técnicas experimentais e análises teóricas, rearranjadas com projeto inicial, ensaios e reprojetado. De uma forma geral o CFD completa as análises teóricas

e os ensaios experimentais. Na Tabela 1 pode-se observar algumas das comparações entre as três técnicas segundo Fortuna (2000).

Tabela 1 – Comparação entre as três técnicas de solução

Técnica	Vantagens	Desvantagens
Experimental	<ul style="list-style-type: none"> • Mais realista 	<ul style="list-style-type: none"> • Equipamento exigido • Problema de escala • Dificuldades de medição • Custo operacional
Teórica	<ul style="list-style-type: none"> • Mais geral • Fórmula fechada 	<ul style="list-style-type: none"> • Restrita a geometrias e processos físicos simples • Geralmente restrita a problemas lineares
Numérica	<ul style="list-style-type: none"> • Não há restrições à linearidade • Geometria e processos complicados • Evolução temporal do processo 	<ul style="list-style-type: none"> • Erros de truncamento • Prescrição das condições de contorno apropriadas • Custos computacionais

Fonte: Fortuna (2000).

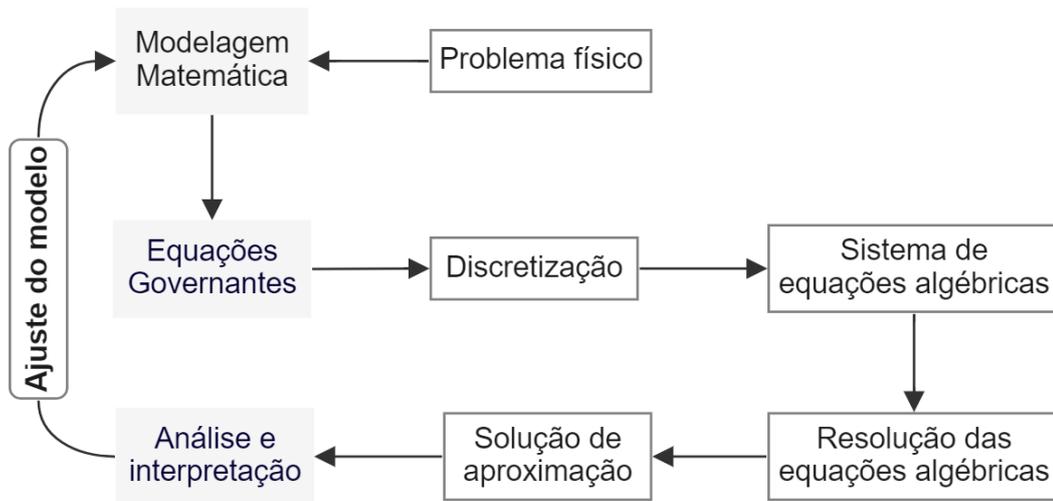
Caso os resultados fornecidos pela técnica computacional sejam limitados pelos parâmetros utilizados em simulação como no método experimental há a facilidade de se alterar os parâmetros como geometria, temperatura e velocidade.

4.1 Etapas para Solução Numérica

Elabora-se um modelo a partir de métodos físicos, descritos por leis de conservação adequadas ao fenômeno e as equações algébricas são resolvidas, fornecendo a solução do problema, devendo ser analisado para verificar se está correta, só depois pode-se extrair do escoamento, com alguma confiabilidade as informações de interesse.

Fazendo uma comparação dos resultados numéricos com dados experimentais, pode-se ajustar o modelo matemático a física do problema, na Figura 7 apresenta as etapas para obtenção da solução numérica de um problema de fluidos.

Figura 7 – Etapas para obtenção da solução numérica de um problema de fluidos



Fonte: Adaptado de Fortuna (2000).

Os problemas transientes, são combinados com variação temporal das grandezas físicas de interesse para o modelo. Com os valores iniciais dessas grandezas em um certo tempo t_0 , calcula-se através da solução numérica das equações diferenciais parciais. Essas equações são modeladas por equações diferenciais parabólicas ou hiperbólicas.

5 ESTADO DA ARTE

Panchal e Patel (2018), realizaram uma comparação experimental utilizando ANSYS CFD (Análise Computacional da Dinâmica de Fluidos) e os resultados da simulação foram considerados relativamente semelhantes aos resultados experimentais, portanto a simulação previu que o desempenho de um dessalinizador solar de inclinação única pelo uso do software ANSYS CFD foi de acordo com o previsto.

Mahmood et al. (2017), analisaram um dessalinizador solar de inclinação única. O estudo apresentado revelou uma estreita concordância entre os dados de simulação e experimentais, mostrando que a avaliação do desempenho de um destilador solar é bastante simples com ANSYSFLUENT.

Khare et al. (2016), abordaram um dessalinizador solar de inclinação única com objetivo de estudo de desenvolver um modelo CFD e utilizá-lo para melhorar o desempenho através de algumas análises paramétricas. Um modelo multifásico foi desenvolvido no ANSYS que considera todas as três fases presentes no destilador solar, ou seja, ar, água líquida e vapores de água. Os resultados da simulação mostraram-se em boa concordância com os dados experimentais.

Mouhsin et. al. (2020), utilizaram um dessalinizador solar tipo cascata, e os dados extraídos dos resultados da simulação está em boa concordância com os dados experimentais, que o dessalinizador do tipo cascata apresenta maior produtividade em relação ao de inclinação única, os resultados mostram que a temperatura e a produtividade da placa absorvente podem chegar a mais de 60 °C e 1,6 kg.m⁻².h⁻¹ respectivamente. Em comparação com a bandeja única, a temperatura da placa chega a mais de 50 °C e a produtividade de 0,6 kg.m⁻².h⁻¹.

Setoodeh et al. (2011), abordaram um modelo tridimensional de duas fases, que foi desenvolvido para processos de evaporação e condensação em dessalinizadores solares usando o método de dinâmica de fluidos computacional (CFD) para simular o modelo. Os resultados da simulação foram comparados com os dados experimentais disponíveis do dessalinizador solar, a taxa de produção de água doce não mudou significativamente, mas influenciou os resultados da temperatura da água e reduziu seu erro em comparação com os resultados da simulação anterior. A quantidade de produtividade de água doce e a temperatura da água estavam de

acordo com os dados experimentais. O estudo mostrou que o CFD é uma ferramenta poderosa para projeto, análise de parâmetros e fins de diagnóstico de dessalinizadores solares.

Rahbar et al. (2018), analisaram dois tipos de destiladores solares, triangular e tubular. Os resultados da simulação numérica mostraram que a maior resistência das zonas de recirculação e a menor geração de entropia são os principais motivos para uma melhor produção de água no dessalinizador tubular. Além disso, o custo de produção de água pelo dessalinizador solar triangular foi considerado menor devido ao seu custo de fabricação mais baixo em comparação com o tubular.

Rashidi e Esfahani (2018), estudaram a geração de entropia sendo calculada pela simulação de dinâmica de fluidos computacional para a melhoria do projeto de dessalinizador solar de inclinação única. Uma abordagem numérica baseada no algoritmo simples é utilizada para simular a convecção natural dupla difusiva no dessalinizador solar e resolver as equações de massa, momento, energia e concentração. Os resultados obtidos indicam que ocorre um aumento nos diferentes tipos de geração de entropia com o aumento das temperaturas do vidro e da água.

Taamneh (2016) estudou uma simulação de dinâmica dos fluidos computacional (CFD) para experimentos realizados com dois destiladores solares em forma de pirâmide idênticos. Com base nos resultados da simulação CFD, a quantidade horária de água doce mostrou uma boa concordância com os dados experimentais correspondentes.

S. El-Sebaey et al. (2020), estudaram com objetivo principal de apresentar um modelo CFD multifásico e tridimensional, que prevê o desempenho de um dessalinizador solar sem o uso de quaisquer medidas experimentais, dependendo do modelo de radiação solar CFD. Os resultados da simulação foram considerados em concordância aceitável com os dados experimentais medidos.

Keshtkar et al. (2020), abordaram um modelo CFD transitório desenvolvido para investigar os parâmetros que afetam a produtividade de um destilador solar de inclinação única. Os resultados mostram um aumento de 14,4% na produtividade sendo observado quando a velocidade do vento aumenta de 1 m/s para 6 m/s, e uma melhora de 3,5% ocorre ao diminuir a espessura do vidro de 4 mm para 2 mm. Os valores ótimos de profundidade da água e distância da água para cobrir são de 2 e 8 cm, respectivamente, com a inclinação da tampa igual ao ângulo de latitude local.

Além disso, ao converter o destilador solar de bandeja em um destilador solar escalonado apropriado, a produtividade aumenta cerca de 17,4%.

Gnanavel et al. (2021), estudaram a melhor produtividade do dessalinizado solar usando o material de mudança de fase, para analisar a produtividade acumulada calculada para com e sem material, o material Trimethylolthane e Parafina C18 tem como resultado do material Parafina C18 quanto maior produtividade desta experiência, os mesmos valores são validados com a análise CFD.

Yan et al. (2020), utilizaram uma modelagem de dinâmica de fluidos computacional (CFD) para investigar os efeitos dos (propriedades operacionais -POP) de pressão operacional e parâmetros geométricos no desempenho de um Tubular Solar Still (TSS), com ênfase no fluxo de vapor no invólucro. Os resultados da simulação indicaram que o vapor d'água tem uma velocidade de circulação maior quando operado sob vácuo em comparação com as condições atmosféricas. O fluxo de vapor em diferentes regimes foi validado por experimentos de visualização. Com base nos resultados da simulação, uma correlação foi obtida para prever o número de Nusselt para um projeto de TSS específico, que mostrou um desvio de -7,8 e -7,5% quando comparado com conjuntos de dados experimentais independentes.

Maheswari e Reddy, (2018), estudaram a da análise numérica e experimental de um dessalinizador solar de inclinação única com modelos aprimorados de instrumentação escalonada, alçada de PCM (Materiais de modificação de fase). As inclinações da bandeja de um declive foram comparadas para 15° e 20°. A partir das investigações, foi determinado que o declive único com 20° e instrumentação PCM deu a produtividade superior em comparação com diferentes tipos.

Rahbar e Esfahani et al. (2013), investigaram a capacidade de uma simulação 2-D CFD (dinâmica de fluidos computacional) em estimar o rendimento horário de um dessalinizador solar de inclinação única. Os resultados estão em uma boa concordância com os resultados de modelos bem conhecidos. No entanto, a precisão da análise CFD na previsão do número Nusselt é melhor do que sua precisão na estimativa de produtividade. Os resultados também mostraram que existia um comprimento ótimo em que a produtividade foi maximizada. Por outro lado, em um comprimento fixo de um destilador solar, a altura específica teve efeito inverso na produtividade. Além disso, a tendência da produtividade da água foi sempre semelhante à tendência do coeficiente de transferência de calor por convecção.

Elango et al. (2015), fizeram uma revisão dos diferentes modelos térmicos usados em dessalinizadores solares passivos e ativos e também visualizaram novos designs em detalhes. O estudo revelou que, o modelo KTM é mais válido para dessalinizadores. Portanto, pode não ser útil para o projeto solares com base na análise teórica. A modelagem térmica é considerada uma ferramenta poderosa que pode ser utilizada para otimizar o desempenho do destilador solar para um determinado conjunto de parâmetros. Concluiu-se que mais pesquisas são necessárias em sistemas solares/híbridos, porque ambos são cruciais em áreas remotas.

Assim, verifica-se que segundo os pressupostos do estado da arte o uso de validação CFD (dinâmica de fluidos computacional) para comparações de dessalinizadores solares e seus parâmetros experimentais é de grande relevância e confirmação de dados entre os mais diversos parâmetros, verificando o quão vasta é a utilização da modelagem CFD, possibilitando prever de forma inteligente o desempenho de sistemas que envolvem escoamento de fluidos, transferência de calor, reações químicas, entre outros fenômenos.

