



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
MESTRADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL**

ADRIANO OLIVEIRA DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UM DESSALINIZADOR SOLAR PORTÁTIL TIPO
ONDULAR COM REFLETORES DE RADIAÇÃO INTEGRADOS PARA
POTABILIZAÇÃO DE ÁGUA SALOBRA**

**CAMPINA GRANDE - PB
2021**

ADRIANO OLIVEIRA DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UM DESSALINIZADOR SOLAR PORTÁTIL TIPO
ONDULAR COM REFLETORES DE RADIAÇÃO INTEGRADOS PARA
POTABILIZAÇÃO DE ÁGUA SALOBRA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Ciências e Tecnologia Ambiental - PPGCTA, em cumprimento às exigências necessárias para obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental.

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

Coorientadora: Profa. Dra. Keila Machado de Medeiros

**CAMPINA GRANDE – PB
2021**

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.

S586d Silva, Adriano Oliveira da.
Desenvolvimento de um dessalinizador solar portátil tipo ondular com refletores de radiação integrados para potabilização de água salobra [manuscrito] / Adriano Oliveira da Silva. - 2021.
111 p. : il. colorido.
Digitado.
Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2021.
"Orientação : Prof. Dr. Carlos Antônio Pereira de Lima, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT."
1. Escassez hídrica. 2. Dessalinizador solar. 3. Eficiência térmica. 4. Água potável. I. Título

21. ed. CDD 628.167

ADRIANO OLIVEIRA DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UM DESSALINIZADOR SOLAR PORTÁTIL TIPO
ONDULAR COM REFLETORES DE RADIAÇÃO INTEGRADOS PARA
POTABILIZAÇÃO DE ÁGUA SALOBRA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Ciências e Tecnologia Ambiental - PPGCTA, em cumprimento às exigências necessárias para obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental.

APROVADO EM 25/2021

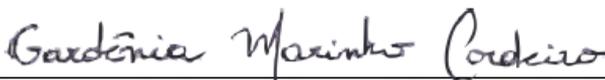
BANCA EXAMINADORA



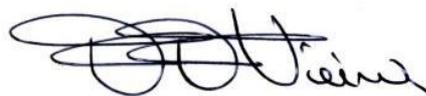
Prof. Dr. Carlos Antônio Pereira de Lima (Orientador)
Universidade Estadual da Paraíba – UEPB



Prof^a. Dr^a. Keila Machado de Medeiros (Coorientadora)
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – UFRB



Prof^a. Dr^a. Gardênia Marinho Cordeiro (Examinadora Externa)
Instituto Federal da Paraíba - IFPB



Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira (Examinador Interno)
Universidade Estadual da Paraíba - UEPB

**CAMPINA GRANDE, PB
2021**

AGRADECIMENTOS

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

Aos meus pais, Maria Luciene e José Oliveira, pelo apoio nessa caminhada da carreira acadêmica.

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

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

Aos colegas do GRUTAA, em especial, Bruna, Camylla, Karyna, Karol e Yohanna, por toda ajuda para realização deste estudo.

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

A CAPES pelo apoio financeiro na realização deste trabalho. Ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA) do Centro de Ciências e Tecnologia (CCT) da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB) pela parceria na realização deste trabalho.

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

Aos colegas de classe e trabalho pelos momentos de amizade e apoio.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

Um dessalinizador solar portátil com refletores de radiação integrados foi desenvolvido com o intuito de analisar a eficiência térmica na produção de água potável para consumo humano em região de difícil acesso ou a igual, bem como estudou os fenômenos de transferência de calor que regem no processo de dessalinização. O dessalinizador foi alimentado com água salobra coletada nos poços artesianos, do distrito de Riacho Fundo de Barra de São Miguel – PB. Foram realizadas análises físico-químicas da água antes e após o processo de dessalinização. Além disso, foram monitoradas as temperaturas da água, temperaturas da placa absorvedora, temperaturas do vidro e temperaturas do isolante, assim como os dados de radiação solar, velocidade do vento, temperatura ambiente e a produção do destilado. A temperatura da água máxima alcançada foi de 72°C, com índice de radiação solar máximo de 1145 W m⁻², apresentando uma produção de água dessalinizada de 3100 mL m⁻² dia⁻¹. A análise térmica realizada nos componentes do dessalinizador evidenciaram que os modelos teóricos apresentado no estudo se ajustaram aos dados experimentais. Além disso, foi constatado que a eficiência térmica do dessalinizador acompanhou o fluxo de radiação solar e que apresenta relação direta com a produtividade. Os resultados obtidos das análises físico-químicas das águas salobra e dessalinizada apresentaram reduções no teor de cloreto de 98,57%, o sódio de 100% e nos sólidos totais dissolvidos de 98,78% após o processo de dessalinização, atingindo valores de acordo com os padrões de potabilidade exigidos pela Portaria do Ministério da Saúde vigente no país. Conclui-se que o dessalinizador solar desenvolvido se configura uma boa alternativa para a produção de água dessalinizada para comunidades isoladas, em que a demanda de água não é elevada, e onde existe alta incidência de radiação solar.

Palavras-chave: Escassez hídrica. Dessalinizador solar. Eficiência térmica. Potabilidade da água.

ABSTRACT

A portable solar desalter with integrated radiation reflectors was developed in order to analyze the thermal efficiency in production in drinking water for human consumption in regions of difficult access, as well as to study the heat transfer phenomena that govern the desalination process. The desalter was fed with brackish water collected from artesian wells in the district of Riacho Fundo de Barra de São Miguel - PB. Physical-chemical analyses of the water before and after the desalination process were performed. In addition, water temperatures, absorption plate temperatures, glass temperatures and insulation temperatures were monitored, as well as data on solar radiation, wind speed, ambient temperature and distillate production. The maximum water temperature reached was 72°C, with a maximum solar radiation index of 1145 W m⁻², with a desalinated water production of 3100 ml m⁻² day⁻¹. The thermal analysis performed on the desalter components showed that the theoretical models presented in the study adjusted to the experimental data. In addition, it was found that the thermal efficiency of the desalter followed the solar radiation flow and that it has a direct relation with productivity. The results obtained from the physical-chemical analysis of brackish and desalinated waters showed reductions in the chloride content of 98.57%, sodium of 100% and total dissolved solids of 98.78% after the desalination process, reaching values in accordance with the standards of potability required by the ministry of health ordinance in force in the country. It is concluded that the developed solar desalter is a good alternative for the production of desalinated water for isolated communities, where the demand for water is not high, and where there is a high incidence of solar radiation.

Keywords: Water scarcity. Solar desalter. Thermal efficiency. Water potability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Espectro da radiação solar incluindo um detalhamento da faixa visível humana...	21
Figura 2 - Representação esquemática da fração de radiação solar em diversos processos de interação com constituintes atmosféricos	22
Figura 3 - Representação esquemática das componentes constituintes da radiação global incidente numa superfície.....	23
Figura 4 - Total da irradiação solar global horizontal – médias mensais	24
Figura 5 - Esquema de um dessalinizador solar	30
Figura 6 - Balanço geral de energia do dessalinizador solar tipo ondular proposto.....	42
Figura 7 - Balanço de energia na cobertura do dessalinizador solar	43
Figura 8 - Balanço de energia para a água salobra do dessalinizador solar	45
Figura 9 - Balanço de energia para a placa absorvedora ondular do dessalinizador solar.....	48
Figura 10 - Balanço de energia para a face interna do isolante	49
Figura 11 - Balanço de energia para a face externa do isolante	50
Figura 12 - Dessalinizador solar portátil tipo ondular com refletores.....	55
Figura 13 - Diagrama do projeto da pesquisa.....	56
Figura 14 - Placa absorvedora ondular: (a) Individualmente (b) Inserido no dessalinizador solar	57
Figura 15 - Refletores de radiação integrados	58
Figura 16 - Dessalinizador solar construído	59
Figura 17 - Perfis de temperatura e radiação solar monitoradas do dia 30/09/2020.	62
Figura 18 - Perfis de temperatura e radiação solar monitoradas do dia 06/10/2020.	63
Figura 19 - Perfis de temperatura e radiação solar monitoradas do dia 16/11/2020.	64
Figura 20 - Produção de água em função dos perfis de temperatura monitoradas do dia 30/09/2020.....	65
Figura 21 - Produção de água em função dos perfis de temperatura monitoradas do dia 06/10/2020.....	66
Figura 22 - Produção de água em função dos perfis de temperatura monitoradas do dia 16/11/2020.....	67

Figura 23 - Produção de água em função da radiação solar monitoradas do dia 30/09/2020.	68
Figura 24 - Produção de água em função da radiação solar monitoradas do dia 06/10/2020.	69
Figura 25 - Produção de água em função da radiação solar monitoradas do dia 16/11/2020.	69
Figura 26 - Eficiência térmica horária em função da radiação solar monitorada do dia 30/09/2020.	70
Figura 27 - Eficiência térmica horária em função da radiação solar monitorada do dia 06/10/2020.	71
Figura 28 - Eficiência térmica horária em função da radiação solar monitorada do dia 16/11/2020.	72
Figura 29- Coeficientes de transferência de calor monitoradas do dia 30/09/2020.	73
Figura 30- Coeficientes de transferência de calor monitoradas do dia 06/10/2020.	74
Figura 31- Coeficientes de transferência de calor monitoradas do dia 16/11/2020.	75
Figura 32- Perfis de temperatura da água em função da radiação solar monitoradas do dia 30/09/2020: (●) teórico e (▲) experimental.	76
Figura 33- Perfis de temperatura da água em função da radiação solar monitoradas do dia 06/10/2020: (●) teórico e (▲) experimental.	76
Figura 34- Perfis de temperatura da água em função da radiação solar monitoradas do dia 16/11/2020: (●) teórico e (▲) experimental.	77
Figura 35- Perfis de temperatura da placa em função da radiação solar monitoradas do dia 30/09/2020: (●) teórico e (▲) experimental.	78
Figura 36- Perfis de temperatura da placa em função da radiação solar monitoradas do dia 06/10/2020: (●) teórico e (▲) experimental.	78
Figura 37- Perfis de temperatura da placa em função da radiação solar monitoradas do dia 16/11/2020: (●) teórico e (▲) experimental.	79
Figura 38- Perfis de temperatura do vidro em função da radiação solar monitoradas do dia 30/09/2020: (●) teórico e (▲) experimental.	80
Figura 39- Perfis de temperatura do vidro em função da radiação solar monitoradas do dia 06/10/2020: (●) teórico e (▲) experimental.	80
Figura 40- Perfis de temperatura do vidro em função da radiação solar monitoradas do dia 16/11/2020: (●) teórico e (▲) experimental.	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação da água quanto à salinidade, de acordo com o CONAMA nº357	25
Tabela 2 - Parâmetros microbiológicos da água potável	26
Tabela 3 -Parâmetros físico-químicos da água potável	26
Tabela 4 - Comparação entres diferentes tipos de dessalizadores solares.....	36
Tabela 6 - Resultado da análise físico-química das amostras de água salobra e dessalinizada.....	81

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tecnologias de dessalinização mais relevantes.....	27
Quadro 2 - Parâmetros físico-químico analisados e equipamentos utilizados	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
CCT	Centro de Ciências e Tecnologia
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DCV	Destilação por Compressão de Vapor
DFM	Destilação Flash de Multiestágios
DME	Destilação de Múltiplo Efeito
DST	Destilação Solar Térmica
ED	Eletrodialise
LAPECA	Laboratório de Pesquisa em Ciências Ambientais
MCTIC	Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MS	Ministério da Saúde
OI	Osmose Inversa
ONU	Organização das Nações Unidas
PAD	Programa Água Doce
STD	Sólidos Totais Dissolvidos
UEPB	Universidade Estadual da Paraíba

LISTA DE SÍMBOLOS

Lista de Símbolos Gregos

Termo	Designação	Unidade
α	Absortividade	-
β	Coefficiente de expansão térmica	K^{-1}
ε	Emissividade	-
η	Eficiência	-
θ_i	Ângulo de incidência sobre uma superfície inclinada	°
θ_h	Ângulo de incidência sobre uma superfície horizontal	°
λ	Condutividade térmica	$W m^{-1} K^{-1}$
ρ_a	Radiação albedo	$W m^{-2}$
ρ_r	Refletância do refletor	-
ν	Viscosidade cinemática	$m^2 s^{-1}$
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$W m^{-2} K^{-4}$
g	Gravidade local	$m s^{-2}$

Lista de Símbolos Latinos

Termo	Designação	Unidade
A	Área	m^2
C	Calor específico	$J kg^{-1} K^{-1}$
h	Coefficiente de transferência de calor	$W m^{-2} K^{-1}$
H	Irradiação solar	$W h m^{-2}$
HB	Irradiação direta	$W h m^{-2}$
HD	Irradiação difusa	$W h m^{-2}$
G	Irradiância global	$W m^{-2}$
GB	Irradiância direta	$W m^{-2}$
GD	Irradiância difusa	$W m^{-2}$
h	Coefficiente de transferência de calor	$W m^{-2} K^{-1}$
$I(t)$	Intensidade de radiação	$W m^{-2}$

I_t	Radiação total absorvida	$W m^{-2}$
I_r	Radiação solar incidente no refletor	$W m^{-2}$
I_{rr}	Radiação direta refletida no refletor externo	$W m^{-2}$
K	Condutividade térmica do material	$W m^{-1} K^{-1}$
L	Calor latente da vaporização da água	$J kg^{-1}$
L_c	Comprimento característico	m
m	Massa	kg
\dot{m}	Taxa de condensação	$Kg m^{-2} h^{-1}$
q_{cond}	Taxa de transferência de calor por condução	W
q_{conv}	Taxa de transferência de calor por convecção	W
q_{evap}	Fluxo de calor evaporativo	W
q_{rad}	Taxa de transferência de calor por radiação	W
T	Temperatura	K
$\frac{dT}{dt}$	Gradiente de temperatura	$K s^{-1}$
$\frac{dT}{dx}$	Gradiente de temperatura em direção a x	$K m^{-1}$
$\Delta T'$	Variação de temperatura	K

Termo	Designação
a	Água salobra
amb_i	Ambiente interno
amb_e	Ambiente externo
$cond$	Condução
$conv$	Convecção
e, is	Isolante externo
$evap$	Evaporação
$irra$	Irradiação
is	Isolante
i, is	Isolante interno
$pabs$	Placa absorvedora
r	Refletor
rad	Radiação
v	Vidro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	18
2.1	Objetivo geral	18
2.2	Objetivos específicos	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1	Escassez de água	19
3.2	Energia solar e radiação eletromagnética	20
3.3	Dessalinização	24
3.3.1	Qualidade da água	25
3.3.2	Processos de dessalinização	27
3.4	Destilação solar	28
3.4.1	Componentes do dessalinizador solar	29
3.4.2	Fatores que afetam a produtividade	34
4	MODELAGEM MATEMÁTICA DO DESSALINIZADOR SOLAR	38
4.1	Transferência de calor no processo de dessalinização	38
4.2	Processos de Condução de calor	38
4.3	Processos de Convecção de calor	39
4.4	Processos de Radiação térmica	39
4.5	Evaporação	40
4.6	Análise térmica do dessalinizador solar	40
4.6.1	Balço de energia térmica do dessalinizador solar	41
4.6.2	Produtividade, produção e eficiência	52
4.6.3	Modelos térmicos do dessalinizador solar	53
4.6.4	Sistema computacional utilizado	53
5	MATERIAIS E MÉTODOS	54
5.1	Descrição do sistema	54
5.2	Construção do dessalinizador solar	55
5.3	Protótipo do dessalinizador solar	59
5.4	Procedimento dos ensaios e coleta de dados	60
5.5	Parâmetros para análise da água	60
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	62

6.1 Perfis de temperatura e de radiação	62
6.2 Produção de água dessalinizada	65
6.3 Produção de água em função da radiação solar	67
6.4 Eficiência térmica do dessalinizador solar	70
6.5 Coeficientes de transferência de calor no dessalinizador	73
6.6 Análise térmica do dessalinizador solar	75
6.7 Estudo da potabilidade da água	81
7 CONCLUSÕES	85
8 SUGESTÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS	86
REFERÊNCIAS	87
APÊNDICE	95

1 INTRODUÇÃO

As tecnologias de dessalinização de água assistida por energia renovável estão se tornando atraentes como uma solução para a crise da escassez de água doce. O crescimento populacional, a poluição e a contaminação das águas juntamente com desenvolvimento industrial e agrícola resultaram no aumento da taxa de consumo de água (MOLLAHOSSEINI *et al.*, 2019).

Segundo o Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento de Recursos Hídricos, a demanda mundial de água deverá aumentar 40% até 2030 e 55% até 2050, ano no qual se estima que mais de 40% da demanda global viverá em áreas de grave estresse hídrico (UNITED NATIONS, 2015).

No Brasil, a demanda de água aumentou 80% nas últimas duas décadas e a previsão é de que até 2030 a retirada deste recurso aumente 24% (ANA, 2019). Esse histórico do crescimento do uso da água está diretamente relacionado ao desenvolvimento econômico e ao processo de urbanização do País, porém o maior consumo de água deve-se à sua utilização na irrigação agrícola.

A oferta de água no semiárido brasileiro é uma das maiores dificuldades para os governos e para a sociedade, no que tange à escassez para a produção de alimentos e para o abastecimento. Essa região apresenta particularidades desfavoráveis quanto à disponibilidade de água, tais como: baixos índices de precipitação pluviométrica, período chuvoso irregular, sequência de anos com índices de precipitação abaixo da média histórica e elevados níveis de salinidade em grande parte dos solos e das águas.

Diante deste cenário, a exploração das águas subterrâneas tem se tornado uma alternativa para o abastecimento humano e animal. Porém, as águas comumente encontradas possuem altos índices de sais dissolvidos, ultrapassando os limites máximos permitidos deste parâmetro na água para o consumo humano, de acordo com o Anexo XX da Portaria de Consolidação Nº 05/2017 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017).

De maneira a combater este problema, sucessivas tecnologias têm sido utilizadas para a potabilização de águas salinas e salobras, tais como: osmose inversa, eletrodialise, destilação multiestágio, destilação multiefeito e a destilação solar.

A técnica de dessalinização por osmose inversa tem sido utilizada pelo Governo Federal, através do Programa Água Doce – PAD, com objetivo de fornecer água potável para populações rurais dispersas do semiárido. Para Marinho *et al.* (2015), esta técnica tem acarretado problemas ambientais, pois cerca de 50% da água retirada dos mananciais é descartada no processo de

dessalinização. Além disso, os custos de implantação e principalmente, de manutenção desses equipamentos são altos; águas com salinidade muito elevada inviabilizam a utilização do equipamento e os dessalinizadores muitas vezes ficam distantes das residências dos moradores da zona rural, dificultando o acesso à água.

A dessalinização é o processo com um dos maiores gastos de energia elétrica e/ou térmica na área de tratamento de água e, portanto, regiões que dispõem pequena disponibilidade de energia têm uma considerável dificuldade para implantar essas operações. Em contrapartida, as zonas descentralizadas, com pouca infraestrutura e carentes de água potável, como o semiárido nordestino, geralmente possuem alta incidência solar e acesso à água salobra com relativa facilidade. Essas características aparentam sugerir a aplicação de processos de dessalinização por energia solar, pois demonstram condições apropriadas para a implantação desses métodos alternativos que são barreiras para os tradicionais (CAMPOS *et al.*, 2019).

A técnica de dessalinização a partir da utilização de transferência de energia solar apresenta como uma alternativa interessante, uma vez que utiliza uma fonte de energia gratuita e abundante, de fácil operação, não geradora de poluição e eficaz no tratamento de águas, sendo assim uma solução integrada tanto para a escassez de água potável quanto para os problemas energéticos e ambientais também enfrentados.

Atualmente, o uso de dessalinizadores solar de bandeja plana é um processo adequado para a produção de água potável por ser fácil de fabricar, além de ter baixo custo comparado a outros processos. No entanto, esse tipo de dessalinizador solar produz um rendimento menor do que outros métodos de dessalinização. Por esta razão, técnicos e pesquisadores buscam aumentar a eficiência e o desempenho desse tipo de dispositivo. Uma das modificações em sua configuração consiste na substituição da bandeja plana por uma bandeja subdividida em patamares. Segundo Bouzaid *et al.* (2019), os dessalinizadores solar escalonados com defletores têm maior produtividade em comparação aos dessalinizadores tipo bandeja, porque a placa absorvedora é feita em várias etapas, oferecendo profundidade mínima de água salobra.

Neste contexto, o presente trabalho busca desenvolver um dessalinizador solar portátil ondular com refletores de radiação integrados, construído a partir de materiais de baixo custo e fácil aquisição, com avaliação dos benefícios socioambientais e de como esta tecnologia atenderá as necessidades hídricas de famílias que convivem com a escassez de água potável.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Projetar, construir e avaliar um dessalinizador solar portátil ondular com refletores de radiação integrados para potabilização de água salobra.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a eficiência térmica do dessalinizador solar proposto na produção de água potável.
- Calcular os coeficientes de transferência de calor no dessalinizador.
- Fazer uma análise térmica comparativa dos perfis de temperatura teóricos e experimentais para: vidro, a água e a placa absorvedora de calor.
- Analisar a qualidade físico-química da água antes e após o processo de dessalinização.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Escassez de água

A água é indiscutivelmente um dos recursos naturais mais importantes, visto que é um elemento essencial tanto na composição dos seres vivos, como para suas atividades vitais, além de estar diretamente relacionada com o desenvolvimento econômico de um País. Constitui-se também no solvente universal da maioria das substâncias (LIBÂNIO, 2010).

A escassez e a baixa qualidade dos recursos hídricos são um dos maiores problemas ambientais do mundo. De toda a água disponível na terra, 97% é água salgada e apenas 2-3% é a água doce, na qual apenas 0,5% estão ao alcance para uso. De acordo com o Relatório Mundial de Desenvolvimento da Água da Organização das Nações Unidas – ONU, 3,7 bilhões de pessoas estão atualmente afetadas pela escassez de água. Em 2050, esse número poderia aumentar para até 5,7 bilhões. Atualmente, 3,5 milhões de pessoas morrem anualmente como resultado do fornecimento inadequado de água e saneamento, reforçando o papel da água como um recurso global crítico (WWAP, 2018).

Essa escassez de água doce vem aumentando em função de diversos fatores como a poluição e contaminação das águas, o crescimento da demanda em algumas localizações em função de aglomerados urbanos, desenvolvimento industrial e agrícola. Esses fatores aliados aos custos econômicos elevados dos sistemas de tratamento contribuem para que o abastecimento de água enfrente dificuldades, sobretudo em regiões periféricas e áreas rurais (RIBEIRO *et al.*, 2018).

A disponibilidade de água para consumo humano depende das condições climáticas e do tipo dos reservatórios. Nos períodos de estiagem e nos anos de seca, a disponibilidade de água diminui drasticamente, comprometendo sua qualidade e fazendo com que o fornecimento desta ocorra por meio de carros-pipas; além da utilização de água de poços, que por muitas vezes ser salobra, necessita ser dessalinizada.

Para sanar a problemática da escassez de água, o Governo Federal, com a coordenação do Ministério do Meio Ambiente – MMA, em conjunto com instituições federais, estaduais e organizações da sociedade civil, formularam o Programa Água Doce, visando aumentar a oferta de água de boa qualidade para consumo humano (BRASIL, 2010). Esse programa promove a potabilização de águas salinas e salobras, oriundas da maioria dos poços no semiárido brasileiro, através de tecnologias para dessalinização da água.

3.2 Energia solar e radiação eletromagnética

A energia solar é uma das alternativas energéticas mais prometedoras para os problemas ambientais enfrentados no mundo. Processos como a composição da biomassa através da fotossíntese, ciclo hidrológico que abastece os rios, lagos, aquíferos, e contenção da temperatura do planeta terra, são capazes somente por meio da energia emitida pelo Sol. Essa energia expressa é a radiação solar, que é uma forma de transferência de energia advinda do Sol, por meio da propagação de ondas eletromagnéticas (ABNT, 2013).

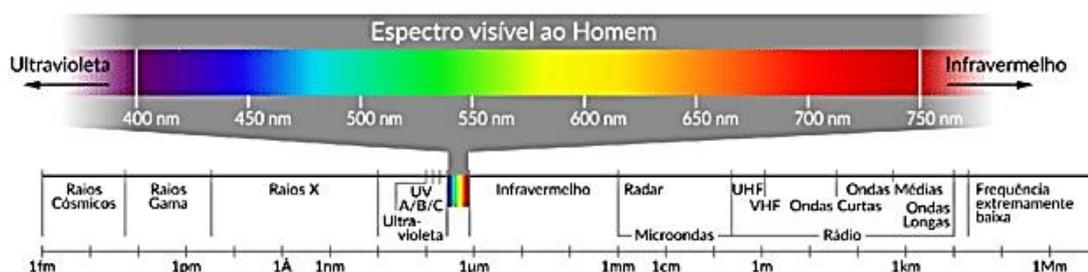
Desta maneira, os fenômenos físicos, químicos, físico-químicos e biológicos responsáveis pela manutenção da vida no sistema biosfera estão de certo modo ligados de maneira direta ou indireta com a quantidade de radiação solar incidente no planeta. De acordo com Duffie e Beckman (2013), o Sol é de fato uma fusão nuclear contínua entre átomos de Hidrogênio (representam cerca de 75% da composição do Sol) para formar os átomos de Hélio (cerca de 25% da composição solar). Desta forma, em seu núcleo há alterações similares às que ocorrem na explosão de uma bomba de hidrogênio, emitindo então radiação sob aspecto de luz e calor.

A radiação solar que alcança o topo da atmosfera terrestre decorre de uma região do Sol denominada fotosfera com temperatura superficial da ordem de 5.778 K (5.504,85 °C) e encontra-se distante da Terra por cerca de 149.598.106 km. Visto que a intensidade de energia radiante diminui no tamanho inverso do quadrado da distância da fonte, a temperatura da superfície da Terra é mais baixa do que a do Sol com uma temperatura média de cerca de 287 K (14 °C ou 57°F) (VIGNOLA, MICHALSKY e STTOFEL, 2012).

Emitindo uma taxa energética praticamente constante há bilhões de anos, o Sol é uma estrela de tamanho médio que libera atualmente uma potência da ordem de $3,86 \times 10^{26}$ W (PEREIRA *et al.*, 2017). Além disso, o Sol possui aproximadamente um diâmetro de $1,39 \times 10^6$ km com uma massa de 2×10^{30} kg. Está, em média, a $1,5 \times 10^8$ km de distância da Terra. Sua superfície atinge uma temperatura de cerca de 6.000 °C, podendo chegar à ordem de 40×10^6 °C no centro (DUFFIE e BECKMAN, 2013).

A energia do sol que chega à superfície terrestre é propagada em forma de ondas eletromagnéticas que se reproduzem no espaço à velocidade da luz, conforme ilustra a Figura 1. Segundo Pereira *et al.* (2017) cerca de 81% da energia que chega ao Sistema Terra/Atmosfera está em uma faixa de comprimentos de onda que vai do visível ao infravermelho. Essa energia proporciona todos os processos térmicos, dinâmicos e tecnológicos produzidos pela sociedade.

Figura 1 - Espectro da radiação solar incluindo um detalhamento da faixa visível humana



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

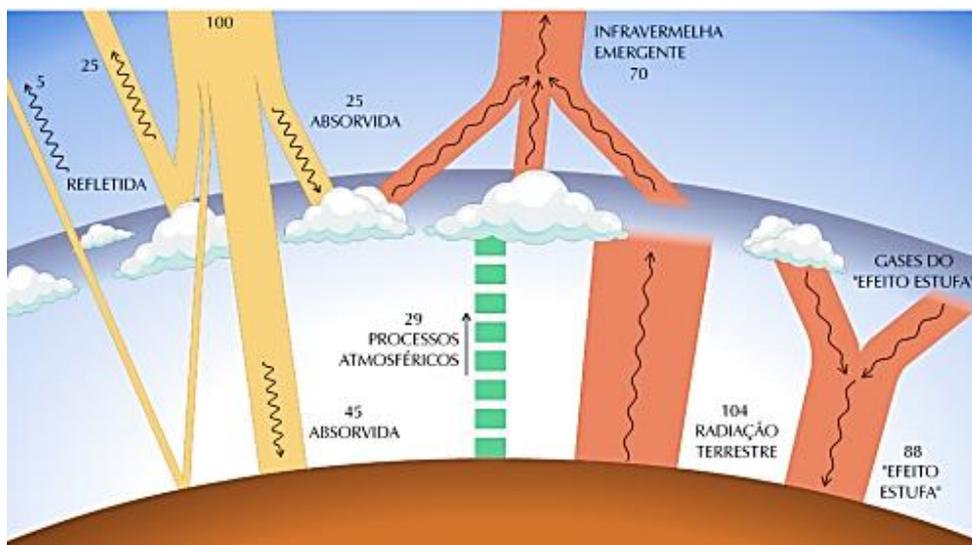
A disponibilidade do recurso energético solar e sua variação espacial e temporal estão inerentemente pertinentes a conceitos astronômicos. O primeiro dos aspectos a serem considerados é a posição relativa entre o sol e a terra. O fluxo de radiação solar (irradiância solar) oscila entre 1.325 W m^{-2} e 1.412 W m^{-2} . O valor médio da irradiância solar igual a 1.366 W m^{-2} é definido como a constante solar (NREL, 2017).

A irradiância solar é a taxa na qual a radiação solar incide em uma superfície, por unidade de área desta superfície, normalmente medida em watts por metro quadrado [W m^{-2}] (ABNT, 2013), ou seja, é a potência por unidade de área. Expressa pela letra G, sendo a irradiância global, GB a irradiância direta, GD a irradiância difusa e ρ_a o albedo.

Já a Irradiação solar é a irradiância solar integrada durante um intervalo de tempo, normalmente uma hora, medida em watt x hora por metro quadrado [W h m^{-2}] ou joules por metro quadrado [J m^{-2}] (ABNT, 2013). Desta forma, a irradiação solar é a designação dada à energia radiante emitida pelo Sol. É representada pela letra H, sendo a irradiação global, HB a irradiação direta e HD a irradiação difusa.

Ao atravessar a atmosfera, a radiação solar passa por diversas camadas até chegar a superfície, sofrendo atenuações em forma de processo físicos de espalhamento, quando a radiação encontra um corpo que reflete (espalha) seus raios, e de absorção, quando parte da radiação é absorvida nas superfícies que a recebem, conforme pode ser observado na Figura 2. Nuvens, moléculas de ozônio (O_3), oxigênio (O_2), vapor de água, dióxido de carbono (CO_2) e a superfície refletem cerca de 30% da radiação incidente no topo da atmosfera. Os 70% restantes são absorvidos produzindo aquecimento do sistema e causando evaporação de água (calor latente) ou convecção (calor sensível) (PEREIRA *et al.*, 2017).

Figura 2 - Representação esquemática da fração de radiação solar em diversos processos de interação com constituintes atmosféricos



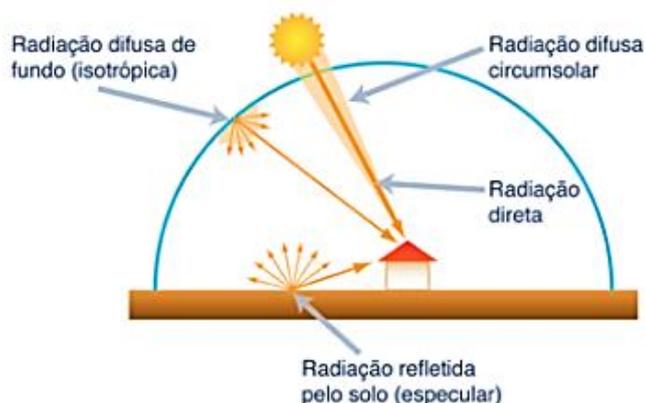
Fonte: Pereira *et al.* (2017).

A energia solar tem sua disponibilidade influenciada por diferentes fatores. Condições atmosféricas (como nebulosidade e umidade relativa), ciclos solares naturais (estações), tempo (hora do dia e dia do ano), clima e localização geográfica, podem ser citados como os principais fatores que afetam a variabilidade da radiação solar (AL-TAMEEMI e CHUKIN, 2016; LUIZ *et al.*, 2018).

Verifica-se então que a atmosfera terrestre procede como um filtro que bloqueia e dispersa parte da irradiância solar incidente. O seguimento de todos estes processos é a decomposição da radiação solar incidente acima de um receptor na superfície da Terra em componentes notadamente diferenciados.

