



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA - UEPB
CAMPUS I - CAMPINA GRANDE
PRÓ - REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL
CURSO DE DOUTORADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

LENILSON OLINTO ROCHA

DESENVOLVIMENTO DE UM DESSALINIZADOR SOLAR COM
REAPROVEITAMENTO DE CALOR PARA PRÉ-AQUECIMENTO E SISTEMA DE
AQUECIMENTO HÍBRIDO DA ÁGUA SALOBRA

CAMPINA GRANDE
2024

LENILSON OLINTO ROCHA

**DESENVOLVIMENTO DE UM DESSALINIZADOR SOLAR COM
REAPROVEITAMENTO DE CALOR PARA PRÉ-AQUECIMENTO E SISTEMA DE
AQUECIMENTO HÍBRIDO DA ÁGUA SALOBRA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Doutor em Engenharia Ambiental.

Área de concentração: Tecnologia de Tratamento de Águas e Resíduos.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Antonio Pereira de Lima

Coorientadora: Profa. Dra. Keila Machado de Medeiros

**CAMPINA GRANDE
2024**

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.

R672d Rocha, Lenilson Olinto.
Desenvolvimento de um dessalinizador solar com reaproveitamento de calor para pré-aquecimento e sistema de aquecimento híbrido da água salobra [manuscrito] / Lenilson Olinto Rocha. - 2024.
152 p. : il. colorido.

Digitado.

Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2024.

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

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

1. Dessalinizador solar. 2. Água potável. 3. Produtividade.
4. Eficiência. I. Título

21. ed. CDD 628

LENILSON OLINTO ROCHA

**DESENVOLVIMENTO DE UM DESSALINIZADOR SOLAR COM
REAPROVEITAMENTO DE CALOR PARA PRÉ-AQUECIMENTO E SISTEMA DE
AQUECIMENTO HÍBRIDO DA ÁGUA SALOBRA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Doutor em Engenharia Ambiental.

Área de concentração: Tecnologia de Tratamento de Águas e Resíduos.

Aprovada em: 27/06/2024.

BANCA EXAMINADORA

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

Profa. Dra. Keila Machado de Medeiros (Coorientadora)
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB)

Profa. Dra. Geralda Gilvania Cavalcante de Lima (Avaliadora interna)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Profa. Dra. Maristela Alves da Silva (Avaliadora externa)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

Prof. Dr. Jonhatan Magno Norte da Silva (Avaliador externo)
Universidade Federal de Alagoas (UFAL)

Prof. Dr. Djoille Denner Damm (Avaliador externo)
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB)

Dedico este trabalho aos meus filhos. Por escolha do nosso criador, são gêmeos! Então a Liz, minha menina, e a Liam, meu menino. Saibam que vocês acendem a chama da vida no meu coração.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a meu bom Deus, dado que a fé em seu filho, Jesus Cristo, iluminou e ilumina meus caminhos e escolhas.

Agradeço ao meu Orientador, Dr. Carlos Antonio, por ter acreditado no meu potencial e por toda contribuição e ajuda na produção dessa verdadeira obra científica.

Agradeço a minha Coorientadora, Dra. Keila, por ter ajudado e contribuído positivamente para a pesquisa.

Agradeço a todos os avaliadores, em especial ao Dr. Jonhatan por sempre me incentivar e ajudar a encontrar soluções para os problemas durante a construção desse trabalho.

Agradeço aos meus colegas e amigos do PPGCTA, em especial ao amigo Mateus, por ter acreditado e está sempre dispostos a ajudar.

Agradeço aos meus colegas do GRUTAA, em especial a Karyna, Yohanna, Camylla, Rafaela, Elton e Wanderley por ter dado todo o apoio possível na realização desta tese e ter ajudado, principalmente ensinando como utilizar os equipamentos do laboratório.

Agradeço ao meu Tio Reginaldo (Nenê), pois, sem sua ajuda não teria conseguido apresentar este trabalho.

Agradeço aos meus familiares e amigos por sempre contribuir com palavras positivas e incentivos, de financeiros à emocionais.

Agradeço a Tayná, minha esposa por me ajudar toda vez que precisei.

Agradeço ao PPGCTA e a UEPB por propiciar uma educação de alto nível e a elaboração da minha primeira patente fruto deste trabalho.