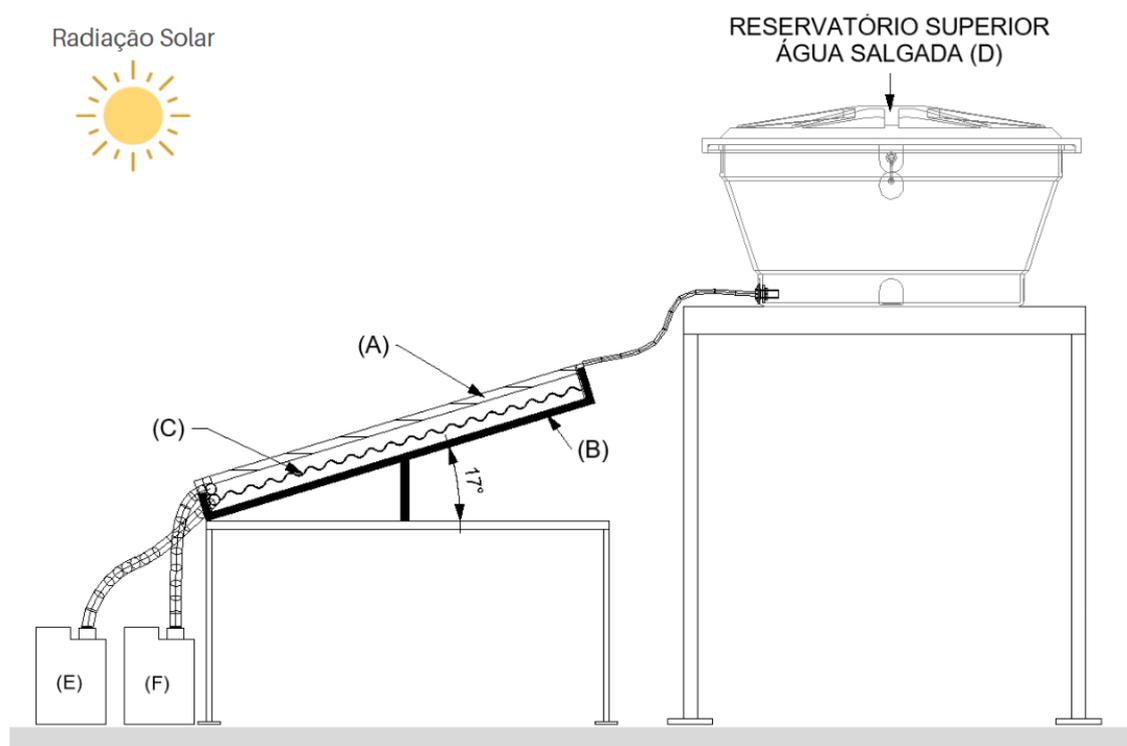
6 METODOLOGIA

6.1 Método de Dessalinização Proposto

Para a realização dos experimentos numéricos, foi utilizado um computador com processador de 11th Gen Intel(R) Core (TM) i5-11300H @ 3.10GHz. Com o Autodesk CFD na versão estudante para as simulações numéricas, as quais foram realizadas com o objetivo principal de obter dados para comparação com dados apresentados na literatura e, dessa forma, validar o modelo desenvolvido.

O método de dessalinização proposto é representado por um dessalinizador solar do tipo cascata, como mostra na Figura 8. Foi escolhido como referência o modelo proposto por Cardoso et al. 2020.

Figura 8 – Dessalinizador solar do tipo cascata



Fonte: Adaptado de CARDOSO et al. (2022).

O equipamento apresenta:

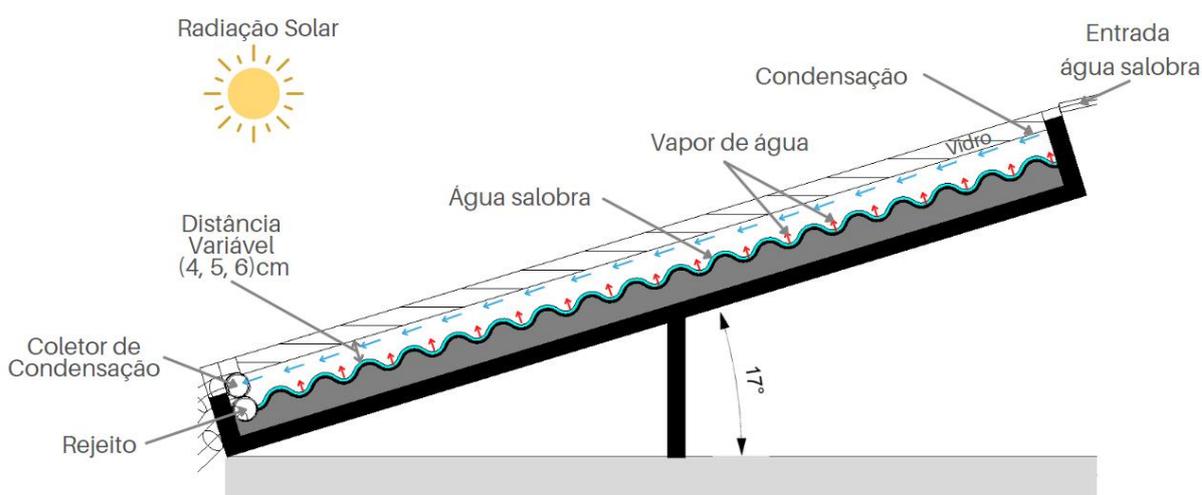
- (A) Placa de vidro apresentando uma inclinação única de 17° apontado para o norte assim o equipamento será capaz de absorver uma maior quantidade de raios solares durante o dia inteiro com 3mm de espessura.
- (B) Sistema de isolamento térmico que envolve a bandeja do dessalinizador.

- (C) Placa absorvedora de calor em fibrocimento em cascata pintado na cor preta para ajudar no aumento da absorção de radiação solar.
- (D) Reservatório superior de água salobra.
- (E) Reservatório inferior de água destilada.
- (F) Reservatório inferior de água concentrada de sais.

No processo de dessalinização é caracterizado pelas várias transferências de calor e massa que ocorrem no interior do dessalinizador ocorrem entre a água salobra e a placa de vidro.

Como mostra na Figura 9 foi considerado três protótipos com lâminas de água com distância variável para verificar qual o melhor protótipo proposto, sendo Protótipo 1,2 e 3 com 4,5 e 6 cm respectivamente.

Figura 9 – Protótipo com distâncias variáveis

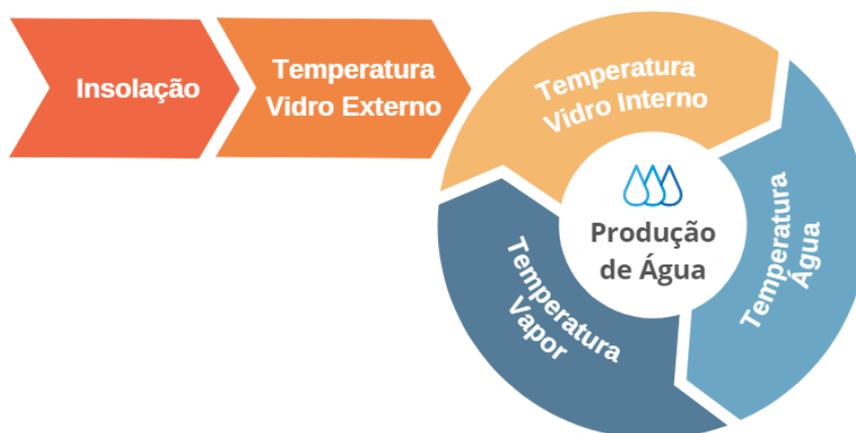


Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

6.2 Sistema Computacional Utilizado

Utilizou-se o software Autodesk REVIT é um arquivo importado em formato Standard ACIS Text (.sat) para o Autodesk CFD ambos com versão gratuita para estudante, assim para analisar os parâmetros de insolação e temperatura, parâmetros diretamente proporcionais à saída de água dessalinizada como mostra a Figura 10.

Figura 10 – Parâmetros para análise CFD



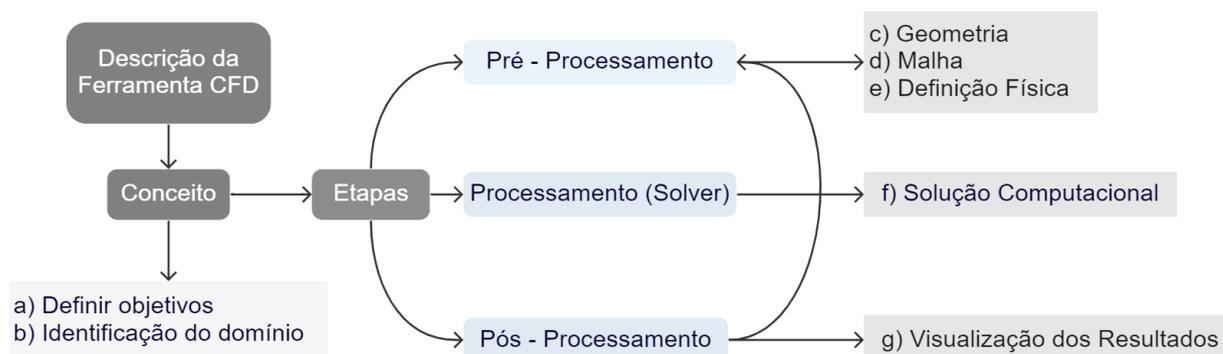
Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Depois de fazer um estudo do modelo é possível determinar os processos básicos que se aplica a todas as análises no Autodesk® CFD, e dividir em três etapas pré-processamento, processamento e pós - processamento, como mostra a Figura 11.

A análise da modelagem CFD é composta pelas seguintes etapas:

1. Pré-processamento:
 - Criação da geometria do desalinizador no REVIT estudante;
 - Modelagem matemática de transferência de calor e massa com mudança de fase;
 - Análise dos parâmetros adotados.
2. Processamento:
 - Condições de Contorno.
3. Pós-processamento:
 - Visualização dos resultados.

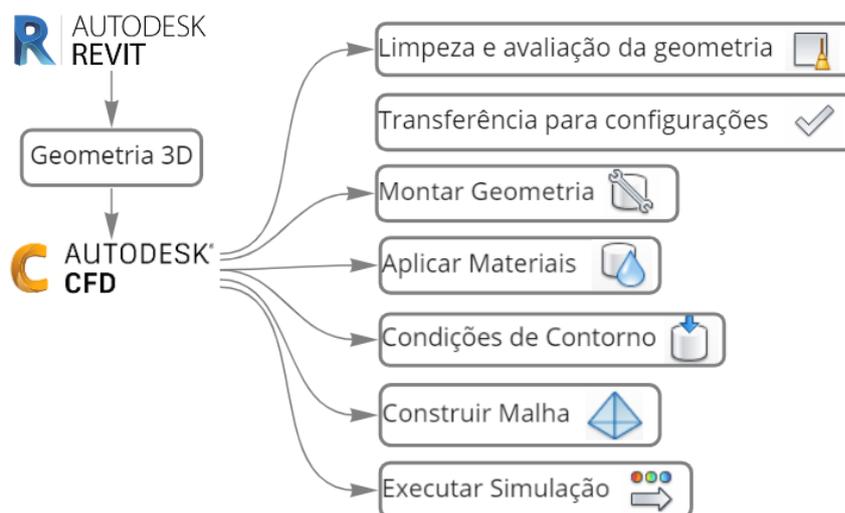
Figura 11 – Estrutura do processo de solução de um problema em CFD



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Na Figura 12, está representada a estrutura de execução dentro do Autodesk® CFD. Em que é importado o arquivo 3D do REVIT para o CFD depois feitas as análises correlatas monta a geometria, aplica materiais, condições de contorno, constrói a malha e executa a simulação.

Figura 12 – Etapas dos processos de análise CFD

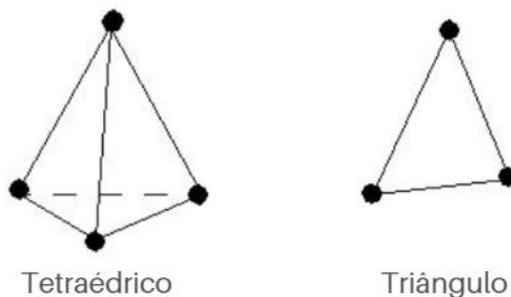


Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Antes de executar a análise no Autodesk® CFD, a geometria é dividida em pequenos pedaços nomeados de elementos. O canto de cada elemento é um nó. O cálculo é realizado nos nós. Esses elementos e nós fazem a composição da malha.

Em modelos tridimensionais, a maioria dos elementos são tetraédricos: um elemento de quatro lados, de face triangular. Em modelos bidimensionais, a maioria dos elementos são triângulos como mostra na Figura 13.

Figura 13 – Modelos Tridimensionais e Bidimensionais



Fonte: Autodesk® CFD, 2022.

7 MODELAGEM MATEMÁTICA

7.1 Equações governantes

Para obter solução de qualquer problema físico requer a habilidade da criação do modelo matemático correspondente, o qual possa ser resolvido com tempos de computação e que os resultados obtidos representem o fenômeno físico da análise em questão (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

O ponto inicial no desenvolvimento do modelo matemático é a obtenção das equações diferenciais que descrevem o problema abaixo considerada equação geral da conservação.

$$\frac{\delta(\rho\phi)}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho V\phi) = \nabla \cdot (\tau \nabla \phi) + S \quad (01)$$

Termo de Acúmulo Advecção Difusão Termo Fonte

Para análise CFD serão adotadas equações de fluxo de fluidos e transferências de calor com a utilização das equações de Navier-Stokes envolve equações de conservação de quantidade de movimento linear para fluido Newtonianos (coordenadas cartesianas) e a Primeira Lei da Termodinâmica (equação de energia), deste modo, os valores de ϕ , τ e S podem ser definidos como mostra abaixo alguns exemplos:

- **Equação da Conservação da Energia Térmica:** deve-se desconsiderar os efeitos da dissipação viscosa para que ocorra a transferência de calor em um fluido.

$$\begin{aligned} \frac{\delta(\rho T)}{\delta t} + \frac{\delta(\rho u T)}{\delta x} + \frac{\delta(\rho v T)}{\delta y} + \frac{\delta(\rho w T)}{\delta z} \\ = \frac{\delta}{\delta x} \left(\frac{k}{C_p} \cdot \frac{\delta T}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(\frac{k}{C_p} \cdot \frac{\delta T}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(\frac{k}{C_p} \cdot \frac{\delta T}{\delta z} \right) + \frac{\dot{s}}{C_p} \end{aligned} \quad (02)$$

Na forma vetorial é representada como mostra a seguir:

$$\frac{\delta(\rho T)}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho VT) = \nabla \cdot \left(\frac{k}{C_p} \cdot \nabla T \right) + \frac{\dot{s}}{C_p} \quad (03)$$

Onde:

C_p : calor específico a pressão constante (J/kg. K);

k: condutividade térmica (W/m. K);

\dot{s} : geração de calor por unidade de volume (W/m³. K).