A radiação direta vem diretamente da direção do disco solar, ou seja, atinge a superfície em uma linha reta do sol e produz sombras nítidas. Radiação difusa é aquela resultante de todas as direções e que chega à superfície após sofrer espalhamento pela superfície terrestre. A radiação refletida resulta da reflexão da radiação solar na superfície, dependendo, portanto, das propriedades ópticas da superfície. A irradiância completa que incide sobre uma superfície é o somatório destes (direta + difusa + albedo) e é denominada radiação global (MAGARREIRO, FREITAS e BRITO, 2016). A Figura 3 apresenta as três componentes citadas.

Figura 3 - Representação esquemática das componentes constituintes da radiação global incidente numa superfície



Fonte: Magarreiro, Freitas e Brito (2016).

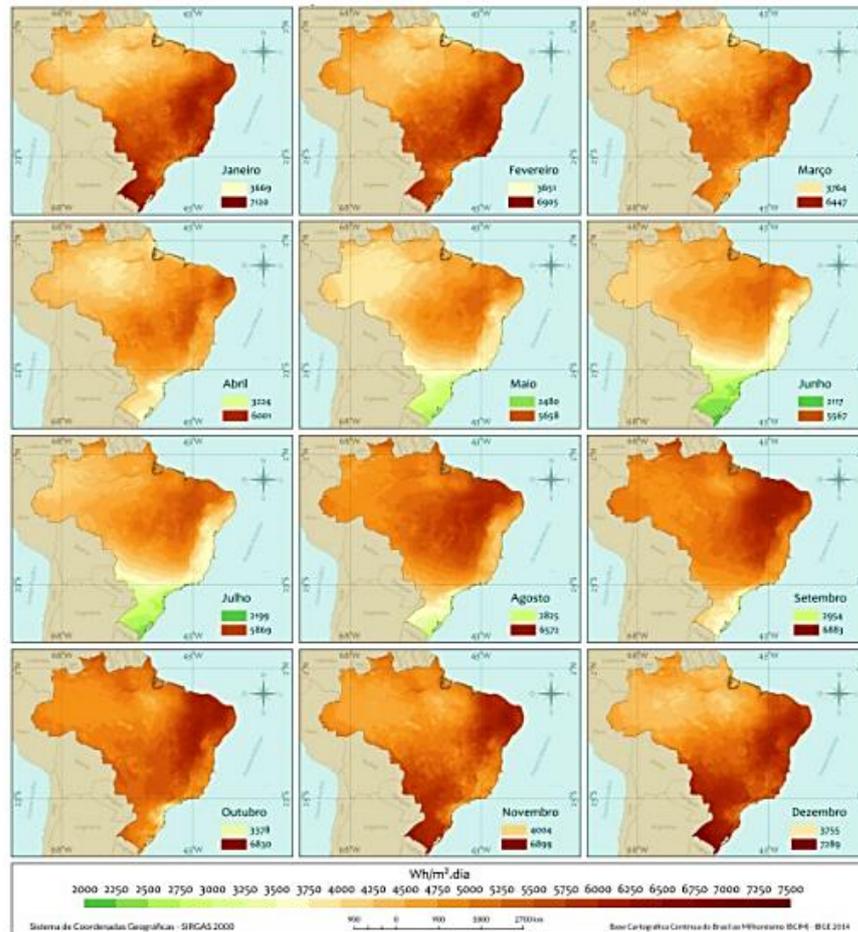
Segundo Pinho e Galdino (2014) a intensidade da radiação direta e difusa varia conforme a nebulosidade. Em um dia completamente sem nuvens no mínimo 20% da irradiância que incide sobre uma superfície de captação é difusa, enquanto em um dia completamente nublado 100% da irradiância que incide sobre uma superfície de captação é difusa.

O índice de irradiação solar do Brasil é um dos mais altos do mundo. Devido à sua localização, sendo a maior parte na região intertropical, apresenta enorme potencial para o rendimento de energia solar durante todo o ano. A irradiação média brasileira sob o plano horizontal é de $4,96 \text{ kW h m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, com média mínima de $4,53 \text{ kW h m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ na região sul do país, e média máxima de irradiação de $5,49 \text{ kW h m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ localizado na região nordeste (Pereira *et al.*, 2017).

A Figura 4 está apresentada a distribuição de radiação solar mensal em todas as regiões do país. Pode-se observar que a região nordeste se destaca como aquela de maior incidência de radiação solar nos meses de agosto a fevereiro. Na região há utilização dessa energia principalmente em processos para dessalinização solar para obtenção de água potável.

Na região do Semiárido brasileiro, a população passa de 26,62 milhões de pessoas; desse total, mais de 38% delas vivem na zona rural (IBGE, 2010). As secas periódicas e prolongadas, a escassez anual de água (durante o período de estiagem) e a falta de gestão de água comprometem o direito a um suprimento adequado de água a essa população. O Estado da Paraíba, por exemplo, com uma população de 3,9 milhões de habitantes (com 75,4% residindo em áreas urbanas e 24,6%, em zonas rurais), enfrenta problemas relacionados ao acesso permanente à água potável (AZEVEDO, 2015).

Figura 4 - Total da irradiação solar global horizontal – médias mensais



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

Para Toniazzo *et al.* (2017), a energia radiada pelo sol é capaz de aquecer diretamente os líquidos. Essa fonte de energia expressa uma enorme vantagem ao ser considerada renovável, já que se acredita ser uma fonte inesgotável. Por outro lado, essa fonte é dependente do clima e ainda apresenta ter alto custo de investimento. No Brasil, em função de sua localização geográfica, indica-se ter um grande potencial para a captação e aproveitamento dessa energia.

3.3 Dessalinização

A dessalinização é o processo de remoção de sais e minerais da água para produzir água que atenda aos requisitos de qualidade (salinidade) de diferentes usos humanos (DARRE e TOOR, 2018). É uma técnica muito utilizada em regiões onde a água doce é escassa ou de difícil acesso.

3.3.1 Qualidade da água

A qualidade da água doce é indispensável para a realização das atividades humanas como o consumo e o abastecimento público; a agricultura; a indústria; e a geração de energia elétrica. No entanto, a qualidade necessária para cada tipo de finalidade tem critérios de avaliação diferentes. A qualidade da água não se refere apenas ao seu estado de pureza, mas também às suas características físicas, químicas e biológicas.

A legislação brasileira vigente, o Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA nº 357 de 2005, classifica como água doce, aquela que possui salinidade igual ou inferior a 0,5‰. Na Tabela 1 ilustra resumidamente a classificação das águas quanto à salinidade à defesa de seus níveis de qualidade e para assegurar seus usos preponderantes (BRASIL, 2005).

Tabela 1 – Classificação da água quanto à salinidade, de acordo com o CONAMA nº357

Salinidade	Classificação da água
Menor ou igual 0,5‰	Doce
Maior que 0,5‰ e menor que 30‰	Salobra
Maior ou igual a 30‰	Salina

Fonte: Brasil (2005).

A água subterrânea encontrada nos poços geralmente é salobra ou salina devido à formação da rocha cristalina na maior parte do semiárido brasileiro, correspondendo cerca de 80% do território (SILVA e SHARQAWY, 2020). Essa característica parece sugerir a utilização de processos de dessalinização via energia solar, pois apresentam maior sustentabilidade a essa operação, por utilizar uma energia limpa e renovável para a potabilização da água.

De acordo com o Anexo XX da Portaria de Consolidação nº 5 do Ministério da Saúde, de 03/10/2017, define-se padrão de potabilidade como conjunto de valores permitidos como parâmetro da qualidade da água para consumo humano (BRASIL, 2017). Essa legislação dispõe sobre as técnicas de manejo e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, condição que incentivam o interesse para transformar tal água para usos potáveis (MIORANDO, BRIÃO e GIRARDELLI, 2017).

Água potável é aquela que não oferece riscos à saúde e que atende ao padrão de potabilidade previsto na Portaria nº 2914 de 03/10/2017 do Ministério da Saúde – MS (BRASIL, 2017). Nas Tabelas 2 e 3 são fornecidos alguns dos parâmetros mais usuais, microbiológicos, físicos e químicos, da água potável.

Tabela 2 - Parâmetros microbiológicos da água potável

Parâmetros	Valores de Referência (VMP/mL)
Bactérias do grupo Coliformes Totais	Zero
Bactérias do Grupo de Origem Fecal	Zero

Fonte: Brasil, 2017.

Tabela 3 -Parâmetros físico-químicos da água potável

Parâmetros	Valores de Referência
Turbidez (NTU)	5,0 máx
Cor Aparente (uH)	15 máx
pH	6,5 – 9,5
Sólidos Totais Dissolvidos (mg L ⁻¹)	1000,0 máx
Dureza Total (mg CaCO ₃ L ⁻¹)	500,0 máx
Cloreto (mg Cl ⁻ L ⁻¹)	250,0 máx
Sódio (mg L ⁻¹)	200,0 máx

Fonte: Brasil, 2017.

Com relação aos parâmetros de aceitação para o consumo humano, a água potável destinada à ingestão, preparação e produção de alimentos e à higiene pessoal, independentemente de sua origem, não pode possuir gosto e odor, e deve conter cor e turbidez dentro dos limites aceitáveis. Os parâmetros químicos estabelecem que a água não deve possuir substâncias nocivas ou tóxicas além dos limites preestabelecidos.

Por meio da Portaria n° 888 do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações – MCTIC, de 07/03/2019, busca de soluções tecnológicas de dessalinização e purificação de águas salobras e salinas surgem para que as populações do Semiárido Brasileiro possam conviver com as severas condições de vida impostas pela seca na região (BRASIL, 2019a).

Segundo a portaria, embora haja água disponível em grande parte do Semiárido Brasileiro, em maior porção a água está inapropriada para o consumo humano, e encontra limitações para aplicação em agropecuária familiar, dentre outros usos, por se tratar de água salobra. Assim, o MCTIC criará um banco de dados sobre tecnologias e métodos para dessalinização de água, que servirá para identificar todas as soluções tecnológicas disponíveis

para dessalinização e purificação de água, e aplicá-las na gestão de políticas públicas correlatas ao acesso à água potável, abastecimento e saneamento (BRASIL, 2019a).

3.3.2 Processos de dessalinização

A dessalinização da água é uma técnica que consiste em tratar a água salobra ou salgada do mar, removendo os sais e transformando-os em águas adequadas para abastecimento de populações ou irrigação. Essa técnica é usada para superar os problemas de déficit de suprimento humano (FONSECA *et al.*, 2020).

São conhecidas e estudadas diversas formas de dessalinização de água. Normalmente, esses processos são classificados de acordo com o tipo de fonte de energia utilizada e pela utilização ou não de membranas especiais. No Quadro 1 são apresentados inúmeros processos de dessalinização.

Quadro 1 - Tecnologias de dessalinização mais relevantes

Processos por membranas	Processos térmicos
<p>Osmose Inversa (OI)</p> <p>Eletrodiálise (ED)</p>	<p>Destilação Flash de Multiestágios – DFM</p> <p>Destilação de Múltiplo Efeito – DME</p> <p>Destilação por Compressão de Vapor – DCV</p> <p>Congelamento à vácuo</p> <p>Destilação Solar Térmica – DST</p>

Fonte: Autor, 2020.

A tecnologia de dessalinização é o processo que se aproveita das diferentes volatilidades dos constituintes da mistura, havendo simultânea transferência de massa do estado líquido para o vapor, através da vaporização e, vice-versa, por meio da condensação (AYBAR, 2006; WANG *et al.*, 2011; FOUST *et al.*, 2013). Exercem essa operação unitária os dessalinizadores: Flash de Múltiplos Estágios (FME), Multi Efeito (ME) e Compressão de Vapor (CV), amplamente utilizados e recomendados para atender grandes demandas de água potável (ZAMEN *et al.*, 2014; BATAINEH, 2016).

Diferentemente da destilação, a separação por membrana não envolve mudanças de fase. Geralmente são empregadas membranas semipermeáveis em dessalinizadores de Osmose Inversa (OI) ou Eletrodiálise (ED) (WANG *et al.*, 2011; ZAMEN *et al.*, 2014). Ambos os equipamentos são comercialmente recomendados para atender médios e grandes volumes de água potável.

Apesar de eficientes, as tecnologias para a dessalinização de grandes volumes de água demandam, indispensavelmente, consideráveis investimentos financeiros para a implantação, operação e manutenção das plantas industriais. Para as pequenas demandas requeridas por populações de regiões remotas podem ser atendidas por equipamentos mais simples e de operação e manutenção com baixo custo (ZAMEN *et al.*, 2014). Esses beneficiamentos são reunidos pelos destiladores ou dessalinizadores solares.

3.4 Destilação solar

A destilação solar consiste na remoção de sais dissolvidos na água a níveis ou concentrações que possibilitam a sua utilização tanto para o consumo humano como para outras atividades em que é necessária água doce (CLAYTON, 2006).

A destilação solar é um processo para a evaporação e condensação da água e é semelhante a um ciclo hidrológico natural. Um destilador solar usa a radiação natural livre para purificar a água contaminada em água dessalinizada, empregando o processo de transferência de energia. Essa radiação solar incidente é considerada o principal parâmetro ambiental que afeta a taxa de produtividade de um sistema de destilação solar (PRAKASH e VELMURUGAN, 2015).

A destilação solar pode ser dividida como direta ou passiva e indireta ou ativa. Na forma passiva, o sistema recebe energia proveniente apenas do sol e já no caso da ativa, o sistema recebe além da radiação solar, uma parcela extra de calor advinda de outra fonte de energia. Sabe-se que, em relação à produtividade, a destilação solar ativa possui vantagens com relação à passiva, pois permite uma variação maior de temperatura, atuando diretamente na lâmina d'água da bandeja. Porém do ponto de vista ambiental, a destilação passiva é mais favorável visto que utiliza apenas uma fonte de energia limpa, o sol (TIWARI e TIWARI, 2007).

A destilação solar, embora utilize calor cedido gratuitamente pela natureza, requer amplas áreas de terreno para exposição da água ao sol, razão pela qual se restringe à produção de reduzidos volumes de água doce (ALVES, 2007).

É consenso entre alguns autores que a destilação solar se destaca entre as tecnologias existentes, por ser a que mais se adequa, técnica e economicamente, a regiões como a do semiárido brasileiro, caracterizada pelo baixo desenvolvimento, dificuldade de acesso à água potável, mesmo com a existência de reservas subterrâneas salobras, devido ao tipo de solo e clima.

A literatura tem apontado um futuro limitado para a destilação solar para aplicações em grande escala. Dentre as principais dificuldades apontadas, está a necessidade de grandes áreas

e os custos de instalação. No entanto, em áreas isoladas, onde o combustível é caro, a terra é barata, e a incidência solar é elevada, essa aplicação se torna especialmente promissora. Adicionalmente, sistemas para abastecimento humano em pequena escala são extremamente simples de se operar, e poderiam ter seu uso bastante difundido em partes subdesenvolvidas do mundo (MILLER, 2003).

3.4.1 Componentes do dessalinizador solar

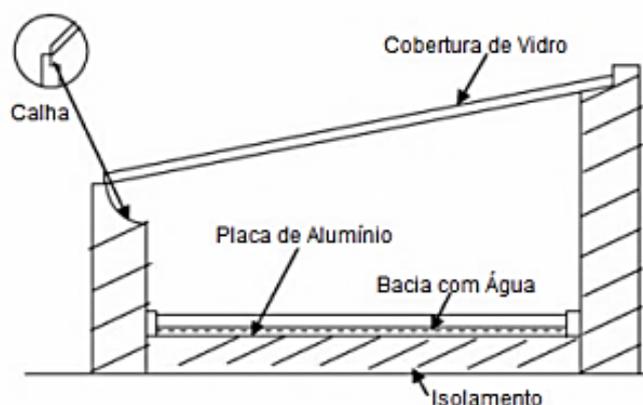
O sucesso no projeto de desenvolvimento de um dessalinizador solar está diretamente relacionando com a estratégia de construção, abrangendo o conhecimento prático das características térmicas e de operação do equipamento. É de fundamental importância conhecer e identificar os possíveis materiais que podem compor cada componente do sistema, visto que a escolha deles irá afetar diretamente nos resultados obtidos e na qualidade do projeto final.

Para a construção de dessalinizadores solares é usada uma variedade de materiais, desde os mais baratos e de baixa qualidade até aos mais caros e eficazes (melhorando o desempenho e a durabilidade). Como os dessalinizadores solares são destinados às pequenas comunidades formadas por indivíduos com baixo poder de compra, o objetivo é construir um sistema usando materiais baratos e resistentes. De acordo com Belessiotis, Kalogirou e Delyannis (2016) as características gerais dos materiais de construção do dessalinizador devem ser:

- Fácil montagem, no local a instalar.
- Custo baixo e de fácil manutenção/reparação. O uso de materiais de baixa qualidade deve ser evitado, sendo que reduz o tempo de vida do equipamento.
- Resistir às condições meteorológicas como ventos fortes, granizo e tempestades de areia.
- Resistentes à corrosão devido ao contato com a solução salina ou com o destilado.
- Se existirem períodos de ocorrência de chuva na região, deve-se instalar calhas de captação da água da chuva, aumentando assim a produção.

O esquema do desempenho de um dessalinizador solar é apresentado na Figura 5. Os componentes básicos são: uma bandeja, onde é alimentada a água; uma placa de alumínio pintada de cor preta que tem por objetivo aumentar a absorção de energia incidida na bandeja; uma cobertura de vidro por onde a radiação solar entra no dessalinizador, e por onde a água condensa e escorre para as canaletas; e as canaletas que são calhas que permitem recolher a água da base da cobertura para o reservatório de armazenamento (VARUN, 2010).

Figura 5 - Esquema de um dessalinizador solar



Fonte: Adaptado de Varun (2010).

Dessa forma, deve-se escolher a matéria-prima mais adequada, visando atingir alguns parâmetros, tais como, a busca por uma maior eficiência, maior custo-benefício, boa durabilidade e obtenção fácil na região de implementação do dessalinizador solar.

3.4.1.1 Bandeja

A bandeja é a base do dessalinizador, contendo no seu interior a solução a destilar. Podem apresentar profundidade que varia de 10-20 mm (rasas) e de 100 mm ou mais (profundas) e a largura das bandejas varia de 1 a 2 m. A profundidade da bandeja é um parâmetro importante para a produtividade dos dessalinizadores, pois a taxa de evaporação depende da área de exposição da água na bacia. Em bandejas mais profundas há uma massa de água maior promovendo um aumento da capacidade térmica. Com isso, há uma maior energia armazenada no interior da bandeja. Tal fato é o responsável pela destilação noturna quando a incidência de raios solares é nula. Em contrapartida, em bandejas mais rasas a capacidade térmica é menor, a temperatura é maior e a taxa de evaporação maior. Assim, bandejas com profundidades menores têm uma produção maior diurna e uma maior interferência da radiação solar na produção, visto que qualquer variação na radiação modificará a temperatura da água (AL-HAYEK e BRADAN, 2004; TRIPATHI, 2006).

Em geral a bandeja é pintada com uma tinta preta ou com um material impermeável preto, a fim de favorecer a absorção da maior quantidade possível de radiação solar e transformá-la em calor (AL-HAYEK e BRADAN, 2004). Em alguns casos, a superfície negra absorvedora e a bandeja funcionam como um único elemento. Qualquer material de cor preta pode ser usado na construção do fundo da bacia, desde que tenha as seguintes propriedades (SAMME *et al.*, 2007; BELESSIOTIS, KALOGIROU e DELYANNIS, 2016):

- Deve ser à prova de água.
- Deve resistir a altas temperaturas operacionais (≈ 90 °C), sem se deteriorar.
- Deve ter alto coeficiente de absorção da radiação solar ($\geq 0,95$).
- Não deve ser tóxico.
- A superfície deve ser lisa, de modo a não proporcionar superfícies ideais para a deposição das partículas sólidas, e tornar mais fácil o processo de limpeza do equipamento.

3.4.1.2 Cobertura

O material mais utilizado para a cobertura dos dessalinizadores é o vidro por possuir características que favorecem a eficiência da cobertura, contudo materiais poliméricos laminados como polietileno de alta densidade, polipropileno e policarbonato também podem ser utilizados.

Os materiais em vidro têm maior tempo de vida que outros materiais, sendo que uma desvantagem é serem quebráveis. Geralmente, vidro temperado ou comum, fino e com baixo teor de ferro ($0,01\%$ Fe_2O_3) é o mais adequado (BELESSIOTIS, KALOGIROU e DELYANNIS, 2016). Para Pereira *et al.* (2007), o material da cobertura deve resistir às altas exposições ultravioletas e a pressão gerada no interior do dessalinizador, a fim de evitar uma expansão e destruir a vedação. Deve também resistir às constantes trocas térmicas e às intempéries. O ideal é ter uma superfície com baixo índice de rugosidade, a fim de evitar a formação de gotas localizadas, bem como facilitar a formação de uma lâmina do destilado que possa fluir de forma contínua e sem dificuldades.

No estudo de Bhardwaj, Kortenaar e Mudde (2013) sobre a influência das superfícies de condensação, concluíram que o ângulo de contato é o parâmetro mais significativo para a seleção do material da superfície de condensação dentro de um dessalinizador solar de água e que o fenômeno mais importante é a reflexão da irradiação solar a partir da superfície. Em condições de umidade, o vidro com ângulo de contato baixo (hidrofílico) proporciona a passagem de mais irradiação solar do que materiais como o PET com ângulos de contato elevados (hidrofóbicos). Assim os materiais hidrofílicos são capazes de produzir maior quantidade de água do que os hidrofóbicos quando usados como superfície de condensação dentro de um dessalinizador solar.

Segundo Singh e Tiwari (2004), quando os raios solares incidem perpendicularmente à superfície da cobertura há um crescimento no rendimento do dessalinizador. Logo, o ideal é

que o ângulo de inclinação da cobertura em relação à superfície tenha o equivalente valor da latitude local, visto que dessa forma os raios solares incidirão de aspecto normal à superfície durante todo o ano. A inclinação também deve colaborar para o escoamento do condensado para as canaletas.

3.4.1.3 Isolamento térmico

Tem como finalidade conter perdas de calor entre a bandeja com água salobra e o ambiente, pois uma isolação muito baixa pode causar queda de temperatura da água e conseqüentemente diminuição na eficiência do sistema.

O material isolante é colocado no fundo da bandeja, diminuindo assim as perdas de calor para o ambiente exterior. As paredes laterais da bandeja devem ser também isoladas. Para o isolamento térmico pode-se recorrer a qualquer material, desde que atenda às seguintes características (BELESSIOTIS, KALOGIROU e DELYANNIS, 2016):

- Ser à prova de água.
- De fácil aplicabilidade e remoção (se necessário).
- Leve e resistente.
- Baixa condutibilidade térmica.
- Resistente a altas temperaturas ($\approx 90^{\circ}\text{C}$), sem se deformar.
- Fácil encaixe no fundo e nas paredes do destilador.

3.4.1.4 Estrutura de apoio

A estrutura de apoio deve ser de preferência do mesmo material que a bandeja e deve proporcionar um encaixe perfeito com a cobertura. O material de construção deve resistir às condições extremas do clima, como ventos fortes ou tempestades de areia, além de ter alta resistência aos efeitos da atmosfera e da solução salina. Normalmente os materiais empregados na construção de apoio são: alumínio, metal galvanizado, tijolos, blocos de cimento e madeira, sendo este último o tempo de vida relativamente curto devido à exposição às intempéries.

3.4.1.5 Sistema de vedação

São essenciais para fixar o vidro utilizado ao restante da estrutura, suportar altas temperaturas, manter o ar quente dentro do dessalinizador, evitando perdas de calor, e evitar a entrada de insetos, poeira e água da chuva. Dos materiais de vedação, o mais adotado e de melhor eficiência é o silicone.

O material vedante tem como finalidade garantir a estanqueidade do dessalinizador, e deve ter as seguintes características (BELESSIOTIS, KALOGIROU e DELYANNIS, 2016):

- Não deve ser afetado pela exposição ao clima ou pela exposição à água, na face interna.
- Deve ser facilmente aplicável sob condições extremas do local, pois, é provável que seja usado durante a ereção da instalação.
- Deve ser de fácil aplicação e de fácil substituição, para efeitos de manutenção.
- Deve ser de baixa absorção da radiação solar.
- Deve ser à prova de água.
- Não deve ser tóxico.
- Não deve ter impactos no odor e no sabor da água dessalinizada.

3.4.1.6 Canaleta de coleta

As calhas de coleta encontram-se geralmente nas laterais do dessalinizador, normalmente na base da cobertura de vidro, e tem como objetivo a coleta do líquido destilado e seu envio para um recipiente de coleta.

O canal de coleta do condensado deve ter revestimento de proteção porque a água dessalinizada ou a água da chuva é corrosiva. Os materiais normalmente empregados na construção das calhas de recolha do destilado são (BELESSIOTIS, KALOGIROU e DELYANNIS, 2016):

- Aço inoxidável.
- Liga de alumínio.
- Ferro galvanizado.
- Plástico.
- Outros materiais com revestimento de borracha butílica ou de polietileno preto.

3.4.1.7 Bomba de recirculação, tubulação e acessórios

Na situação de o regime de operação ser contínuo, existe a necessidade de efetuar a instalação de tubulações para a alimentação da solução salina e para a extração do concentrado, além disso, de uma bomba de circulação que permita a introdução da solução no dessalinizador. As tubulações e os respectivos acessórios devem ser de preferência do mesmo material. Os materiais normalmente usados são plásticos como PVC, polietileno preto ou qualquer outro plástico que não se degrade facilmente quando exposto aos raios solares e a altas temperaturas

de trabalho. Tubulações metálicas podem ser também usadas, mas apenas para o circuito de alimentação da solução salina (BELESSIOTIS, KALOGIROU e DELYANNIS, 2016).

3.4.2 Fatores que afetam a produtividade

A produtividade e o desempenho do dessalinizador solar dependem de parâmetros como intensidade da radiação solar, diferença de temperatura entre a placa de cobertura e a água, profundidade da água da bandeja, inclinação da placa de cobertura e espessura do vidro e velocidade do vento (VELMURUGAN e SRITHAR, 2011).

Badran, Abbu-Khader e Mazen (2007) realizaram uma análise experimental e teórica em um dessalinizador solar de única inclinação com base na intensidade da radiação solar. Concluíram que a produtividade e eficiência do dessalinizador solar melhoram com aumento de intensidade da radiação. Em particular, a eficiência máxima é obtida no início da tarde, pois a intensidade da radiação solar é alta durante este período. Almuhanha (2014) também constatou que a taxa de produção dessalinizada aumenta à medida que a intensidade da radiação solar aumenta.

A diferença de temperatura da placa de vidro e da água foi objeto de estudo de Al-Garni (2012), onde realizaram uma análise experimental em um dessalinizador solar de dupla inclinação usando um aquecedor de água na base para aumentar artificialmente a temperatura da água. Concluiu que a produtividade é aumentada para 370% devido ao aumento da diferença de temperatura.

A taxa de evaporação da água no dessalinizador solar é diretamente proporcional à área de exposição à água. Como resultado, o aumento da área de superfície da água na bandeja melhora a produção de energia solar (ALAUDEEN *et al.*, 2014). A profundidade da água da bandeja tem efeito significativo sobre a produtividade da energia solar. Rajamanickam e Ragupathy (2012) realizaram experimentos em um dessalinizador solar de dupla inclinação em diferentes profundidades de água com 1 cm, 2,5 cm, 5 cm e 7,5 cm, e obtiveram uma produção máxima de destilado de $3,071 \text{ L m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ com uma lâmina de 1 cm de profundidade de água. Com isso, a produtividade do dessalinizador aumenta com a diminuição da profundidade da água.

O material e a espessura do isolamento são significativos em um dessalinizador solar. No estudo de Al-Hassan e Algarni (2013) usaram fibra de vidro de 5 cm de espessura como isolamento cercado por uma moldura de madeira.

Singh e Tiwari (2004) relataram que o rendimento do dessalinizador solar atingia um valor máximo quando a inclinação da cobertura do vidro de condensação era igual à latitude do

local. A transferência de calor através da cobertura de vidro melhorou quando a espessura diminuiu e a condutividade térmica aumentou. Identificaram também que a energia solar aumenta em 16,5% com uma cobertura de 3 mm de espessura de vidro, se comparado com a espessura de vidro de 6 mm.

Os parâmetros como intensidade da radiação solar e velocidade do vento não são controláveis, pois são parâmetros meteorológicos. Outros parâmetros incluindo a área do coletor, profundidade e isolamento da água da bandeja são controláveis e, portanto, devem ser projetados de forma eficaz para melhorar a produtividade (SELVARAJ e NATARAJAN, 2018).

Com o objetivo de maximizar a produtividade do destilador solar, os processos de transferência de calor e massa da bacia para a cobertura, e da cobertura para o exterior devem ser otimizados. A variação destes processos de transferência de calor depende de vários fatores como (DUFFIE e BECKMAN, 2013; SELVARAJ e NATARAJAN, 2018):

- A variação da intensidade de radiação solar.
- A variação da temperatura e da umidade ao longo do dia.
- A latitude e a longitude do local.
- A velocidade do ar incidente na superfície do dessalinizador.
- A espessura da cobertura.
- A orientação e a inclinação da cobertura.
- A profundidade da água na bandeja.
- As características dos materiais constituintes do dessalinizador.
- A utilização de refletores aumenta o fluxo de calor da radiação melhorando o rendimento.

Na Tabela 4 está apresentado um panorama de resultados alcançados com o emprego de dessalinizadores solares.

Tabela 4 - Comparação entres diferentes tipos de dessalinizadores solares

Tipo	Autores	Especificações	Resultados Experimentais	Conclusão
Dessalinizador solar acoplado a tubos coletores	Tiwari <i>et al.</i> (2007)	Área: 1 m ² Massa de água: 50 kg Área tubo coletor: 2m ² Fluxo: 0,035 kg·s ⁻¹	Produtividade: 4,0 L m ⁻² dia ⁻¹ Eficiência térmica: 17%	Opção mais viável para aquecimento e destilação simultânea de água
Dessalinizador solar com superfície côncava	Kabeel (2009)	Superfície da bacia côncava com quatro lados em forma de pirâmide	Produtividade: 0,5 L m ⁻² h ⁻¹ após o meio dia Eficiência térmica: 30%	O sistema apresentou um custo de R\$0.1225 por litro destilado
Dessalinizador solar tubular	Ahsan <i>et al.</i> (2012)	L = 0,52 m, d = 0,13 m e espessura 0,15 mm	Produtividade: 5,0 L m ⁻² dia ⁻¹	Apresentou melhor produtividade comparado com o dessalinizador convencional
Dessalinizador solar escolonado com refletores externos	Maiti <i>et al.</i> (2014)	Área: 1 m ²	Produtividade: 5,07 L m ⁻² dia ⁻¹	A utilização dos refletores aumentou a temperatura do sistema
Dessalinizador solar tubular acoplado ao concentrador parabólico e ao tanque tubular	Al-Nimr e Dahdolan (2015)	Área: 1 m ² L = 1 m d = 48,3 mm	Produtividade: 3,0 L m ⁻² dia ⁻¹ Eficiência térmica máxima: 33,8%	De acordo com a modelagem matemática, esse sistema tem melhor resultado com velocidade de fluxo de ar de 2 m s ⁻¹
Dessalinizador solar com bandeja modificada com aletas	El-Naggar <i>et al.</i> (2016)	Área: 1 m ²	Produtividade: 5,0 L m ⁻² dia ⁻¹	Apresentou melhorias na transferência de calor comparado ao sistema convencional
Dessalinizador solar em forma de pirâmide	Vala e Kanabar (2017)	0.82 m × 0.81 m × 0.75 me testado com diferentes profundidades de água (2 a 4 cm)	Produtividade: 48% maior do que a convencional	Tem a forma geométrica apropriada e aumenta a produção de água fresca comparado à outros destiladores
Dessalinizador solar pirâmide com o dessalinizador inclinado com defletores integrados	Kumar <i>et al.</i> (2017)	Área: 1 m ² Massa de água: 20 kg	Produtividade: 7,05 L m ⁻² dia ⁻¹	A estrutura com defletores aumentou a área de transferência de calor da energia solar, melhorando a produtividade
Dessalinizador solar de dupla inclinação integrado com materiais absorventes	Pal <i>et al.</i> (2017)	Área: 2 m ²	Produtividade: 9,0 L m ⁻² dia ⁻¹	A mecha de algodão preto e bastão aumentou a produção de água doce
Dessalinizador solar cascata com defletores	Bouzaid <i>et al.</i> (2019)	Cobertura de vidro inclinado com ângulo de 30°	Produtividade: 1,6 L m ⁻² h ⁻¹ de 900 W m ⁻² intensidade de energia solar	O desempenho térmico do destilador pode ser melhorado com a nova modificação

Fonte: Autor, 2020.