A vida é passagem, é transição!

Não existe estado permanente quando falamos de pessoas.

Até o pensar pode ser no passado, no futuro e no presente. Então, um termo mais próximo para definir uma pessoa é: transição.

Sempre a transição faz parte, não é o elo, mas sim a jornada.

Porém essa jornada é contemplada por altos e baixos que nem sempre existe clareza.

Muitas vezes não sabemos como fazer determinada coisa ou agir diante o inesperado.

Contudo, o não saber no passado se tornar conhecimento quando o inesperado acontece no futuro, e assim, toda bagagem chamada de vivência é construída.

Por experiências!

Construa boas experiências, utilize da transição e conheça a vida!

A transição é diversa, é a fome insaciável, enquanto existe transição, existe vida.

RESUMO

A escassez global de água potável, intensificada por mudanças climáticas, destaca-se como um desafio significativo, afetando bilhões de pessoas. A pandemia de covid-19 exacerbou esse problema, especialmente em áreas socialmente vulneráveis. Nesse contexto, a dessalinização solar emerge como uma solução promissora, sustentável e de baixo custo para atenuar o acesso a água potável. Porém, existem grandes desafios para aumentar a eficiência dos equipamentos de dessalinização solar, e conseqüentemente, suas produtividades. Então, esse estudo visando contribuir na construção de conhecimento na área da sustentabilidade especificamente na garantia ao acesso a água, tem por objetivo projetar um dessalinizador solar de alta eficiência e com sistema de reaproveitamento de calor adaptado para a região semiárida do nordeste brasileiro. Para atingir o objetivo, esta pesquisa realizou uma revisão sistemática da literatura, e, com base nessa revisão, projetou, construiu, operou e comparou os resultados de um dessalinizador solar com tubos evacuados e sistemas de recuperação de calor (Gruta 1) com um dessalinizador solar convencional (Gruta 2). Os dados mostraram que o equipamento projetado é 1,7 vezes mais produtivo e apresentou mais de 40% de eficiência quando comparado a um dessalinizador solar convencional, uma vez que o Gruta 1 conseguiu produzir $2,66 \text{ L.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ e o Gruta 2 somente $1,51 \text{ L.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. Além disso, o Gruta 1 obteve o custo de R\$ 0,22 por litro de água dessalinizada.

Palavras-chave: dessalinizador solar; água potável; produtividade; eficiência.

ABSTRACT

The global scarcity of potable water, exacerbated by climate change, stands out as a significant challenge, affecting billions of people. The COVID-19 pandemic has worsened this problem, especially in socially vulnerable areas. In this context, solar still emerges as a promising, sustainable, and low-cost solution to alleviate access to potable water. However, there are significant challenges in increasing the efficiency of solar still equipment and consequently, their productivities. Therefore, this study aims to contribute to knowledge construction in the field of sustainability, specifically in ensuring access to water, by designing a high-efficiency solar still with a heat recovery system adapted for the semi-arid region of northeastern Brazil. To achieve this objective, this research conducted a systematic literature review and, based on this review, designed, constructed, operated, and compared the results of a solar still with evacuated tubes and heat recovery systems (Gruta 1) with a conventional solar still (Gruta 2). The data showed that the designed equipment is 1.7 times more productive and exhibited over 40% efficiency when compared to a conventional solar still, as Gruta 1 was able to produce $2.66 \text{ L.m}^{-2}.\text{day}^{-1}$ while Gruta 2 only produced $1.51 \text{ L.m}^{-2}.\text{day}^{-1}$. Additionally, Gruta 1 achieved a cost of US\$ 0.044 per liter of desalinated water.