- **Equação da conservação da massa ou da continuidade:** modela os escoamentos permanentes, viscoso, compressível ou incompressível.

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \frac{\delta \rho u}{\delta x} + \frac{\delta \rho v}{\delta y} + \frac{\delta \rho w}{\delta z} = 0 \quad (04)$$

Pode ser escrita na forma vetorial da seguinte forma:

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \nabla \cdot \rho V = 0 \quad (05)$$

- **Equação da Conservação da Quantidade de Movimento:** são as chamadas equações de Navier-Stokes devido estabelecer que a variação de movimento de uma partícula fluida é provocada devido as forças de campo, pressão e viscosas. Para as direções x, y e z, as equações são:

Equação de movimento na direção x:

$$\frac{\delta(\rho u)}{\delta t} + u \frac{\delta(\rho u)}{\delta x} + v \frac{\delta(\rho u)}{\delta y} + w \frac{\delta(\rho u)}{\delta z} = \rho g_x - \frac{\delta P}{\delta x} + \mu \left(\frac{\delta^2 u}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 u}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 u}{\delta z^2} \right) \quad (06)$$

Equação de movimento na direção y:

$$\frac{\delta(\rho v)}{\delta t} + u \frac{\delta(\rho v)}{\delta x} + v \frac{\delta(\rho v)}{\delta y} + w \frac{\delta(\rho v)}{\delta z} = \rho g_y - \frac{\delta P}{\delta y} + \mu \left(\frac{\delta^2 v}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 v}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 v}{\delta z^2} \right) \quad (07)$$

Equação de movimento na direção z:

$$\frac{\delta(\rho w)}{\delta t} + u \frac{\delta(\rho w)}{\delta x} + v \frac{\delta(\rho w)}{\delta y} + w \frac{\delta(\rho w)}{\delta z} = \rho g_z - \frac{\delta P}{\delta z} + \mu \left(\frac{\delta^2 w}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 w}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 w}{\delta z^2} \right) \quad (08)$$

Substituindo o operador diferencial nabla $\nabla = \frac{\delta}{\delta x} i + \frac{\delta}{\delta y} j + \frac{\delta}{\delta z} k$ as equações acima podem ser escritas na forma compacta da seguinte forma:

$$\frac{\delta(\rho u)}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho V u) = \nabla \cdot (\mu \nabla u) + \rho g_x - \frac{\delta P}{\delta x} \quad (09)$$

$$\frac{\delta(\rho v)}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho V v) = \nabla \cdot (\mu \nabla v) + \rho g_y - \frac{\delta P}{\delta y} \quad (10)$$

$$\frac{\delta(\rho w)}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho V w) = \nabla \cdot (\mu \nabla w) + \rho g_z - \frac{\delta P}{\delta z} \quad (11)$$

Equação geral de transporte é escrita da seguinte forma:

$$\rho U \frac{\delta \phi}{\delta x} + \rho V \frac{\delta \phi}{\delta y} + \rho W \frac{\delta \phi}{\delta z} = \frac{\delta}{\delta x} \left(\tau_{\phi} \frac{\delta \phi}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(\tau_{\phi} \frac{\delta \phi}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(\tau_{\phi} \frac{\delta \phi}{\delta z} \right) + S_{\phi} \quad (12)$$

O método dos elementos finitos descrito acima é usado diretamente nos termos de difusão e fonte. No entanto, para estabilidade numérica, os termos de advecção são tratados com métodos upwind juntamente com o método da integral ponderada.

Onde ϕ é a propriedade, t é o tempo, x , y e z são as componentes do vetor posição, u , v e w são as componentes do vetor velocidade, Γ é o coeficiente de transporte por difusão e S é o termo fonte.

Quatro dos métodos upwind são usados no Autodesk® CFD, para o modelo em questão será utilizado o ADV 5: Modified Petrov-Galerkin:

- Versão mais estável do adv 2.
- Adequado para todos os tipos de aplicação recomendados com adv 2, mas normalmente produz resultados mais conservadores.
- Ideal para recirculação e fluxos secundários
- Previsão precisa de queda de pressão
- Estabilidade de convecção natural
- Precisão e estabilidade do fluxo compressível
- Precisão e estabilidade de rotação e movimento
- Estabilidade do balanço de energia
- Precisão para resistências distribuídas atribuídas a volumes

Na Tabela 2 é feito um resumo mostrando os valores de ϕ , τ e S que produzem as equações de governo descritas acima.

Tabela 2 – Valores de ϕ , τ e S para equações de conservação

Equação da Conservação	ϕ	τ	S
Energia Térmica	T	$\frac{K}{Cp}$	$\frac{\dot{s}}{Cp}$
Massa	1	0	0
Movimento na direção x	u	μ	$\rho g_x - \frac{\delta P}{\delta x}$
Movimento na direção y	v	μ	$\rho g_y - \frac{\delta P}{\delta y}$
Movimento na direção z	w	μ	$\rho g_z - \frac{\delta P}{\delta z}$

Fonte: Filho (2019).

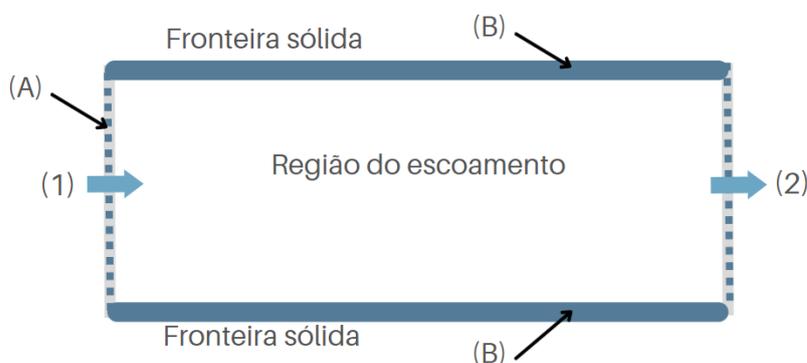
7.1.1 Condições Iniciais e de Contorno

As condições de contorno mais simples na resolução de equações diferenciais são:

- Dirichlet: condição de contorno o valor da variável dependente é fixado, por exemplo: $T=26^\circ\text{C}$, para equação de energia ou $v=0$ na parede.
- Neumann: condição de contorno o fluxo da variável é igual a zero.
- Robin: condição de contorno ocorre com fluxo em função do valor bulk da variável.

As condições de contorno são aplicadas aos diversos tipos de fronteiras encontradas no domínio de simulação. Ao focar a atenção nos valores nos pontos da malha, substituiu-se a informação contínua contida na solução exata da equação diferencial por valores discretos. De acordo com a Figura 14.

Figura 14 – Condições de fronteira



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

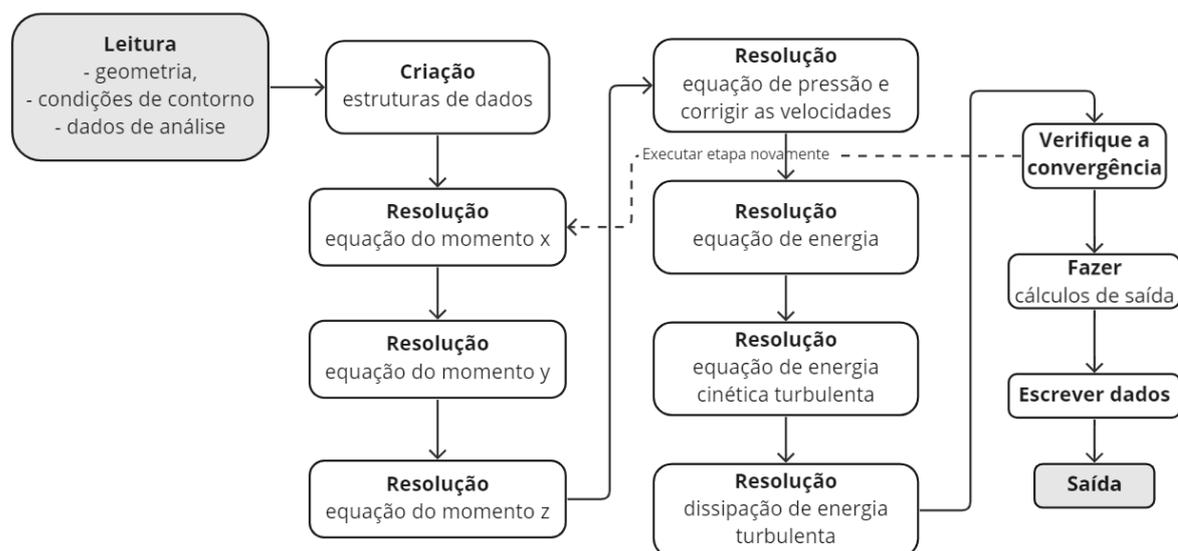
Onde:

- (A) Velocidade ou temperaturas especificadas
- (B) Velocidade = 0, temperatura ou fluxo de calor especificados
- (1) Fronteira de entrada
- (2) Fronteira de saída

7.1.2 Método de Solução

A sequência de operações no solucionador (solver) da Autodesk® CFD é mostrada na Figura 15.

Figura 15 – Sequência de operações no solver



Fonte: Adaptado, de Autodesk® CFD (2022).

7.2 Balanço de Energia

As equações do balanço de energia de cada componente são analisadas levando em consideração as suas temperaturas médias e são desenvolvidas para a modelagem matemática do dessalinizador.

Para obter uma maior produtividade de água destilada, será necessário aumentar a quantidade de água evaporada, isso implica que as outras formas de energia dentro do equipamento para fora devem ser desconsideradas.

Ao escrever o balanço energético deve-se considerar as partes do sistema como água, placa de vidro, placa absorvedora e placa isolante, para obter um conjunto de equações de acordo com os pressupostos:

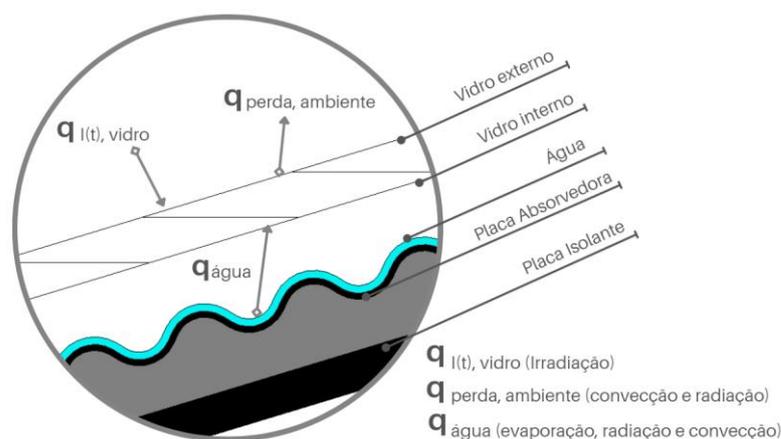
- O dessalinizador está completamente isolado, não há perda de calor;
- A espessura do fluxo de água é considerada constante durante cada experiência e diferentes taxas de fluxo de massa têm sido aplicadas.

7.2.1 Balanço de Energia no Vidro

Para calcular as diversas temperaturas na cobertura de vidro, no fluido e na placa absorvedora de calor do dessalinizador solar proposto, faz-se necessário a resolução de algumas equações do balanço de energia para as diferentes partes do sistema. Obtém-se um conjunto de equações dependentes da temperatura, considerando os seguintes pressupostos aplicados no desenvolvimento das equações do balanço energético de acordo com Zoori et al. (2013); Elango et al. (2015) e Dashtban; Tabrizi (2011).

A representação do balanço de energia no vidro pode ser visualizada na Figura 16.