Existem diferentes configurações de dessalinizadores solares, sendo que a maior diferença entre eles reside no projeto da cobertura, que pode ser em vidro ou em plástico, de inclinação simples ou de dupla inclinação. Além disso, refletores são utilizados para aumentar a temperatura, consequentemente manter maior concentração de energia no sistema para melhorar a produtividade do dessalinizador solar.

Outra modificação na configuração consiste na substituição da bandeja plana por uma bandeja subdividida em patamares. Segundo Bouzaid *et al.* (2019) apresentado na Tabela 4, os dessalinizadores solares escalonados com defletores têm maior produtividade em comparação com os dessalinizadores tipo bandeja, porque a placa absorvedora é feita em várias etapas, oferecendo profundidade mínima de água salgada.

Pesquisas comprovam que a produtividade do dessalinizador solar tipo cascata é aproximadamente 57% mais elevada em relação aos destiladores solares simples (KABEEL *et al.*, 2012). Isso ocorre em virtude de temperaturas mais elevadas serem atingidas em seu interior, por haver maior área superficial para absorção e transferência de calor, além de subdivisão da bandeja em volumes de controle menores acarretar na diminuição do gasto energético para aquecimento da água (KABEEL *et al.*, 2015).

A produtividade máxima do dessalinizador tipo cascata é alcançada para uma profundidade de salmoura nas bandejas de 0,5 cm, largura de 12 cm e comprimento da bandeja de 200 cm, distância entre a superfície da água e a base da bandeja superior de 10 cm (KABEEL *et al.*, 2012).

Conforme estudos de Bouzaid *et al.* (2019), o dessalinizador tipo escalonado com defletores a produtividade pode atingir $1,6 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ de 900 W m^{-2} de intensidade de energia solar, valor interessante de produtividade em comparação com outros resultados de dessalinizadores solares.

4 MODELAGEM MATEMÁTICA DO DESSALINIZADOR SOLAR

Para que possam ser calculadas as diversas temperaturas presentes no dessalinizador solar proposto, faz-se necessária a resolução de algumas equações de balanço de energia, e em virtude de uma maior complexidade matemática, foi realizada uma modelagem matemática a partir de dados experimentais presentes nesta pesquisa.

4.1 Transferência de calor no processo de dessalinização

Os mecanismos internos e externos da dessalinização solar são originados da transferência de calor, em forma de radiação, convecção e condução, que são processos em que não há mudança de fase. Também existem outros fenômenos importantes neste processo, como a evaporação e a condensação, que são processos em que há mudança de fase (INCROPERA *et al.*, 2014). A relação entre estas três formas de transferência de calor estão extremamente envolvidas, possibilitando seu transporte pela vaporização, considerado o mais importante no dessalinizador solar (SAETTONE *et al.*, 2017).

4.2 Processos de Condução de calor

A condução é a transferência de calor de molécula a molécula através de um corpo, podendo ser considerada como transporte molecular de energia. O fluxo se dá do mais quente ao mais frio, até que estes cheguem ao equilíbrio (BIRD, STEWART e LIGHTFOOT, 2010).

De acordo com Incropera *et al.* (2014), a quantificação da transferência de calor por condução é feita através da equação conhecida como “Lei de Fourier”. Ela estabelece que a taxa de calor transferido, é diretamente proporcional ao gradiente de temperatura entre duas regiões, a área da seção perpendicular à transferência de calor e à condutividade térmica, como representado na Equação (1).

$$q_{cond} = -KA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Sendo q_{cond} a taxa de transferência de calor por condução [W], K é a condutividade térmica do material [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$], A [m^2] é a área da seção por onde flui o calor e $\frac{dT}{dx}$ [K m^{-1}] é o gradiente de temperatura na direção do fluxo de x .

4.3 Processos de Convecção de calor

Quando calor é transferido pela circulação de fluidos devido às mudanças de densidade induzidas pelo próprio calor, então o processo é conhecido como convecção natural. Enquanto, que se a transferência de calor ocorrer devido a outras forças, como através de uma bomba, por exemplo, este é denominado como convecção forçada (INCROPERA e DEWITT, 2008).

Segundo Incropera *et al.* (2014), quando uma superfície está a uma temperatura acima do fluido que a envolve, ocorre transferência de calor, por condução, da região mais quente (superfície) para a mais fria (fluido). Com isso, a energia interna do fluido eleva-se, aumentando também a temperatura devido à maior agitação molecular. Assim, as partículas movem-se, sob ação da gravidade, para regiões de menor temperatura do fluido, misturando-se e transferindo energia para as demais partículas, o que caracteriza a convecção.

A taxa de transmissão de calor entre uma superfície e um fluido (q_{conv}) pode ser expressa pela Equação (2).

$$q_{conv} = h_{conv}A\Delta T \quad (2)$$

Onde q_{conv} [W] é a taxa de transferência de calor, h_{conv} [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$] é o coeficiente de transferência de calor por convecção, A [m^2] é a área de transferência de calor e ΔT [K] é a diferença entre a temperatura de uma superfície e a temperatura do fluido.

4.4 Processos de Radiação térmica

A radiação térmica é a energia liberada por um corpo com temperatura acima de zero Kelvin ou zero absoluto. Essa energia da radiação térmica é transportada por ondas eletromagnéticas (fótons). A radiação ocorre tanto em superfícies sólidas como em líquidos e gases. Enquanto, a condução e a convecção carecem de um meio material para se propagar, a radiação pode-se propagar no vácuo (BEJAN e KRAUS, 2003).

Para Incropera *et al.* (2014), um corpo que absorve ou emite o máximo possível de radiação, em todos os comprimentos de onda e em todas as direções é denominado “corpo negro”. A taxa de radiação emitida por um corpo é diretamente proporcional à quarta potência da temperatura absoluta dele. A expressão para a taxa de emissão de radiação térmica, conhecida como “Lei de Stefan-Boltzmann”, é dada pela Equação (3).

$$q_{rad} = \sigma AT^4 \quad (3)$$

Sendo q_{rad} [W] a taxa de transferência de calor por radiação, σ é a constante de Stefan-Boltzmann [$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$], A [m^2] é a área da superfície e T [K] é a temperatura do corpo, em escala absoluta.

Para um corpo real, a taxa de radiação térmica é inferior à de um corpo negro e é expressa pela Equação (4). Na qual ϵ é a emissividade da superfície real.

$$q_{rad} = \epsilon \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad (4)$$

4.5 Evaporação

A evaporação é um processo em que uma substância líquida passa para o estado gasoso. Tal fato ocorre devido à diferença de pressão entre a camada superficial do fluido e sua pressão na corrente livre. As moléculas do líquido, vizinhas à superfície, sofrem colisões que aumentam sua energia interna, ultrapassando a energia de ligação na superfície. A energia que mantém a evaporação advém do líquido que não evapora e tem sua temperatura reduzida (INCROPERA *et al.*, 2014).

Conforme Fuentes e Roth (1997), a evaporação é o principal mecanismo de transferência de calor em um dessalinizador de bandeja, quando está sob o efeito de pressões parciais do vapor na cobertura e no condensado, afirmam ainda que a temperatura, no processo de destilação solar, é proporcional ao seu aumento à taxa de evaporação da água, conduzindo a maiores rendimentos. Implica, também, vários pontos de ebulição diferentes, além de volatilidades, com evaporação seletiva para um destilado de qualidade.

O fluxo de calor evaporativo (q_{evap}) é apresentado pelo somatório do fluxo de calor convectivo (q_{conv}) e do fluxo de calor advectivo (q_{adv}) expressa pela Equação (5).

$$q_{evap} = q_{conv} + q_{adv} \quad (5)$$

4.6 Análise térmica do dessalinizador solar

Para realizar a modelagem de um sistema de dessalinização solar existe certos impedimentos por causa das características transitórias e variáveis, e também o fato da não regularidade da intensidade de radiação solar para cada região. Os cálculos teóricos para determinação do desempenho do dessalinizador solar necessitam do uso de coeficientes empíricos de troca de calor e de massa. Os principais modelos, existentes na literatura, estão baseados nas relações apresentadas por (DUNKLE, 1961).

Para execução da modelagem matemática foram admitidas como base as seguintes hipóteses:

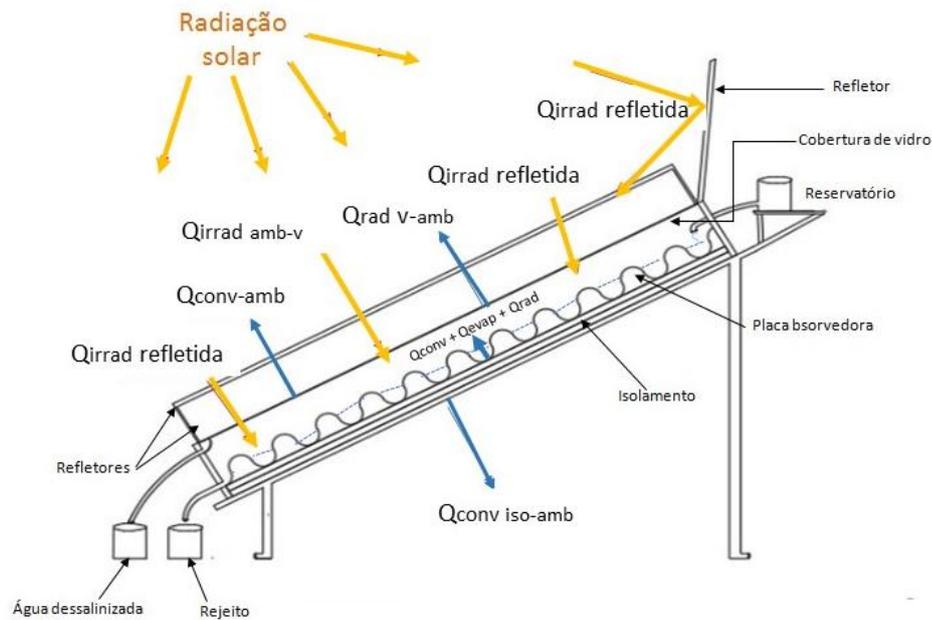
- A condensação ocorre apenas na cobertura de vidro.
- Não há saída de ar do dessalinizador.
- A placa absorvedora está livre de vazamentos.
- A concentração do rejeito não está envolvida na transferência de calor e massa.
- A condução de calor ocorre em regime transiente.
- No início do processo, as temperaturas de todas as superfícies são iguais à temperatura ambiente.

Os resultados numéricos são alcançados resolvendo-se as equações de balanço de energia do dessalinizador solar para cobertura de vidro, água salobra, placa absorvedora, isolamento térmica e a irradiação solar. Nas equações subsequentes, T_v , T_a , T_{pabs} e T_{is} são temperatura média da cobertura de vidro, temperatura da água salobra, temperatura da placa absorvedora e temperatura do isolante, respectivamente, todas medidas em °C. Além disso, são calculados a radiação total absorvida no revestimento da placa absorvedora (I_t) devido a adição de refletores no equipamento.

4.6.1 Balanço de energia térmica do dessalinizador solar

O dessalinizador solar deve maximizar a quantidade de água evaporada, que é diretamente proporcional à taxa de produção de água dessalinizada. Por outro lado, todas as outras formas de transferência de energia para o meio exterior devem ser anuladas o máximo possível. De maneira a poder avaliar a produtividade e o rendimento do dessalinizador, é necessário efetuar o balanço energético do mesmo. Na Fig 6 pode ser observado o balanço térmico global que ocorre no dessalinizador solar proposto.

Figura 6 - Balanço geral de energia do dessalinizador solar tipo ondular proposto



Fonte: Autor, 2020.

A variação de energia é calculada pela diferença entre a energia que está entrando no sistema (Irradiação) e a energia que está saindo do sistema, por meio da convecção entre o vidro e a água, a convecção entre o isolante e o ambiente e pôr fim a radiação, como expresso na Equação (6).

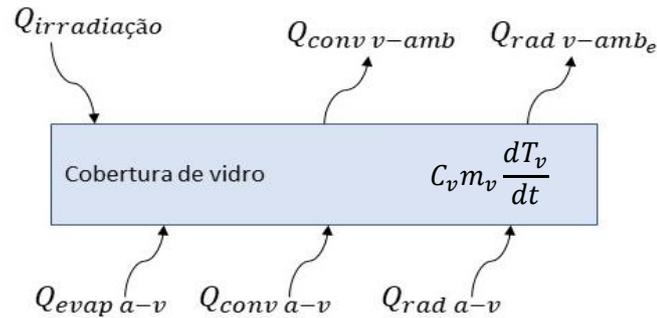
$$m_a C_a \frac{dT}{dt} = I(t) \alpha_v A_v + I(t) \alpha_r \rho_r A_r - \{h_{conv v-amb} A_v (T_v - T_{amb}) + h_{conv is-amb} A_{is} (T_{is} - T_{amb}) + h_{rad} A_v (T_v - T_{amb})\} \quad (6)$$

Após representar o balanço global do dessalinizador solar foi realizado os balanços individuais em cada parte do dessalinizador.

a) Balanço de energia na cobertura

Nesta parte do equipamento é onde ocorre a condensação da água, que após ser evaporada conduz para o vidro, que está a uma temperatura menor, ocorrendo assim a condensação da água dessalinizada. O balanço de energia térmica para a cobertura de vidro está representado pela Figura 7.

Figura 7 - Balanço de energia na cobertura do dessalinizador solar



Fonte: Autor, 2020.

A variação de energia no vidro de condensação é calculada pela diferença entre a energia que está chegando à cobertura de vidro e a energia que está saindo, de acordo com a Equação (7). A energia obtida pela cobertura de vidro é dada pela energia do sol e pela transferência de calor por convecção, radiação e evaporação da água para o vidro e a energia perdida pela transferência de calor por radiação e convecção entre o vidro e o ambiente externo.

Energia solar absorvida pelo vidro + energia recebida pelo vidro da superfície da água por evaporação, convecção e radiação = perda de energia do vidro para o ambiente por convecção e radiação (TIWARI, 2002; XIAO *et al.*, 2013).

$$C_v m_v \frac{dT_v}{dt} = Q_{irra_{amb-v}} + Q_{rad\ a-v} + Q_{conv\ a-v} + Q_{evap\ a-v} - Q_{rad\ v-amb_e} - Q_{conv\ v-amb_e} \quad (7)$$

Na Equação 7, C_v [$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$] corresponde o calor específico do vidro, m_v [kg] a massa do vidro, $\frac{dT_v}{dt}$ [$K\ s^{-1}$] gradiente de temperatura do vidro e Q [$W\ m^{-2}$] densidade do fluxo de calor.

A densidade do fluxo de calor radiativo trocado entre a cobertura de vidro e o ambiente externo é expressa pela Equação (8).

$$Q_{rad\ v-amb_e} = h_{rad\ v-amb_e} A_v (T_v - T_{amb_e}) \quad (8)$$

O $h_{rad\ v-amb_e}$ [$W\ m^{-2}\ K^{-1}$], coeficiente de troca de calor radiativo entre a cobertura de vidro e o ambiente externo é dado pela Lei de Stefan-Boltzman, conforme apresentado na Equação (9).

$$h_{rad\ v-amb_e} = \sigma \varepsilon (T_v^2 + T_{amb_e}^2) (T_v + T_{amb_e}) \quad (9)$$

σ e ε são respectivamente a constante de Stefan-Boltzman e a emissividade da cobertura de vidro.

A temperatura do ambiente externo é expressa pela Equação (10).

$$T_{amb_e} = 0,0552(T_{amb_i}^{1,5}) \quad (10)$$

A densidade do fluxo de calor convectivo entre a cobertura de vidro e o ambiente interno está expressa pela Equação (11).

$$Q_{conv\ v-amb_i} = h_{conv\ v-amb_i} A_v (T_v - T_{amb_i}) \quad (11)$$

O $h_{conv\ v-amb_i}$ [$W\ m^{-2}\ K^{-1}$], coeficiente de troca de calor convectivo trocado entre a cobertura de vidro e o ambiente interno é dada pela Equação (12) (BOUZAIID *et al.*, 2016; BOUZAIID *et al.*, 2019).

$$h_{conv\ v-amb_i} = 5,8 + 3,8V \quad (12)$$

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

A densidade do fluxo de calor radiativo entre a água salobra e cobertura de vidro está expressa pela Equação (13).

$$Q_{rad\ a-v} = h_{rad\ a-v} A_a (T_a - T_v) \quad (13)$$

O $h_{rad\ a-v}$ [$W\ m^{-2}\ K^{-1}$], coeficiente de troca de calor radiativo entre a água salobra e a cobertura de vidro está representada pela Equação (14).

$$h_{rad\ a-v} = \frac{\sigma * (T_a^2 + T_v^2) * (T_a + T_v)}{\frac{1}{\varepsilon_a} + \frac{1}{\varepsilon_v} - 1} \quad (14)$$

ε_a e ε_v são respectivamente a emissividade da água salobra e a emissividade da cobertura de vidro. σ é a constante de Stefan-Boltzman.

A expressão da densidade do fluxo de calor convectivo entre a água salobra e a cobertura de vidro é dada pela Equação (15).

$$Q_{conv\ a-v} = h_{conv\ a-v} A_a (T_a - T_v) \quad (15)$$

De acordo com Aggarwal e Tiwari (1998) e Ansari *et al.* (2013), o coeficiente convectivo de troca de calor entre a água salobra e a cobertura de vidro $h_{conv\ a-v}$ [$W\ m^{-2}\ K^{-1}$] pode ser calculado pela Equação (16).

$$h_{conv\ a-v} = 0,884 \left[T_a - T_v + \frac{(T_a - T_v) * (T_v + 273,15)}{268,9 * 10^3 - P_a} \right]^{1/3} \quad (16)$$

A densidade do fluxo de calor evaporativo entre a água salobra e cobertura de vidro está expressa pela Equação (17).

$$Q_{evap\ a-v} = h_{evap\ a-v} A_a (T_a - T_v) \quad (17)$$

Dunkle (1961) descreve que o coeficiente de troca de calor evaporativo entre a água salobra e a cobertura de vidro $h_{evap\ a-v}$ [W m⁻² K⁻¹] é definido na Equação (18).

$$h_{evap\ a-v} = 16,273 \times 10^{-3} h_{conv\ a-v} \frac{(P_a - P_v)}{T_a - T_v} \quad (18)$$

Onde P_a e P_v são respectivamente as pressões de vapor de água na água salobra e na cobertura de vidro, e são calculados como sugerido por Tiwari (2002) e enunciado nas Equações (19) e (20).

$$P_a = \exp\left(25,317 - \frac{5144}{T_a + 273,15}\right) \quad (19)$$

$$P_v = \exp\left(25,317 - \frac{5144}{T_v + 273,15}\right) \quad (20)$$

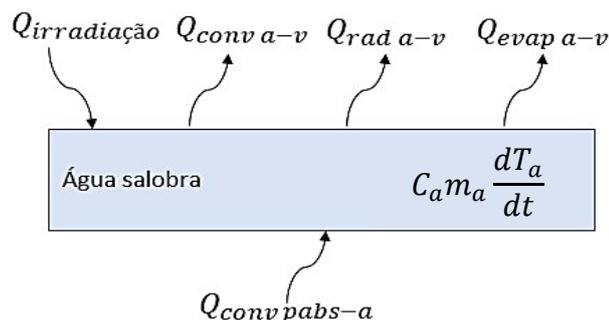
A fração absorvida da densidade do fluxo de calor da radiação incidente na cobertura de vidro do dessalinizador solar $Q_{irra_{amb-v}}$ é dada pela Equação (21).

$$Q_{irra_{amb-v}} = I(t) A_v \alpha_v \quad (21)$$

b) Balanço de energia da água salobra

A Figura 8 apresenta o balanço de energia para a água salobra.

Figura 8 - Balanço de energia para a água salobra do dessalinizador solar



Fonte: Autor, 2020.

Neste balanço térmico, a energia que está atingindo a água salobra é a irradiação que atravessa a cobertura de vidro até alcançar na água e a convecção que ocorre entre a placa absorvedora e a água. A energia que sai do sistema é a convecção, a radiação e a evaporação que ocorre entre a água e o vidro. Na água salobra, o balanço de energia térmica é determinado pela Equação (22).

$$C_a m_a \frac{dT_a}{dt} = Q_{irra_{ambi-a}} + Q_{conv\ pabs-a} - Q_{rad\ a-v} - Q_{conv\ a-v} - Q_{evap\ a-v} \quad (22)$$

A densidade do fluxo de calor convectivo entre o revestimento da placa absorvedora e a água salobra está representada pela Equação (23). A_{pabs} [m²] é a área da placa absorvedora e T_{pabs} e T_a [K] são respectivamente as temperaturas da placa absorvedora e da água salobra.

$$Q_{conv\ pabs-a} = h_{conv\ pabs-a} A_{pabs} (T_{pabs} - T_a) \quad (23)$$

O $h_{conv\ pabs-a}$ [W m⁻² K⁻¹] coeficiente de troca de calor convectivo entre o revestimento da placa absorvedora e a água salobra, pode ser obtido a partir da correlação do número de Nusselt, conforme apresentado na Equação (24) (ANSARI *et al.*, 2013; BOUZAID *et al.*, 2016; BOUZAID *et al.*, 2019).

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

$$h_{conv\ pabs-a} = \frac{\lambda_a}{L_{pabs}} \quad (24)$$

Se $10^5 < Gr < 2 \times 10^7$, o número de Nusselt pode ser determinado pela Equação (25).

$$Nu = 0,54(GrPr)^{0,25} \quad (25)$$

Se $Gr > 2 \times 10^7$, o número de Nusselt pode ser determinado pela Equação (26).

$$Nu = 0,14(GrPr)^{0,25} \quad (26)$$

O coeficiente de transferência de calor é então calculado para as duas últimas situações de acordo com a Equação (27).

$$h_{conv\ pabs-a} = \frac{Nu * \lambda_a}{L_{pabs}} \quad (27)$$

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

A transferência de calor e de massa num dessalinizador solar ocorre simultaneamente, sendo assim, Dunkle (1961) sugeriu uma modificação no número de Rayleigh considerando os efeitos da flutuação (empuxo) devido às variações de densidade e ao gradiente de temperatura. A Equação (28) apresenta a fórmula do número de Rayleigh.

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} \quad (28)$$

Onde g , ν , α e β representam respectivamente a gravidade local [m s^{-2}], a viscosidade cinemática [m^2s^{-1}], difusividade térmica e o coeficiente de expansão térmica [K^{-1}]. T_s e T_∞ [K] são respectivamente, temperatura da superfície e temperatura do fluido em movimento. A Equação (29) e (30) apresentam respectivamente a fórmula do número de Grashof e de Prandtl.

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad (29)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (30)$$

A energia solar absorvida pela água salobra é dada pela Equação (31).

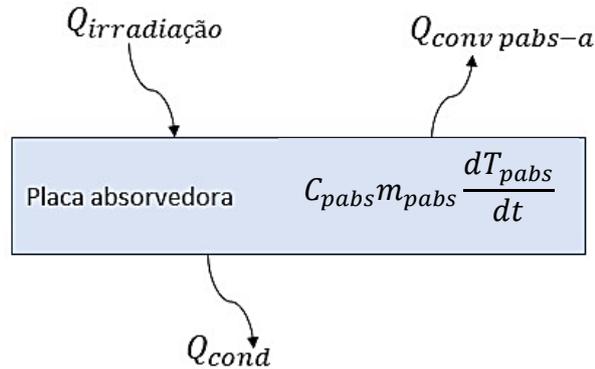
$$Q_{irra_{ambi-a}} = I(t)A_a\alpha_a\tau_v \quad (31)$$

Na equação 31, $I(t)$ [W m^{-2}] representa a intensidade de radiação, A_a [m^2] área da água salobra, α_a a absorvidade da água e τ_v a transmitância do vidro.

c) *Balço de energia da placa absorvedora*

A placa absorvedora é o local em que fica armazenada a água salobra para acontecer todo o processo de dessalinização. O balanço de energia térmica para a placa absorvedora é representado pela Figura 9.

Figura 9 - Balanço de energia para a placa absorvedora ondular do dessalinizador solar



Fonte: Autor, 2020.

Na placa absorvedora o balanço de energia térmica é expresso pela Equação (32).

$$C_{pabs}m_{pabs} \frac{dT_{pabs}}{dt} = Q_{irra_{pabs}} - Q_{conv_{pabs-a}} - Q_{cond} \quad (32)$$

Em que, C_{pabs} [$J \text{ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$] corresponde o calor específico da placa absorvedora, m_{pabs} [kg] a massa da placa absorvedora e $\frac{dT_{pabs}}{dt}$ [$K \text{ s}^{-1}$] o gradiente de temperatura da placa absorvedora.

A densidade do fluxo de calor condutivo da placa absorvedora está representada pela Equação (33).

$$Q_{cond} = \frac{\lambda_{pabs}}{e_{pabs}} A_{pabs} (T_{pabs} - T_{i,ls}) \quad (33)$$

Sendo que λ_{pabs} [$W \text{ m}^{-1} \text{ K}^{-1}$] e e_{pabs} [m] respectivamente, denotam a condutividade térmica e a espessura da placa absorvedora.

A energia solar absorvida pelo revestimento da placa absorvedora $Q_{irra_{pabs}}$ está representada pela Equação (34).

$$Q_{irra_{pabs}} = I(t) A_{pabs} \alpha_{pabs} \tau_v \tau_a \quad (34)$$

Onde $I(t)$ [$W \text{ m}^{-2}$] representa a intensidade de radiação, A_{pabs} [m^2] área da água placa absorvedora, α_{pabs} a absorvidade da placa absorvedora, τ_v a transmitância do vidro e τ_a a transmitância da água.

Segundo Bouzaid *et al.* (2019), a energia solar absorvida pela placa absorvedora é representada pela Equação (35).

$$Q_{irra_{pabs}} = Q_{Hpabs} + Q_{Ipabs} \quad (35)$$

Onde Q_{Hpabs} é a energia solar absorvida pela superfície horizontal da placa absorvedora e Q_{Ipabs} é a energia solar absorvida pela superfície inclinada da placa absorvedora, conforme apresentado nas Equações (36) e (37).

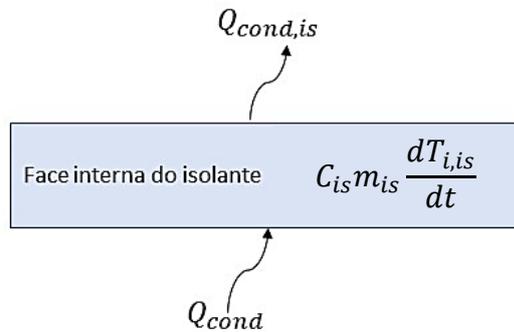
$$Q_{Hpabs} = I(t)A_{Hpabs}\alpha_{pabs}\tau_v\tau_a \quad (36)$$

$$Q_{Ipabs} = I(t)A_{Ipabs}\alpha_{pabs}\tau_v\tau_a \quad (37)$$

d) *Balanço de energia para face interna do material de isolamento*

Na face interna do isolamento, o balanço de energia térmica é representado pela Figura 10.

Figura 10 - Balanço de energia para a face interna do isolante



Fonte: Autor, 2020.

O balanço de energia térmica está representado pela Equação (38).

$$C_{is}m_{is} \frac{dT_{i,is}}{dt} = Q_{cond} - Q_{cond,is} \quad (38)$$

Na qual, C_{is} [J kg⁻¹ K⁻¹] corresponde o calor específico do isolante, m_{is} [kg] a massa do isolante e $\frac{dT_{i,is}}{dt}$ [K s⁻¹] o gradiente de temperatura da face interna do isolante.

A densidade do fluxo de calor condutivo do material isolante é expressa pela Equação (39).

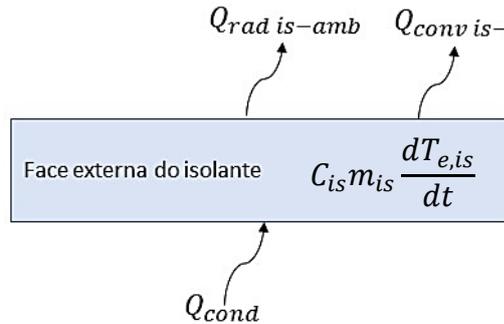
$$Q_{cond,is} = \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} A_{is} (T_{i,is} - T_{e,is}) \quad (39)$$

Sendo que λ_{is} e e_{is} respectivamente, denotam a condutividade térmica e a espessura do material de isolamento.

e) *Balço de energia para face externa do material de isolamento*

Na face externa do isolamento, o balanço de energia térmica é representado pela Figura 11.

Figura 11 - Balço de energia para a face externa do isolante



Fonte: Autor, 2020.

O balanço de energia térmica está representado pela Equação (40).

$$C_{is} m_{is} \frac{dT_{e,is}}{dt} = Q_{cond,is} - (Q_{rad is-amb} + Q_{conv is-amb}) \quad (40)$$

Em que, C_{is} [$J kg^{-1} K^{-1}$] corresponde o calor específico do isolante, m_{is} [kg] a massa do isolante e $\frac{dT_{e,is}}{dt}$ [$K s^{-1}$] o gradiente de temperatura da face externa do isolante.

A densidade do fluxo de calor radiativo entre o material de isolamento e o ambiente é representada pela Equação (41).

$$Q_{rad is-amb} = h_{rad is-amb} A_{is} (T_{e,is} - T_{amb_i}) \quad (41)$$

O $h_{rad is-amb}$ [$W m^{-2} K^{-1}$] coeficiente de troca de calor radiativo entre a face externa do isolamento e o ambiente é dado pela lei de Stefan-Boltzaman representado pela Equação (42).

$$h_{rad is-amb} = \sigma \varepsilon_{is} (T_{e,is}^2 + T_{amb_i}^2) (T_{e,is} + T_{amb_i}) \quad (42)$$

A expressão da densidade do fluxo de calor convectivo existente entre a face externa do isolamento e o ambiente está representada pela Equação (43).

$$Q_{conv is-amb} = h_{conv is-amb} (T_{e,is} + T_{amb_i}) \quad (43)$$

O $h_{conv\ is-amb}$ [W m⁻² K⁻¹] coeficiente de troca de calor convectivo trocado entre o isolamento e o ambiente pode ser representado pela Equação (44).

$$h_{conv\ is-amb} = 1,78[T_{e,is} + T_{amb_e}]^{0,25} \quad (44)$$

f) *Irradiação solar em dessalinizador solar*

O fluxo solar sobre uma superfície inclinada pode ser determinado usando a Equação (45) (DUFFIE e BECKMAN, 1991; VELMURUGAN *et al.*, 2008).

$$I_r = (I_g - I_d) \left(\frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_h} \right) + I_d \left(1 + \frac{\cos \beta}{2} \right) \quad (45)$$

Onde I_g e I_d são respectivamente, intensidade de radiação global e intensidade de radiação difusa em uma placa horizontal. E θ_i e θ_h são o ângulo de incidência sobre uma superfície inclinada e horizontal, respectivamente, e são obtidos a partir de (VELMURUGAN *et al.*, 2008).

A radiação direta refletida no refletor externo e absorvida no revestimento da placa absorvedora pode ser determinada usando a Equação (46) (TANAKA, 2009; EL-SEBAII e AL-DOSSARI, 2011).

$$I_{rr} = I_r \rho_r F_{rv} \frac{A_r}{A_v} \quad (46)$$

Em que I_r são o total de radiação solar incidente no refletor e ρ_r é a refletância do refletor. F_{rv} é o fator de visão entre o refletor e a cobertura de vidro do dessalinizador solar. A_r e A_v são respectivamente, a área do refletor e a área da cobertura de vidro. O F_{rv} pode ser expresso pela Equação (47) (VELMURUGAN *et al.*, 2008).

$$F_{rv} = (c + r - s) / 2r \quad (47)$$

Onde:

$$s = [c^2 + r^2 - 2 * c * r * \cos \psi]^{1/2} \quad (48)$$

Sendo ψ o ângulo de inclinação do refletor, c [m] altura do refletor, r [m] largura da cobertura de vidro e s [m] a distância da borda superior do refletor até a borda externa da cobertura de vidro (OMARA e KABELL, 2013).

Com isso, a radiação total que é absorvida no revestimento da placa absorvedora pode ser determinada usando a Equação (49).

$$I_t = I_r + I_{rr} \quad (49)$$

4.6.2 Produtividade, produção e eficiência

A produtividade horária de água dessalinizada pode ser obtida pela Equação (50) (TIWARI e TIWARI, 2007).

$$\dot{m} = \frac{h_{evap\ a-v} A_a (T_a - T_v) 3600}{L} \quad (50)$$

Onde \dot{m} [$\text{Kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$] é a taxa de condensação, $h_{evap\ a-v}$ [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$] o coeficiente de troca de calor evaporativo entre a água salobra e a cobertura de vidro, A_a [m^2] a área da água salobra, T_a e T_v [K] são respectivamente a temperatura da água e a temperatura do vidro e L [J kg^{-1}] é o calor latente da vaporização da água.