Keywords: solar still; potable water; productivity; efficiency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Delimitação do semiárido brasileiro	21
Figura 2 - Planta de destilação solar em Las Salinas no deserto do Atacama em 1872	23
Figura 3 - Esquema básico de um dessalinizador solar	27
Figura 4 - Classificação dos sistemas de dessalinização solar	29
Figura 5 - Esquematização de um dessalinizador solar de inclinação única	30
Figura 6 - Visão de um destilador solar de inclinação dupla	30
Figura 7 - Esquematização de um dessalinizador solar do tipo degrau	32
Figura 8 - Dessalinizadores solar do tipo pirâmide	33
Figura 9 - Esquematização de um de dessalinizador solar tubular	34
Figura 10 - Visão de um dessalinizador solar hemisférico	35
Figura 11 - Visão de um dessalinizador solar com cobertura em "V"	35
Figura 12 - Dessalinizador solar tubular acoplado a um concentrador parabólico	38
Figura 13 - Esquematização de equipamento de dessalinização híbrido	38
Figura 14 - Dessalinizador com tubos evacuados, condensador e PCM	39
Figura 15 - Dessalinizador de inclinação única com três estágios e evacuados	39
Figura 16 - Dessalinizador solar SSSS com tubos evacuados	40
Figura 17 - Dessalinizador solar de única inclinação de três estágios acoplado a lente Fresnel	40
Figura 18 - Dessalinizador SSSS com dois reservatórios de água	41
Figura 19 - Balanço de energia no dessalinizador solar	44
Figura 20 - Delimitação do semiárido paraibano	57
Figura 21 - Lógica da Revisão Sistemática da Literatura (RSL)	60
Figura 22 - Quantitativos da busca e procedimento de filtragem	63
Figura 23 - Resumo dos parâmetros meteorológicos em novembro de 2023	67
Figura 24 - Evolução das publicações	68
Figura 25 - Dessalinizador solar projetado	81
Figura 26 - Tubo evacuado projeto por Avallone	83
Figura 27 - Bandejas de alumínio	87
Figura 28 - Caixas de madeira	88
Figura 29 - Isolantes térmicos	89
Figura 30 - Calhas	90
Figura 31 - Cobertura da tampa de vidro	91
Figura 32 - Módulos Gruta 1 e Gruta 2	91
Figura 33 - Comparação das produtividades do Gruta 1 e Gruta 2 com lâmina d'água de 0,5cm	95
Figura 34 - Comparação das produtividades do Gruta 1 e Gruta 2 com lâmina d'água de 1,0cm	95
Figura 35 - Dados ambientais da etapa de parametrização para 0,5cm de lâmina d'água	96
Figura 36 - Dados ambientais da etapa de parametrização para 1,0 cm de lâmina d'água	97
Figura 37 - Eficiência na etapa de parametrização para 0,5cm de lâmina d'água	97
Figura 38 - Eficiência na etapa de parametrização para 1,0 cm de lâmina d'água	98
Figura 39 - Perfis de temperatura na parametrização para 0,5 cm de lâmina d'água	99
Figura 40 - Perfis de temperatura na parametrização para 1,0 cm de lâmina d'água	99
Figura 41 - Módulos Gruta 1 e 2 em operação	100
Figura 42 - Armação de metalon	102
Figura 43 - Assoalho de madeira	104
Figura 44 - Chapa de apoio e cavaletes	104
Figura 45 - Gruta 1 acoplado vista superior	105
Figura 46 - Dados ambientais para 0,5 cm de lâmina d'água	112
Figura 47 - Dados ambientais para 1,0 cm de lâmina d'água	113
Figura 48 - Perfis de temperatura Gruta 1 com lâmina d'água 0,5cm	114
Figura 49 - Perfis de temperatura Gruta 2 com lâmina d'água 0,5cm	115

Figura 50 - Perfis de temperatura Gruta 1 com lâmina d'água 1,0 cm	116
Figura 51 - Perfis de temperatura Gruta 2 com lâmina d'água 1,0 cm	117
Figura 52 - Produtividade para lâmina d'água de 0,5cm	117
Figura 53 - Produtividade para lâmina d'água de 1,0 cm	118
Figura 54 - Eficiência final para lâmina d'água de 0,5 cm	119
Figura 55 - Eficiência final para lâmina d'água de 1,0 cm	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidade de artigos por periódico e seu fator de impacto	69
Tabela 2 - Síntese dos trabalhos experimentais.....	76
Tabela 3 - Resultados das análises físico-químicas na parametrização.....	93
Tabela 4 - Resultados das análises físico-químicas finais	121
Tabela 5 - Análise econômica.....	123