Figura 16 – Balanço de energia no vidro



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

A equação de balanço térmico para a placa de vidro é representada pela Equação (13).

$$q_{I(t), \text{ vidro}} + q_{\text{água}} = q_{\text{perdas, ambiente}} \quad (13)$$

A taxa de transferência de calor da água é representada pela Equação (14).

$$q_{\text{água}} = h_{ta} A_b (T_a - T_{vi}) \quad (14)$$

A taxa de transferência de calor irradiado sobre a placa de vidro é representada pela Equação (15).

$$q_{I(t), \text{ vidro}} = \alpha_v I_s A_v \quad (15)$$

As perdas de calor para ambiente podem ser calculadas pela Equação (16).

$$q_{\text{perdas, ambiente}} = h_{\text{conv-r}} (T_{ve} - T_{am}) A_v \quad (16)$$

A obtenção do coeficiente total de transferência de calor entre a superfície da água e a placa de vidro é demonstrada pela soma dos coeficientes de radiação, convecção natural e de evaporação, como mostra a Equação (17).

$$h_{ta} = h_{r-a} + h_{\text{conv-a}} + h_{e-a} \quad (17)$$

O coeficiente de transferência de calor de radiação e da condensação entre a superfície da água e a superfície da placa de vidro ocorre da mistura de ar e vapor, deve considerar a emissão efetiva expressa na Equação (18 e 19).

$$h_{r-a} = \varepsilon_{eff} \sigma [(T_a + 273)^2 + (T_{vi} + 273)^2] (T_a + T_{vi} + 546) \quad (18)$$

$$\varepsilon_{eff} = \left(\frac{1}{\varepsilon_a} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1 \right)^{-1} \quad (19)$$

O coeficiente de convecção natural refere-se à transferência de calor por convecção que ocorre com a mistura de ar e vapor para a placa de vidro. Deve considerar as pressões de vapor de saturação da água (P_a) e da placa de vidro interna (P_v) calculado nas Equações (21 e 22) e expressa na Equação (20).

$$h_{conv-a} = 0,884 \times \left[(T_a - T_{vi}) + \frac{(P_a - P_{vi})(T_a + 273,15)}{268,9 \times 10^3 - P_a} \right]^{1/3} \quad (20)$$

$$P_a = \exp \left[25,317 - \left(\frac{5144}{T_a + 273} \right) \right] \quad (21)$$

$$P_v = \exp \left[25,317 - \left(\frac{5144}{T_{vi} + 273} \right) \right] \quad (22)$$

O coeficiente de evaporação ocorre entre a massa de água e a superfície da placa de vidro, considerar as pressões de vapor de saturação da massa de água (P_a) e da superfície da placa de vidro (P_v) pelo produto do coeficiente de convectivo determinada na Equação (23).

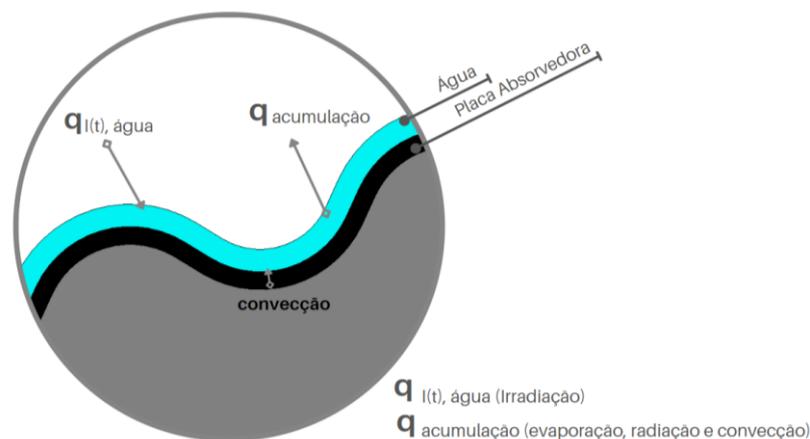
$$h_{e-a} = 16,273 \times 10^{-2} \times h_{conv-a} \left[\frac{P_a - P_v}{T_a - T_{vi}} \right] \quad (23)$$

7.3 Balanço de Energia da Água

O balanço energético para a água deve ser representado pela Equação (24) (DUFFIE; BECKMAN, 2013). Levando em consideração a Figura 17.

$$q_{I(t), \text{ água}} = q_{acumulação} + q_{\text{água}} + q_{perdas, \text{ solo}} \quad (24)$$

Figura 17 – Balanço de energia da água



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

A taxa de transferência de calor de irradiação sobre a água está representada pela Equação (25).

$$q_{I(t), \text{ água}} = \alpha_a(1 - \alpha_v)I_s A_b \quad (25)$$

A taxa de transferência de calor de acumulação é calculada pela Equação (26).

$$q_{\text{acumulação}} = m_a C_a \left[\frac{dT_a}{dt} \right] \quad (26)$$

A taxa de transferência de calor perdido para o solo é representada pela Equação (27).

$$q_{\text{perdas, solo}} = U_s(T_a - T_{am})A_b \quad (27)$$

O coeficiente de perdas de calor para o solo é calculado pela Equação (28).

$$U_s = U_f + U_l \quad (28)$$

O coeficiente de perdas de calor para o solo pelo fundo é calculado pela Equação (29).

$$U_f = \frac{K_{isol}}{e_{isol,fundo}} \quad (29)$$

O coeficiente de perdas de calor para o solo pela lateral é calculado pela Equação (30).

$$U_l = \frac{K_{isol} A_{lateral}}{e_{isol,lateral} A_b} \quad (30)$$

7.4 Massa Evaporada

Para calcular a quantidade de massa evaporada pode aplica-se as Equações (31 e 32).

$$\dot{q}_{e-a} = \dot{m}_{e-a} h_{fg} \quad (31)$$

$$\dot{q}_{e-a} = A_v h_{e-a} (T_a - T_v) \quad (32)$$

A quantidade de água destilada produzida deve então ser calculada pela Equação (33 e 34).

$$\dot{m}_{e-a} = \frac{A_v h_{e-a} (T_a - T_v)}{h_{fg}} \times 3600 \quad (33)$$

$$M_{e-a} = \sum_{i=1}^{24} \dot{m}_{e-a} \quad (34)$$

7.5 Eficiência

A eficiência térmica do dessalinizador solar (instantânea, passiva) são calculados respectivamente pelas Equações (35 e 36), (ELANGO et al., 2015).

$$\eta_i = \frac{\dot{q}_{e-a}}{I_s} \quad (35)$$

$$\eta_{passivo} = \frac{\sum \dot{m}_{e-a} \times h_{fg}}{\sum (I_s A_v) \times 3600} \quad (36)$$

7.6 Propriedades dos materiais para simulação

Foram consideradas as especificações e propriedades dos materiais do protótipo proposto para a placa de vidro, água salobra, placa absorvedora e placa isolante nas Tabelas 3, 4, 5 e 6 respectivamente.

Tabela 3 – Especificações e Propriedades da placa de vidro utilizada

Material	Propriedades	Símbolo	Valores	Unidade
Placa de vidro	Calor específico	C_v	800	J.Kg ⁻¹ . K ⁻¹
	Condutividade Térmica	k_v	0,80	W.m ⁻¹ . K ⁻¹
	Densidade	ρ_v	2.500	Kg.m ⁻³
	Área	A_v	0,77	m ²
	Absorvidade	α_v	0,05	-
	Emissividade	ε_v	0,92	-
	Transmitância	τ_v	0,08	-
	Espessura	L_v	0,003	m

Fonte: GRUTAA e Cardoso et al. (2020).

Tabela 4 – Especificações e Propriedades da água salobra utilizada

Material	Propriedades	Símbolo	Valores	Unidade
Água salobra	Calor específico	C_a	4190	J.Kg ⁻¹ . K ⁻¹
	Condutividade Térmica	k_a	0,58	W.m ⁻¹ . K ⁻¹
	Densidade	ρ_a	1.000	Kg.m ⁻³
	Absorvidade	α_a	0,05	-
	Emissividade	ε_a	0,95	-
	Transmitância	τ_a	0,15	-
	Área	A_a	0,78	m ²
	Espessura	L_a	0,01*	m

Fonte: GRUTAA e Cardoso et al. (2020).

Tabela 5 – Especificações e Propriedades placa absorvedora utilizada

Material	Propriedades	Símbolo	Valores	Unidade
Placa absorvedora	Calor específico	C_b	0,84	J.Kg ⁻¹ . K ⁻¹
	Condutividade Térmica	k_b	0,95	W.m ⁻¹ . K ⁻¹
	Densidade	ρ_b	20	Kg.m ⁻³
	Absorvidade	α_b	0,05	-
	Emissividade	ε_b	0,90	-
	Área	A_b	0,78	m ²
	Espessura	L_b	0,0055	m

Fonte: GRUTAA e Cardoso et al. (2020).

Tabela 6 – Especificações e Propriedades placa isolante utilizada

Material	Propriedades	Símbolo	Valores	Unidade
Bandeja	Calor específico	C_{isol}	670	J.Kg ⁻¹ . K ⁻¹
	Condutividade Térmica	k_{isol}	0,045	W.m ⁻¹ . K ⁻¹
	Densidade	ρ_{isol}	2800	Kg.m ⁻³
	Área	A_{isol}	0,79	m ²
	Espessura	L_{isol}	0,025	m

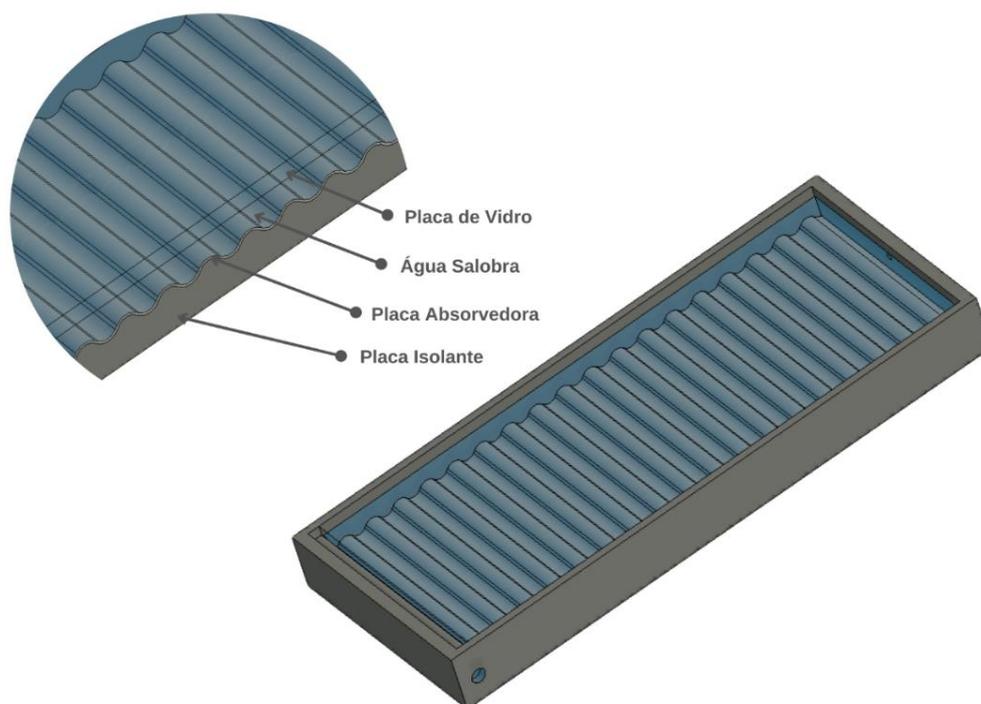
Fonte: GRUTAA e Cardoso et al. (2020).

8 SIMULAÇÃO

8.1 Geometria

Na Figura 18 foi obtido um protótipo geométrico do dessalinizador solar, no qual foi criado usando o *software* Autodesk REVIT importado um arquivo em formato *Standard ACIS Text* (.sat) para o Autodesk CFD. Foi utilizada a geometria para validar o protótipo sem nenhum tipo de erro depois da verificação da geometria, aplica os materiais para cada elemento representante dos protótipos. Para esse caso foram considerados materiais para placa de vidro, placa isolante, placa absorvedora de calor e água salobra com seus respectivos parâmetros tendo como referência os dados do programa de pesquisa GRUTAA da Universidade Estadual da Paraíba de Campina Grande, dados esses de Cardoso et al. (2020).

Figura 18 – Protótipo 3D do dessalinizador solar



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

São considerados os seguintes casos:

- Protótipo 1: distância entre a placa de vidro e placa absorvedora com 4cm.
- Protótipo 2: distância entre a placa de vidro e placa absorvedora com 5cm.

- Protótipo 3: distância entre a placa de vidro e placa absorvedora com 6cm.
- Inferência das temperaturas.
- Qual Protótipo tem o melhor desempenho?

8.2 Condições de Fronteira

Aplicam-se as condições de fronteira no dessalinizador solar, para assim montar a malha. No Autodesk CFD é aplicado o processo de transferência de calor e condições de contorno aplicados no domínio é explicado para resolver a equação de continuidade e momento. Assumiu-se que a temperatura do fundo (da placa absorvedora de calor) é igual à temperatura do banho-maria que varia de 80 a 85 °C. Como referência em Cardoso et al. (2020), aplicou-se uma taxa de fluxo de volume de 2300 ml/min equivale a $3,83333e^{-05}$ m³/s. Nos modelos as condições de fronteira são determinadas a partir da Tabela 7.