A produção diária é calculada pelo somatório da produção horária ao longo de um dia, como apresentado na Equação (51).

$$\dot{M} = \sum \dot{m} \quad (51)$$

A eficiência térmica global do dessalinizador solar pode ser determinada pela Equação (52) (DUFFIE e BECKMAN, 1991).

$$\eta = \frac{\sum \dot{m} L}{\sum (A_v I(t))} 100 \quad (52)$$

Onde, \dot{m} [$\text{Kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$] é a taxa de condensação, L [J kg^{-1}] é o calor latente de vapor de água, A_v [m^2] é a área de cobertura do vidro e $I(t)$ [W m^{-2}] é a intensidade de radiação que incide na área de cobertura ao longo de um dia.

4.6.3 Modelos térmicos do dessalinizador solar

O estudo sobre o efeito de parâmetros climáticos, de projeto e operacionais do dessalinizador solar podem ser feitos teoricamente com base em certas suposições. No entanto, as suposições não devem se desviar do ambiente operacional real do dessalinizador. O modelo teórico desenvolvido pelas relações empíricas deve ser validado por meio de dados experimentais para estabelecer sua precisão. A previsão de desempenho térmico do

dessalinizador solar depende da estimativa precisa dos coeficientes de transferência de calor. As equações de modelos térmicos populares usados pelos pesquisadores são apresentadas pelas Equações (53), (54) e (55) (ELANGO, GUNASEKATAN e SAMPATHKUMAR, 2015).

$$T_a = \frac{\overline{f(t)}}{a} [1 - e^{-at}] + T_{a,i} e^{-at} \quad (53)$$

$$T_{pabs} = \frac{\alpha_b I(t)_s + h_a T_a + h_b T_{amb}}{h_a + h_b} \quad (54)$$

$$T_{vi} = \frac{\alpha_v I(t)_s + h_{t,a-v} T_a + U_{b,v-amb} T_{amb}}{h_{t,a-v} + U_{t,v-amb}} \quad (55)$$

4.6.4 Sistema computacional utilizado

O *software* aplicativo Microsoft Excel[®] 2019 foi utilizado para o cálculo de modelo numérico a ser desenvolvido. Neste programa foram resolvidas as múltiplas equações algébricas propostas, bem como equações diferenciais, além de fornecer análises, tabelas capazes de calcular simultaneamente o resultado de uma ou mais equações para de diversos valores de uma dada variável (PEREIRA *et al.*, 2014), características fundamentais para avaliação do método do dessalinizador solar proposto.

Além disso, foi utilizado o programa Origin 2018 – OriginLab para análise de dados gráficos e estatística. Origin fornece várias funções pré-formatadas que permitem o ajuste de parâmetros ou predefinição de valores. Isso possibilita ao usuário de software construir suas próprias funções e na confecção dos gráficos permite uma melhor representação dos dados quando diversas variáveis são analisadas simultaneamente (HUBER-RODRIGUEZ, 2014).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

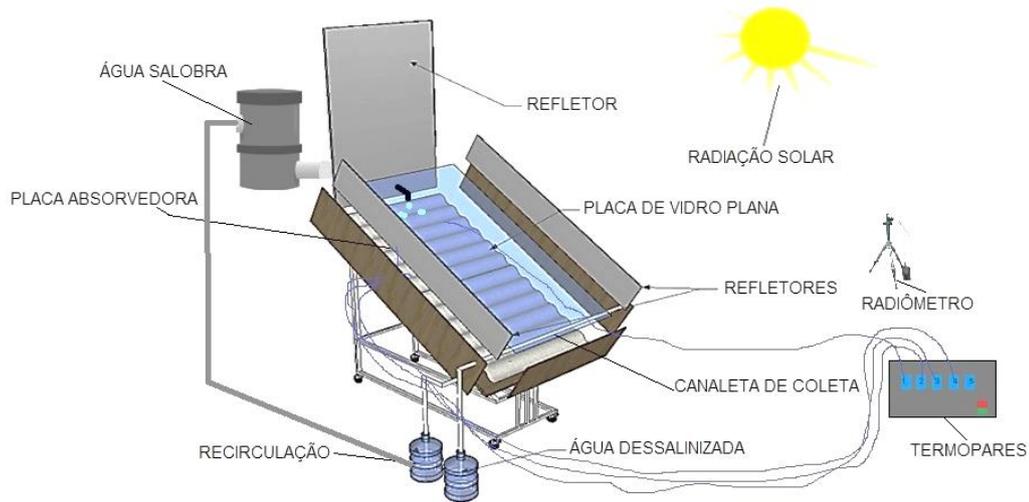
As seções que seguem tratam dos materiais e métodos empregados nesta pesquisa. Foi construído o protótipo do dessalinizador solar visando atender as condições necessárias para a tecnologia recomendada, de maneira a ter fácil operação, simples de transportar, menor perda de calor, resistência à corrosão e boa durabilidade. Posteriormente é detalhada a metodologia dos ensaios desenvolvidos para a aquisição dos dados, bem como o procedimento experimental aplicado. Por fim, são esclarecidos os parâmetros para análise da água salobra antes e após o processo de dessalinização.

5.1 Descrição do sistema

O novo conceito de design do dessalinizador via energia solar proposto está na sua placa absorvedora de calor que tem o formato ondular composto por fibrocimento na sua confecção e junção de refletores de radiação integrados. Foi utilizada uma cobertura de vidro inclinado com um ângulo de 17° para favorecer a passagem dos raios solares à superfície durante todo o ano e para facilitar o escoamento da água de condensação para o coletor. No equipamento foram adicionados refletores à superfície de absorção, com o intuito de aumentar a eficiência térmica do sistema. Portanto, o dessalinizador solar proposto é considerado de modelo passivo e ativo.

O sistema foi alimentado com água salobra por gravidade com uma vazão de 70 mL min⁻¹ na parte superior do dessalinizador operando em modo contínuo, percorrendo por toda a placa absorvedora. Com a irradiação direta e refletida para a placa absorvedora de calor através da cobertura de vidro inclinada, rapidamente a superfície da placa absorvedora é aquecida, transferindo o calor por meio de convecção para a água, provocando o aumento na taxa de evaporação. O vapor de água é condensado ao entrar em contato com a superfície interna da cobertura de vidro e, por meio da gravidade, a água dessalinizada escorre e é recolhida na parte inferior pela canaleta de coleta, conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12 - Dessalinizador solar portátil tipo ondular com refletores



Fonte: Autor, 2020.

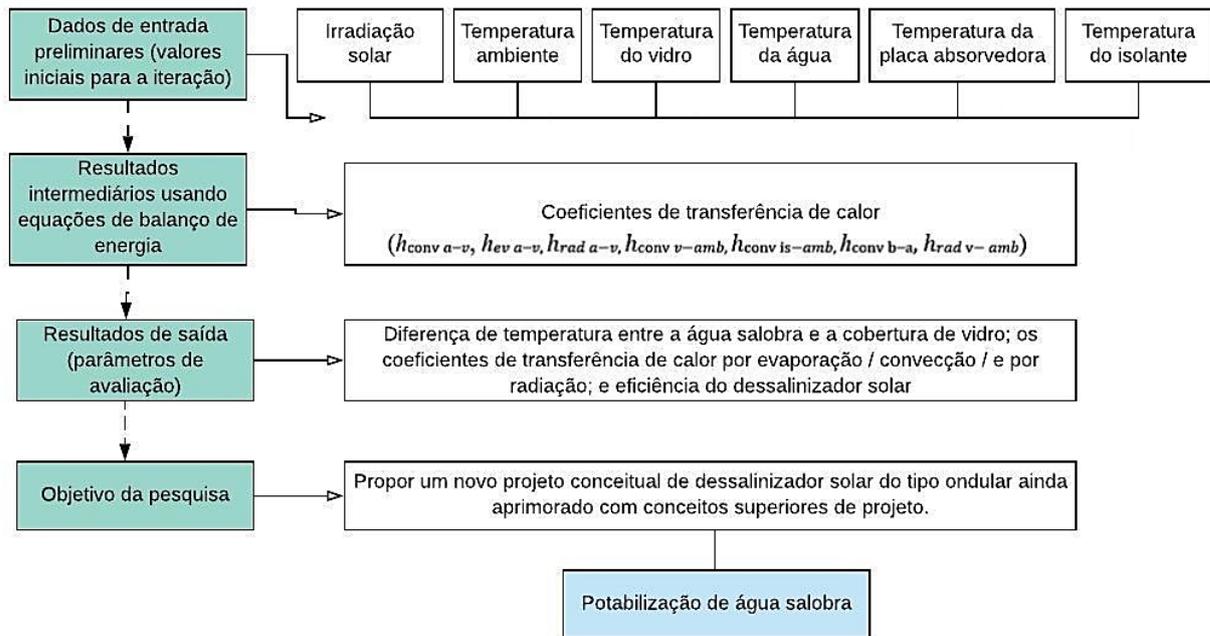
5.2 Construção do dessalinizador solar

O projeto e a construção do protótipo foram realizados na cidade de Campina Grande - PB, situada a 126 Km da capital João Pessoa, a 551 m acima do nível do mar, tendo como coordenadas $7^{\circ}13'50''$ sul e $35^{\circ}52'52''$ oeste, no Laboratório de Pesquisa em Ciências Ambientais – LAPECA, do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA do Centro de Ciências e Tecnologia – CCT da Universidade Estadual da Paraíba – UEPB.

Os materiais empregados no dessalinizador solar foram estabelecidos visando o maior custo-benefício, além de assegurar uma boa isolamento, resistência a temperatura e durabilidade. Outro aspecto relevante foi a disponibilidade deles na região, o que facilitou a construção do equipamento.

O projeto teve como finalidade maximizar dois pontos, eficiência e portabilidade. A eficiência é importante, pois analisa a relação entre a quantidade de energia solar que o equipamento recebe pela produção de água tratada por um determinado período, e a portabilidade agrega a possibilidade de aplicar o sistema em diversas comunidades isoladas que enfrentam problemas de escassez hídrica. A Figura 13 ilustra o diagrama da pesquisa designada neste trabalho.

Figura 13 - Diagrama do projeto da pesquisa



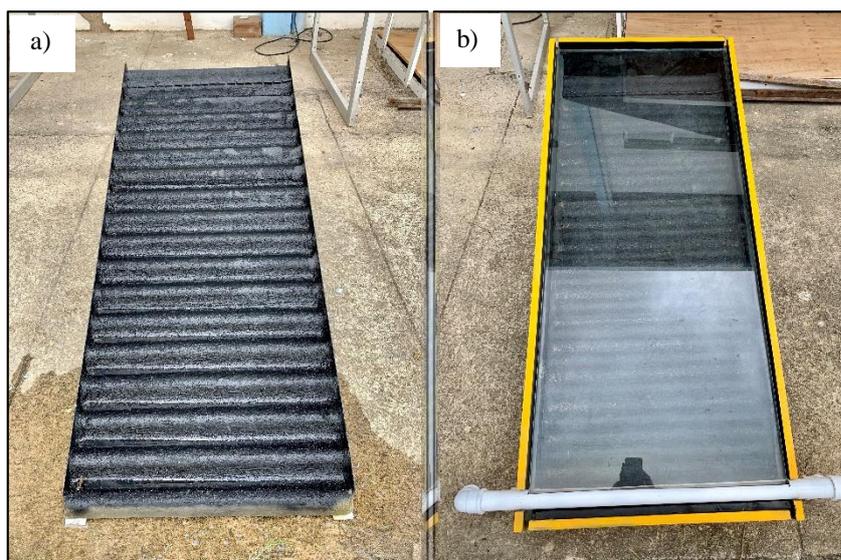
Fonte: Autor, 2020.

I. Placa absorvedora de calor e Revestimento

A placa absorvedora de calor do dessalinizador solar, onde percorreu a água salobra, foi construído de telhas de fibrocimento sem amianto na sua confecção, formato ondular, visto que o fibrocimento apresenta bom desempenho térmico, absorvendo aproximadamente metade da radiação solar global incidente (COELHO, GOMES e DORNELLES, 2017); os mesmos apresentam resistência a salinidade, a atmosferas agressivas e aos efeitos da corrosão (HAYRTON, 2019); e ainda evita que a água salobra (antes do processo de dessalinização) e dessalinizada (após o processo) entrem em contato uma com a outra. A vedação do fibrocimento foi feita com parafusos com arruelas de vedação e massa epóxi, materiais mais adequados para esse tipo de atividade.

A placa absorvedora de calor tem formato retangular com ondulação de 6 mm de espessura, possuindo 1,43 m de comprimento e 0,543 m de largura, tendo uma área total de $0,78\text{ m}^2$. O acabamento áspero ficou na parte superior com o objetivo de aumentar o atrito com a água, e colocou o isolante na sua parte posterior. Além disso, a placa absorvedora foi revestida com o impermeabilizante de aderência e resistência mecânica, que não altera a potabilidade da água, sendo atóxico e inodoro. A mesma foi pintada com tinta preto fosco, a fim de obter maior absorção da radiação solar e transformá-la em energia térmica. A Figura 14 ilustra a placa absorvedora do dessalinizador solar construído.

Figura 14 - Placa absorvedora ondulada: (a) Individualmente (b) Inserido no dessalinizador solar



Fonte: Autor, 2020.

II. Cobertura e Refletores

Com relação à cobertura, foi utilizado em sua construção um vidro de 0,003 m de espessura, possuindo 1,365 m de comprimento e 0,565 m de largura, que como já citado no referencial teórico, tal material apresenta a melhor relação custo-benefício para essa utilização. A angulação da cobertura é um parâmetro de extrema significância quando se pretende atingir um bom desempenho do dessalinizador solar, necessitando ter atenção redobrada na concepção do projeto e na construção. Levando em consideração que o dessalinizador solar será utilizado no Semiárido da região Nordeste, o ângulo em que ocorre a maior otimização do projeto é 17° , devido somado uma margem de 10° com a latitude da região para favorecer a higienização do equipamento e nesse ângulo favorece o escoamento por gravidade, tendo uma melhor captação da água dessalinizada. A vedação da cobertura de vidro foi feita com silicone para que não ocorra perda de vapor d'água no sistema.

Foram adicionados três refletores ao dessalinizador solar, inclinados, a fim de aumentar a concentração de radiação solar no sistema. O refletor superior possui dimensões de 0,704 m de comprimento e 0,545 m de largura e os refletores laterais possuem 1,493 m de comprimento e 0,55 m de largura cada. A Figura 15 apresenta os refletores de radiação integrados no dessalinizador solar.

Figura 15 - Refletores de radiação integrados



Fonte: Autor, 2020.

III. Isolação Térmica

A isolação térmica tem como função conter o máximo de energia térmica possível dentro do dessalinizador, evitando perdas de calor para o ambiente externo. Para o projeto da isolação térmica do dessalinizador solar foi utilizado lã de vidro por apresentar vantagens, como suportar temperaturas elevadas; não sofrerem com umidade; ser leve e fácil de manipulação e não favorece a proliferação de fungos ou bactérias. O isolante térmico foi inserido entre a parte inferior da placa absorvedora e a chapa de zinco galvanizada. A lã de vidro possui 50 mm de espessura, condutividade térmica de $k = 0,038 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e resistência térmica de $1,32 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C W}^{-1}$ (INCROPERA; DEWITT; 2008).

IV. Sistema de escoamento

O sistema de escoamento é responsável por levar a água dessalinizada após o processo de condensação na cobertura. Dessa forma, é fundamental que o próprio seja eficiente, não envolvendo vazamentos que consigam levar a perda do produto e não libere resíduos.

No projeto do dessalinizador, o sistema de escoamento ocorre a partir do processo de condensação da água dessalinizada, onde ela escorre pela cobertura de vidro e recolhido pela calha. A água dessalinizada ao sair do dessalinizador, por um uma conexão de 90° de policloreto de vinila (PVC), é contabilizado em uma proveta.

5.3 Protótipo do dessalinizador solar

Objetivando a possibilidade de limpeza da placa absorvedora e do sistema como um todo, a angulação do dispositivo favorece para a manutenção do mesmo. Além disso, todo o sistema de isolamento e cobertura é facilmente retirável do equipamento, para possíveis trocas, reparos ou limpezas.

Outro elemento acrescentado ao projeto final foi o suporte do dessalinizador, que tem como função evitar o contato do sistema com a superfície do solo, prevenindo possíveis danos externos. O suporte foi construído utilizando dois “apoios” de formato retangular de madeira de boa qualidade, onde o “apoio” da parte traseira do dessalinizador possuem 1,02 m de altura e o da parte dianteira 0,6 m, isso possibilita uma inclinação que facilita o transporte da água dessalinizada dentro do sistema de escoamento. Ainda com relação ao suporte, os “apoios” foram acoplados por meio de dobradiças no equipamento, tornando-se acessível para sua locomoção. A Figura 16 apresenta o dessalinizador solar construído.

Figura 16 - Dessalinizador solar construído



Fonte: Autor, 2020.

5.4 Procedimento dos ensaios e coleta de dados

Os ensaios do dessalinizador solar foram realizados no distrito de Riacho Fundo de Barra de São Miguel – PB. O local escolhido facilitou o experimento, visto que a incidência solar é alta durante as horas de operação do equipamento, e permitiu um monitoramento mais intenso da prática.

O dessalinizador solar foi alimentado com água salobra coletada em três poços de Riacho Fundo. A operação do equipamento foi realizada em sistema contínuo com recirculação da água salobra. Para estudar os experimentos, foram definidos como fator de operação a vazão de água salobra.

Durante o período da pesquisa, foram realizados ensaios durante os meses de março, setembro, outubro e novembro de 2020, utilizando a vazão de 70 mL min^{-1} de água salobra, em que foram medidos parâmetros predeterminados a cada 30 minutos, iniciando às 7:00h e finalizando às 17:00h.

Os parâmetros definidos para serem analisados foram, temperatura do ambiente; temperatura na superfície da cobertura; temperatura da placa absorvedora; temperatura do isolante; temperatura do vapor de água; temperatura da água salobra, velocidade do vento e a radiação solar. Com esse acompanhamento, será possível determinar os coeficientes de transferência de calor e de massa, que regem o processo de dessalinização, através do balanço de energia.

Para medir corretamente cada parâmetro, foram utilizados no procedimento para coleta dos dados, termopares do tipo PT-100 para medições das temperaturas; um anemômetro para medição da velocidade do vento e um radiômetro SL 200 17957 da marca KIMO para medição de radiação solar, fazendo leituras ininterruptas durante todo o período de funcionamento do dessalinizador. A quantidade de água dessalinizada foi medida com a utilização de uma proveta graduada. Os equipamentos utilizados foram cedidos pelo LAPECA da UEPB. Para tratamento dos dados e realização dos balanços de energia foram utilizados os resultados experimentais e equações da literatura.

5.5 Parâmetros para análise da água

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

As análises ocorreram nos laboratórios de Pesquisa em Ciências Ambientais e o de Referência em Tecnologias de Águas, ambos na UEPB. As metodologias utilizadas para obter todos os parâmetros físico-químicos das águas provenientes da alimentação e do destilado estão preconizadas no *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (BAIRD, EATON e RICE, 2017). O Quadro 2 apresenta os parâmetros físico-químicos analisados juntamente com a metodologia utilizada.

Quadro 2 - Parâmetros físico-químico analisados e equipamentos utilizados

Parâmetro	Unidade	Método/Equipamento
pH	adimensional	pHmetria
Condutividade elétrica	$\mu\text{S cm}^{-1}$	Condutimetria
Cor aparente	uH	Colorimetria
Cloreto	$\text{mg Cl}^{-1} \text{ L}^{-1}$	Titulometria - Mohr
Dureza	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	Titulometria - EDTA
Alcalinidade	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	Titulometria com indicador
Turbidez	NTU	Nefelometria
Sódio	$\text{mg Na}^{+} \text{ L}^{-1}$	Fotometria de chama
Potássio	$\text{mg K}^{+} \text{ L}^{-1}$	Fotometria de chama
STD	mg L^{-1}	Método instrumental

STD= Sólidos Totais Dissolvidos

Fonte: Autor, 2020.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

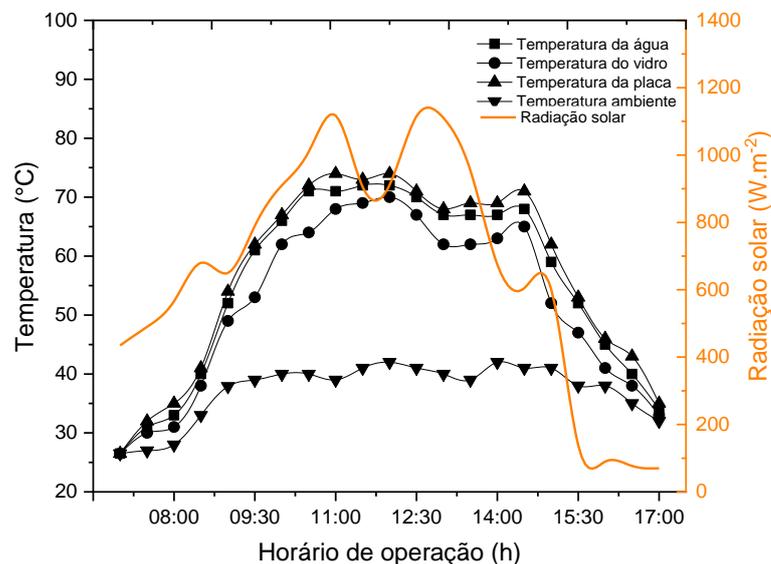
O protótipo do dessalinizador solar deste estudo é uma modificação similar do dessalinizador apresentado por Cardoso *et al.* (2020). No entanto, o presente protótipo possui configuração e modo de funcionamento inédito, não possui referências bibliográficas para comparar os resultados, desta forma, será comparado com dessalinizadores solar retratados na literatura semelhantes ao do experimento.

Foram feitos um total de 17 experimentos no decorrer do ano de 2020, onde os resultados estão reportados no Apêndice A. Para efeito de estudo dos perfis de temperatura, eficiência térmica, produção e qualidade da água e coeficientes de transferência de calor, foi selecionado um experimento dos três últimos meses. A seguir estão apresentados os resultados da pesquisa realizados nos dias 30/09/2020, 06/10/2020 e 16/11/2020.

6.1 Perfis de temperatura e de radiação

A Figura 17 representa as variações de temperatura interna da cobertura de vidro, temperatura da água, temperatura da placa absorvedora e a temperatura ambiente em função da radiação solar incidente no dessalinizador monitoradas do dia 30/09/2020. Verifica-se o aumento gradativo dos perfis de temperatura até às 12h00min, onde os valores da temperatura interna da cobertura de vidro mantiveram-se inferiores às demais temperaturas, e isso de fato ocorre devido o vidro permanecer com uma temperatura inferior ao do vapor d'água, o que garante que ocorra o processo de condensação (AL-GARNI, 2012).

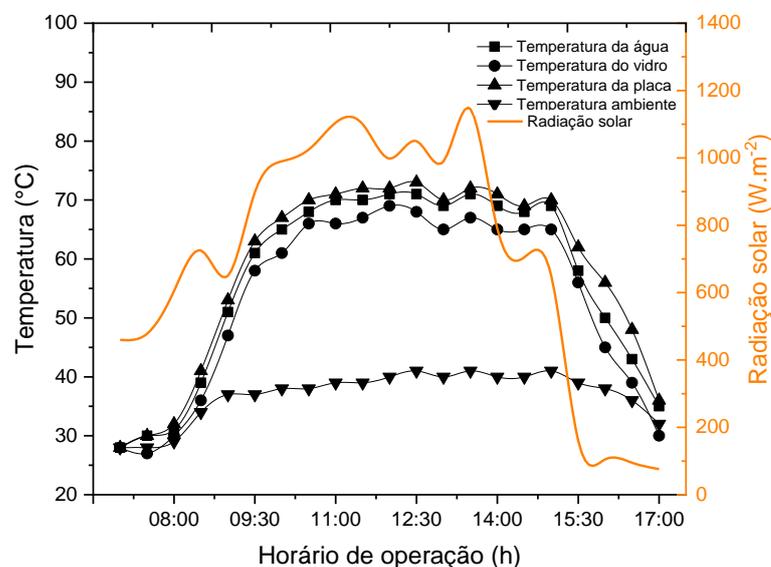
Figura 17 - Perfis de temperatura e radiação solar monitoradas do dia 30/09/2020.



Ao longo do experimento, a temperatura da água salobra sofre variações. Inicia às 07h00min com a temperatura de 26,5 °C e atinge maior temperatura às 11h30min, alcançando 72 °C, trinta minutos antes do momento de maior incidência de radiação solar, de 1117 W m⁻². Abdullah *et al.* (2020) em seu estudo relatou atingir a temperatura máxima da água salobra e temperatura da cobertura de vidro 67,5 °C e 44,5 °C, respectivamente, e intensidade de radiação solar de 1030 W m⁻² no dessalinizador solar modificado pela adição de bandejas internamente. Logo, no estudo realizado do experimento do dia 30/09/2020 foi obtido um valor superior de temperatura, resultando em um comportamento térmico satisfatório do sistema.

A Figura 18 exibe as variações de temperatura interna da cobertura de vidro, temperatura da água, temperatura da placa absorvedora e a temperatura ambiente em função da radiação solar incidente no dessalinizador monitoradas do dia 06/10/2020. Os valores de temperatura interna da cobertura de vidro também se mantiveram inferior às demais temperaturas do dessalinizador. Ao longo do experimento, a temperatura da água salobra também sofre variações e atinge maior temperatura às 12h00min, alcançando 71 °C, e a maior incidência de radiação solar durante o experimento foi de 1145 W m⁻². Resultados semelhantes foram obtidas no trabalho de Mulftah, Sopian e Alghoul (2018) que a temperatura da água salobra alcançou cerca de 62 °C no dessalinizador solar escalonado sem modificação, e após a modificação com adição de refletores a temperatura da água chegou a, aproximadamente, 70 °C, valor conforme identificado no estudo.

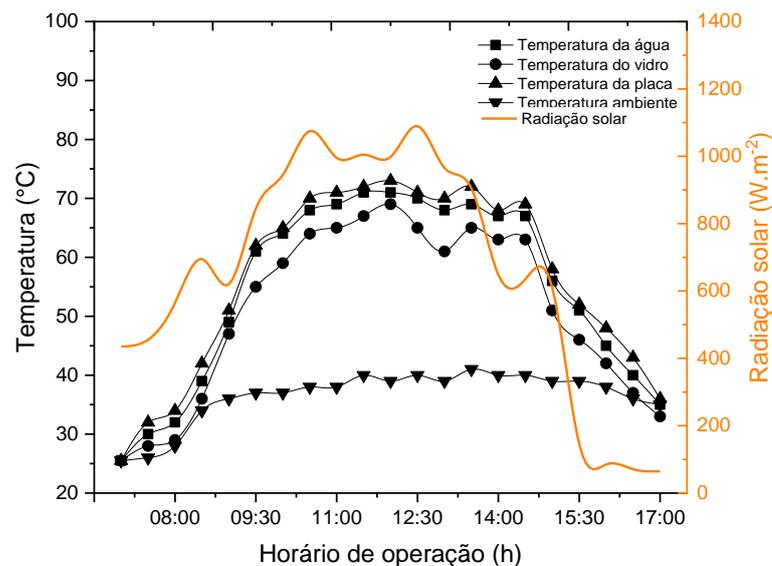
Figura 18 - Perfis de temperatura e radiação solar monitoradas do dia 06/10/2020.



A Figura 19 apresenta as variações de temperatura interna da cobertura de vidro, temperatura da água, temperatura da placa absorvedora e a temperatura ambiente em função da

radiação solar incidente no dessalinizador monitoradas do dia 16/11/2020. A partir da figura, verifica-se que a temperatura da água salobra sofre variações e atinge maior temperatura às 11h30min, alcançando 71 °C, e a maior incidência de radiação solar durante o experimento foi de 1090 W m⁻². Esses resultados foram superiores ao estudo de Bataineh e Abbas (2020) que a temperatura da água salobra alcançou cerca de 54 °C no dessalinizador solar sem modificação, e após a modificação com adição de refletores e aletas a temperatura da água chegou a, aproximadamente, 66 °C no experimento realizado no mês de dezembro, valor inferior apresentado no estudo.

Figura 19 - Perfis de temperatura e radiação solar monitoradas do dia 16/11/2020.



Observa-se que os perfis de temperatura na Figuras 17, 18 e 19 acompanham a intensidade de radiação solar no sistema, devido a decorrência da radiação solar direta e refletida no dessalinizador. O perfil da temperatura ambiente variou de 26,5 °C a 42 °C no decorrer do experimento do dia 30/09/2020, para o experimento do dia 06/10/2020 variou de 28,0 °C a 41,0 °C e para o experimento do dia 06/11/2020 variou de 25,5 °C a 41,0 °C. No estudo de Matrawy, Alosaimy e Mahrous (2015) do dessalinizador solar simples com um refletor inclinado, a temperatura ambiente correspondeu a 35 °C e radiação solar aproximadamente 1150 W m⁻², valores semelhantes encontrado no estudo.

Além disso, os valores obtidos nas Figuras 17, 18 e 19 para a temperatura da placa foram maiores do que a temperatura da água e que por sua vez foi maior do que a temperatura do vidro. Esse comportamento crescente na variação das temperaturas de forma gradativa do interior para a parte exterior do dessalinizador ocorre devido os mecanismos internos e externos

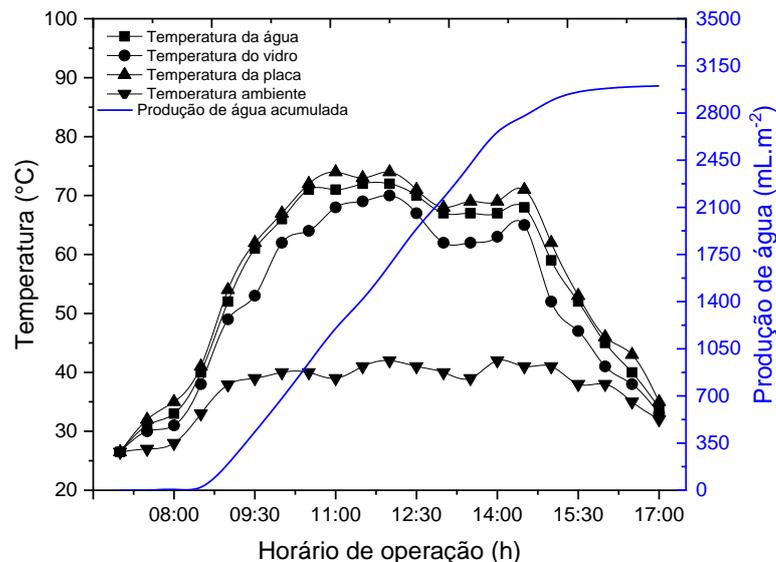
de transferência de calor, acontece com os resultados de Bouzaid *et al.* (2019) e Patel *et al.* (2020).

6.2 Produção de água dessalinizada

A Figura 20 apresenta a variação da produção de água dessalinizada com o tempo de operação e em função dos perfis de temperatura da água, temperatura do vidro, temperatura da placa absorvedora e temperatura do ambiente monitoradas do dia 30/09/2020. Observa-se que o volume de água dessalinizada acompanha a variação das temperaturas da água, do vidro e da placa, onde há o acúmulo gradativo da produção de água dessalinizada.

Com base nos valores obtidos, percebeu-se que durante o ensaio a temperatura do ambiente estava favorável ao experimento, apresentando valores acima da média de 31 °C da região nordeste (INMET, 2019). Outro fato observado foi ausência de alterações bruscas de temperatura ao longo do dia, obtendo-se ao final uma temperatura média de 37,2 °C, influenciando diretamente no aumento da temperatura interna do dessalinizador, que é um fator importante no processo de dessalinização. E com isso, a produção de água dessalinizada acumulada durante o experimento foi de 3001,3 mL m⁻² dia⁻¹.