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Gregos

Termo	Designação	Unidade
α_v	Absortividade do vidro	-
α_{tubo}	Absortividade do tubo evacuado	-
ϵ	Emissividade	-
ϵ_{eff}	Emissividade efetiva	-
ϵ_a	Emissividade da superfície da água na bandeja do dessalinizador	-
ϵ_v	Emissividade da parte interna da cobertura de vidro	-
ϵ_{iso}	Emissividade do isolamento	-
η	Eficiência	%
θ_1	Ângulo 1 de inclinação da cobertura do dessalinizador	°
θ_2	Ângulo 2 de inclinação da cobertura do dessalinizador	°
λ	Condutividade térmica	W m ⁻¹ K ⁻¹
λ_a	Calor latente da evaporação da água	J.Kg ⁻¹
ρ_r	Refletância do refletor	-
ν	Viscosidade cinemática	m ² s ⁻¹
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	W m ⁻² K ⁻⁴
μ	Fator de amortização	-

Símbolos Latinos

Termo	Designação	Unidade
A	Área	m ²
AFC	Taxa fixa anual do dessalinizador	%
AMC	Custo anual de manutenção e operação do sistema	R\$
A _v	Área da cobertura de vidro	m ²
A _s	Área da superfície da lâmina d'água	m ²
A _b	Área da bandeja	m ²
A _{iso}	Área do isolamento	m ²
A _{tubo}	Área da tubo evacuado	m ²
A _{ext}	Área externa	m ²
ASV	Valor residual anual	R\$
C	Comprimento do vidro	m
C _a	Calor específico da água	J kg ⁻¹ K ⁻¹
C _n	Constante de convecção natural	-
CPL	Custo do litro de água dessalinizada	R\$
FC	Custo fixo (custo de produção)	R\$

G_r	Número de Grashof	-
h	Coeficiente de transferência de calor	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$h_{con(água-v)}$	Coeficiente de transferência de calor convectivo da superfície da água para a superfície interna da cobertura de vidro	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$h_{rad(água-v)}$	Coeficiente de transferência de calor radiativo da superfície da água para a superfície interna da cobertura de vidro	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$h_{evap(água-v)}$	Coeficiente de transferência de calor evaporativo entre a superfície da água para a superfície interna da cobertura de vidro	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$h_{evap(v-amb)}$	Coeficiente de transferência de calor evaporativo entre a superfície da água para a superfície interna da cobertura de vidro	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$h_{con(iso-amb)}$	Coeficiente de transferência de calor convectivo do isolamento para o ambiente	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$h_{rad(iso-amb)}$	Coeficiente de transferência de calor radiativo do isolamento para o ambiente	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$h_{con(bandeja-água)}$	Coeficiente de transferência de energia que ocorre entre a bandeja do dessalinizador solar para a massa d'água	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$h_{con(cober.vidro-amb)}$	Coeficiente externo de transferência de calor convectivo entre a cobertura de vidro e o ambiente	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$h_{rad(cober.vidro-amb)}$	Coeficiente externo de transferência de calor radiativo entre a cobertura de vidro e o ambiente	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$h_{cond(bandeja-amb)}$	Coeficientes externo de transferência de calor condutivo entre a bandeja e o ambiente	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$h_{cond(massa.água-amb)}$	Coeficiente externo de transferência de calor condutivo entre a massa d'água e o ambiente	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$h_{con(bandeja-água)}$	Coeficiente convectivo externo de transferência de calor entre a bandeja e a massa d'água	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$h_{rad(iso-amb)}$	Coeficiente de transferência de calor radiativo entre o isolamento e o ambiente	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$h_{con(iso-amb)}$	Coeficiente de transferência de calor convectivo entre o isolamento e o ambiente	$W.m^{-2}.K^{-1}$
i	Juros por ano	a.a.
$I(t)$	Intensidade de radiação solar	$W.m^{-2}$
It	Radiação total absorvida	$W.m^{-2}$
k	Condutividade térmica do material	$W.m^{-1}.K^{-1}$
k	Fator de recuperação de capital	-
$K_{água}$	Condutividade térmica da água	$W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$
K_{ins}	Condutividade térmica do isolante	$W.m^{-1}.K^{-1}$
l	Comprimento do vidro	m
L	Calor latente da vaporização da água	$J.kg^{-1}$
L_{ins}	Espessura do isolante	m
$m\acute{a}gua$	Produção anual de água dessalinizada	$L.ano^{-1}.m^{-2}$