Tabela 7 – Condições de fronteira

Protótipo 1, 2 e 3	
Limites:	Dados de Entrada
Placa de vidro Interna	Temperatura 72 °C
Placa de vidro Externa	Temperatura 68 °C
Água Salobra	Taxa de fluxo de volume $3,83333e^{-05}$ m ³ /s
	Temperatura 26 °C
Saída do destilado	Pressão 0 Pa
Placa Absorvedora de Calor	Temperatura 80 °C
Placa Isolante	Temperatura 37 °C

Fonte: GRUTAA e Cardoso et al. (2020)

8.3 Fluidodinâmica computacional

Durante a execução desta etapa foi utilizado o software Autodesk CFD, que gerou uma malha computacional tridimensional, Protótipo 1 – Cenário 1: 312427 elementos, Protótipo 2 – Cenário 1: 321942 elementos, Protótipo 3 – Cenário 1: 372417. Na Tabela 8 mostra as informações de execução dos Modelos 1, 2 e 3.

Tabela 8 – Informações de execução dos protótipos

Autodesk CFD 2023 [20220516]		
Protótipo	1 ,2 e 3	Cenários 1, 2 e 3
Data de criação:	19/11/2022	

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Os resultados da variável de campo foram a um passo de tempo 200s com método de solução:

- transitório.
- fluxo incompressível turbulento.
- equação de temperatura estática.
- convecção natural.
- modelo de radiação.

Na Tabela 9 encontra-se os Parâmetros iniciais para os protótipos.

Tabela 9 – Parâmetros iniciais para os protótipos

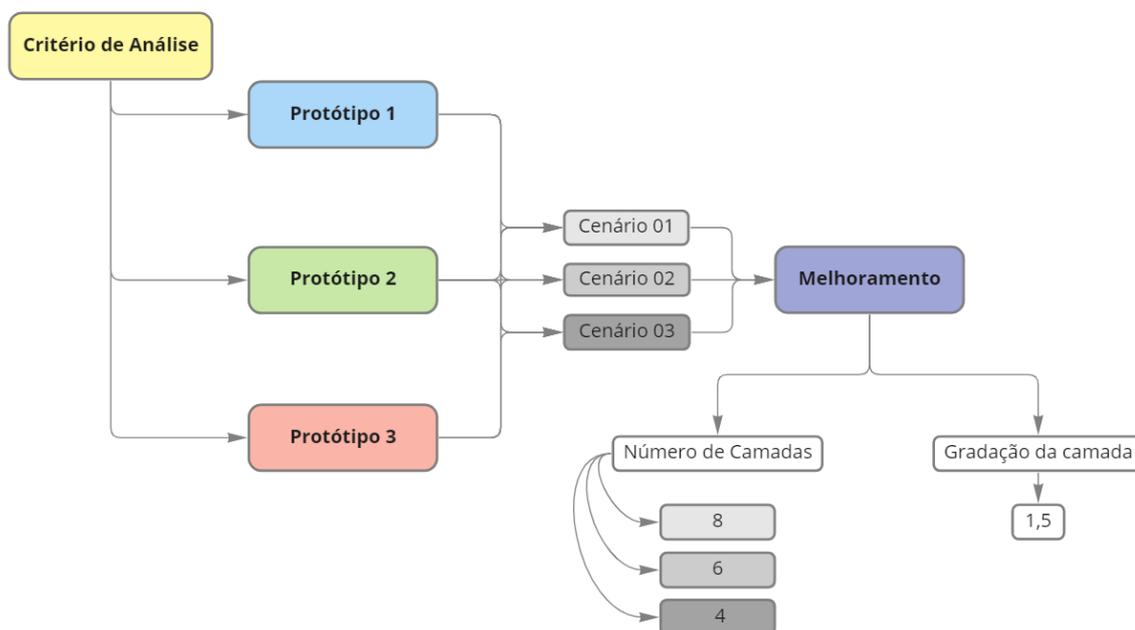
Dados de Entrada	
Fluxo de Volume de Entrada	3,83333e ⁻⁰⁵ m ³ /s
Pressão admitida de entrada	8,0374 N/m ²
Temperatura de entrada	26 °C
Número de Reynolds de entrada	2757,96
Número Mach de Entrada	1.37246e ⁻⁰⁸
Fluxo de Massa Total de Entrada	0,0383333 kg/s
Volume Total Fluxo de entrada	3,83333e ⁻⁰⁵ m ³ /s

Fonte: GRUTAA e Cardoso et al. (2020)

8.4 Critério de análise

Como critério de análise CFD foram considerado três protótipos 1, 2 e 3, realizado em três cenários para análise da convergência da malha, cenário 01, 02 e 03 melhorando o número de camadas em 8, 6 e 4 respectivamente ambos com gradação das camadas de 1,5 como mostra a Figura 19.

Figura 19 – Fluxo de critério para análise CFD



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

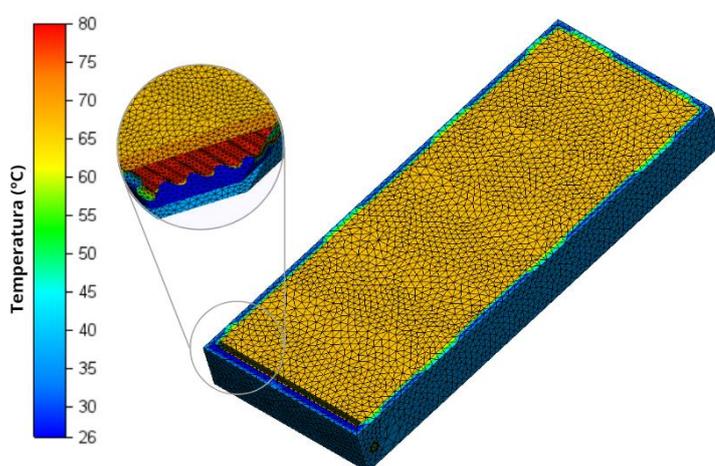
A análise foi determinada para um tempo com intervalos em interação de 200s para cada modelo já estabelecido.

O critério inicial para determinar a convergência é que a mudança de cada grau de liberdade seja minimizada em uma grande variedade de iterações. As curvas mostradas nos gráficos são valores de convergência com valor médio de cada grau de liberdade em todo o domínio de cálculo.

9 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para melhor representar os resultados da distribuição de temperatura na forma de gráfico de contorno, na Figura 20 a região avermelhada no gráfico de contorno representa a temperatura mais alta e a região azul representa a temperatura mais baixa no domínio, é claramente visto na figura devido à grande diferença de temperatura entre a temperatura da placa de vidro, placa absorvedora de calor, bandeja e a água.

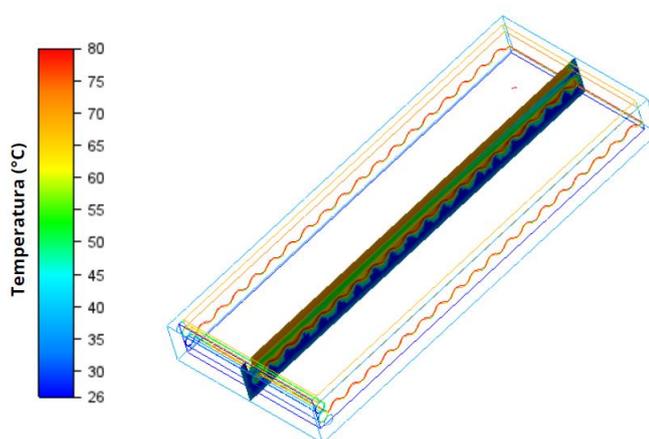
Figura 20 – Representação da distribuição de temperatura no protótipo em malha



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

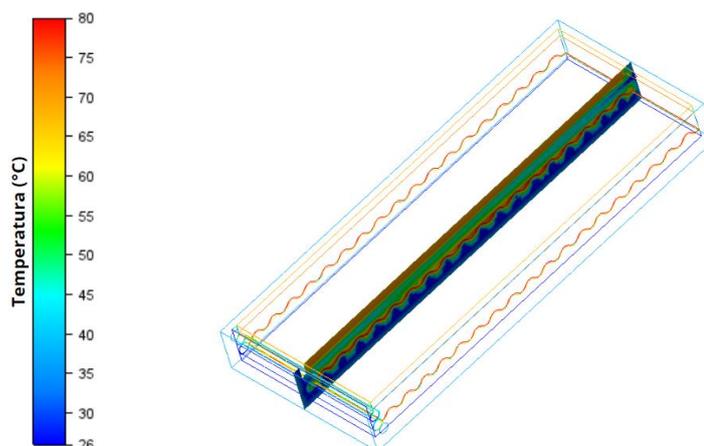
Pode-se analisar essa gradação de distribuição de temperatura nas Figuras 21,22 e 23 dos protótipos 1, 2 e 3 respectivamente.

Figura 21 – Distribuição de temperatura no protótipo 1



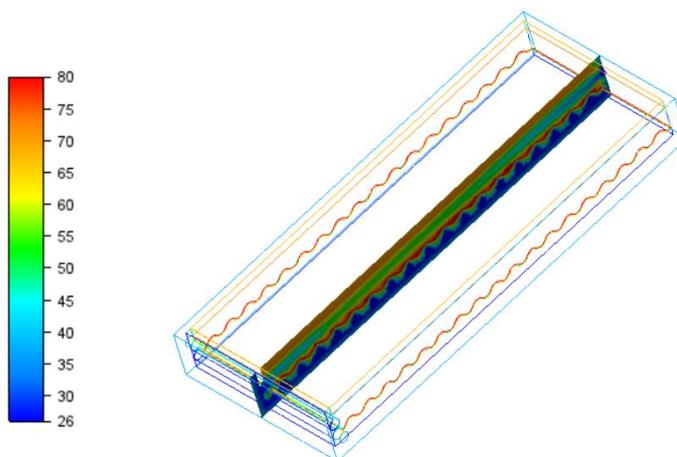
Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Figura 22 – Distribuição de temperatura no protótipo 2



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Figura 23 – Distribuição de temperatura no protótipo 3



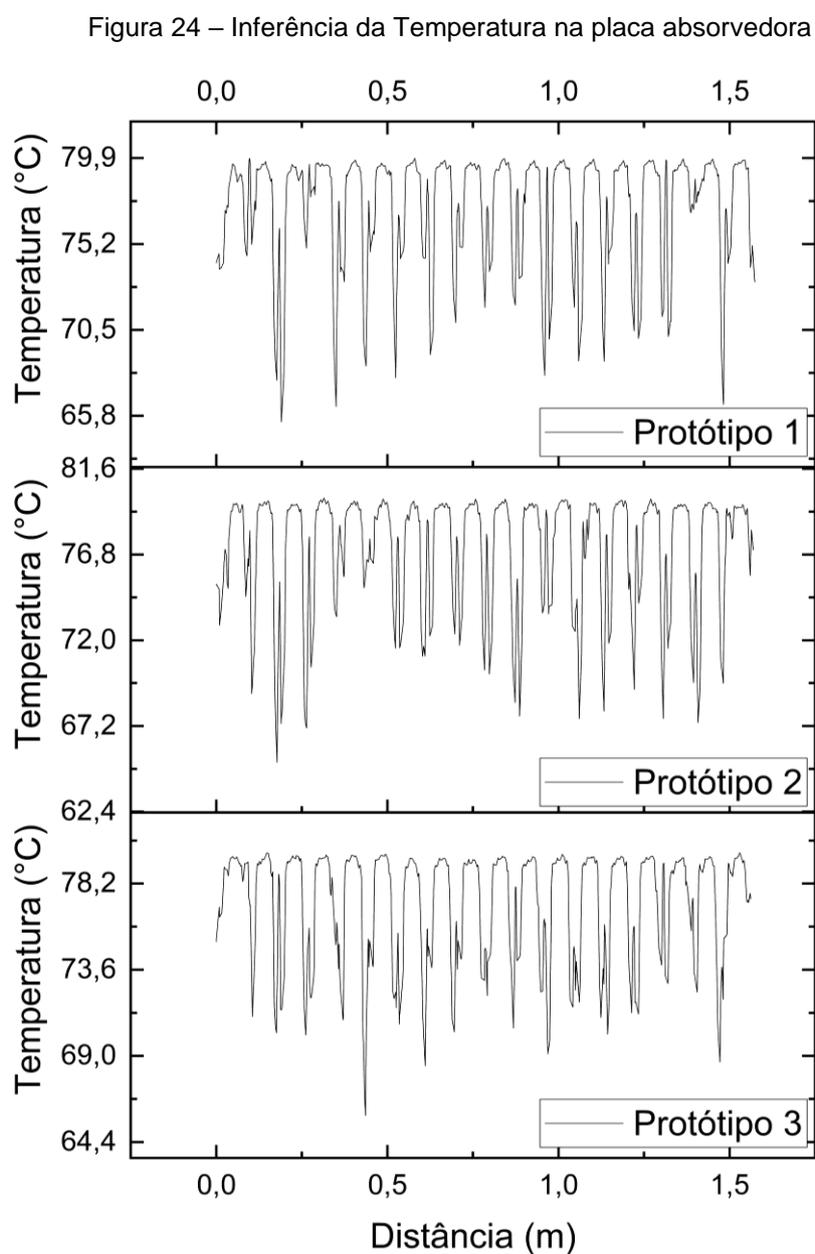
Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Vale salientar que os dados expostos serão dados do melhor cenário proposto. Foram analisados em três cenários para verificar se havia convergência entre as simulações dos protótipos. Pode-se afirmar que houve sim convergência, pois ambos os cenários para os protótipos seguem um padrão de simetria. O melhor cenário foi o cenário 1, pois esse cenário foi simulado com uma melhor configuração de malha.