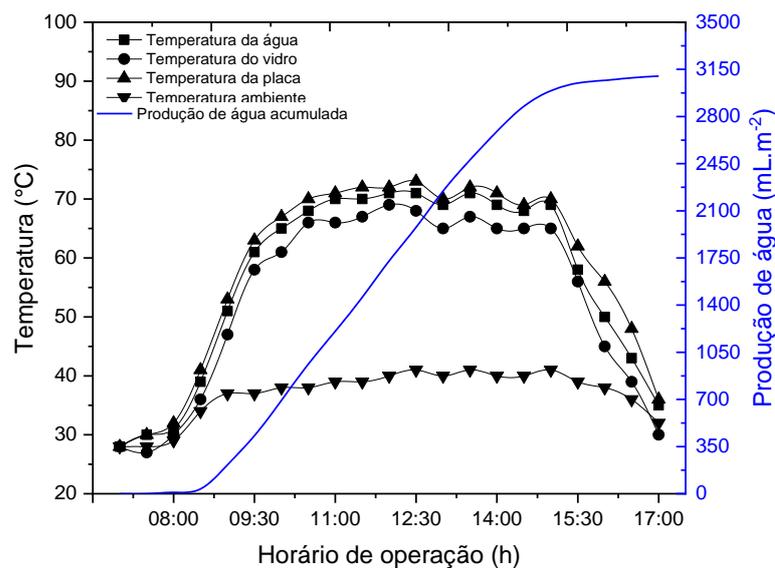
Figura 20 - Produção de água em função dos perfis de temperatura monitoradas do dia 30/09/2020.



Na Figura 21 pode-se observar os valores de temperatura da placa e da água salobra monitoradas do dia 06/10/2020, em que o estudo desses parâmetros relaciona a radiação solar incidente sobre o dessalinizador com a capacidade do sistema de direcionar e conservar essa energia para aquecer a água salobra. Verifica-se que os valores obtidos da temperatura da placa

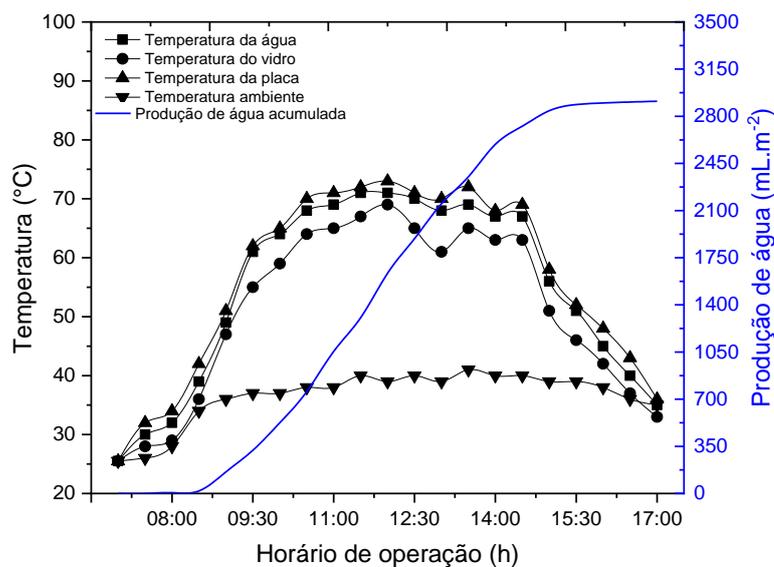
absorvedora foram satisfatórios para o aumento dos níveis de temperatura da água, elevou-se até às 12h30min, chegando ao ápice de 73 °C, e acarretou uma produção de água dessalinizada durante o experimento de 3100,0 mL m⁻² dia⁻¹. Resultado mais próximo ao obtido no experimento, foi retratado por Bouzaid *et al.* (2019) que estudaram um dessalinizador solar tipo cascata com defletores, em que a temperatura da água salobra e temperatura da placa absorvedora atingiram 72 °C e 74 °C, respectivamente, e obtiveram uma produtividade média de 4000 mL m⁻² dia⁻¹.

Figura 21 - Produção de água em função dos perfis de temperatura monitoradas do dia 06/10/2020.



Na Figura 22 apresenta os perfis de temperatura da água, do vidro, do ambiente com a produção acumulada de água dessalinizada do experimento do dia 16/11/2020. Foi constatado que a produção acumulada de água foi de 2912,1 mL m⁻² dia⁻¹, devido a influência direta das condições climáticas, pois o experimento foi realizado em um dia parcialmente nublado, acarretando variações menores das temperaturas de operação no dessalinizador. No trabalho de Cardoso *et al.* (2020) foi realizado um experimento de acordo com condições climáticas aproximadas do estudo, e apresentou uma produção de água dessalinizada de 891 mL m⁻² dia⁻¹, valor ainda inferior, ressaltando uma melhor produção de água dessalinizada do estudo.

Figura 22 - Produção de água em função dos perfis de temperatura monitoradas do dia 16/11/2020.



Ao fim do período de análise a Figura 20 obteve-se uma temperatura média da placa absorvedora e da água salobra de 57,0 °C e 55,5 °C para o experimento do dia 30/09/2020. No experimento do dia 06/10/2020 na Figura 21 a temperatura média da placa absorvedora e da água salobra foi de 58,4 °C e 56,5 °C, valores próximos apresentados na Figura 20. Enquanto no experimento do dia 16/11/2020 na Figura 22 a temperatura média da placa absorvedora e da água salobra foi de 56,4 °C e 54,6 °C, respectivamente. Podemos observar que nas Figuras 20, 21 e 22 a produção de água dessalinizada acumulada acompanhou as temperaturas no sistema. Constatou-se que o aumento da produção de água dessalinizada está diretamente influenciado pela radiação solar e os perfis de temperatura do dessalinizador.

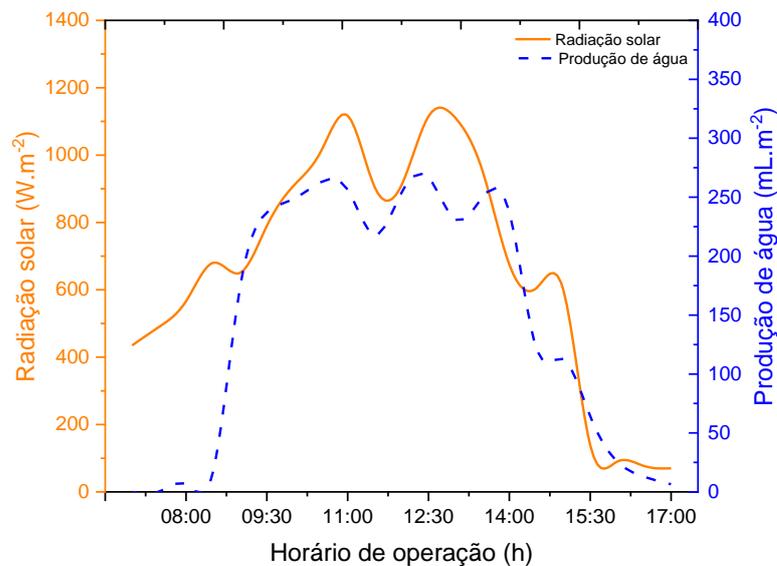
Dessa forma, verifica-se que a produção de água dessalinizada no período das 7h00min às 17h00min do experimento do dia 06/10/2020 foi um pouco maior do que o valor de 3001,3 mL m⁻² dia⁻¹ obtido no experimento do dia 30/09/2020, e esta diferença volumétrica foi devido o valor da radiação do experimento (Figura 21) ter sido maior do que o experimento (Figura 20). Além disso, estes valores foram muito próximos ao valor reportado por Bataineh e Abbas (2020) que obteve uma produção de água dessalinizada de 3014 mL m⁻² dia⁻¹ para o dessalinizador solar modificado com refletores e aletas.

6.3 Produção de água em função da radiação solar

A Figura 23 apresenta os valores da produção de água dessalinizada horária em função da radiação solar no experimento do dia 30/09/2020. Esse último parâmetro, é de fundamental importância para o sistema, visto que os níveis de radiação solar incidentes sobre o

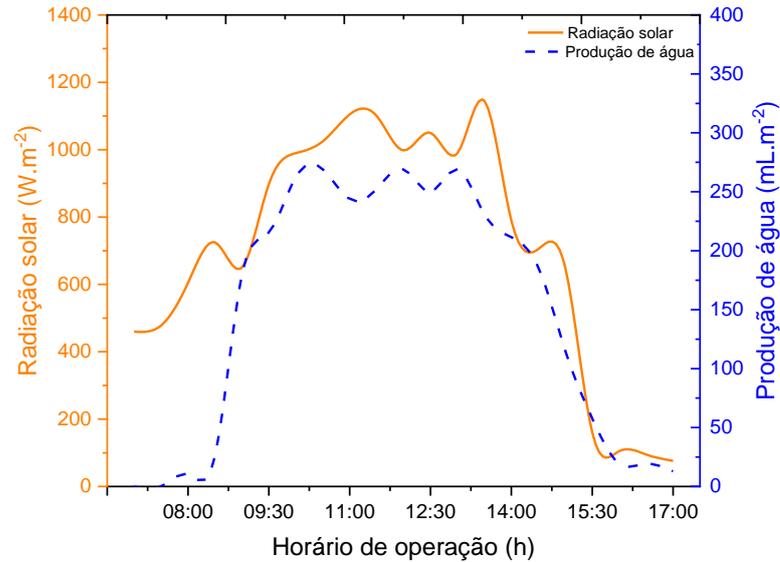
dessalinizador provocam a evaporação da água salobra, dando início ao processo de dessalinização. Verifica-se que o maior valor da intensidade de radiação foi de 1117 W m^{-2} por volta das 11h00min, produzindo cerca de $256,4 \text{ mL m}^{-2}$ de água dessalinizada. Porém, durante o tempo de operação, a produção maior foi de $266,7 \text{ mL m}^{-2}$ com radiação de 1115 W m^{-2} , e isso ocorre porque a placa absorvedora estava superaquecida devido o tempo de exposição à radiação solar, e conseqüentemente aquecendo a água salobra para o processo de evaporação. No estudo de Jani e Modi (2019) a produção de água dessalinizada horária teve o valor máximo de 140 mL m^{-2} com radiação de 900 W m^{-2} para o dessalinizador solar de dupla inclinação com aletas, valor ainda inferior reportado no experimento do dia 30/09/2020.

Figura 23 - Produção de água em função da radiação solar monitoradas do dia 30/09/2020.



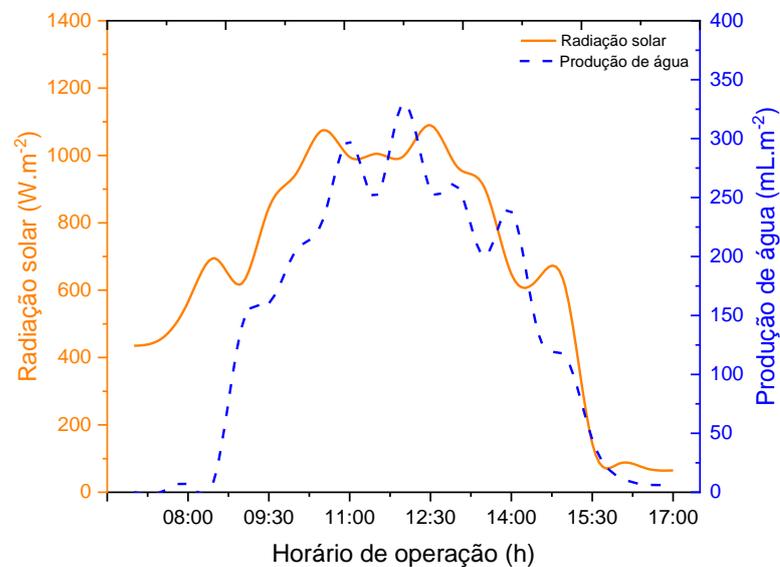
A Figura 24 apresenta a produção de água dessalinizada horária em função da radiação solar no experimento do dia 06/10/2020. É possível notar que os índices de radiação a que o sistema foi exposto foram satisfatórios, se comportando de maneira crescente até as 11h30min, atingindo níveis muito elevados. Observa-se que a variação da produção de água dessalinizada está em fase com a variação da radiação solar, e apresenta o valor máximo horário de $269,2 \text{ mL m}^{-2}$ às 10h30min, hora em que foi registrado o valor de radiação solar com 1025 W m^{-2} . O momento de maior intensidade de radiação solar ocorreu por volta das 13h30min no valor de 1145 W m^{-2} . Em seguida, houve uma pequena variação da radiação solar, e conseqüentemente da produção de água, apresentando uniformidade até o final do experimento.

Figura 24 - Produção de água em função da radiação solar monitoradas do dia 06/10/2020.



A Figura 25 apresenta a produção de água dessalinizada horária em função da radiação solar no experimento do dia 16/11/2020. Durante o experimento, a produção de água dessalinizada horária atingiu o valor máximo horário de 330,2 mL m⁻² às 12h00min, com intensidade de radiação solar de 998 W m⁻². Estes resultados foram superiores ao estudo de Shubhjayothi *et al.* (2020), onde a produção de água dessalinizada horária máxima foi de 280 mL m⁻² com radiação de 1005 W m⁻² para o dessalinizador solar do tipo inclinado.

Figura 25 - Produção de água em função da radiação solar monitoradas do dia 16/11/2020.



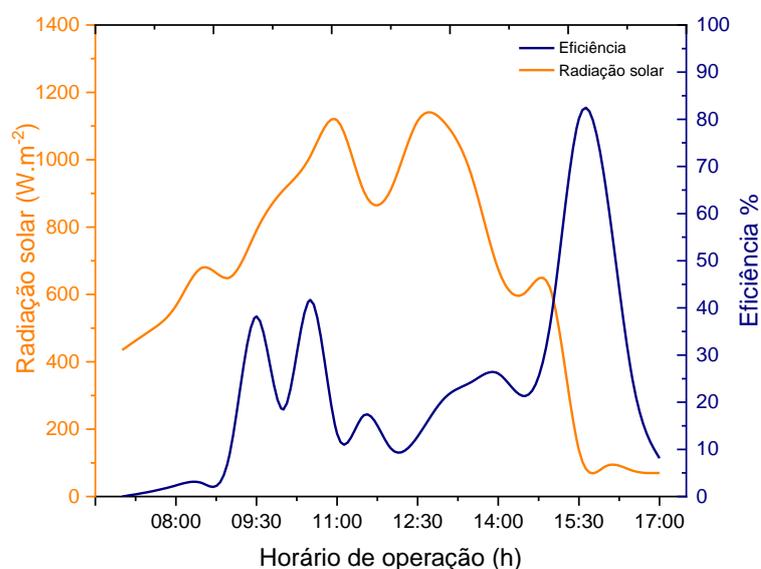
Rahbar, Asadi e Fotouhi-Bafghi (2018) estudaram dois dessalinizadores solares, triangular e tubular, onde atingiu a intensidade de radiação solar de 620 W m⁻² a temperatura

ambiente de 24 °C. Pal *et al.* (2017) em seu estudo do dessalinizador solar do tipo com vários pavios e dupla inclinação atingiu o valor máximo de intensidade solar de 1198 Wm^{-2} , valor próximo do obtido ao estudo do experimento do dia 06/10/2020.

6.4 Eficiência térmica do dessalinizador solar

A evolução da eficiência térmica horária em função da radiação solar no dessalinizador para o experimento do dia 30/09/2020 está apresentada na Figura 26. Observa-se que a eficiência térmica horária acompanha o comportamento da radiação solar devido ao aumento dos perfis de temperatura no sistema. Uma eficiência máxima de 80,14% é alcançada às 15h30min mesmo com o decaimento da intensidade da radiação solar, e isso ocorre devido a capacidade térmica da água resultar em uma taxa constante de evaporação acompanhado do acúmulo de energia térmica anteriormente armazenada no interior do dessalinizador. Salinas-Freire, Pérez-Ones e Rodríguez-Muñoz (2019) realizaram análises comparativas de dessalinizadores solares passivos e apreciaram que a eficiência teórica máxima atinge valores entre 25% e 63%, enquanto os dados experimentais atingiram o máximo de 45%, valores ainda inferiores encontrados no estudo, ressaltando uma melhor eficiência térmica do dessalinizador solar.

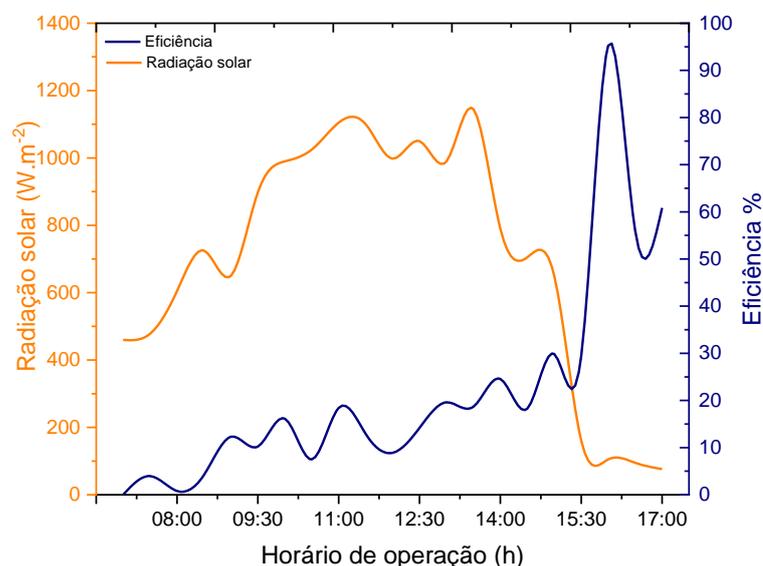
Figura 26 - Eficiência térmica horária em função da radiação solar monitorada do dia 30/09/2020.



Na Figura 27 está apresentada a evolução da eficiência térmica horária em função da radiação solar no dessalinizador para o experimento do dia 06/10/2020. A eficiência térmica

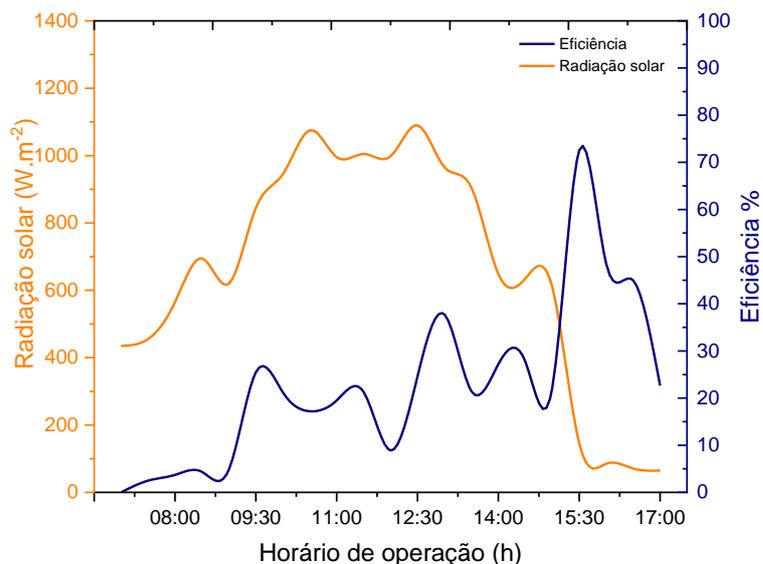
horária atingiu um valor máximo de 95,26% durante o tempo de operação do experimento. Resultado aproximado do estudo foi detectado por Beik, Assari e Tabrizi (2020) que apresentou uma eficiência térmica máxima de 89% para um dessalinizador solar pirâmide escalonado, destacando a eficiência térmica do dessalinizador solar apresentado nesse estudo.

Figura 27 - Eficiência térmica horária em função da radiação solar monitorada do dia 06/10/2020.



Na Figura 28 está apresentada a evolução da eficiência térmica horária em função da radiação solar no dessalinizador para o experimento do dia 16/11/2020. A eficiência térmica horária atingiu um valor máximo de 72,54% durante o tempo de operação do experimento. Apesar que o dia do experimento estava parcialmente nublado, o maior valor de radiação solar registrado foi de 1090 W m⁻² às 12h30min, contribuindo para o funcionamento do sistema. Ao fim da coleta de dados, obteve-se uma radiação solar média de 659,6 W m⁻². No estudo realizado por Mulftah, Sopian e Alghoul (2018) o dessalinizador escalonado antes e após a modificação com refletores, a eficiência térmica horária máxima relatada foi de 52,3% e 60,2%, respectivamente, bem próximo ao encontrado nesse estudo.

Figura 28 - Eficiência térmica horária em função da radiação solar monitorada do dia 16/11/2020.



De acordo com as Figuras 26, 27 e 28, foi possível constatar que os valores da eficiência térmica do dessalinizador acompanha o fluxo do índice de radiação solar, deste modo a eficiência é diretamente proporcional à radiação, justificada pelo aumento das temperaturas da placa e da água, assim proporcionando maior evaporação.

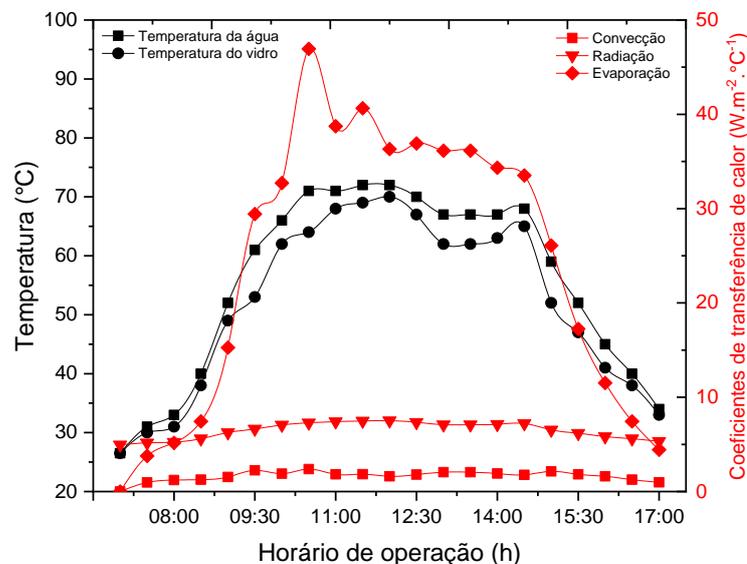
A eficiência térmica diária do experimento do dia 30/09/2020 foi de 22,73%, enquanto do experimento do dia 06/10/2020 foi de 22,01%, e para o experimento do dia 16/11/2020 foi de 22,78%. Comparando as eficiências encontradas no dessalinizador com absorvedor e condensador de pinos desenvolvido por Rabhi *et al.* (2017), no qual obteve, respectivamente, 21,93% e 25,39%, é possível analisar que os valores obtidos neste estudo se encontram dentro de uma faixa aceitável de eficiência, tornando o sistema viável para obtenção de água dessalinizada.

6.5 Coeficientes de transferência de calor no dessalinizador

O estudo dos coeficientes de transferência de calor de convecção, radiação e evaporação no dessalinizador solar, estão de acordo com os dados da literatura para dessalinizador solar tipo cascata, conforme as equações do balanço de energia apresentada no tópico 4.2.1 e do artigo publicado por (BOUZAIID *et al.*, 2019). As curvas do coeficiente de convecção estão relacionadas com o movimento do fluido, enquanto as curvas de radiação estão relacionadas diretamente com a temperatura da água salobra, da cobertura de vidro e da emissividade do vidro e da água. As curvas de evaporação têm valores maiores que os anteriores e geralmente é mais sensível a variação de temperatura (TIWARI e SAHOTA, 2017).

Na Figura 29 são representadas as curvas dos coeficientes de convecção, evaporação e radiação para o experimento do dia 30/09/2020. Verifica-se que os coeficientes de convecção e radiação variaram entre 0,96 a 2,37 $\text{W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e 4,96 a 7,51 $\text{W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, respectivamente. O coeficiente de evaporação atingiu seu ápice às 10h30min no valor de 46,94 $\text{W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Em pesquisa realizada por Prakash e Jayaprakash (2020) de um dessalinizador solar pirâmide múltipla escalonada, os valores encontrados para os coeficientes de convecção e radiação variaram entre 1,80 e 3,50 $\text{W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e 5,80 e 8,30 $\text{W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, valores próximos reportado nesse estudo.

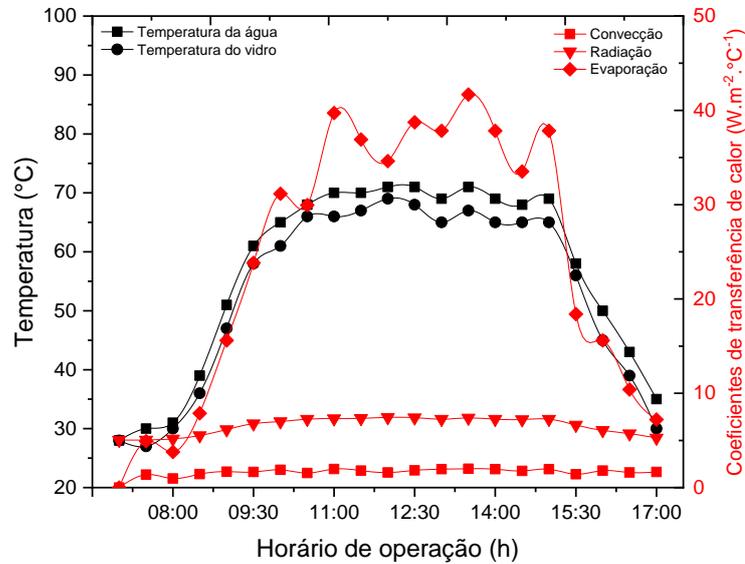
Figura 29- Coeficientes de transferência de calor monitoradas do dia 30/09/2020.



Na Figura 30 estão apresentados os valores dos coeficientes de convecção, radiação e evaporação para o experimento do dia 06/10/2020. Os coeficientes de convecção e radiação variaram entre 0,96 a 1,99 $\text{W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e 5,03 a 7,45 $\text{W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, respectivamente. Observa-se

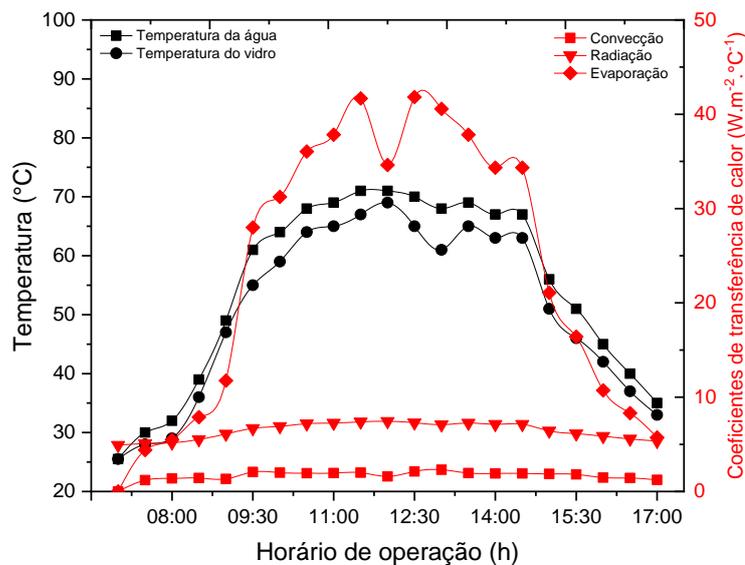
que a variação para o coeficiente de evaporação encontra-se entre $0,01$ e $41,68 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ para variação de temperatura entre a água da placa absorvedora e a cobertura de vidro.

Figura 30- Coeficientes de transferência de calor monitoradas do dia 06/10/2020.



Na Figura 31 estão representados os valores dos coeficientes de convecção, radiação e evaporação para o experimento do dia 16/11/2020. Constata-se que o coeficiente de transferência de calor por evaporação atingiu seu valor máximo de $41,82 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ às 12h30min, enquanto o coeficiente de convecção foi de $2,30 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, e o coeficiente de radiação foi de $7,45 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ às 12h00min. Este resultado do coeficiente de evaporação constata com o resultado obtido por Mulftah, Sopian e Alghoul (2018) que apresentaram um valor máximo de $43,5 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, utilizando um dessalinizador solar escalonado modificado. Desta maneira, podemos observar que para a evaporação entre a água e a cobertura de vidro, a evaporação líquida depende da diferença de temperatura entre a água e a cobertura de vidro. Além disso, a evaporação da superfície da água está relacionada com a temperatura da água. Já que a temperatura da água varia muito ($25,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $71,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$) e constantemente recebe a entrada de radiação solar.

Figura 31- Coeficientes de transferência de calor monitoradas do dia 16/11/2020.



A partir dos resultados obtidos das Figura 29, 30 e 31, foi possível notar que o coeficiente de transferência de calor por evaporação domina os coeficientes de transferência de calor por convecção e radiação, e isso ocorre por o processo de evaporação conduzir à transferência de massa da superfície da água para condensar na cobertura de vidro. Ainda de acordo com Prakash e Jayaprakash (2020) a área da superfície da cobertura de vidro de condensação é maior do que a superfície da água de evaporação, o valor do coeficiente de transferência de calor por evaporação é sempre maior do que os coeficientes de calor por convecção e radiação ao longo do tempo do experimento, o que corrobora para os resultados nesse estudo.

6.6 Análise térmica do dessalinizador solar

Os perfis de desempenho térmico do vidro, da placa e da água do dessalinizador foram calculados com base nas Equações reportadas por (ELANGO, GUNASEKATAN e SAMPATHKUMAR, 2015). As Figuras 32, 33 e 34 apresentam os perfis de temperaturas teóricas e experimentais da água para cada dia do experimento realizado do dessalinizador solar.

A partir da observação experimental, podemos observar que as temperaturas da água se elevam de acordo com o aumento da energia solar nas horas da manhã, atinge o máximo ao meio-dia e reduz no decorrer do final da tarde. Analisando os resultados com os valores de temperatura da água teórica, observa-se que ambas denotam resultados próximos, acompanhando os níveis de radiação solar durante o experimento. No estudo de Modi e Modi (2020) com dessalinizador solar de inclinação única utilizando tecido, foram apontados os

valores de temperatura da água experimental e teórico, onde o comportamento se manteve próximos durante as horas da manhã, desempenho térmico similar ao encontrado neste estudo.

Figura 32- Perfis de temperatura da água em função da radiação solar monitoradas do dia 30/09/2020: (●) teórico e (▲) experimental.

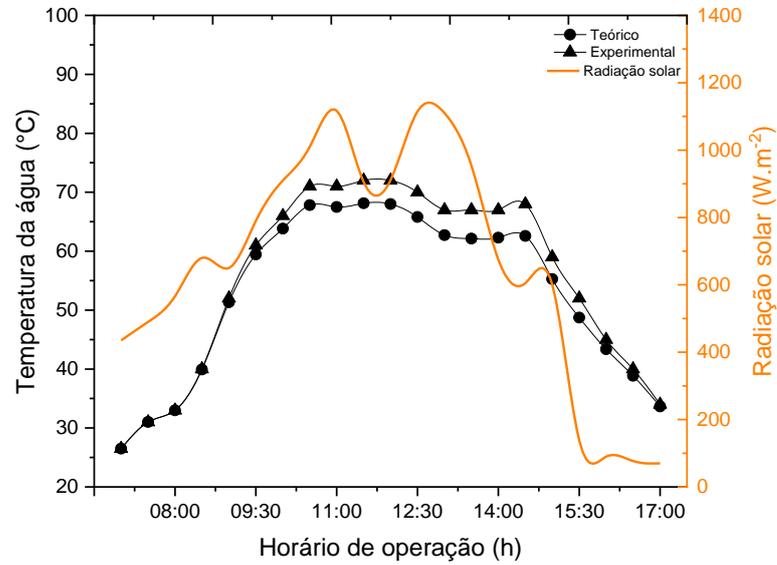


Figura 33- Perfis de temperatura da água em função da radiação solar monitoradas do dia 06/10/2020: (●) teórico e (▲) experimental.