m_a	Massa d'água	kg
M_{prod}	Produtividade do dessalinizador solar	M_{prod}
n	Vida útil do equipamento	anos
n	Constante na expressão do cálculo do número de Nusselt	n
P_r	Número de Prandtl	-
P_a	Pressão parcial do vapor de saturação d'água	$N.m^{-2}$
P_{vi}	Pressão parcial do vapor de saturação d'água na superfície interna do vidro de cobertura	$N.m^{-2}$
P_{mer}	Precificação do equipamento no mercado	R\$
$p_{v_{ag}}$	Valor do litro da água destilada vendida no mercado	R\$
q_{cond}	Taxa de transferência de calor por condução	W
q_{conv}	Fluxo de transferência de calor por convecção	W
q_{evap}	Fluxo de transferência de calor evaporativo	W
q_{rad}	Fluxo de transferência de calor por radiação	W
q_{irrad}	Irradiação solar	W
$q_{con (v-amb)}$	Fluxo de calor convectivo do vidro para o ambiente	W
$q_{rad (v-amb)}$	Fluxo de calor radiativo do vidro para o ambiente	W
$q_{con (iso-amb)}$	Fluxo de calor convectivo do isolamento para o ambiente	W
$q_{rad (iso-amb)}$	Fluxo de calor radiativo do isolamento para o ambiente	W
SV	Amortização do custo fixo em 20%;	R\$
T	Temperatura	K
$T_{água}$	Temperatura da água	K
T_a	Temperatura da água na bandeja do dessalinizador	°C
T_{vi}	Temperatura interna da cobertura de vidro	°C
T_{iso}	Temperatura do isolamento	°C
T_{atm}	Temperatura Atmosférica	K
T_{viz}	Temperatura da vizinhança	K
$T_{ext-iso}$	Temperatura externa do isolamento	K
T_{amb}	Temperatura do ambiente	K
v	Velocidade do vento	$m.s^{-1}$
$X_{água}$	Comprimento característico	m
$\frac{dT}{dt}$	Gradiente da temperatura em relação ao tempo	$K s^{-1}$
$\frac{dT}{dx}$	Gradiente da temperatura em relação a área	$K.m^{-2}$
ΔT	Variação de temperatura	K

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Parâmetros que interferem na dessalinização solar.....	26
Quadro 2 - Comparação entre sistemas de dessalinização solar	42
Quadro 3 - Experiências de tecnologias sociais	55
Quadro 4 - Descrição detalhada das etapas da RSL.....	62
Quadro 5 - Dados para análise experimental	65
Quadro 6 - Descrição dos componentes do equipamento.....	85
Quadro 7 - Detalhamento do projeto.....	107
Quadro 8 - Posicionamento dos termopares no equipamento	111

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivos	19
1.1.1	<i>Objetivo geral</i>	19
1.1.2	<i>Objetivos específicos</i>	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	20
2.1	Semiárido brasileiro	20
2.2	Dessalinização solar	22
2.3	Fatores que interferem na dessalinização solar	25
2.4	Componentes básicos de um dessalinizador solar	26
2.5	Classificação dos projetos de dessalinizadores solares.....	27
2.5.1	<i>Dessalinizador solar ativo e dessalinizador solar passivo</i>	28
2.5.2	<i>Dessalinizador solar com uma única inclinação</i>	29
2.5.3	<i>Dessalinizador solar de dupla inclinação</i>	30
2.5.4	<i>Dessalinizador solar do tipo degrau (cascata)</i>	31
2.5.5	<i>Dessalinizador com pirâmide solar</i>	32
2.5.6	<i>Dessalinizador solar do tipo tubular</i>	33
2.5.7	<i>Dessalinizador solar hemisférico</i>	34
2.5.8	<i>Dessalinizador solar com cobertura em “V”</i>	35
2.6	Comparação entre sistemas de dessalinização solar	36
2.7	Tecnologias para aumentar a produtividade	37
2.8	Balço energético em um dessalinizador solar.....	43
2.9	Produtividade e eficiência em um dessalinizador solar	51
2.10	Avaliação econômica em um dessalinizador solar	52
2.11	Tecnologias sociais	54
3	METODOLOGIA	57
3.1	Caracterização da área de estudo.....	57
3.2	Classificação da pesquisa	58
3.3	Revisão sistemática da Literatura (RSL)	59
3.3.1	<i>Formulação do problema</i>	61
3.3.2	<i>Localização e seleção de estudos</i>	61