Com o intuito de avaliar o desempenho térmico e do volume de água dessalinizada foram realizadas simulações para verificar se as temperaturas da placa de vidro, bandeja e placa absorvedora de calor se tem influência na produção de água dessalinizada, e também verificar as temperaturas da água.

Essas temperaturas interferem diretamente na produção da água, pois é onde a radiação solar vai ter uma grande incidência, fazendo que tenha uma maior absorção de calor na placa.

Na Figura 24 os parâmetros de entrada foram considerados para inferir a temperatura na placa absorvedora de calor de ambos os protótipos de 80°C, para o Protótipo 1, 2 e 3 a temperatura média atingiu 78,94 °C, 79,09 °C e 78,88 °C respectivamente.

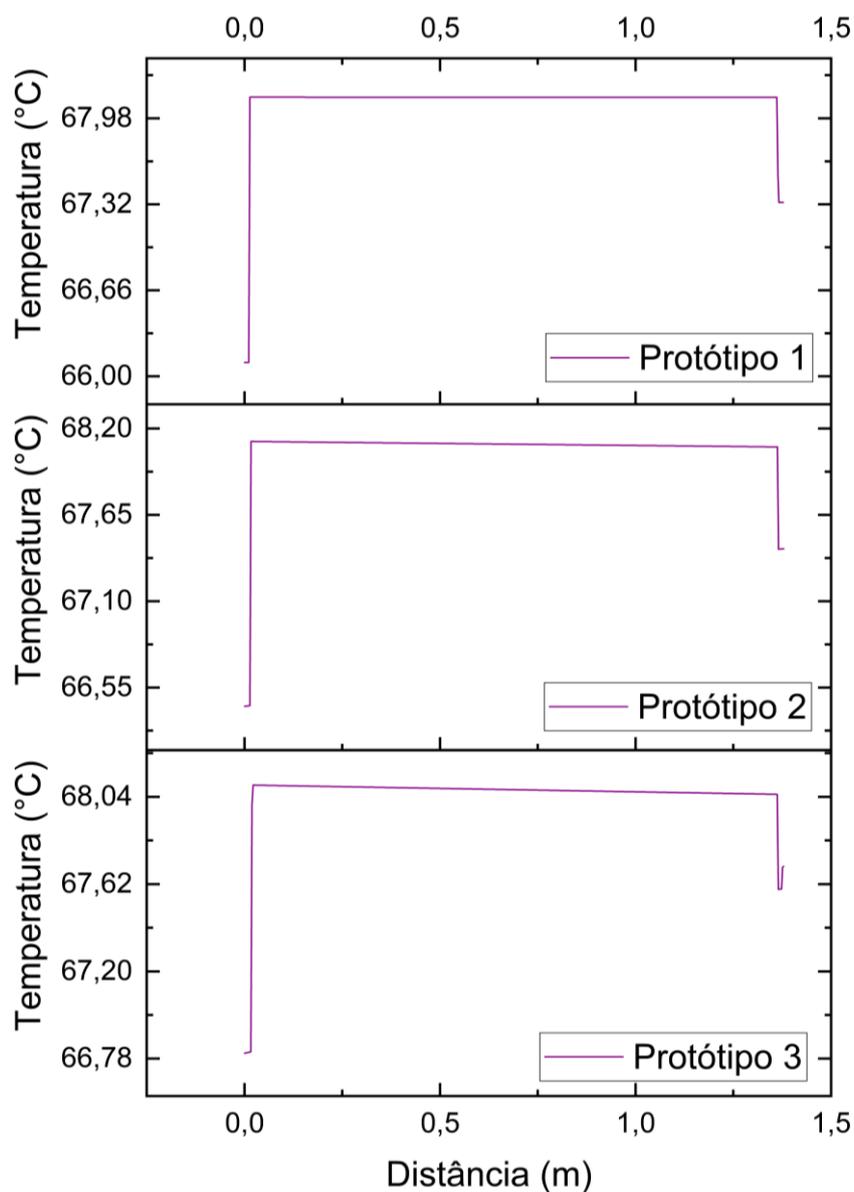


Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Os valores da temperatura do vidro se mantêm inferiores as demais temperaturas, porém teve um aumento gradativo, visto que o vidro absorve parte da energia recebida pela radiação solar, elevando sua temperatura.

Na Figura 25 os níveis de temperatura atingido na placa de vidro foram considerados altos, com temperatura média para o Protótipo 1, 2 e 3 de 68,14 °C, 68,10 °C e 68,07 respectivamente.

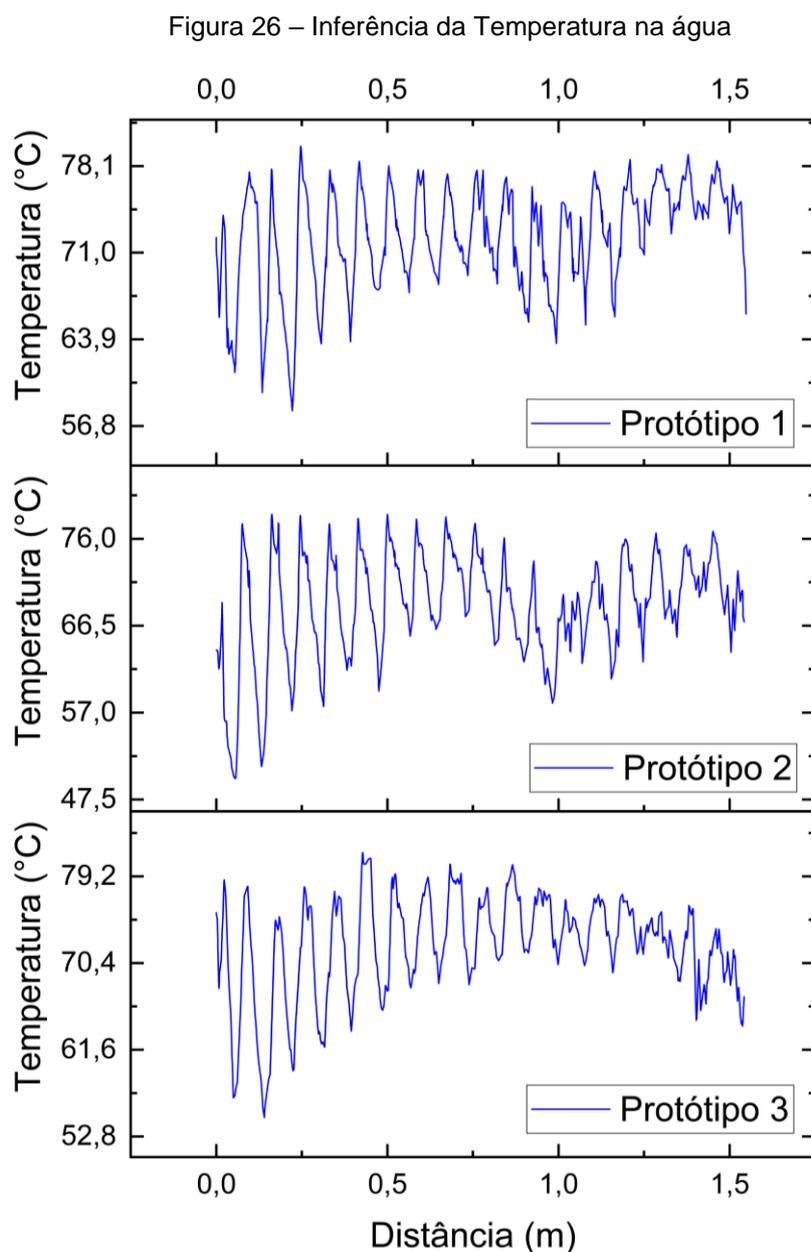
Figura 25 – inferência da Temperatura na placa de vidro



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

A temperatura da água dentro do dessalinizador está diretamente associada à sua eficiência, sabendo que o sistema deve regular o máximo de energia para si, fazendo com que eleve sua temperatura em seu interior e conseqüentemente a da água.

Para o Protótipo 1, 2 e 3 na Figura 26, a água atingiu uma temperatura média de 73,25 °C, 69,43 °C e 73,18 °C respectivamente.



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

A partir dos valores observados, foi possível analisar que o sistema consegue absorver e conservar a energia que incidiu, pois as temperaturas se mantiveram

crecentes acompanhando o nível de radiação solar na temperatura ambiente de 42°C.

Visto que Silva et al. (2020) instalaram o equipamento no mesmo local e obteve ao final uma temperatura de 79 °C com temperatura ambiente de 28,2°C. Já Cardoso et al. (2020) com equipamento instalado também no mesmo local atingiu uma temperatura da água de 70 °C. Pode-se inferir que os valores da simulação se aproximam do experimental corroborando assim para a análise em questão.

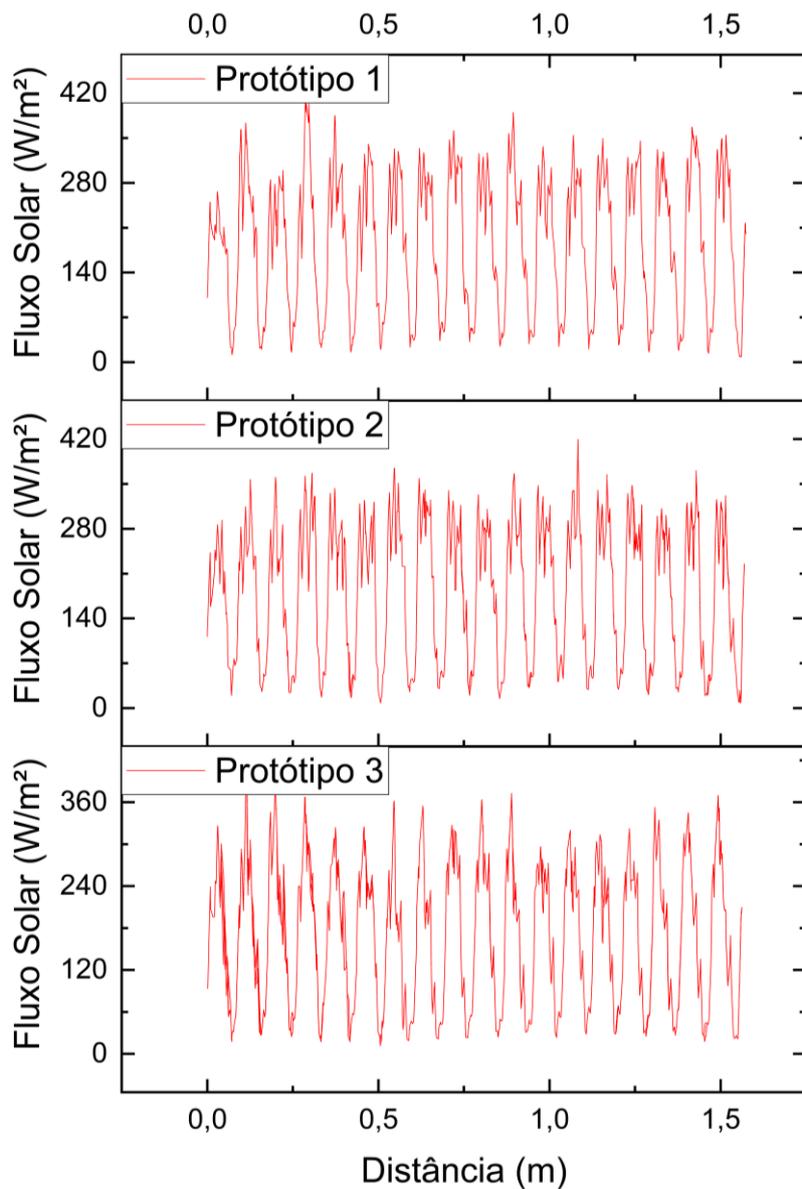
Os resultados de saída no protótipo enfatizando o fluxo de massa total da água utilizando uma vazão inicial de entrada obtido por Mazraeh et al. (2018) que alcançaram uma produção máxima diária 2.300 mL.min⁻¹, produção máxima utilizada em Cardoso et al. (2022) como referência sua produção foi de 1.961 mL.m⁻². dia⁻¹. Já em Cardoso et al. (2020) teve uma produção de 891 mL.m⁻².