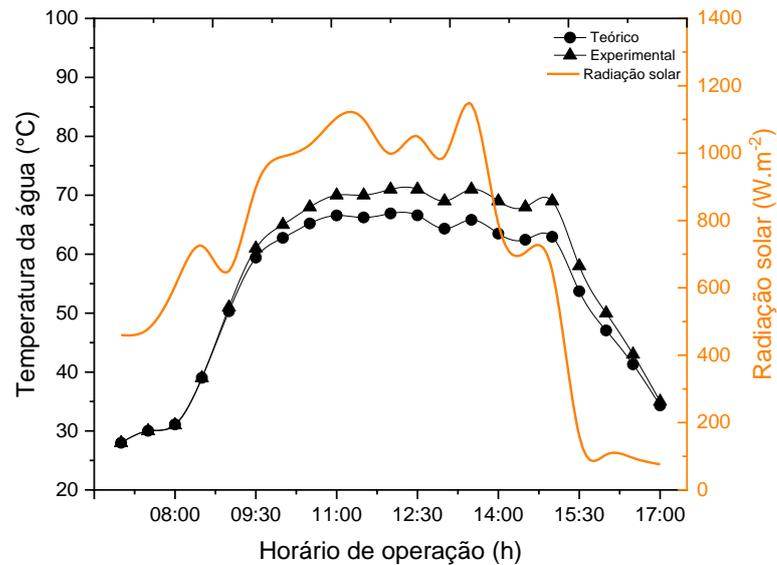
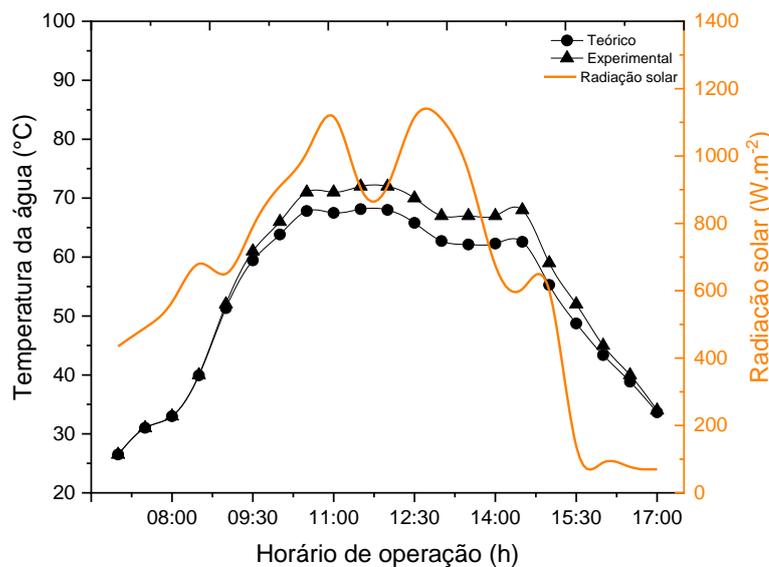


Figura 34- Perfis de temperatura da água em função da radiação solar monitoradas do dia 16/11/2020: (●) teórico e (▲) experimental.



Nas Figuras 35, 36 e 37 são apresentados os perfis de temperaturas teóricas e experimentais da placa absorvedora para cada dia do experimento realizado no dessalinizador solar.

De acordo com os resultados obtidos para temperatura teórica e experimental da placa absorvedora, todos os experimentos apresentaram uma conformidade entre os valores, estando de acordo com os valores de radiação solar durante o tempo de operação.

No experimento do dia 30/09/2020, as temperaturas teórica e experimental máximas da placa absorvedora foram 71,5 °C e 74,0 °C, respectivamente. Para o experimento do dia 06/10/2020, as temperaturas teórica e experimental máximas da placa absorvedora foram 72,2 °C e 73,0 °C, respectivamente. E para o experimento do dia 16/11/2020, as temperaturas teórica e experimental máximas da placa absorvedora foram 70,9 °C e 73,0 °C, respectivamente. Estes resultados da temperatura da placa absorvedora foram semelhantes reportado no estudo de Bouzaid *et al.* (2019) que atingiu 72° a 74°C, respectivamente, para método número e experimental no dessalinizador solar tipo cascata com refletores.

Figura 35- Perfis de temperatura da placa em função da radiação solar monitoradas do dia 30/09/2020: (•) teórico e (▲) experimental.

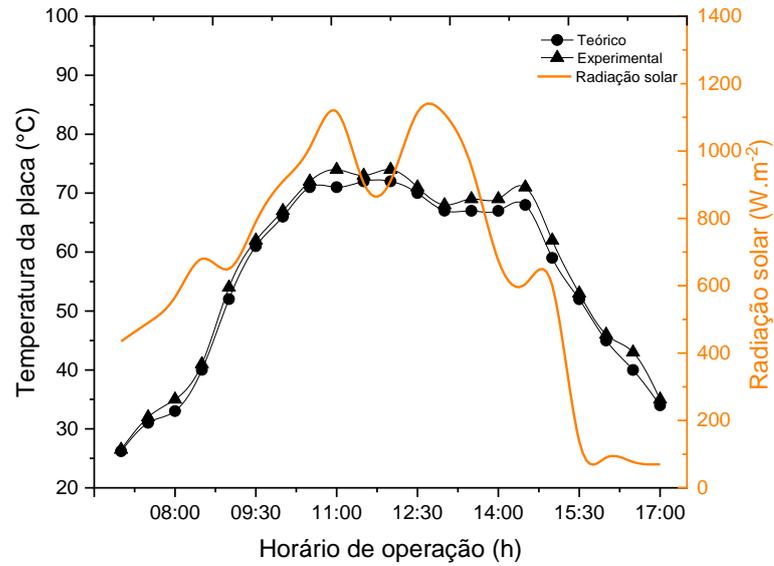


Figura 36- Perfis de temperatura da placa em função da radiação solar monitoradas do dia 06/10/2020: (•) teórico e (▲) experimental.

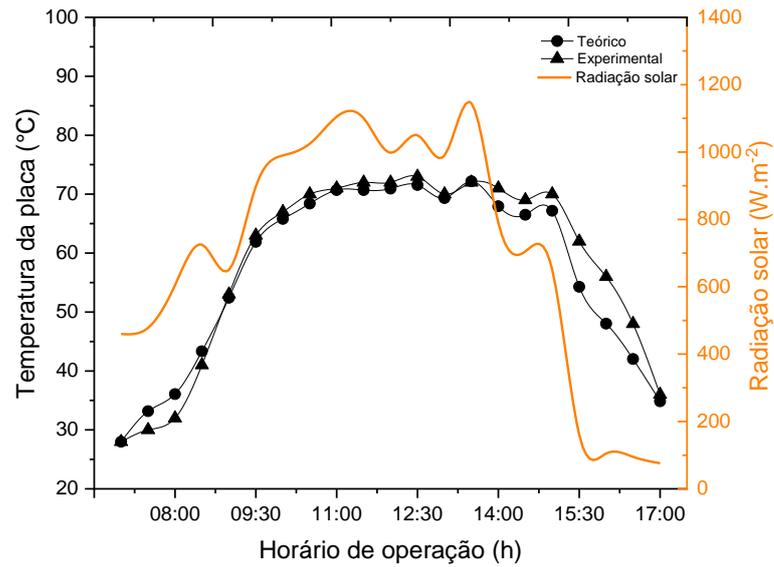
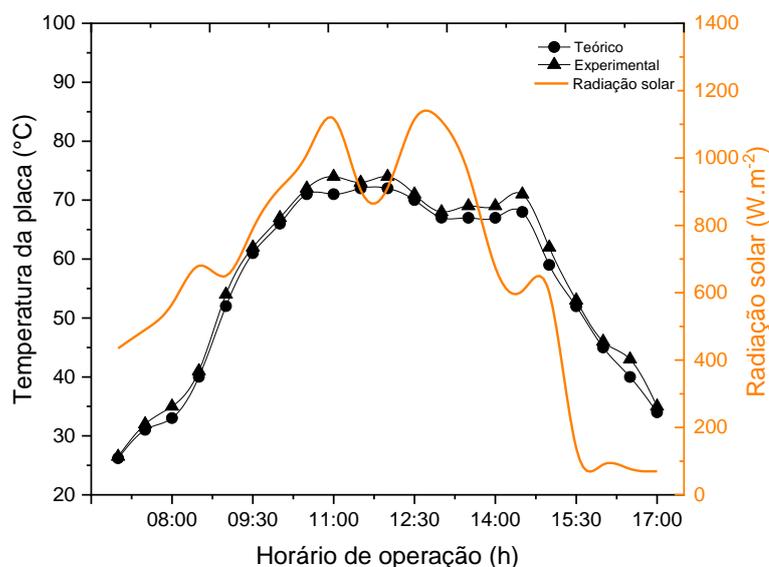


Figura 37- Perfis de temperatura da placa em função da radiação solar monitoradas do dia 16/11/2020: (•) teórico e (▲) experimental.



Nas Figuras 38, 39 e 40 são apresentados os perfis de temperaturas teóricas e experimentais da cobertura do vidro para cada dia do experimento realizado do dessalinizador solar.

Conforme os resultados obtidos para temperatura teórica e experimental da cobertura interna do vidro, nas horas iniciais de cada experimento, apresentaram valores equiparados, além disso ocorreram uma pequena diferença de valores no horário entre às 10h00min e 15h00min, provavelmente devido a influência direta dos coeficientes de transferência de calor de convecção e radiação. Shubhajyothi *et al.* (2020), apresentaram estudo sobre dessalinizador solar do tipo inclinado, obtendo valores de temperatura teórica e experimental máximas da cobertura do vidro de 54,0 °C e 70,0 °C, similares reportado nesse estudo, o que evidencia a variação natural do comportamento das temperaturas durante o tempo de operação.

De acordo com os resultados do experimento do dia 30/09/2020, as temperaturas teórica e experimental máximas da cobertura de vidro que ocorreram aproximadamente às 12h00min são 58,7 °C e 70,0 °C, respectivamente. Baseado nos resultados teórico e experimental do dia 06/10/2020, as temperaturas máximas da cobertura interna do vidro que ocorreram aproximadamente às 12h00min são 57,2 °C e 69,0 °C, respectivamente. Para os resultados teórico e experimental do dia 16/11/2020, as temperaturas máximas da cobertura interna do vidro ocorreram aproximadamente às 12h00min, com temperaturas de 56,8 °C e 69,0 °C, respectivamente.

Figura 38- Perfis de temperatura do vidro em função da radiação solar monitoradas do dia 30/09/2020: (•) teórico e (▲) experimental.

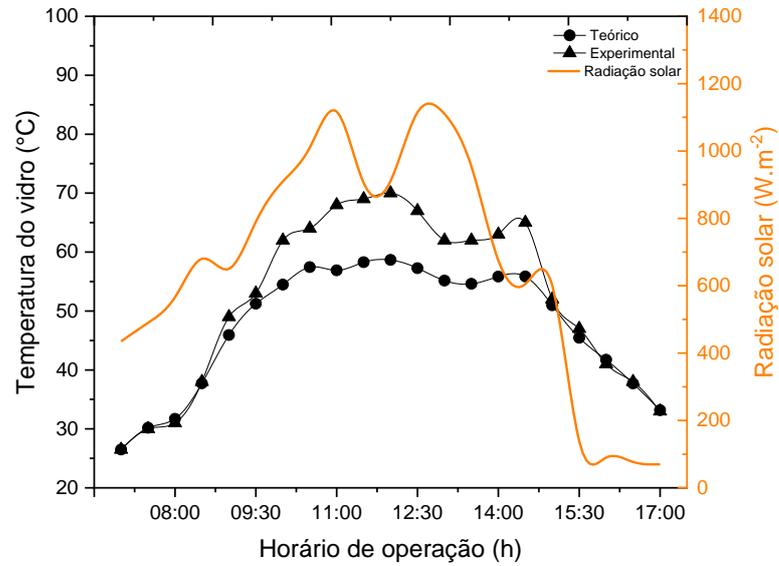


Figura 39- Perfis de temperatura do vidro em função da radiação solar monitoradas do dia 06/10/2020: (•) teórico e (▲) experimental.

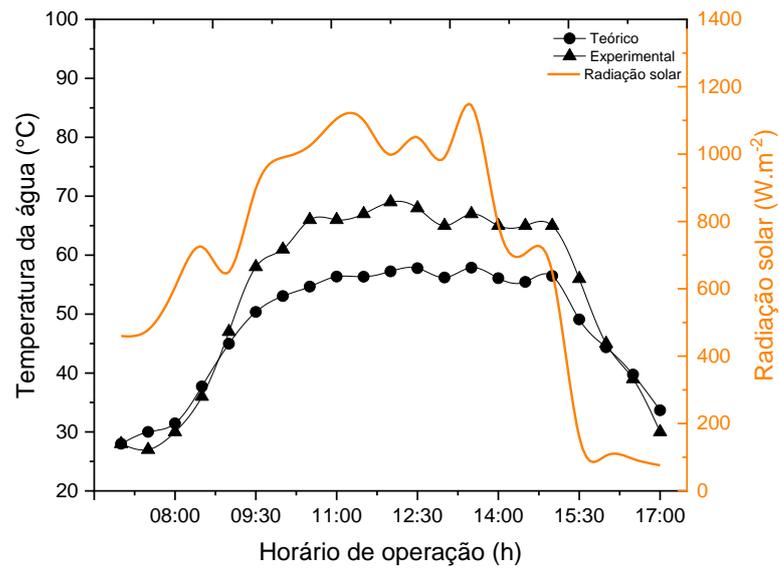
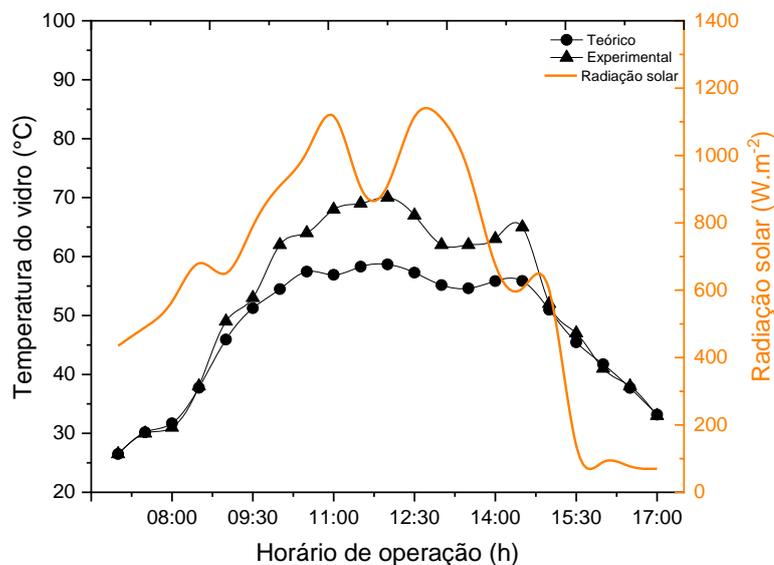


Figura 40- Perfis de temperatura do vidro em função da radiação solar monitoradas do dia 16/11/2020: (•) teórico e (▲) experimental.



6.7 Estudo da potabilidade da água

Além de projetar, construir e testar o dessalinizador solar e verificar sua produtividade de água dessalinizada, o presente trabalho também teve como finalidade verificar a potabilidade da água obtido pelo sistema proposto. Desta forma, a Tabela 6 apresenta um comparativo entre a água salobra e a água dessalinizada com relação aos parâmetros de potabilidade mencionados na seção 5.5. Além disso, também são apresentados os valores máximos permitidos pela legislação atual.

Tabela 5 - Resultado da análise físico-química das amostras de água salobra e dessalinizada

Parâmetro de controle	Água salobra			Água dessalinizada			V.M.P.*
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	
pH	8,0	7,9	8,1	6,1	6,3	6,2	6,0 – 9,5
Condutividade elétrica (μScm^{-1})	3842,0	3456,0	2997,0	48,0	35,0	15,0	–
Cor aparente (uH)	18,7	16,5	13,8	6,0	5,4	7,3	15,0
Cloreto ($\text{mg Cl}^{-1} \text{L}^{-1}$)	1755,0	1207,0	994,0	35,5	21,3	14,2	250,0
Dureza ($\text{mg CaCO}_3 \text{L}^{-1}$)	350,0	250,0	250,0	20,0	17,5	16,5	500,0
Alcalinidade ($\text{mg CaCO}_3 \text{L}^{-1}$)	18,0	20,0	21,0	2,0	2,3	3,0	–
Turbidez (NTU)	1,3	0,8	0,7	0,4	0,3	0,3	5,0
Sódio ($\text{mg Na}^{+} \text{L}^{-1}$)	935,0	762,0	600,0	0,0	0,0	0,0	200,0
Potássio ($\text{mg K}^{+} \text{L}^{-1}$)	19,0	16,0	11,0	1,0	0,0	0,0	–
STD (mgL^{-1})	1921,0	1980,0	1856,0	24,0	7,0	4,0	1000,0

*V.M.P. = Valor Máximo Permitido segundo a RDC n° 5, de 28 de setembro de 2017, Anexo XX/
STD= Sólidos Totais Dissolvidos/ P1, P2 e P3: Poços do distrito Riacho Fundo de Barra de São Miguel – PB.

Os resultados obtidos das análises, qualificaram o potencial hidrogeniônico pH das amostras de água salobra como básico, devido à apresentação de um valor superior a 7. Para Libânio (2010) o potencial hidrogeniônico corresponde à concentração dos íons H^+ nas águas e representa a intensidade das condições ácidas ou alcalinas da água. O valor do pH encontrado nas amostras para a água salobra foram 8,0, 7,9 e 8,1, e após o processo de dessalinização o pH diminuiu para 6,1, 6,3 e 6,2, respectivamente. Comparando esses dados com a Portaria de Consolidação nº 005/2017 do Ministério da Saúde – MS (BRASIL, 2017), que estabelece os índices ideais de pH entre 6,0 e 9,5, observa-se que as amostras apresentam valores dentro do padrão de potabilidade.

A condutividade elétrica determina a capacidade da água em conduzir a corrente elétrica na presença de substâncias dissolvidas que se dissociam em ânions e cátions, assim sendo exatamente proporcional à concentração iônica (LIBÂNIO, 2010). O valor encontrado para P1 e P2 foram 3842,0 e 3456,0 $\mu S\ cm^{-1}$ para a água salobra, e que foi superior ao encontrado por Cardoso *et al.* (2020) de 3190,0 $\mu S\ cm^{-1}$ em poço artesiano do município de Caturité-PB. Com a aplicação da dessalinização foi possível observar uma redução de 98,75% para P1 e 98,99% para P2 da condutividade elétrica na água. De acordo com dados da CETESB (2009) a baixa condutividade inferior a 200 $\mu S\ cm^{-1}$ pode indicar água potável por apresentar concentrações baixas de sais dissolvidos. No presente estudo apenas a água obtida no processo de dessalinização apresentou nível inferior de 200 $\mu S\ cm^{-1}$ de condutividade elétrica, sendo aceitável a qualidade da água para consumo humano para este parâmetro.

O valor obtido na análise de sólidos totais dissolvidos (STD) na água salobra foram 1921,0, 1980,0 e 1856,0 $mg\ L^{-1}$ para P1, P2 e P3, respectivamente, na qual encontraram-se fora dos padrões exigidos pela legislação brasileira, que delimita valor máximo de 1000 $mg\ L^{-1}$ para água potável. A concentração em excesso de STD pode oferecer risco, tornando a água desagradável ao paladar e o seu consumo pode causar o acúmulo de sais na corrente sanguínea, possibilitando a formação de cálculos renais (SANTOS e MOHR, 2013). Quanto ao valor obtido de STD da água dessalinizada, teve uma redução de 98,75%, 99,65% e 99,78% de STD que estavam presentes nas amostras P1, P2 e P3 da água salobra, e, portanto, o parâmetro atendeu o valor referenciado pela legislação vigente.

Em relação ao parâmetro cor aparente, a Portaria de Consolidação nº 005/2017 do MS (BRASIL, 2017) determina o valor máximo de 15 uH para a potabilidade da água, uma vez que, quanto maior o valor da cor aparente, maior será a quantidade de partículas coloidais ou em suspensão. Pode-se observar na Tabela 6 que os valores de cor aparente das amostras da água salobra apresentaram-se acima do máximo permitido dos padrões de potabilidade, apenas as

amostras de água dessalinizada apresentaram de acordo com a legislação vigente. Dourado *et al.* (2018), analisaram os parâmetros físico-químicos de águas utilizadas para consumo em poços artesianos no município de Vitória da Conquista, região sudoeste da Bahia, e constataram que apenas uma amostra atendeu ao padrão vigente, e as demais amostras apresentaram um valor aproximado de 65 uH para cor, valor também fora do padrão de potabilidade.

Os parâmetros de turbidez, dureza e alcalinidade das amostras de água salobra e de água dessalinizada apresentaram-se dentro dos padrões de potabilidade de acordo com a Portaria de Consolidação nº 005/2017 do MS (BRASIL, 2017) antes e após o processo de dessalinização.

Os cloretos estão presentes em quase todas as águas subterrâneas e são provenientes da dissolução de minerais, estando normalmente associado ao sódio (SILVA e MIGLIORINI, 2014). Logo, analisando as amostras de água salobra, observou-se níveis altíssimos de cloreto com 1755,0 mg L⁻¹ para P1, um valor 7 vezes maior que o permitido pela Portaria de Consolidação nº 005/2017 do MS (BRASIL, 2017) e valor superior ao encontrado por Silva *et al.* (2016) de 1370,3 mg L⁻¹ em poço artesiano no município de Pedra Lavrada-PB. Entretanto, ao analisar a mesma água após o processo de dessalinização solar, obteve-se uma redução de 97,98% de cloreto, e para as amostras P2 e P3 apresentaram uma redução de 98,23% e 98,57% de cloreto, resultados compatíveis com o parâmetro de potabilidade estabelecido pelo Ministério da Saúde (BRASIL, 2017).

Além disso, um dos parâmetros mais significativo foi o sódio, que apresentou nas amostras de água salobra alto teor, no valor de 935,0 mg L⁻¹ para P1 que, após o processo de dessalinização, tanto P1, P2 e P3 obtiveram uma redução total do sódio na água. Comparando esses dados com a Portaria de Consolidação nº 005/2017 do MS (BRASIL, 2017), que estabelece o valor máximo de 200 mg L⁻¹ de sódio, observa-se que apenas as amostras de água dessalinizada apresentaram valores dentro do padrão de potabilidade. No estudo de Cardoso *et al.* (2020), um dessalinizador tipo cascata foi desenvolvido, e analisaram águas de poços no município de Juazeirinho – PB com valores de sódio na água salobra de 520,0 mg L⁻¹, que pós-dessalinização, constataram valores baixos e próximos reportado neste estudo para fins de potabilidade.

Com relação ao parâmetro potássio, a Portaria de Consolidação nº 005/2017 do MS não estabelece limites em água de abastecimento humano. O potássio foi encontrado nas amostras de água salobra de P1, P2 e P3 com concentrações de 19,0, 16,0 e 11,0 mg L⁻¹ (Tabela 6). O potássio é um elemento importante para o corpo humano e, juntamente com o sódio, participam de trocas intracelulares (QUEIROZ e OLIVEIRA, 2018). Segundo dados da CETESB (2009),

as concentrações de potássio em águas naturais não excedem 10 mg L^{-1} , indicando que apenas as águas dessalinizadas do estudo encontram-se dentro do padrão esperado para esse elemento.

Devido aos baixos níveis de salinidade das águas dessalinizadas obtida, faz-se necessária a adição de sais minerais para adequá-la ao consumo humano de acordo com a Resolução da Diretoria Colegiada – RDC N° 316, de 17 de outubro de 2019, do Ministério da Saúde e Agência Nacional de Vigilância Sanitária (BRASIL, 2019b). Uma forma é misturar a água dessalinizada obtida com a água salobra utilizada. Por meio dessa mistura, a produção diária do dessalinizador solar é maior, atendendo a um maior número de pessoas. Ainda de acordo com a RDC n° 316, a água após o processo de dessalinização precisa conter o mínimo de 30 mg L^{-1} de sais, e deve atender aos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria de Consolidação n° 005/2017 do MS (BRASIL, 2017). Desse modo, para atender aos padrões de potabilidade, deve-se acrescentar na água dessalinizada de P1, P2 e P3 um percentual de 0,04%, 1,6% e 1,8% do volume de água salobra, respectivamente, desde que ela se encontre dentro dos padrões microbiológicos estabelecidos pela Portaria de Consolidação n° 005/2017 do MS (BRASIL, 2017).

7 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos com o dessalinizador solar portátil ondular com refletores de radiação integrados apresentaram-se concordância com alguns resultados experimentais em sistema passivo/ativo, possibilitando, desta maneira, a construção e utilização do equipamento. No presente trabalho, além de atingirmos os objetivos iniciais e diante dos resultados obtidos, pode-se inferir que:

- Os níveis de incidência de radiação solar sobre o dessalinizador foram essenciais para o aumento dos perfis de temperatura e evaporação da água salobra, que promoveram o processo de dessalinização.
- Verificou-se que um aumento significativo na produtividade de água dessalinizada é conseguido através dos refletores no dessalinizador solar, comparado com dessalinizadores solar retratados na literatura, visto que, os refletores permitiram a intensificação de radiação solar no equipamento, que levou o aumento dos coeficientes de transferência de calor por convecção, radiação e evaporação, ocasionando melhor desempenho térmico para o sistema. Além disso, foi constatado que a eficiência térmica do dessalinizador acompanhou o fluxo de radiação solar e que teve relação direta com a produção de água dessalinizada.
- Os resultados teóricos dos perfis de temperatura para o vidro, a água e a placa absorvedora de calor estão em grande concordância com aqueles obtidos experimentalmente. Então, dá uma confirmação da capacidade do modelo citado no estudo para representar fielmente o processo de dessalinização.
- Os resultados obtidos das análises físico-químicas das águas salobra e dessalinizada foram satisfatórios, apresentando valores de cloreto, sódio, STD, entre outros, após o processo de dessalinização, dentro dos valores máximos permitidos pela Portaria de Consolidação nº 005/2017 do MS, o que confirma a eficiência do dessalinizador solar para a obtenção de água dessalinizada.
- O processo de dessalinização solar se configura uma boa alternativa para a produção de água dessalinizada para comunidades isoladas, em que a demanda de água não é elevada, e onde existe alta incidência de radiação solar.
- O dessalinizador solar desenvolvido é uma proposta inédita em sistemas passivo/ativo de dessalinização que apresentam desempenho equivalente ao de sistemas presentes na área de dessalinização via energia solar, com um baixo custo de operação, e considerado uma tecnologia ambiental e social.

8 SUGESTÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Foram identificados alguns ajustes que deverão otimizar o sistema, em trabalhos futuros:

- Realizar a operação simultânea de dois dessalinizadores do mesmo modelo para poder comparar a influência dos parâmetros que não podem ser controlados.
- Melhorar o isolamento térmico nas técnicas de construção, como forma de otimizar os processos de aproveitamento da radiação solar.
- Realizar outras avaliações e testes em períodos mais longos.
- Realizar o estudo hidrodinâmico do dessalinizador.
- Realizar análises microbiológicas da água antes e após o processo de dessalinização.
- Usar o Datalogger para obter um melhor registro de dados do experimento.
- Realizar um estudo de viabilidade técnico-econômica do dessalinizador solar proposto para atender as necessidades de comunidades isoladas.

REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, A. S.; YOUNES, M. M.; OMARA, Z. M.; ESSA, F. A. New design of trays solar still with enhanced evaporation methods–Comprehensive study. **Solar Energy**, v. 203, p. 164-174, 2020.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10899: Energia Solar Fotovoltaica - Terminologia**. 2a ed. Rio de Janeiro: S.n., 2013. 11 p.
- AGGARWAL, S.; TIWARIG, N. Convective mass transfer in a double-condensing chamber at conventional solar still, **Desalination**; v. 115, p. 181-188, 1998.
- AHSAN, A.; IMTEAZ, M.; RAHMAN, A.; YUSUF, B.; FUKUHARA, T. Design, fabrication and performance analysis of an improved solar still. **Desalination**; v. 292, p.105–12, 2012.
- ALAUDEEN, A.; JOHNSON, K.; GANASUNDAR, P.; ABUTHAHIR, A. S.; SRITHAR, K. Study on stepped type basin in a solar still. **Journal of King Saud University-Engineering Sciences**, v. 26, n. 2, p. 176-183, 2014.
- AL-GARNI, A. Z. Productivity enhancement of solar still using water heater and cooling fan. **Journal of Solar Energy Engineering**, v. 134, n. 3, 2012.
- AL-HAYEK, I.; BRADAN, O. O. The effect of using different designs of solar stills on water distillation; **Desalination**, v. 169, p. 121-127, 2004.
- AL-HASSAN, G. A.; ALGARNI, S. A. Exploring of water distillation by single solar still basins. **American Journal of Climate Change**, v. 2, p. 57-61, 2013.
- AL-NIMR, M. A.; DAHDOLAN, M. E. Modeling of a novel concentrated solar still enhanced with a porous evaporator and an internal condenser. **Solar Energy**, v. 114, p. 8-16, 2015.
- ALMUHANNA, E. A. Evaluation of single slop solar still integrated with evaporative cooling system for brackish water desalination. **Journal of Agricultural Science**, v. 6, n. 1, p. 48, 2014.
- AL-TAMEEMI, M. A.; CHUKIN, V. V. Global water cycle and solar activity variations. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 142, p. 55-59, 2016.
- ALVES, C. **Tratamento de águas de abastecimento**, 2ª Edição, Publindústria, 301- 320, 2007.
- ANA – Agência Nacional de Águas (Brasil). **Manual de usos consuntivos da água no Brasil** / Agência Nacional de Águas. Brasília: 2019. 75 p.
- ANSARI, O.; ASBIK, M.; BAH, A.; ARBAOUI, A.; KHMOU, A. Desalination of the brackish water using a passive solar still with a heat, **Desalination**, v. 324, p. 10-20, 2013.
- AYBAR, H. Mathematical modeling of an inclined solar water distillation system. **Desalination**, v. 190, n. 1-3, p. 63-70, 2006.

- AZEVEDO, A. C. Verso e reverso das políticas públicas de água para o semiárido brasileiro. **Revista Política e Planejamento Regional**, v. 2, n. 2, p. 373-392, 2015.
- BADRAN, O. O.; ABU-KHADER, M. M. Evaluating thermal performance of a single slope solar still. **Heat and Mass Transfer**, v. 43, n. 10, p. 985-995, 2007.
- BAIRD, R. B.; EATON, A. D.; RICE, E. W. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 1496 p. 23th edition. Washington, USA: American Public Health Association, 2017.
- BATAINEH, K. M. Multi-effect desalination plant combined with thermal compressor driven by steam generated by solar energy. **Desalination**, v. 385, p. 39-52, 2016.
- BATAINEH, K. M.; ABBAS, M. A. Performance analysis of solar still integrated with internal reflectors and fins. **Solar Energy**, v. 205, p. 22-36, 2020.
- BEIK, A. J. G.; ASSARI, M. R.; TABRIZI, H. B. Passive and active performance of a multi-side-stepped square pyramid solar still; experimental and modeling. **Journal of Energy Storage**, v. 32, p. 101832, 2020.
- BEJAN, A.; KRAUS, A. D. **Heat Transfer Handbook**. New Jersey, USA: John Wiley & Sons Inc., 2003.
- BELESSIOTIS, V.; KALOGIROU, S.; DELYANNIS, E. **Thermal solar desalination: Methods and systems**. Elsevier, 2016.
- BHARDWAJ M. V.; KORTENAAR, T.; MUDDE, R. F. Influence of condensation surface on solar distillation; **Desalination**, v. 326, p. 37-45, 2013.
- BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Fenômenos de Transporte**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.
- BOUZAID, M.; OUBREK, M.; ANSARI, A.; SABRI, A.; TAHA-JANAN, M. Mathematical Analysis of a New Design for Cascade Solar Still Performance. **Tech Science Press FDMP**, v. 12, p. 15-32, 2016.
- BOUZAID, M.; ANSARI, O.; TAHA-JANAN, M.; MOUHSIN, N.; OUBREK, M. Numerical Analysis of Thermal Performances for a Novel Cascade Solar Desalination Still Design. **Energy Procedia**, v. 157, p. 1071-1082, 2019.
- BRASIL. Resolução CONAMA 357, de 17 de março de 2005. **Conselho Nacional de Meio Ambiente**.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Documento Base do Programa Água Doce**. Brasília, 2010.
- BRASIL. **Portaria de consolidação de nº 5 de 28 de setembro de 2017 do Ministério da Saúde**. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.
- BRASIL. **Portaria nº 888, de 7 de março de 2019 do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações**. Institui o Programa de Apresentação de Unidades de

Dessalinização e Purificação de Águas Salobras e Salinas para Teste e Análise de Desempenho, 2019a.

BRASIL. **Resolução da Diretoria Colegiada - RDC Nº 316, de 17 de outubro de 2019 do Ministério da Saúde e Agência Nacional de Vigilância Sanitária.** Dispõe sobre os requisitos sanitários da água do mar dessalinizada, potável e envasada, 2019b.

CARDOSO, M. K. B.; BRITO, Y. J. V.; SILVA, K. S.; SILVA, C. B.; L, C. A. P.; MEDEIROS, K. M. Dessalinizador solar do tipo cascata aplicado em poços artesianos no interior da Paraíba. **Águas Subterrâneas**, v. 34, n. 2, p. 135-142, 2020.

CAMPOS, B. L. O.; FRAGA, M. M. C.; COSTA, A. O. S.; JUNIOR, E. F. C. Análise do processo de dessalinização solar com ênfase no método de umidificação e desumidificação. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 24, n. 5, p. 861-873, 2019.