3.3.3	<i>Filtragem dos estudos</i>	61
3.3.4	<i>Análise dos estudos</i>	63
3.4	Experimento.....	64
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
4.1	Análise quantitativa da Revisão Sistemática da Literatura (RSL).....	68
4.2	Análise qualitativa da Revisão Sistemática da Literatura (RSL)	70
4.2.1	<i>Parâmetros que interferem nos dessalinizadores solares</i>	71
4.2.2	<i>Modelos e técnicas utilizados nos dessalinizadores solares</i>	72
4.3	Resultados: processo de construção.....	81
4.3.1	<i>Processo de construção dos módulos de dessalinização solar</i>	86
4.4	Parametrização e primeiros dados	92
4.5	Desenvolvimento das melhorias no módulo Gruta 1	100
4.6	Resultados da operação do módulo Gruta 1 e suas melhorias	111
4.7	Resultados da avaliação econômica	122
5	CONCLUSÕES FINAIS	124
5.1	Conclusões	124
5.2	Frutos da tese	125
5.3	Sugestões para trabalhos futuros	126
	REFERÊNCIAS	127
	ANEXO A - CÁLCULO DOS ρ – VALORES	146
	ANEXO B - VARIÁVEIS PARA lâmina d'água com 0,5 cm	147
	ANEXO C - VARIÁVEIS PARA lâmina d'água com 1,0 cm	149
	ANEXO D - FLUXOS DE CALOR 1	151
	ANEXO E - FLUXOS DE CALOR 2	152

1 INTRODUÇÃO

A Organização das Nações Unidas (ONU) publicou, em 2023, que cerca de 2,1 bilhões de pessoas no mundo não têm acesso a água potável e que cerca de 4,5 bilhões de pessoas, não têm saneamento básico adequado.

O acesso aos recursos hídricos, especificadamente a água potável, sofre influência das mudanças climáticas induzidas por ações antrópicas, pois, impactam no ciclo hidrológico, em que estações com eventos de seca são cada vez mais intensas (Padrón *et al.*, 2020).

Então, conforme as mudanças climáticas provocam cada vez mais eventos de extremos hidrológicos, maior também será o número de pessoas, em vulnerabilidade social, sem acesso a água potável (Kohlitz; Chong; Willetts, 2020).

Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS), Fundo das Nações Unidas para a Infância (UNICEF) (2019) e Prüss-Ustün *et al.* (2019) cerca de 1,7 milhões de pessoas morreram em 2016 em decorrência de doenças relacionadas com a falta de água potável, saneamento básico e condições adequadas de higiene. Para a OMS e a UNICEF (2019), pode-se atribuir que 3,3% das mortes globais de certo modo, estão relacionadas com a falta de água, saneamento e higiene.

Felix *et al.* (2018) e Santos *et al.* (2020) relacionam a questão da água potável com o semiárido nordestino, em que a combinação da escassez de recursos hídricos com a salinidade dos solos, (provinda da irrigação de água salobra ou do desgaste natural das rochas), e renda familiar baixa, potencializa a exploração descontrolada do uso da terra, levando a seu esgotamento. Assim, não sendo possível atenuar os impactos negativos no bioma da caatinga e conseqüentemente, não viabilizando a geração de renda.

Em 2020, com a pandemia do covid-19, a problemática do acesso à água ganhou novos contornos. Para Ekumah *et al.* (2020) os indivíduos que não possuem acesso aos recursos básicos, como a água potável, e em localidades com fortes indicadores de desigualdade social, apresentam maior probabilidade de violar as medidas de prevenção e distanciamento social, dado que buscam atender suas demandas por água, alimentação e saneamento.

Uma forma de atenuar a escassez de água para consumo humano é a utilização de tecnologias limpas, como a dessalinização solar (Eltawil; Zhengming; Yuan, 2009; Shahzad, 2017). E, dado que é uma tecnologia que produz poucos resíduos, seu sistema de captação é adaptável, abundante e de baixo custo.