Foi obtido na saída para a água dessalinizada uma produção acumulada para o Protótipo 1, 2 e 3 de 1.873 mL.m⁻² dia⁻¹, 1.843 mL.m⁻² dia⁻¹ e 1.748 mL.m⁻² dia⁻¹ respectivamente, resultados esses que corroboram com os dados de Cardoso et al. (2022).

A radiação solar é um parâmetro de grande importância para o sistema, sabendo que os níveis de radiação solar incidentes sobre o dessalinizador ocasionam a evaporação da água salobra, dando início ao processo de dessalinização.

A Figura 27 apresenta os valores de radiação solar simulado. É possível notar que os índices de radiação a que o sistema foi exposto na simulação foram satisfatórias, pois sem atingir níveis muito elevados, os valores foram aceitáveis, contribuindo para o funcionamento do sistema. Com valor de radiação solar máxima para o Modelo 1, 2 e 3 de 405,3 W/m², 419,4 W/m², 397,75 W/m² respectivamente.

Figura 27 – Inferência do fluxo de calor solar



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

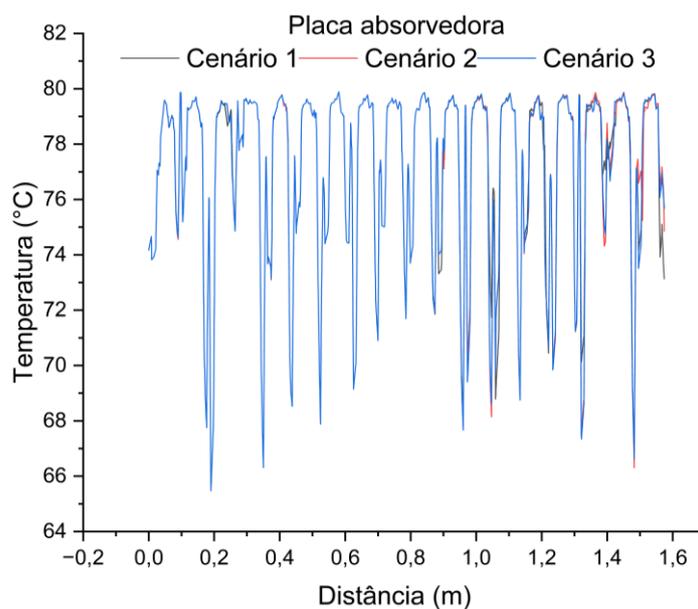
10 VALIDAÇÃO

Na modelagem de elementos finitos, uma malha mais fina geralmente produz uma solução mais precisa. No entanto, o tempo de compilação aumenta à medida que a malha se torna mais fina. Para obter um equilíbrio da grade da malha e recursos de computação precisa executar um estudo de convergência de malha.

Validação do Modelo 1:

Como mostra a Figura 28 a validação da temperatura na placa absorvedora no Protótipo 1 para os cenários 1, 2 e 3, os cenários estão convergindo entre si com temperatura média de 78,94 °C para ambos os cenários.

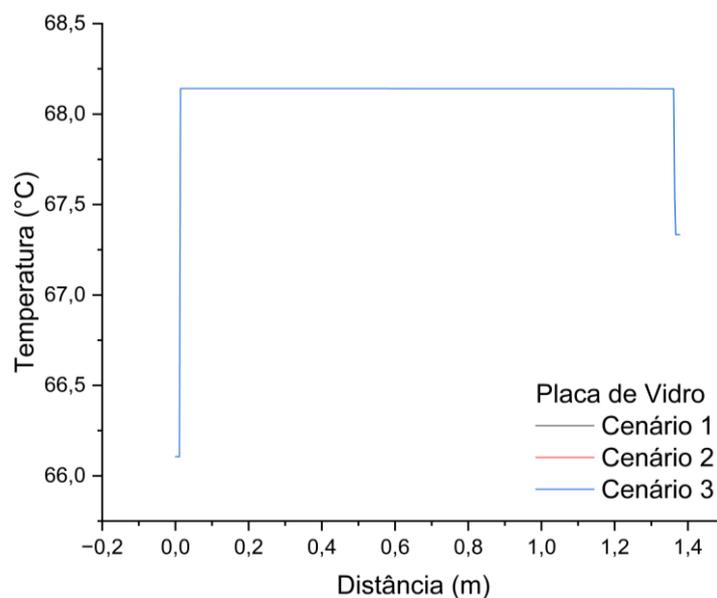
Figura 28 – Validação da temperatura na placa absorvedora Protótipo 1



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Na Figura 29, nota-se uma grande convergência nos cenários, pois eles estão praticamente interceptados entre si, com temperatura média de 68,14 °C.

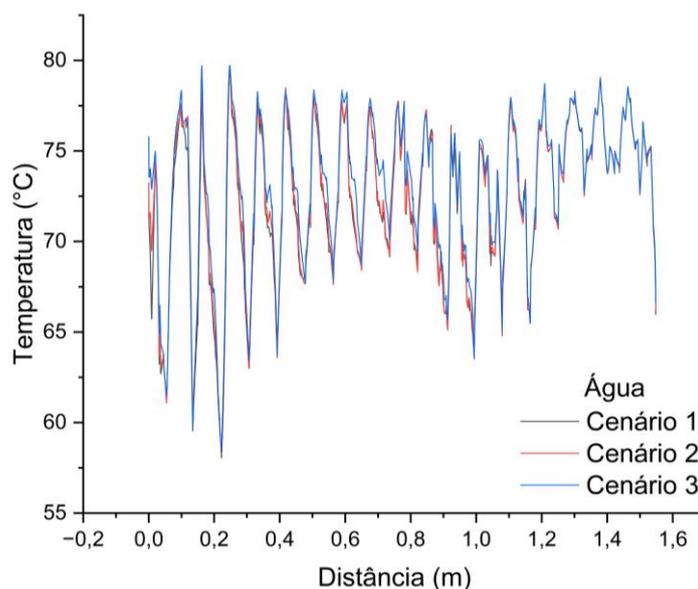
Figura 29 – Validação da temperatura na placa de vidro Protótipo 1



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Na Figura 30, verifica-se uma convergência nos cenários 1, 2 e 3, com temperatura média de 73,26 °C, 73,38 °C e 73,99 °C respectivamente.

Figura 30 – Validação da temperatura na água Protótipo 1

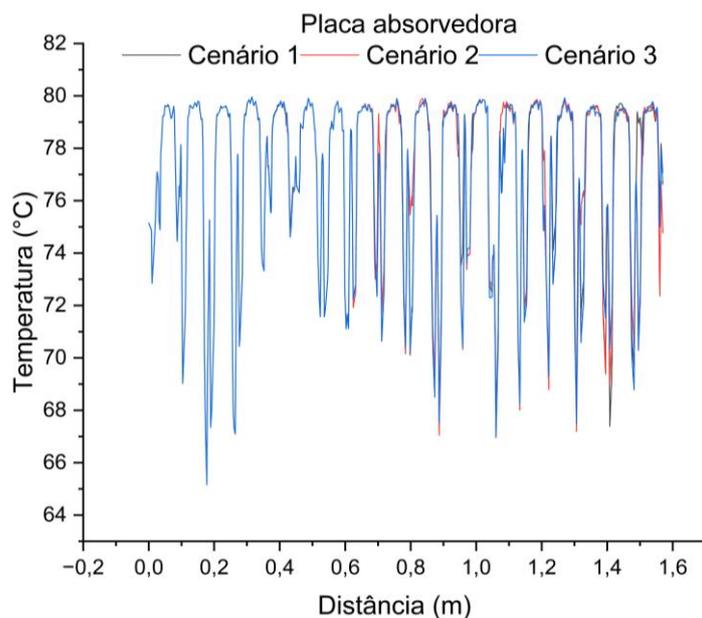


Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Validação do Protótipo 2:

Como mostra a Figura 31 verifica-se convergência para os cenários 1, 2 e 3, com temperatura média de 79,09, °C 79,12 °C e 79,10°C.

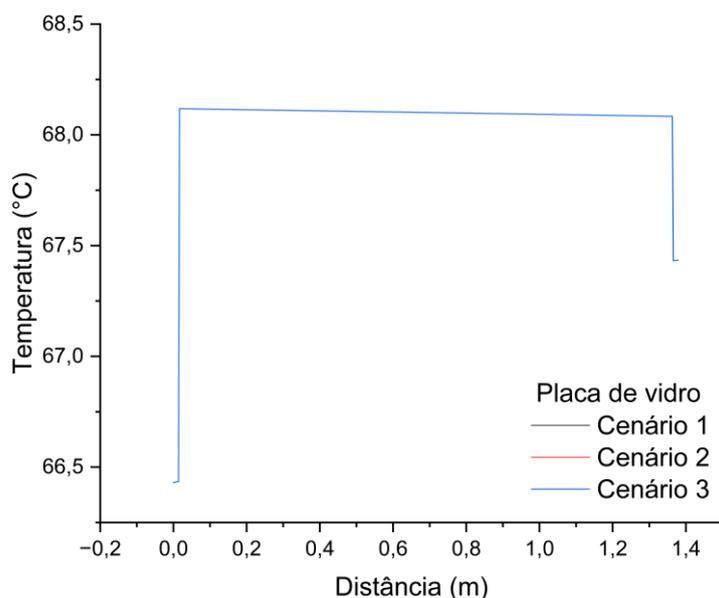
Figura 31 – Validação da temperatura na placa absorvedora Protótipo 2



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Na Figura 32, nota-se uma grande convergência nos cenários pois eles estão praticamente interceptados entre si, com temperatura média de 68,10 °C.

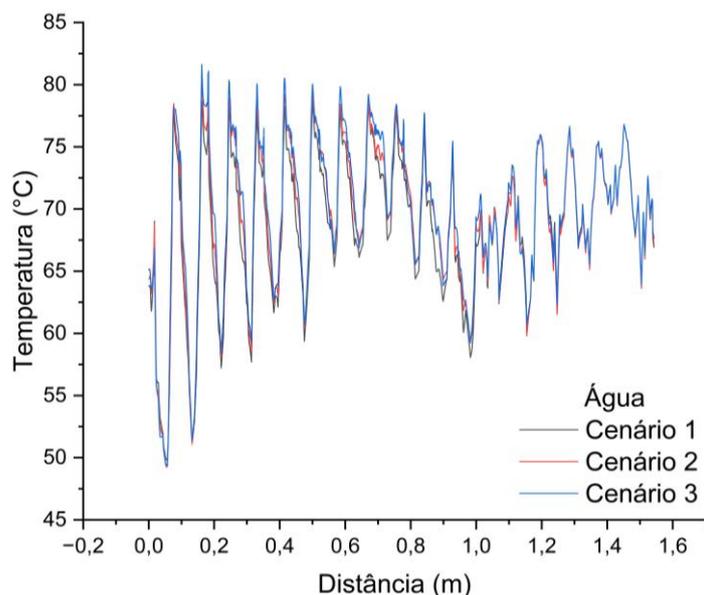
Figura 32 – Validação da temperatura na placa de vidro Protótipo 2



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Na Figura 33, verifica-se uma convergência nos cenários 1, 2 e 3, com temperatura média de 69,43°C, 70,16 °C e 70,53 °C respectivamente.

Figura 33 – Validação da temperatura na água Protótipo 2

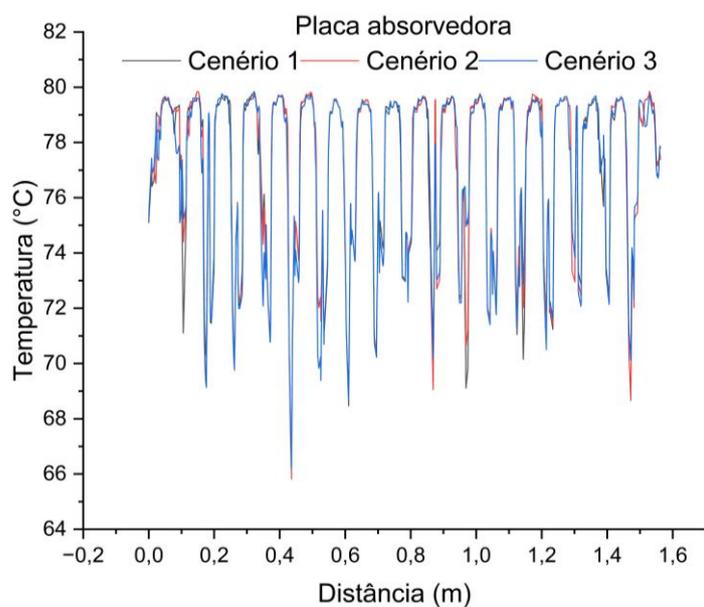


Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Validação do Protótipo 3:

Como mostra a Figura 34 verifica-se convergência para os cenários 1, 2 e 3, com temperatura média de 78,88, °C 78,95 °C e 78,72°C.