CLAYTON, R. Desalination for Water Supply FR/R0013 (35p), **Review of Current Knowledge**, Foundation for Water Research, U.K, Feb. 2006.

COELHO, T. C. Costa.; GOMES, C. E. M.; DORNELLES, K. A. Desempenho térmico e absorvância solar de telhas de fibrocimento sem amianto submetidas a diferentes processos de envelhecimento natural. **Ambiente construído**, v. 17, n. 1, p. 147-161, 2017.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo.** São Paulo: CETESB. 44 p. 2009.

DARRE, N. C.; TOOR, G. S. Desalination of water: a review. **Current Pollution Reports**, v. 4, n. 2, p. 104-111, 2018.

DOURADO, A. A.; FERRAZ, L. L.; SILVA, A. R. S.; ROCHA, F. A. Qualidade físico-química e microbiológica da água em reservatórios subterrâneos na cidade de Vitória da Conquista-BA para fins de potabilidade. **Águas Subterrâneas**, v. 32, n. 2, p. 1-8, 2018.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. Solar engineering of thermal processes John Wiley & Sons. **Inc. New York**, 1991.

DUFFIE. A. J., BECKMAN. A. W. **Solar Engineering of Thermal Processes**, Fourth Edition, John Wiley and Sons, Inc, 2013.

DUNKLE, R. V. **Solar Water Distillation: The Roof Type Still and a Multiple Effect Diffusion Still.** International Developments in Heat Transfer, ASME, Proc. International Heat Transfer, Part V, University of Colorado, Melbourne: CSIRO, p. 895-902, 1961.

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

EL-NAGGAR, M.; EL-SEBAII, A. A.; RAMADAN, M. R. I.; ABOUL-ENEIN S. Experimental and theoretical performance of finned-single effect solar still. **Desalination and Water Treatment**, v. 57, n. 37, p. 17151-17166, 2016.

- EL-SEBAII, A. A.; AL-DOSSARI, M. A mathematical model of single basin solar still with an external reflector, *Desalin. Desalination and water treatment*, v. 26, n. 1-3, p. 250-259, 2011.
- FONSECA, F.; RODRÍGUEZ, J. C. R.; ACOSTA, F. F.; PERDOMO, E. M.; LOMBÁ, O. F. Software “SoftDest” y su Validación. *Tecnología Química*, v. 40, n. 1, p. 68-80, 2020.
- FOUST, S. A.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSON, L. B. **Princípios das Operações Unitárias**. 2 ed. LTC, Rio de Janeiro, 2013.
- FUENTES, R.; ROTH, P. Teoría de La Destilación Solar en Vacío. *Revista Facultad de Ingeniería*, U.T.A., Chile, v. 4, 1997.
- HAYRTON. Os ensaios em telhas onduladas de fibrocimento. *Revista AdNormas*, 2019. Disponível em: < <https://revistaadnormas.com.br/2019/03/26/os-ensaios-em-telhas-onduladas-de-fibrocimento/>>. Acesso em: 11 de fev. 2020.
- HUBER-RODRIGUEZ, B. **Origin 9.1: A review**. 14 fevereiro 2014. Disponível em: < <https://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/PT.5.9008/full/>> Acesso em: 12 fev. 2020.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico**, 2010.
- INCROPERA, F.; DEWITT, D. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D.P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. LTC, 7. ed., Rio de International Heat Transfer, part V, University of Colorado, 2014.
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Ministério da agricultura, pecuária e abastecimento. Brasília, DF: INMET, 2019. Disponível em: < http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=sobre_tempo >. Acesso em: 03 fev. 2020.
- JANI, H. K.; MODI, K V. Experimental performance evaluation of single basin dual slope solar still with circular and square cross-sectional hollow fins. *Solar Energy*, v. 179, p. 186-194, 2019.
- KABEEL, A. A. Performance of solar still with a concave wick evaporation surface, *Energy*, v. 34, n. 10, p. 1504-1509, 2009.
- KABEEL, A. E.; KHALIL, A.; OMARA, Z. M.; YOUNES, M. M. Theoretical and experimental parametric study of modified stepped solar still. *Desalination*, v. 289, p. 12-20, 2012.
- KABEEL, A.E.; OMARA, Z.M.; YOUNES, M.M. Techniques used to improve the performance of the stepped solar still: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 46, p. 178-188, 2015.
- KUMAR, P. N.; SAMUEL, D. G. H.; NAGARAJAN, P. K.; SATHYAMURTHY, R. Theoretical analysis of a triangular pyramid solar still integrated to an inclined solar still with baffles. *International Journal of Ambient Energy*, v. 38, n. 7, p. 694-700, 2017.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**, Campinas, SP, editora átomo, 3ª edição, 2010.

LUIZ, E. W.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; PEREIRA, E.B. Analysis of intra-day solar irradiance variability in different Brazilian climate zones. **Solar Energy**, v.167, p.210-219, 2018.

MAGARREIRO, C.; FREITAS, S.; BRITO, M. C. Radiação e energia solar. **Gazeta de Física: Ano Internacional da Luz. Lisboa**, v. 39, p. 1-2, 2016.

MAITI, S.; BHATT, C.; PATEL, P.; GHOSH, P. K. Practical and sustainable household seawater desalination using an improved solar still. **Desalination and Water Treatment**, v. 57, n. 8, p. 3358-3371, 2016.

MARINHO, F. J. L.; UCHOA, T. R.; LEITE, S. F.; AGUIA, R. L.; NASCIMENTO, A. S. Dessalinizador solar associado a coletor de águas de chuvas para fornecer água potável. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v. 11, n. 20, p. 68, 2015.

MATRAWY, K. K.; ALOSAIMY, A. S.; MAHROUS, A.-F. Modeling and experimental study of a corrugated wick type solar still: comparative study with a simple basin type. **Energy conversion and management**, v. 105, p. 1261-1268, 2015.

MIORANDO, T.; BRIÃO, V. B.; GIRARDELLI, L. Ultrafiltration of rainwater to produce drinking water. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 3, p. 481-490, 2017.

MILLER, J.E. Review of Water Resources and Desalination Technologies. **M. Kevin Price, Denver**. 2003.

MODI, K. V.; MODI, J. G. Influence of wick pile of jute cloth on distillate yield of double-basin single-slope solar still: Theoretical and experimental study. **Solar Energy**, v. 205, p. 512-530, 2020.

MOLLAHOSSEINI, A.; ABDELRASOUL, A.; SHEIBANY, S.; AMINI, M.; SALESTAN, S. K. Renewable energy-driven desalination opportunities—A case study. **Journal of Environmental Management**, v. 239, p. 187-197, 2019.

MULFTAH, A. F.; SOPIAN, K.; ALGHOUL, M. A. Performance of basin type stepped solar still enhanced with superior design concepts. **Desalination**, v. 435, p. 198-209, 2018.

NREL. **Glossary of solar radiation resource terms: National Renewable Energy Laboratory**. 2017.

OMARA, Z. M.; KABEEL, A. E.; YOUNES, M. Enhancing the stepped solar still performance using internal reflectors, **Desalination**, v. 314, p. 67-72, 2013.

PAL, P.; YADAV, P.; DEV, R.; SINGH, D. Performance analysis of modified basin type double slope multi-wick solar still. **Desalination**, v. 422, p. 68-82, 2017.

PATEL, S. K.; KUMAR, B.; PAL, P.; DEV, R.; SINGH, D. Production of potable water from Gomti River by using modified double slope solar still with external mounted reflectors. **Solar Energy**, v. 209, p. 576-589, 2020.

- PEREIRA, M. C.; MENDES, J. F.; HORTA, P.; KOROVESSIS, N. Final design of an advanced solar dryer for salt recovery from brine effluent of an MED desalination plant. **Desalination**, v. 211, n. 1-3, p. 222-231, 2007.
- PEREIRA, M. L. D.; ARAÚJO, J. C. F.; SCHIMIGUEL, J. 2014. Ensinando a distribuição de probabilidade normal utilizando os recursos do Microsoft Excel. **Revista acadêmica de economia: En Observatorio de la Economía Latinoamericana**, n. 193, 2014.
- PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L.; RUTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2 ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80p.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. CRESESB -Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Grupo de Trabalho de Energia Solar -GTES. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL, 2014. 530 p.
- PRAKASH, P.; VELMURUGAN, V. Parameters influencing the productivity of solar stills-a review. **Renew. Sust. Energ. Rev.** v. 49, p. 585–609, 2015.
- PRAKASH, A.; JAYAPRAKASH, R. Performance evaluation of stepped multiple basin pyramid solar still. **Materials Today: Proceedings**, 2020.
- QUEIROZ, T. M.; OLIVEIRA, L. C. P. Qualidade da água em comunidades quilombolas do Vão Grande, município de Barra do Bugres (MT). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, n. 1, p. 173-180, 2018.
- RABHI, K.; NCIRI, R.; NASRI, F.; ALI, C.; BACHA, H. B. Experimental performance analysis of a modified single-basin single-slope solar still with pin fins absorber and condenser. **Desalination** v. 416, p. 86–93, 2017.
- RAHBAR, N.; ASADI, A.; FOTOUHI-BAFGHI, E. 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.
- RAJAMANICKAM, M. R.; RAGUPATHY, A. Influence of water depth on internal heat and mass transfer in a double slope solar still. **Energy procedia**, v. 14, p. 1701-1708, 2012.
- RIBEIRO, P. G.; PEREIRA, I.; SANTOS, C. C. A.; FRANCO, C. S.; MARQUES, R. F. P. V. Sistema de abastecimento e qualidade da água de consumo do alojamento iarem em Lavras-MG. **Sustentare**, v. 2, n. 1, p. 1-19, 2018.
- SAETTONE, E.; VALENCIA-TOVAR, Y.; GÓMEZ-DE-LA-TORRE-GASTELLO, A. Preliminary overview and evaluation of a stepped solar distiller with internal reflective walls and borosilicate vacuum tubes. **Desalination**, v. 413, p. 136-143, 2017.
- SALINAS-FREIRE, H. A.; PÉREZ-ONES, O.; RODRÍGUEZ-MUÑOZ, S. Límites termodinámicos a la productividad de los destiladores solares pasivos. **Revista ION**, v. 32, n. 1, p. 7-20, 2019.
- SAMME, M. A.; MIRZA, U. K.; MAJEED, T.; AHMAD, N. Design and performance of a simple single basin solar still. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 11, n. 3, p. 543-549, 2007.

- SANTOS, R. S.; MOHR, T. Saúde e qualidade da água: análises microbiológicas e físico-químicas em águas subterrâneas. **Revista Contexto & Saúde**, v. 13, n. 24-25, p. 46-53, 2013.
- SELVARAJ, K.; NATARAJAN, A. Factors influencing the performance and productivity of solar stills – A review. **Desalination**, v. 435, p. 181-187, 2018.
- SILVA, J. J. F.; MIGLIORINI, R. B. Caracterização das águas subterrâneas do aquíferos furnas na região sul do estado de Mato Grosso. **Geosciences= Geociências**, v. 33, n. 2, p. 261-277, 2014.
- SILVA, J. A. L.; MEDEIROS, M. C. S.; LIMA, V. L. A.; MARINHO, F. J. L.; AZEVEDODO, P. V.; UCHÔA, T. R.; OTONI, L. C. P. Obtenção de água potável a partir do uso da energia solar disponível na região do semiárido paraibano. **Revista ESPACIOS**, v. 37, n. 32, 2016.
- SILVA, G. D. P.; SHARQAWY, M. H. Techno-economic analysis of low impact solar brackish water desalination system in the Brazilian Semiarid region. **Journal of Cleaner Production**, v. 248, p. 119-255, 2020.
- SINGH, H. N.; TIWARI, G. N. Monthly performance of passive and active solar stills for different Indian climatic condition, **Desalination**. v. 168, p. 145–150, 2004.
- SHUBHAJYOTHI, H.; GANESH, R.; MANIKANDAN, V.; BHAVANI, T. Performance evaluation of a tilted wick type solar still by using the concept of solar fraction. **Materials Today: Proceedings**, 2020.
- TANAKA, H. Experimental study of a basin type solar still with internal and external reflectors in winter, **Desalination**, v. 249, n. 1, p. 130-134, 2009.
- TIWARI, G. N. **Solar energy: fundamentals, design, modelling and applications**. Alpha Science Int'l Ltd., 2002.
- TIWARI, A. K., TIWARI, G. N. Thermal Modeling Based on Solar Fraction and Experimental Study of the Annual and Seasonal Performance of a Single Slope Passive Solar Still: The Effect of Water Depths. **Desalination**. v. 207, n. 1-3, p. 184- 204, 2007.
- TIWARI, G. N.; DIMRI, V.; SINGH, U.; CHEL, A.; SARKAR, B. Comparative thermal performance evaluation of an active solar distillation system. **International Journal of Energy Research**, v. 31, n. 15, p. 1465-1482, 2007.
- TIWARI, G. N.; SAHOTA, L. Review on the energy and economic efficiencies of passive and active solar distillation systems, **Desalination** v. 401, p. 151–179, 2017.
- TONIAZZO, F.; CANTONI, F.; LAVNITCKI, L.; HENIKA, M. L.; GALVAN, K. A. Implementação de painéis fotovoltaicos no clube Ipiranga de Frederico Westphalen–RS, como fonte de energia alternativa. **Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v. 9, n. 5, 2017.
- TRIPATHI, R.; TIWARI, G. N. Thermal Modeling of Passive and Active Solar Stills for Different Depths of Water by Using the Concept of Solar Fraction. **Solar energy**, v. 80, n. 8, p. 956-967, 2006.
- UNITED NATIONS. **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos: Água para um mundo sustentável**. Sumário Executivo, p. 3. 2015.

VALA, S.; KANABAR, B. Solar Distillation Based on Pyramid Shape Solar Still- A Review. **Journal for Research**, v. 3, n. 3, 2017.

VARUN, A. K. Solar stills: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 1, p. 446-453, 2010.

VELMURUGAN, V.; KUMARAN, S. S.; PRABHU, V. N.; SRITHAR, K. Productivity enhancement of stepped solar still – performance analysis, **Thermal Science**, v. 12, n. 3, p. 153-163, 2008.

VELMURUGAN, V.; SRITHAR, K. Performance analysis of solar stills based on various factors affecting the productivity – a review. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 15, n. 2, p. 1294-1304, 2011.

VIGNOLA, F.; STOFFEL, T.; MICHALSKY, J. **Solar and Infrared Radiation Measurements**. Nova Iorque: CRC Press, 2012. 408 p. ISBN: 978-1-4398-5190-6.

WANG, L. K.; CHEN, J. P.; HUNG, Y; SHAMMAS, N. K. **Membrane and Desalination Technologies**. Humana Press, New York, 2011.

WWAP, **The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-based Solutions**, UNESCO, Paris, 2018.

XIAO, G., WANG, X., NI, M., WANG, F., ZHU, W., LUO, Z., CEN, K. A review on solar stills for brine desalination. **Applied Energy**, v. 103, p. 642-652, 2013.

ZAMEN, M.; SOUFARI, S. M.; VAHDAT, S. A.; AMIDPOUR, M.; ZEINALI, M. A.; IZANLOO, H.; AGHABABAIE, H. Experimental investigation of a two-stage solar humidification–dehumidification desalination process. **Desalination**, v. 332, n. 1, p. 1-6, 2014.

APÊNDICE A

Aspectos climáticos e resultados experimentais

Tabela 1 – Condições operacionais do dessalinizador solar monitoradas do dia 10/03/2020.

Horário (h:min)	Temperaturas (°C)							Radiação Total (W m ⁻²)	Velocidade do vento (m s ⁻¹)	Destilado horário (mL m ⁻²)	Destilado acumulado (mL m ⁻²)
	Água	Vidro interno	Vidro externo	Isolante	Placa	Ambiente interno	Ambiente externo				
07:00	28,2	28,2	28,2	28,2	28,2	28,2	28,2	450,0	0,0	0,0	0,0
07:30	33,0	32,0	27,0	27,0	38,0	28,0	29,2	485,0	0,4	0,0	0,0
08:00	45,0	45,0	32,0	39,0	49,0	31,0	28,6	591,0	1,6	0,0	0,0
08:30	54,0	49,0	27,0	45,0	55,0	42,0	29,6	709,0	1,4	60,2	60,2
09:00	58,0	54,0	33,0	45,0	59,0	51,0	30,2	630,0	1,4	125,7	185,9
09:30	65,0	59,0	32,0	55,0	65,0	59,0	31,0	820,0	2,1	166,7	352,6
10:00	74,0	68,0	37,0	58,0	73,0	64,0	31,8	945,0	1,2	237,1	589,7
10:30	73,0	66,0	35,0	59,0	70,0	68,0	33,9	1001,0	0,3	153,9	743,6
11:00	78,0	77,0	37,0	67,0	78,0	70,0	35,0	1117,0	2,1	179,5	923,1
11:30	79,0	78,0	37,0	65,0	78,0	70,0	36,0	917,0	2,2	250,0	1173,1
12:00	68,0	64,0	32,0	54,0	71,0	69,0	34,0	907,0	2,7	141,0	1314,1
12:30	78,0	72,0	30,0	60,0	76,0	68,0	37,0	1052,0	1,1	237,2	1551,3
13:00	70,0	63,0	26,0	54,0	68,0	66,0	36,6	1039,0	0,7	262,8	1814,1
13:30	68,0	61,0	34,0	54,0	67,0	64,0	36,8	841,0	0,4	211,5	2025,6
14:00	67,0	62,0	31,0	54,0	67,0	65,0	34,4	650,0	1,8	115,5	2141,1
14:30	61,0	55,0	28,0	45,0	59,0	66,0	36,6	705,0	0,9	128,1	2269,2
15:00	59,0	56,0	31,0	46,0	59,0	54,0	35,5	625,0	2,0	141,1	2410,3
15:30	53,0	51,0	33,0	45,0	54,0	49,0	34,8	153,0	0,3	76,9	2487,2
16:00	46,0	41,0	29,0	41,0	43,0	40,0	33,6	99,0	0,1	64,1	2551,3
16:30	41,0	38,0	28,0	34,0	37,0	37,0	32,4	73,0	0,0	32,0	2583,3
17:00	39,0	37,0	27,0	32,0	36,0	33,0	30,1	72,0	0,3	12,8	2596,1

Tabela 2 – Condições operacionais do dessalinizador solar monitoradas do dia 11/03/2020.

Horário (h:min)	Temperaturas (°C)							Radiação Total (W m ⁻²)	Velocidade do vento (m s ⁻¹)	Destilado horário (mL m ⁻²)	Destilado acumulado (mL m ⁻²)
	Água	Vidro interno	Vidro externo	Isolante	Placa	Ambient e interno	Ambiente externo				
07:00	27,9	27,9	27,9	27,9	27,9	27,9	27,9	440,0	0,0	0,0	0,0
07:30	35,0	35,0	33,0	32,0	37,0	28,0	30,7	465,0	0,4	0,0	0,0
08:00	38,0	39,0	35,0	35,0	40,0	30,0	31,0	507,0	2,1	0,0	0,0
08:30	40,0	40,0	33,0	35,0	40,0	39,0	29,4	594,0	1,4	0,0	0,0
09:00	53,0	50,0	35,0	37,0	55,0	51,0	33,3	568,0	1,7	80,3	80,3
09:30	57,0	55,0	37,0	40,0	57,0	59,0	32,2	772,0	0,1	121,8	202,1
10:00	73,0	69,0	38,0	42,0	70,0	64,0	37,7	792,0	0,6	153,0	355,1
10:30	72,0	73,0	46,0	37,0	78,0	68,0	33,3	1134,0	2,0	289,3	644,4
11:00	77,0	75,0	47,0	53,0	77,0	70,0	34,7	973,0	0,4	173,1	817,5
11:30	79,0	75,0	42,0	45,0	77,0	70,0	35,4	915,0	0,6	250,0	1067,5
12:00	82,0	74,0	45,0	61,0	81,0	69,0	36,4	1144,0	0,7	230,8	1298,3
12:30	82,0	77,0	43,0	48,0	80,0	68,0	37,5	1090,0	0,9	269,2	1567,5
13:00	79,0	79,0	42,0	52,0	80,0	66,0	36,3	1032,0	1,8	269,2	1836,7
13:30	72,0	70,0	44,0	44,0	71,0	64,0	37,1	712,0	0,9	211,6	2048,3
14:00	69,0	64,0	44,0	49,0	71,0	65,0	37,0	802,0	0,4	230,8	2279,1
14:30	63,0	61,0	43,0	44,0	61,0	66,0	37,2	617,0	1,5	115,3	2394,4
15:00	60,0	59,0	39,0	44,0	57,0	54,0	35,5	634,0	0,1	128,2	2522,6
15:30	52,0	49,0	36,0	37,0	53,0	49,0	31,5	418,0	2,1	109,0	2631,6
16:00	46,0	41,0	27,0	34,0	41,0	42,0	32,7	113,0	2,0	51,3	2682,9
16:30	38,0	37,0	27,0	32,0	39,0	36,0	31,5	87,0	1,2	32,0	2714,9
17:00	37,0	35,0	26,0	30,0	38,0	33,0	30,2	60,0	1,5	12,9	2727,8

Tabela 3 – Parâmetros físico-químicos da água salobra e da água dessalinizada monitoradas do dia 11/03/2020.

Parâmetro de controle	Água salobra*	Água dessalinizada	V.M.P.**
pH	8,0	7,4	6,0 – 9,5
Condutividade elétrica (µScm ⁻¹)	8316,0	28,0	–
Cor aparente (uH)	6,7	3,5	15,0
Cloreto (mg Cl ⁻ L ⁻¹)	2577,3	7,1	250,0
Dureza (mg CaCO ₃ L ⁻¹)	360,0	50,0	500,0
Alcalinidade (mg CaCO ₃ L ⁻¹)	28,0	2,0	–
Turbidez (NTU)	0,6	0,5	5,0
Sódio (mg Na ⁺ L ⁻¹)	810,0	1,0	200,0
Potássio (mg K ⁺ L ⁻¹)	4,0	0,0	–
STD (mgL ⁻¹)	4130,0	11,0	1000,0

*Água salobra de um poço no Sítio Poço de Pedra, no município de Juazeirinho – PB.

**V.M.P. = Valor Máximo Permitido segundo a RDC n° 5, de 28 de setembro de 2017, Anexo XX

Tabela 4 – Condições operacionais do dessalinizador solar monitoradas do dia 29/09/2020.

Horário (h:min)	Temperaturas (°C)							Radiação Total (W m ⁻²)	Velocidade do vento (m s ⁻¹)	Destilado horário (mL m ⁻²)	Destilado acumulado (mL m ⁻²)
	Água	Vidro interno	Vidro externo	Isolante	Placa	Ambient e interno	Ambient e externo				
07:00	24,9	24,9	24,9	24,9	24,9	24,9	24,9	450,0	0,0	0,0	0,0
07:30	32,0	30,0	29,0	26,0	33,0	31,0	25,7	485,0	0,4	0,0	0,0
08:00	34,0	32,0	29,0	28,0	36,0	33,0	28,1	591,0	1,6	0,0	0,0
08:30	42,0	38,0	33,0	31,0	43,0	41,0	34,3	709,0	1,4	14,1	14,1
09:00	52,0	49,0	38,0	32,0	53,0	50,0	37,9	630,0	1,4	187,2	201,3
09:30	61,0	54,0	38,0	36,0	64,0	57,0	39,0	866,0	2,1	261,5	462,8
10:00	67,0	59,0	46,0	43,0	68,0	65,0	40,4	945,0	1,2	256,4	719,2
10:30	71,0	66,0	44,0	43,0	73,0	67,0	41,0	1001,0	0,3	256,4	975,6
11:00	71,0	66,0	49,0	41,0	72,0	69,0	36,0	1117,0	2,1	230,8	1206,4
11:30	74,0	71,0	47,0	44,0	75,0	72,0	40,0	917,0	2,2	192,3	1398,7
12:00	71,0	68,0	46,0	42,0	72,0	69,0	41,0	907,0	2,7	243,6	1642,3
12:30	66,0	57,0	49,0	49,0	68,0	60,0	42,0	1112,0	1,1	269,2	1911,5
13:00	67,0	61,0	46,0	41,0	69,0	62,0	40,0	1039,0	0,7	205,1	2116,7
13:30	69,0	65,0	43,0	42,0	70,0	67,0	41,0	914,0	0,4	262,8	2379,5
14:00	66,0	62,0	49,0	48,0	68,0	65,0	45,0	650,0	1,8	243,6	2623,1
14:30	67,0	64,0	50,0	49,0	70,0	66,0	43,0	638,0	0,9	128,2	2751,3
15:00	57,0	54,0	43,0	45,0	59,0	56,0	42,0	625,0	2,0	115,4	2866,7
15:30	51,0	49,0	41,0	43,0	53,0	50,0	38,0	153,0	0,3	76,9	2943,6
16:00	45,0	42,0	40,0	41,0	47,0	43,0	38,0	99,0	0,1	17,9	2961,5
16:30	40,0	39,0	37,0	38,0	41,0	39,0	36,0	73,0	0,0	12,8	2974,4
17:00	37,0	36,0	35,0	36,0	37,0	37,0	33,0	72,0	0,3	15,4	2989,7

Tabela 5 – Condições operacionais do dessalinizador solar monitoradas do dia 30/09/2020.

Horário (h:min)	Temperaturas (°C)							Radiação Total (W m ⁻²)	Velocidade do vento (m s ⁻¹)	Destilado horário (mL m ⁻²)	Destilado acumulado (mL m ⁻²)
	Água	Vidro interno	Vidro externo	Isolante	Placa	Ambiente interno	Ambiente externo				
07:00	26,5	26,5	26,5	26,5	26,5	26,5	26,5	435,0	0,0	0,0	0,0
07:30	31,0	30,0	29,0	26,0	32,0	30,0	27,0	490,0	0,3	0,0	0,0
08:00	33,0	31,0	28,0	27,0	35,0	32,0	28,0	566,0	1,2	6,4	6,4
08:30	40,0	38,0	33,0	28,0	41,0	39,0	33,0	680,0	1,3	16,7	23,1
09:00	52,0	49,0	39,0	31,0	54,0	51,0	37,9	650,0	1,1	173,1	196,2
09:30	61,0	53,0	38,0	36,0	62,0	59,0	39,0	790,0	1,7	237,2	433,3
10:00	66,0	62,0	45,0	37,0	67,0	64,0	40,0	910,0	0,8	248,7	682,1
10:30	71,0	64,0	46,0	39,0	72,0	69,0	40,0	1010,0	0,5	262,8	944,9
11:00	71,0	68,0	47,0	40,0	74,0	70,0	39,0	1117,0	1,8	256,4	1201,3
11:30	72,0	69,0	48,0	40,0	73,0	70,0	41,0	905,0	2,0	217,9	1419,2
12:00	72,0	70,0	47,0	42,0	74,0	69,0	42,0	911,0	2,1	253,8	1673,1
12:30	70,0	67,0	49,0	43,0	71,0	68,0	41,0	1115,0	1,6	266,7	1939,7
13:00	67,0	62,0	46,0	42,0	68,0	65,0	40,0	1110,0	0,6	230,8	2170,5
13:30	67,0	62,0	42,0	40,0	69,0	64,0	39,0	954,0	0,5	250,0	2420,5
14:00	67,0	63,0	46,0	43,0	69,0	65,0	42,0	675,0	1,5	237,2	2657,7
14:30	68,0	65,0	47,0	45,0	71,0	66,0	41,0	605,0	0,4	121,8	2779,5
15:00	59,0	52,0	45,0	41,0	62,0	53,0	41,0	601,0	1,9	112,8	2892,3
15:30	52,0	47,0	40,0	40,0	53,0	49,0	38,0	138,0	0,6	64,1	2956,4
16:00	45,0	41,0	40,0	39,0	46,0	42,0	38,0	90,0	0,1	25,6	2982,1
16:30	40,0	38,0	37,0	38,0	43,0	39,0	35,0	77,0	0,3	12,8	2994,9
17:00	34,0	33,0	34,0	36,0	35,0	33,0	32,0	70,0	0,4	6,4	3001,3

Tabela 6 – Condições operacionais do dessalinizador solar monitoradas do dia 02/10/2020.

Horário (h:min)	Temperaturas (°C)							Radiação Total (W m ⁻²)	Velocidade do vento (m s ⁻¹)	Destilado horário (mL m ⁻²)	Destilado acumulado (mL m ⁻²)
	Água	Vidro interno	Vidro externo	Isolante	Placa	Ambiente interno	Ambiente externo				
07:00	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	455,0	0,0	0,0	0,0
07:30	31,0	30,0	28,0	27,0	33,0	30,0	28,0	490,0	0,1	0,0	0,0
08:00	33,0	30,0	28,0	27,0	35,0	31,0	29,0	605,0	0,9	12,8	12,8
08:30	40,0	38,0	34,0	29,0	42,0	39,0	35,0	705,0	1,0	25,6	38,5
09:00	53,0	50,0	40,0	33,0	56,0	51,0	38,0	648,0	1,5	179,5	217,9
09:30	62,0	57,0	37,0	36,0	64,0	60,0	39,0	906,0	1,3	205,1	423,1
10:00	66,0	62,0	46,0	39,0	68,0	65,0	40,0	930,0	0,2	262,8	685,9
10:30	71,0	64,0	46,0	39,0	74,0	69,0	40,0	1080,0	0,1	269,2	955,1
11:00	70,0	67,0	47,0	41,0	73,0	69,0	41,0	1115,0	1,3	275,6	1230,8
11:30	72,0	68,0	49,0	39,0	74,0	71,0	40,0	920,0	0,8	237,2	1467,9
12:00	70,0	67,0	46,0	39,0	72,0	68,0	40,0	1006,0	1,2	262,8	1730,8
12:30	72,0	70,0	49,0	45,0	73,0	71,0	41,0	1180,0	0,9	262,8	1993,6
13:00	67,0	65,0	47,0	42,0	69,0	66,0	40,0	1090,0	0,8	237,2	2230,8
13:30	70,0	69,0	45,0	43,0	72,0	69,0	41,0	936,0	0,1	250,0	2480,8
14:00	68,0	66,0	45,0	42,0	70,0	67,0	41,0	695,0	0,2	224,4	2705,1
14:30	72,0	69,0	48,0	44,0	73,0	70,0	41,0	680,0	1,3	128,2	2833,3
15:00	64,0	59,0	44,0	40,0	67,0	61,0	40,0	650,0	0,9	115,4	2948,7
15:30	58,0	54,0	40,0	40,0	59,0	56,0	38,0	143,0	1,0	70,5	3019,2
16:00	47,0	44,0	39,0	38,0	49,0	45,0	38,0	105,0	0,5	32,1	3051,3
16:30	44,0	38,0	37,0	37,0	45,0	40,0	36,0	86,0	0,1	12,8	3064,1
17:00	36,0	33,0	34,0	36,0	38,0	34,0	33,0	73,0	0,1	12,8	3076,9

Tabela 7 – Condições operacionais do dessalinizador solar monitoradas do dia 05/10/2020.

Horário (h:min)	Temperaturas (°C)							Radiação Total (W m ⁻²)	Velocidade do vento (m s ⁻¹)	Destilado horário (mL m ⁻²)	Destilado acumulado (mL m ⁻²)
	Água	Vidro interno	Vidro externo	Isolante	Placa	Ambiente interno	Ambiente externo				
07:00	26,0	26,0	26,0	26,0	26,0	26,0	26,0	395,0	0,0	0,0	0,0
07:30	30,0	29,0	28,0	27,0	31,0	29,0	27,0	444,0	0,0	0,0	0,0
08:00	32,0	30,0	28,0	27,0	33,0	31,0	28,0	595,0	0,2	6,4	6,4
08:30	38,0	36,0	32,0	28,0	40,0	37,0	34,0	710,0	1,2	19,2	25,6
09:00	51,0	49,0	40,0	32,0	52,0	50,0	37,0	635,0	1,3	160,3	185,9
09:30	60,0	57,0	37,0	36,0	62,0	59,0	38,0	890,0	0,8	192,3	378,2
10:00	65,0	61,0	44,0	39,0	66,0	63,0	38,0	945,0	0,1	256,4	634,6
10:30	70,0	66,0	45,0	39,0	71,0	69,0	39,0	1050,0	0,3	250,0	884,6
11:00	70,0	67,0	46,0	41,0	71,0	69,0	40,0	1112,0	1,0	269,2	1153,8
11:30	72,0	69,0	49,0	40,0	73,0	71,0	40,0	1095,0	0,9	243,6	1397,4
12:00	71,0	68,0	47,0	39,0	72,0	70,0	39,0	995,0	1,5	275,6	1673,1
12:30	70,0	67,0	46,0	45,0	71,0	69,0	39,0	1062,0	0,5	243,6	1916,7
13:00	70,0	67,0	46,0	42,0	72,0	68,0	40,0	998,0	0,1	230,8	2147,4
13:30	69,0	65,0	44,0	41,0	71,0	67,0	39,0	1090,0	0,2	224,4	2371,8
14:00	71,0	68,0	47,0	42,0	73,0	70,0	40,0	705,0	0,1	243,6	2615,4
14:30	69,0	66,0	46,0	41,0	70,0	67,0	40,0	688,0	1,6	147,4	2762,8
15:00	65,0	58,0	44,0	40,0	67,0	63,0	39,0	646,0	0,7	109,0	2871,8
15:30	58,0	55,0	40,0	40,0	60,0	57,0	38,0	145,0	0,1	51,3	2923,1
16:00	48,0	43,0	38,0	38,0	50,0	45,0	37,0	99,0	1,2	25,6	2948,7
16:30	42,0	39,0	36,0	36,0	44,0	40,0	36,0	87,0	0,3	12,8	2961,5
17:00	36,0	33,0	34,0	36,0	37,0	35,0	34,0	69,0	0,1	6,4	2967,9

Tabela 8 – Condições operacionais do dessalinizador solar monitoradas do dia 06/10/2020.

Horário (h:min)	Temperaturas (°C)							Radiação Total (W m ⁻²)	Velocidade do vento (m s ⁻¹)	Destilado horário (mL m ⁻²)	Destilado acumulado (mL m ⁻²)
	Água	Vidro interno	Vidro externo	Isolante	Placa	Ambiente interno	Ambiente externo				
07:00	28,0	28,0	28,0	28,0	28,0	28,0	28,0	460,0	0,4	0,0	0,0
07:30	30,0	27,0	28,0	27,0	30,0	28,0	28,0	478,0	0,0	0,0	0,0
08:00	31,0	30,0	28,0	27,0	32,0	30,0	29,0	605,0	0,1	10,3	10,3
08:30	39,0	36,0	31,0	29,0	41,0	38,0	34,0	725,0	1,6	25,6	35,9
09:00	51,0	47,0	40,0	32,0	53,0	49,0	37,0	650,0	0,5	179,5	215,4
09:30	61,0	58,0	38,0	35,0	63,0	60,0	37,0	898,0	1,0	215,4	430,8
10:00	65,0	61,0	45,0	37,0	67,0	64,0	38,0	990,0	0,0	262,8	693,6
10:30	68,0	66,0	45,0	38,0	70,0	67,0	38,0	1025,0	0,8	269,2	962,8
11:00	70,0	66,0	47,0	42,0	71,0	69,0	39,0	1105,0	1,3	243,6	1206,4
11:30	70,0	67,0	47,0	40,0	72,0	69,0	39,0	1100,0	0,8	252,6	1459,0
12:00	71,0	69,0	48,0	40,0	72,0	70,0	40,0	998,0	0,4	269,2	1728,2
12:30	71,0	68,0	47,0	44,0	73,0	69,0	41,0	1050,0	0,3	250,0	1978,2
13:00	69,0	65,0	45,0	43,0	70,0	67,0	40,0	990,0	0,0	269,2	2247,4
13:30	71,0	67,0	46,0	44,0	72,0	68,0	41,0	1145,0	0,1	230,8	2478,2
14:00	69,0	65,0	47,0	39,0	71,0	67,0	40,0	790,0	0,2	211,5	2689,7
14:30	68,0	65,0	45,0	40,0	69,0	66,0	40,0	705,0	1,0	185,9	2875,6
15:00	69,0	65,0	46,0	41,0	70,0	67,0	41,0	650,0	0,0	115,4	2991,0
15:30	58,0	56,0	40,0	40,0	62,0	57,0	39,0	160,0	0,0	57,7	3048,7
16:00	50,0	45,0	39,0	38,0	56,0	47,0	38,0	105,0	0,6	19,2	3067,9
16:30	43,0	39,0	36,0	35,0	48,0	41,0	36,0	95,0	0,4	19,2	3087,2
17:00	35,0	30,0	33,0	34,0	36,0	31,0	32,0	76,0	0,9	12,8	3100,0

Tabela 9 – Condições operacionais do dessalinizador solar monitoradas do dia 07/10/2020.

Horário (h:min)	Temperaturas (°C)							Radiação Total (W m ⁻²)	Velocidade do vento (m s ⁻¹)	Destilado horário (mL m ⁻²)	Destilado acumulado (mL m ⁻²)
	Água	Vidro interno	Vidro externo	Isolante	Placa	Ambiente interno	Ambiente externo				
07:00	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	448,0	0,1	0,0	0,0
07:30	30,0	28,0	28,0	26,0	32,0	29,0	28,0	495,0	0,0	0,0	0,0
08:00	34,0	32,0	28,0	28,0	35,0	33,0	28,0	570,0	0,0	12,8	12,8
08:30	41,0	38,0	33,0	31,0	42,0	40,0	33,0	725,0	0,5	19,2	32,1
09:00	49,0	47,0	35,0	32,0	51,0	48,0	36,0	650,0	0,8	166,7	198,7
09:30	61,0	56,0	38,0	36,0	63,0	58,0	37,0	795,0	1,0	198,7	397,4
10:00	65,0	62,0	41,0	40,0	67,0	65,0	39,0	915,0	0,1	230,8	628,2
10:30	67,0	64,0	43,0	43,0	69,0	66,0	39,0	1070,0	0,0	256,4	884,6
11:00	70,0	67,0	45,0	41,0	71,0	69,0	40,0	1130,0	0,0	217,9	1102,6
11:30	71,0	69,0	45,0	42,0	73,0	70,0	40,0	895,0	0,6	262,8	1365,4
12:00	71,0	69,0	47,0	42,0	72,0	70,0	41,0	935,0	1,6	243,6	1609,0
12:30	69,0	62,0	48,0	45,0	71,0	65,0	41,0	1050,0	1,9	269,2	1878,2
13:00	69,0	61,0	45,0	41,0	70,0	65,0	40,0	1045,0	1,5	217,9	2096,2
13:30	70,0	66,0	46,0	43,0	72,0	68,0	41,0	907,0	0,4	250,0	2346,2
14:00	67,0	63,0	47,0	45,0	69,0	65,0	40,0	708,0	0,0	185,9	2532,1
14:30	68,0	65,0	47,0	44,0	70,0	66,0	40,0	640,0	0,1	141,0	2673,1
15:00	57,0	53,0	44,0	41,0	60,0	56,0	39,0	598,0	0,2	128,2	2801,3
15:30	54,0	49,0	41,0	41,0	57,0	50,0	39,0	145,0	0,8	51,3	2852,6
16:00	45,0	41,0	40,0	40,0	49,0	43,0	38,0	88,0	1,6	12,8	2865,4
16:30	40,0	38,0	37,0	38,0	45,0	39,0	37,0	75,0	1,0	6,4	2871,8
17:00	34,0	31,0	34,0	34,0	36,0	32,0	34,0	68,0	0,5	6,4	2878,2

Tabela 10 – Condições operacionais do dessalinizador solar monitoradas do dia 26/10/2020.

Horário (h:min)	Temperaturas (°C)							Radiação Total (W m ⁻²)	Velocidade do vento (m s ⁻¹)	Destilado horário (mL m ⁻²)	Destilado acumulado (mL m ⁻²)
	Água	Vidro interno	Vidro externo	Isolante	Placa	Ambiente interno	Ambiente externo				
07:00	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	435,0	0,1	0,0	0,0
07:30	30,0	28,0	29,0	26,0	32,0	29,0	26,0	455,0	0,1	0,0	0,0
08:00	32,0	29,0	29,0	28,0	34,0	30,0	28,0	565,0	0,0	6,4	6,4
08:30	39,0	36,0	32,0	29,0	42,0	37,0	34,0	695,0	1,2	12,8	19,2
09:00	49,0	47,0	37,0	32,0	51,0	48,0	36,0	620,0	0,0	141,0	160,3
09:30	61,0	55,0	38,0	36,0	62,0	56,0	37,0	845,0	0,2	160,3	320,5
10:00	64,0	59,0	41,0	40,0	65,0	61,0	37,0	945,0	0,5	192,3	512,8
10:30	68,0	64,0	42,0	40,0	70,0	66,0	38,0	1075,0	0,1	230,8	743,6
11:00	69,0	65,0	46,0	41,0	71,0	67,0	38,0	995,0	0,0	198,7	942,3
11:30	71,0	67,0	47,0	42,0	72,0	69,0	40,0	1005,0	1,5	250,0	1192,3
12:00	71,0	69,0	48,0	45,0	73,0	70,0	39,0	998,0	1,9	230,8	1423,1
12:30	70,0	65,0	48,0	49,0	71,0	67,0	40,0	1090,0	0,2	256,4	1679,5
13:00	68,0	61,0	46,0	47,0	70,0	63,0	39,0	965,0	0,1	211,5	1891,0
13:30	69,0	65,0	43,0	45,0	72,0	68,0	41,0	905,0	0,0	185,9	2076,9
14:00	67,0	63,0	44,0	45,0	68,0	65,0	40,0	648,0	0,0	192,3	2269,2
14:30	67,0	63,0	45,0	44,0	69,0	66,0	40,0	635,0	0,5	134,6	2403,8
15:00	56,0	51,0	43,0	42,0	58,0	54,0	39,0	610,0	0,0	115,4	2519,2
15:30	51,0	46,0	41,0	41,0	52,0	48,0	39,0	145,0	0,1	44,9	2564,1
16:00	45,0	42,0	39,0	38,0	48,0	43,0	38,0	85,0	1,5	12,8	2576,9
16:30	40,0	37,0	36,0	37,0	43,0	39,0	36,0	71,0	0,3	6,4	2583,3
17:00	35,0	33,0	35,0	34,0	36,0	37,0	35,0	65,0	0,4	6,4	2589,7

Tabela 11 – Condições operacionais do dessalinizador solar monitoradas do dia 27/10/2020.

Horário (h:min)	Temperaturas (°C)							Radiação Total (W m ⁻²)	Velocidade do vento (m s ⁻¹)	Destilado horário (mL m ⁻²)	Destilado acumulado (mL m ⁻²)
	Água	Vidro interno	Vidro externo	Isolante	Placa	Ambiente interno	Ambiente externo				
07:00	26,0	26,0	26,0	26,0	26,0	26,0	26,0	460,0	0,4	0,0	0,0
07:30	32,0	28,0	29,0	26,0	34,0	29,0	27,0	485,0	0,0	0,0	0,0
08:00	33,0	30,0	30,0	28,0	36,0	32,0	28,0	600,0	0,1	6,4	6,4
08:30	41,0	37,0	31,0	30,0	45,0	39,0	28,0	695,0	0,1	19,2	25,6
09:00	50,0	47,0	36,0	32,0	54,0	48,0	30,0	680,0	0,4	147,4	173,1
09:30	61,0	57,0	38,0	35,0	62,0	58,0	36,0	890,0	1,5	160,3	333,3
10:00	62,0	59,0	41,0	39,0	64,0	61,0	37,0	980,0	0,8	211,5	544,9
10:30	69,0	65,0	42,0	40,0	71,0	67,0	38,0	1080,0	0,1	250,0	794,9
11:00	69,0	65,0	45,0	41,0	70,0	67,0	39,0	1008,0	0,0	205,1	1000,0
11:30	70,0	67,0	47,0	41,0	71,0	69,0	39,0	1025,0	0,5	256,4	1256,4
12:00	71,0	69,0	47,0	45,0	72,0	70,0	40,0	1005,0	0,6	262,8	1519,2
12:30	70,0	67,0	48,0	46,0	72,0	68,0	40,0	995,0	0,3	250,0	1769,2
13:00	68,0	61,0	45,0	47,0	70,0	65,0	39,0	1105,0	0,1	217,9	1987,2
13:30	70,0	65,0	43,0	46,0	73,0	68,0	41,0	960,0	0,1	269,2	2256,4
14:00	68,0	63,0	44,0	45,0	69,0	65,0	40,0	705,0	0,0	205,1	2461,5
14:30	67,0	63,0	44,0	42,0	68,0	66,0	40,0	690,0	0,6	141,0	2602,6
15:00	67,0	61,0	43,0	42,0	69,0	63,0	40,0	650,0	0,1	121,8	2724,4
15:30	51,0	47,0	41,0	41,0	53,0	49,0	39,0	160,0	0,1	51,3	2775,6
16:00	46,0	42,0	39,0	38,0	49,0	45,0	38,0	98,0	1,5	19,2	2794,9
16:30	40,0	37,0	36,0	37,0	44,0	39,0	37,0	80,0	0,3	12,8	2807,7
17:00	34,0	30,0	35,0	34,0	36,0	32,0	35,0	69,0	0,1	6,4	2814,1

Tabela 12 – Condições operacionais do dessalinizador solar monitoradas do dia 16/11/2020.

Horário (h:min)	Temperaturas (°C)							Radiação Total (W m ⁻²)	Velocidade do vento (m s ⁻¹)	Destilado horário (mL m ⁻²)	Destilado acumulado (mL m ⁻²)
	Água	Vidro interno	Vidro externo	Isolante	Placa	Ambiente interno	Ambiente externo				
07:00	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	435,0	0,1	0,0	0,0
07:30	30,0	28,0	29,0	26,0	32,0	29,0	26,0	455,0	0,1	0,0	0,0
08:00	32,0	29,0	29,0	28,0	34,0	30,0	28,0	565,0	0,0	6,4	6,4
08:30	39,0	36,0	32,0	29,0	42,0	37,0	34,0	695,0	1,2	12,8	19,2
09:00	49,0	47,0	37,0	32,0	51,0	48,0	36,0	620,0	0,0	141,0	160,3
09:30	61,0	55,0	38,0	36,0	62,0	56,0	37,0	845,0	0,2	160,3	320,5
10:00	64,0	59,0	41,0	40,0	65,0	61,0	37,0	945,0	0,5	205,0	525,5
10:30	68,0	64,0	42,0	40,0	70,0	66,0	38,0	1075,0	0,1	230,8	756,3
11:00	69,0	65,0	46,0	41,0	71,0	67,0	38,0	995,0	0,0	298,7	1055,0
11:30	71,0	67,0	47,0	42,0	72,0	69,0	40,0	1005,0	1,5	250,0	1305,0
12:00	71,0	69,0	48,0	45,0	73,0	70,0	39,0	998,0	1,9	330,2	1635,2
12:30	70,0	65,0	48,0	49,0	71,0	67,0	40,0	1090,0	0,2	256,4	1891,6
13:00	68,0	61,0	46,0	47,0	70,0	63,0	39,0	965,0	0,1	260,0	2151,6
13:30	69,0	65,0	43,0	45,0	72,0	68,0	41,0	905,0	0,0	200,0	2351,6
14:00	67,0	63,0	44,0	45,0	68,0	65,0	40,0	648,0	0,0	240,0	2591,6
14:30	67,0	63,0	45,0	44,0	69,0	66,0	40,0	635,0	0,5	134,6	2726,2
15:00	56,0	51,0	43,0	42,0	58,0	54,0	39,0	610,0	0,0	115,4	2841,6
15:30	51,0	46,0	41,0	41,0	52,0	48,0	39,0	145,0	0,1	44,9	2886,5
16:00	45,0	42,0	39,0	38,0	48,0	43,0	38,0	85,0	1,5	12,8	2899,3
16:30	40,0	37,0	36,0	37,0	43,0	39,0	36,0	71,0	0,3	6,4	2905,7
17:00	35,0	33,0	35,0	34,0	36,0	37,0	35,0	65,0	0,4	6,4	2912,1

Tabela 13 – Condições operacionais do dessalinizador solar monitoradas do dia 17/11/2020.

Horário (h:min)	Temperaturas (°C)							Radiação Total (W m ⁻²)	Velocidade do vento (m s ⁻¹)	Destilado horário (mL m ⁻²)	Destilado acumulado (mL m ⁻²)
	Água	Vidro interno	Vidro externo	Isolante	Placa	Ambiente interno	Ambiente externo				
07:00	24,5	24,5	24,5	24,5	24,5	24,5	24,5	390,0	0,7	0,0	0,0
07:30	31,0	30,0	27,0	26,0	32,0	31,0	26,1	410,0	0,4	0,0	0,0
08:00	40,0	37,0	36,0	27,0	42,0	36,0	32,0	510,0	0,1	0,0	0,0
08:30	46,0	42,0	38,0	29,0	48,0	45,0	32,0	693,0	0,1	0,0	0,0
09:00	53,0	49,0	39,0	31,0	56,0	48,0	35,0	685,0	0,4	64,1	64,1
09:30	66,0	56,0	40,0	32,0	68,0	58,0	35,0	879,0	0,3	121,8	185,9
10:00	71,0	62,0	42,0	37,0	72,0	64,0	37,0	980,0	0,9	147,4	333,3
10:30	72,0	60,0	39,0	44,0	73,0	66,0	38,0	998,0	1,7	189,7	523,1
11:00	71,0	57,0	40,0	35,0	73,0	68,0	35,0	1002,0	0,6	217,9	741,0
11:30	72,0	64,0	45,0	33,0	73,0	64,0	37,0	990,0	0,3	307,7	1048,7
12:00	60,0	58,0	45,0	36,0	62,0	59,0	34,0	997,0	0,1	147,4	1196,2
12:30	61,0	59,0	46,0	38,0	64,0	60,0	35,0	992,0	0,1	121,8	1317,9
13:00	64,0	64,0	46,0	41,0	66,0	65,0	39,0	985,0	0,6	230,8	1548,7
13:30	66,0	65,0	47,0	42,0	67,0	65,0	40,0	880,0	0,2	153,8	1702,6
14:00	62,0	61,0	48,0	45,0	64,0	62,0	42,0	698,0	0,0	147,4	1850,0
14:30	61,0	60,0	47,0	44,0	63,0	60,0	41,0	670,0	0,1	121,8	1971,8
15:00	60,0	49,0	43,0	42,0	62,0	59,0	40,0	650,0	0,4	89,7	2061,5
15:30	59,0	48,0	42,0	40,0	60,0	49,0	39,0	158,0	0,1	51,3	2112,8
16:00	45,0	41,0	38,0	34,0	48,0	42,0	38,0	75,0	0,4	19,2	2132,1
16:30	44,0	40,0	37,0	32,0	46,0	41,0	37,0	72,0	0,1	12,8	2144,9
17:00	37,0	32,0	34,0	30,0	39,0	35,0	35,0	61,0	0,3	6,4	2151,3

Tabela 14 – Condições operacionais do dessalinizador solar monitoradas do dia 18/11/2020.

Horário (h:min)	Temperaturas (°C)							Radiação Total (W m ⁻²)	Velocidade do vento (m s ⁻¹)	Destilado horário (mL m ⁻²)	Destilado acumulado (mL m ⁻²)
	Água	Vidro interno	Vidro externo	Isolante	Placa	Ambiente interno	Ambiente externo				
07:00	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	455,0	0,2	0,0	0,0
07:30	32,0	31,0	28,0	27,0	33,0	32,0	27,1	478,0	0,4	0,0	0,0
08:00	41,0	38,0	37,0	28,0	43,0	37,0	33,0	600,0	0,1	12,8	12,8
08:30	47,0	43,0	39,0	30,0	48,0	46,0	33,0	693,0	0,5	64,1	76,9
09:00	54,0	50,0	40,0	32,0	57,0	49,0	36,0	685,0	0,4	141,0	217,9
09:30	67,0	57,0	41,0	33,0	69,0	59,0	36,0	879,0	0,3	121,8	339,7
10:00	72,0	63,0	43,0	38,0	73,0	65,0	38,0	980,0	0,9	153,8	493,6
10:30	73,0	61,0	40,0	45,0	74,0	67,0	39,0	1065,0	1,5	205,1	698,7
11:00	72,0	58,0	41,0	36,0	74,0	69,0	36,0	1008,0	0,6	217,9	916,7
11:30	73,0	65,0	46,0	34,0	74,0	65,0	38,0	1007,0	0,3	307,7	1224,4
12:00	61,0	59,0	46,0	37,0	63,0	60,0	35,0	1005,0	0,1	230,8	1455,1
12:30	62,0	60,0	47,0	39,0	65,0	61,0	36,0	992,0	0,1	128,2	1583,3
13:00	65,0	65,0	47,0	42,0	67,0	66,0	40,0	1105,0	0,5	269,2	1852,6
13:30	67,0	66,0	48,0	43,0	68,0	66,0	41,0	960,0	0,2	250,0	2102,6
14:00	63,0	62,0	49,0	46,0	65,0	63,0	43,0	704,0	0,0	230,8	2333,3
14:30	62,0	61,0	48,0	45,0	64,0	61,0	42,0	695,0	0,1	121,8	2455,1
15:00	61,0	50,0	44,0	43,0	63,0	60,0	41,0	650,0	0,2	141,0	2596,2
15:30	60,0	49,0	43,0	41,0	61,0	50,0	40,0	158,0	0,1	51,3	2647,4
16:00	46,0	42,0	39,0	35,0	49,0	43,0	39,0	98,0	0,3	19,2	2666,7
16:30	45,0	41,0	38,0	33,0	47,0	42,0	38,0	76,0	0,1	12,8	2679,5
17:00	38,0	33,0	35,0	31,0	40,0	36,0	36,0	65,0	0,1	6,4	2685,9

Tabela 15 – Condições operacionais do dessalinizador solar monitoradas do dia 19/11/2020.

Horário (h:min)	Temperaturas (°C)							Radiação Total (W m ⁻²)	Velocidade do vento (m s ⁻¹)	Destilado horário (mL m ⁻²)	Destilado acumulado (mL m ⁻²)
	Água	Vidro interno	Vidro externo	Isolante	Placa	Ambiente interno	Ambiente externo				
07:00	24,3	24,3	24,3	24,3	24,3	24,3	24,3	380,0	0,6	0,0	0,0
07:30	29,0	30,0	27,0	26,0	32,0	30,0	26,5	420,0	0,2	0,0	0,0
08:00	41,0	38,0	37,0	28,0	43,0	37,0	33,0	535,0	0,1	0,0	0,0
08:30	47,0	43,0	39,0	30,0	48,0	46,0	33,0	605,0	0,5	50,0	50,0
09:00	54,0	50,0	40,0	32,0	57,0	49,0	36,0	685,0	0,4	100,0	150,0
09:30	67,0	57,0	41,0	33,0	69,0	59,0	36,0	850,0	0,3	150,0	300,0
10:00	72,0	63,0	43,0	38,0	73,0	65,0	38,0	960,0	0,9	160,0	460,0
10:30	73,0	61,0	40,0	45,0	74,0	67,0	39,0	1005,0	1,7	120,0	580,0
11:00	72,0	58,0	41,0	36,0	74,0	69,0	36,0	1010,0	0,6	200,0	780,0
11:30	73,0	65,0	46,0	34,0	74,0	65,0	38,0	997,0	0,3	150,0	930,0
12:00	61,0	59,0	46,0	37,0	63,0	60,0	35,0	998,0	0,1	180,8	1110,8
12:30	62,0	60,0	47,0	39,0	65,0	61,0	36,0	992,0	0,1	304,1	1414,9
13:00	65,0	65,0	47,0	42,0	67,0	66,0	40,0	1010,0	0,5	336,9	1751,8
13:30	67,0	66,0	48,0	43,0	68,0	66,0	41,0	960,0	0,2	271,2	2022,9
14:00	63,0	62,0	49,0	46,0	65,0	63,0	43,0	704,0	0,0	148,1	2171,0
14:30	62,0	61,0	48,0	45,0	64,0	61,0	42,0	695,0	0,1	164,2	2335,3
15:00	61,0	50,0	44,0	43,0	63,0	60,0	41,0	650,0	0,2	180,9	2516,2
15:30	60,0	49,0	43,0	41,0	61,0	50,0	40,0	158,0	0,1	95,5	2611,7
16:00	46,0	42,0	39,0	35,0	49,0	43,0	37,0	96,0	0,3	82,2	2693,8
16:30	44,0	40,0	37,0	32,0	46,0	41,0	36,0	74,0	0,5	38,0	2731,8
17:00	37,0	32,0	34,0	30,0	39,0	35,0	35,0	62,0	0,2	15,5	2747,3

Tabela 16 – Condições operacionais do dessalinizador solar monitoradas do dia 20/11/2020.

Horário (h:min)	Temperaturas (°C)							Radiação Total (W m ⁻²)	Velocidade do vento (m s ⁻¹)	Destilado horário (mL m ⁻²)	Destilado acumulado (mL m ⁻²)
	Água	Vidro interno	Vidro externo	Isolante	Placa	Ambiente interno	Ambiente externo				
07:00	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7	455,0	0,6	0,0	0,0
07:30	32,0	28,0	29,0	26,0	34,0	29,0	27,0	490,0	0,0	0,0	0,0
08:00	33,0	30,0	30,0	28,0	36,0	32,0	28,0	600,0	0,2	0,0	0,0
08:30	41,0	37,0	31,0	30,0	45,0	39,0	28,0	700,0	0,1	77,2	77,2
09:00	50,0	47,0	36,0	32,0	54,0	48,0	30,0	685,0	0,4	110,0	187,2
09:30	61,0	57,0	38,0	35,0	62,0	58,0	36,0	890,0	1,5	200,0	387,2
10:00	62,0	59,0	41,0	39,0	64,0	61,0	37,0	980,0	1,2	250,0	637,2
10:30	69,0	65,0	42,0	40,0	71,0	67,0	38,0	1010,0	0,1	197,3	834,5
11:00	69,0	65,0	45,0	41,0	70,0	67,0	39,0	1000,0	0,0	230,1	1064,6
11:30	70,0	67,0	47,0	41,0	71,0	69,0	39,0	1025,0	0,6	250,0	1314,6
12:00	71,0	69,0	47,0	45,0	72,0	70,0	40,0	1005,0	0,6	180,8	1495,4
12:30	70,0	67,0	48,0	46,0	72,0	68,0	40,0	995,0	0,3	180,0	1675,4
13:00	68,0	61,0	45,0	47,0	70,0	65,0	39,0	1090,0	0,1	255,0	1930,4
13:30	70,0	65,0	43,0	46,0	73,0	68,0	41,0	960,0	0,1	210,0	2140,4
14:00	68,0	63,0	44,0	45,0	69,0	65,0	40,0	705,0	0,0	148,1	2288,5
14:30	67,0	63,0	44,0	42,0	68,0	66,0	40,0	690,0	0,6	164,2	2452,7
15:00	67,0	61,0	43,0	42,0	69,0	63,0	40,0	650,0	0,1	180,9	2633,6
15:30	51,0	47,0	41,0	41,0	53,0	49,0	39,0	155,0	0,1	98,6	2732,2
16:00	46,0	42,0	39,0	38,0	49,0	45,0	38,0	85,0	1,5	70,0	2802,2
16:30	40,0	37,0	36,0	37,0	44,0	39,0	37,0	80,0	0,3	38,0	2840,2
17:00	34,0	30,0	35,0	34,0	36,0	32,0	35,0	65,0	0,2	15,0	2855,2

Tabela 17 – Condições operacionais do dessalinizador solar monitoradas do dia 24/11/2020.

Horário (h:min)	Temperaturas (°C)							Radiação Total (W m ⁻²)	Velocidade do vento (m s ⁻¹)	Destilado horário (mL m ⁻²)	Destilado acumulado (mL m ⁻²)
	Água	Vidro interno	Vidro externo	Isolante	Placa	Ambiente interno	Ambiente externo				
07:00	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	475,0	0,3	0,0	0,0
07:30	32,0	28,0	29,0	26,0	34,0	29,0	27,0	495,0	0,0	0,0	0,0
08:00	33,0	30,0	30,0	28,0	36,0	32,0	28,0	610,0	0,1	0,0	0,0
08:30	41,0	37,0	31,0	30,0	45,0	39,0	28,0	700,0	0,1	70,0	70,0
09:00	50,0	47,0	36,0	32,0	54,0	48,0	30,0	685,0	0,2	98,0	168,0
09:30	61,0	57,0	38,0	35,0	62,0	58,0	36,0	890,0	1,1	190,0	358,0
10:00	62,0	59,0	41,0	39,0	64,0	61,0	37,0	980,0	1,2	250,0	608,0
10:30	69,0	65,0	42,0	40,0	71,0	67,0	38,0	1050,0	0,1	197,3	805,3
11:00	69,0	65,0	45,0	41,0	70,0	67,0	39,0	1005,0	0,0	230,1	1035,4
11:30	71,0	67,0	47,0	41,0	71,0	69,0	39,0	1060,0	0,6	245,0	1280,4
12:00	71,0	69,0	47,0	45,0	72,0	70,0	40,0	1005,0	0,4	180,8	1461,2
12:30	69,0	67,0	48,0	46,0	72,0	68,0	40,0	995,0	0,3	175,0	1636,2
13:00	68,0	61,0	45,0	47,0	70,0	65,0	39,0	1090,0	0,1	240,0	1876,2
13:30	70,0	65,0	43,0	46,0	73,0	68,0	41,0	960,0	0,1	290,0	2166,2
14:00	68,0	63,0	44,0	45,0	69,0	65,0	40,0	705,0	0,0	148,1	2314,3
14:30	68,0	63,0	44,0	42,0	68,0	66,0	40,0	690,0	0,6	164,2	2478,5
15:00	67,0	61,0	43,0	42,0	69,0	63,0	40,0	650,0	0,1	180,9	2659,4
15:30	51,0	47,0	41,0	41,0	53,0	49,0	39,0	155,0	0,1	98,6	2758,0
16:00	46,0	42,0	39,0	38,0	49,0	45,0	38,0	90,0	1,3	70,0	2828,0
16:30	40,0	37,0	36,0	37,0	44,0	39,0	37,0	72,0	0,2	38,0	2866,0
17:00	32,0	29,0	34,0	33,0	35,0	31,0	34,0	67,0	0,1	15,0	2881,0

Tabela 18 – Condições operacionais do dessalinizador solar monitoradas do dia 25/11/2020.

Horário (h:min)	Temperaturas (°C)							Radiação Total (W m ⁻²)	Velocidade do vento (m s ⁻¹)	Destilado horário (mL m ⁻²)	Destilado acumulado (mL m ⁻²)
	Água	Vidro interno	Vidro externo	Isolante	Placa	Ambiente interno	Ambiente externo				
07:00	26,5	26,5	26,5	26,5	26,5	26,5	26,5	480,0	0,3	0,0	0,0
07:30	33,0	29,0	30,0	27,0	35,0	30,0	28,0	500,0	0,0	0,0	0,0
08:00	33,0	30,0	30,0	28,0	36,0	32,0	28,0	610,0	0,1	0,0	0,0
08:30	41,0	37,0	31,0	30,0	45,0	39,0	28,0	700,0	0,1	70,0	70,0
09:00	50,0	47,0	36,0	32,0	54,0	48,0	30,0	685,0	0,2	98,0	168,0
09:30	61,0	57,0	38,0	35,0	62,0	58,0	36,0	890,0	1,1	190,0	358,0
10:00	62,0	59,0	41,0	39,0	64,0	61,0	37,0	980,0	1,2	250,0	608,0
10:30	69,0	65,0	42,0	40,0	71,0	67,0	38,0	1060,0	0,1	197,3	805,3
11:00	69,0	65,0	45,0	41,0	70,0	67,0	39,0	1005,0	0,0	240,0	1045,3
11:30	71,0	67,0	47,0	41,0	71,0	69,0	39,0	1065,0	0,6	245,0	1290,3
12:00	71,0	69,0	47,0	45,0	72,0	70,0	40,0	1005,0	0,4	180,8	1471,1
12:30	69,0	67,0	48,0	46,0	72,0	68,0	40,0	995,0	0,3	175,0	1646,1
13:00	68,0	61,0	45,0	47,0	70,0	65,0	39,0	1090,0	0,1	250,0	1896,1
13:30	70,0	65,0	43,0	46,0	73,0	68,0	41,0	960,0	0,1	290,0	2186,1
14:00	68,0	63,0	44,0	45,0	69,0	65,0	40,0	705,0	0,0	148,1	2334,2
14:30	68,0	63,0	44,0	42,0	68,0	66,0	40,0	695,0	0,6	164,2	2498,4
15:00	67,0	61,0	43,0	42,0	69,0	63,0	40,0	650,0	0,1	180,9	2679,3
15:30	51,0	47,0	41,0	41,0	53,0	49,0	39,0	160,0	0,1	98,6	2777,9
16:00	46,0	42,0	39,0	38,0	49,0	45,0	38,0	90,0	1,3	70,0	2847,9
16:30	41,0	38,0	37,0	38,0	45,0	40,0	38,0	70,0	0,2	38,0	2885,9
17:00	31,0	28,0	33,0	32,0	34,0	30,0	34,0	65,0	0,1	15,0	2900,9