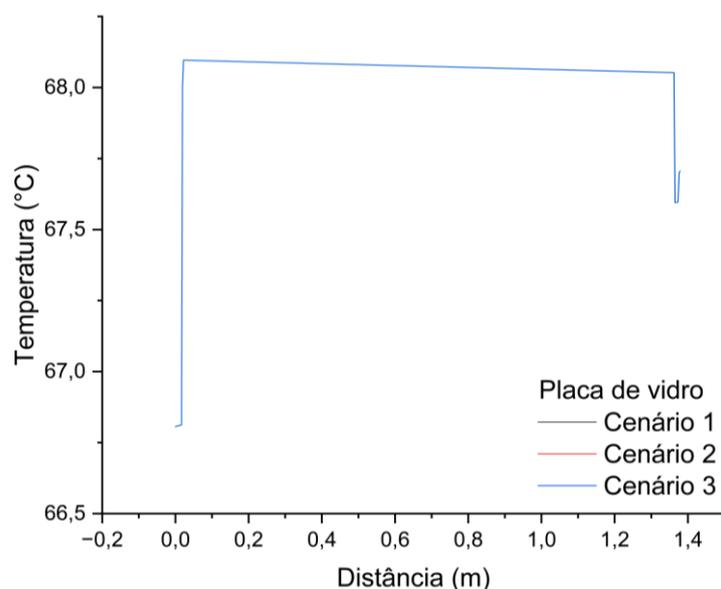
Figura 34 – Validação da temperatura na placa absorvedora Protótipo 3



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Na Figura 35, nota-se uma grande convergência nos cenários pois eles estão praticamente interceptados entre si, com temperatura média de 68,07 °C.

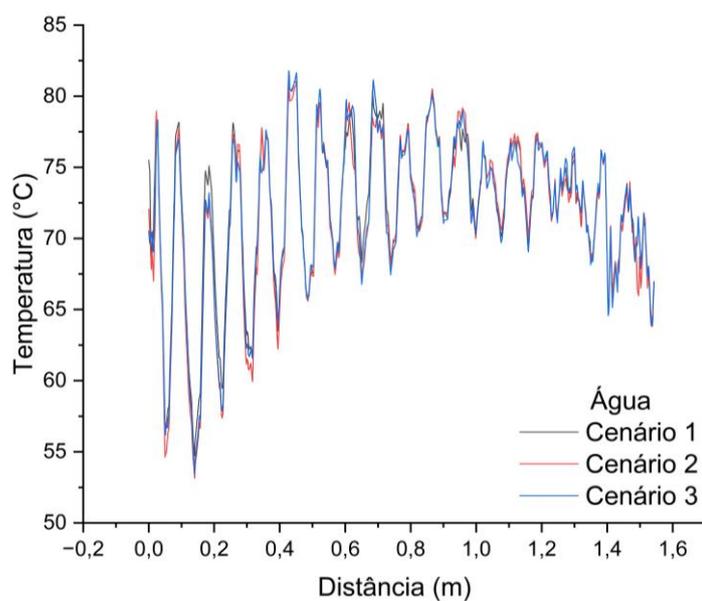
Figura 35 – Validação da temperatura na placa vidro Protótipo 3



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Na Figura 36, verifica-se uma convergência nos cenários 1, 2 e 3, com temperatura média de 73,18°C, 72,86 °C e 72,90 °C respectivamente.

Figura 36 – Validação da temperatura na água Protótipo 3



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Verificou-se que houve convergência em ambos os modelos.

11 CONCLUSÃO

O modelo matemático construído possibilitou uma simulação das variáveis resultantes do dessalinizador proposto. Este modelo foi aplicado no programa computacional Autodesk CFD e a partir dele foi realizada uma análise paramétrica onde as características do dessalinizador foram sendo ajustadas. Esta análise tem como objetivo obter um dessalinizador solar com melhores resultados e que produza a maior quantidade de água dessalinizada esperada.

A análise paramétrica através dos resultados do *software* Autodesk CFD permitiu a conclusão de algumas características indispensáveis para um bom e eficiente funcionamento do dessalinizador solar.

Variou-se a distância entre a placa absorvedora e a placa de vidro dentro da bandeja do dessalinizador, pôde-se concluir que quanto menor é a altura de água dentro da bacia maior quantidade de água destilada o sistema irá produzir. Isto se deve ao fato de que o aquecimento da coluna de água é dificultado quando se tem uma grande quantidade de água dentro da bacia.

A transferência de calor que irradia da cobertura até toda a água salina é mais demorada quando tem uma profundidade maior da lâmina de água, sendo assim menor é a evaporação e condensação capaz de produzir água destilada. O melhor modelo exposto com as distancias de 4, 5, 6 cm é o Protótipo 1 e 2 de 4cm ,5cm de lâmina de água para a placa de vidro, justamente por ter uma maior transferência de calor da placa do vidro para o fluido.

Foram criados cenários para verificar a convergência do dessalinizador, e notou-se que houve uma convergência nos resultados apresentados nos gráficos, pois os valores se aproximavam da literatura. Pôde-se concluir que de fato teve convergência e que os valores obtidos corroboram para esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

AUTODESK. **Computational fluid dynamics simulation software**. Disponível em:< <https://www.autodesk.com/products/cfd/overview>>. Acesso em 19/05/2022.

BISWAS, Anirudh; RUBY. R. Distillation of water by solar energy. **VSRD International Journal of Mechanical, Automobile and Production Engineering**, v. 2, n. 5, p. 166-173, 2012.

BARRAZA, Rodrigo. **Solar Desalination Systems Research and Modeling** Process. 2011. Tese de Doutorado. University of Wisconsin--Madison.
BRASIL. **Ministério do Meio Ambiente**. Resolução CONAMA nº 357, de 15 de junho de 2005.

Bouzaid, M., Ansari, O., Taha-Janan, M., Mouhsin, N., & Oubrek, M. (2019). Numerical analysis of thermal performances for a novel cascade solar desalination still design. **Energy Procedia**, 157, 1071-1082.

Cardoso, M. K. B., de Brito, Y. J. V., Silva, K. S., Silva, C. B., de Lima, C. A. P., & de Medeiros, K. M. (2020). Dessalinizador solar do tipo cascata aplicado em poços artesianos no interior da Paraíba. **Águas Subterrâneas**, 34(2), 135-142.

Cardoso, M. K. B., da Silva, K. S., Silva, C. B., de Lima, G. G. C., de Medeiros, K. M., & de Lima, C. A. P. (2022). Low-cost solar still with corrugated absorber basin for water desalination. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, 44(5), 214.

ELANGO, C.; GUNASEKARAN, N.; SAMPATHKUMAR, K. Thermal models of solar still—a comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 47, p. 856-911, 2015.

CARVALHO FILHO, A. F. . Método de volumes finitos aplicado à condução de calor: uma abordagem com Python. 1. ed. São Luís - MA: **Edição do Autor**, 2019. v. 1. 240p .

Cipolla, E. Z., Silva, F. D. G. D., Tiago Filho, G. L., & Barros, R. M. (2011). **Avaliação da distribuição de velocidades em uma bomba centrífuga radial utilizando técnicas de CFD**. RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 16(3), 71-79.

da Conceicao Albuquerque, M. V., Ferreira de Carvalho, E. K., Pereira de Lima, C. A., de Sousa, J. T., Leite, V. D., & Lopes, W. S. (2022). Removal of microcystin-LR from eutrophic water using solar distillation. **DESALINATION AND WATER TREATMENT**, 253, 138-144.

FORTUNA, Armando de Oliveira. **Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos: conceitos básicos e aplicações**. São Paulo: USP, 2000.

GOMES, D. J., MONTEIRO, F., LOIOLA, M., ABRANTES, G., FERREIRA, A., & MEDEIROS, O. (2016). Qualidade microbiológica de água de poços artesianos no município de Sousa—PB. **Informativo Técnico do Semiárido**, 10(1), 99-105.

GNANAVEL, C.; SARAVANAN, R.; CHANDRASEKARAN, M. CFD analysis of solar still with PCM. **Materials Today: Proceedings**, v. 37, p. 694-700, 2021.

Khare, V. R., Singh, A. P., Kumar, H., & Khatri, R. (2017). Modelling and performance enhancement of single slope solar still using CFD. *Energy Procedia*, 109, 447-455.

KESHTKAR, M.; ESLAMI, M.; JAFARPUR, K. Effect of design parameters on performance of passive basin solar stills considering instantaneous ambient conditions: A transient CFD modeling. **Solar Energy**, v. 201, p. 884-907, 2020.

Zoori, H. A., Tabrizi, F. F., Sarhaddi, F., & Heshmatnezhad, F. (2013). Comparison between energy and exergy efficiencies in a weir type cascade solar still. **Desalination**, 325, 113-121.

PANCHAL, Hitesh N.; PATEL, Nikunj. ANSYS CFD and experimental comparison of various parameters of a solar still. **International Journal of Ambient Energy**, v. 39, n. 6, p. 551-557, 2018.

DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A. **Solar engineering of thermal processes**. John Wiley & Sons, 2013.

LEVY, João de Quinhones. **Novas Fontes de abastecimento de água: Reutilização e dessalinização**. Lisboa : s.n., 2008. ISBN: 978-989-96061-0-4.

MAHMOUD SHATAT; MARK WORALL; SAFFA RIFFAT. Opportunities for solar water desalination worldwide: Review. **Sustainable Cities and Society**, p. 67-80, 2013.

MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. Reuso de Água. **Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2003. 21.

MATHIOULAKIS, E. E.; BELESSIOTIS, V. G.; DELYANNIS, E. E. **Desalination by using alternative energy: Review and state-of-the-art**. **Desalination**, p. 346-365, 2007.

MAHESWARI, C. Uma; REDDY, R. Meenakshi. CFD Analysis of different types of single basin solar stills. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2018. p. 012097.

MAZRAEH, A.E.; BABAYAN, M.; YARI, M.; SEFIDAN, ALI M.; SAHA, SUVASH C. (2018). **Theoretical study on the performance of a solar still system integrated with PCM-PV module for sustainable water and power generation**. **Desalination**, 443(), 184–197. doi:10.1016/j.desal.2018.05.024.

Mouhsin, N., Bouzaid, M., Taha-Janan, M., & Oubrek, M. (2020). Modeling and experimental study of cascade solar still. **SN Applied Sciences**, 2, 1-9.

DASHTBAN, Mohammad; TABRIZI, Farshad Farshchi. Thermal analysis of a weir-type cascade solar still integrated with PCM storage. **Desalination**, v. 279, n. 1-3, p. 415-422, 2011.

SETOODEH, Narjes; RAHIMI, Rahbar; AMERI, Abolhasan. Modeling and determination of heat transfer coefficient in a basin solar still using CFD. **Desalination**, v. 268, n. 1-3, p. 103-110, 2011.

RAHBAR, Nader; ASADI, Amin; FOTOUHI-BAFGHI, Ehsan. Performance evaluation of two solar stills of different geometries: tubular versus triangular: experimental study, numerical simulation, and second law analysis. **Desalination**, v. 443, p. 44-55, 2018.

RAZZOLINI, M. T.; GUNTHER, W. T. **Impactos na Saúde das Deficiências**. **Saúde Soc.**, São Paulo, p. 21-32, 2008.

RASHIDI, Saman; ESFAHANI, Javad Abolfazli. Spatial entropy generation analysis for the design improvement of a single slope solar still. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v. 37, n. 3, p. 1112-1120, 2018.

S. El-Sebaey, M., Ellman, A., Hegazy, A., & Ghonim, T. (2020). Experimental analysis and CFD modeling for conventional basin-type solar still. **Energies**, 13(21), 5734.

SILVA, Adriano Oliveira et al. Potabilização de água salobra por meio de um dessalinizador solar portátil com refletores de radiação integrados. **Águas Subterrâneas**, v. 34, n. 3, p. 285-295, 2020.

THEODORE L. BERGMAN, ANDRIENNE S. LAVINE, FRANK P. Incropera, David P. Dewitt; [tradução Eduardo Mach Queiroz, Fernando Luiz Pellegrini Pessoa]. **Fundamentos de transferência de calor e de massa** / 7. ed. - Rio de Janeiro: LTC, 2014. il.

TAAMNEH, Yazan. Influence of Jordanian zeolite on the performance of a solar still: experiments and CFD simulation studies. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 16, n. 6, p. 1700-1709, 2016.

UNESCO. World Water. **Agua para todos Agua para la vida**. 2003, Capítulo p. 69. <http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001494/149406s.pdf>. Acessado em 19/05/2022.

VERSTEEG, Henk Kaarle; MALALASEKERA, Weeratunge. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. 2ª ed. **Pearson education**, 2007.

Waterions. Electrodialysis Reversal. Disponível em: <http://waterions.aceenvironment.com/edr>. acesso em 19/05/2022.

WHO. World Health Organization. **World Health Organization**, 2011.

YOUNOS, T.; TULOU, K. E. Overview of Desalination Techniques. **Journal of Contemporary Water Research & Education**, p. 3-10, 2009

YAN, Tiantong et al. CFD investigation of vapor transportation in a tubular solar still operating under vacuum. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 156, p. 119917, 2020.