Na percepção de Velmurugan *et al.* (2008) e Shahzad (2017) a dessalinização solar apresenta-se como o melhor método para purificar a água em pequena escala, e o dessalinizador solar, apesar da baixa produtividade, pode ser empregado com outras tecnologias com objetivo de aumentar a produção de água, como por exemplo o uso de painéis solares, coletores e concentradores solares.

No estudo de El-Sebaili e El-Bialy (2015) foi evidenciada a importância do uso dos equipamentos de dessalinização solar para prover água potável a comunidades sem acesso ao recurso, mas, os autores, destacaram que os equipamentos disponíveis no mercado ainda possuem uma baixa eficiência.

Já Arunkumar *et al.* (2019) elaboraram uma revisão de literatura com os vários modelos e tecnologias empregadas nos dessalinizadores solares e apontaram que os materiais de mudança de fase, "*Phase Change Materials*", ou PCMs, são desenvolvidos para atuarem como "armazenadores" de energia na forma de calor e poderão aumentar a eficiência dos dessalinizadores solares.

Silva *et al.* (2016) sugerem que há necessidade de novos estudos sobre o uso de dessalinizadores solares, especialmente no tocante a qual o melhor modelo e o acoplamento à outras tecnologias como tubos evacuados, painéis solares, coletores e concentradores. Desse modo, justifica-se realizar estudos sobre: a aplicação de diferentes materiais na construção de um dessalinizador solar; a viabilidade econômica e a disponibilidade desses materiais no mercado; e a influência desses materiais na produtividade do dessalinizador solar.

Desse modo, visando contribuir para a temática ambiental e desenvolvimento de tecnologias sustentáveis, especificamente na área de qualidades de águas e abastecimento, esta pesquisa tem por objetivo projetar um dessalinizador solar de alta eficiência e com sistema de reaproveitamento de calor adaptado para a região semiárida do nordeste brasileiro.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Esta pesquisa apresenta como objetivo geral projetar um dessalinizador solar de alta eficiência e com sistema de reaproveitamento de calor adaptado para a região semiárida do nordeste brasileiro.

A partir das observações apresentadas na literatura e diante da necessidade ímpar da melhoria da qualidade de vida das pessoas residentes em regiões do semiárido, em relação a escassez de acesso água, que poderão utilizar a dessalinização solar, o presente trabalho contribui no tocante ao ineditismo e cientificidade, à medida que produziu conhecimentos sobre:

- a) modelo de revisão sistemática da literatura sobre a dessalinização solar;
- b) a real potencialidade do uso da dessalinização solar com emprego de materiais acessíveis financeiramente na construção do equipamento;
- c) quais materiais promovem o aumento da eficiência em relação ao custo;
- d) se o uso do equipamento pode ser considerado uma tecnologia social eficiente e de fácil construção.

1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar uma Revisão Sistemática da Literatura (RLS), identificando o modelo, as tecnologias, os materiais e parâmetros mais apropriados na construção de um dessalinizador solar de acordo com as restrições: acessibilidade econômica dos materiais de construção, fácil usabilidade e eficiência;
- Projetar, construir e determinar o custo do protótipo do dessalinizador solar;
- Analisar a eficiência térmica do protótipo;
- Analisar os níveis de condutividade elétrica, cloreto, dureza, alcalinidade, turbidez, sódio, potássio e pH da água ao padrão de consumo;
- Estimar a viabilidade econômica do equipamento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Semiárido brasileiro

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2019), o semiárido brasileiro concentra cerca de 28,7% da população brasileira, com uma área geográfica de influência de 969.589 km².

De acordo com o Instituto Nacional do Semiárido (INSA), o termo “clima semiárido” é utilizado para delimitar áreas onde a quantidade de chuva que cai é menor que a quantidade de água que se evapora (INSA, 2013). No Brasil, verifica-se que ocorrem quatro tipos diferentes de clima semiárido, caracterizados pelo período de tempo sem ocorrência de chuvas, os quais são: 6 meses secos, 7 a 8 meses secos, 9 a 10 meses secos, e 11 meses secos.

A região do Nordeste e uma pequena parte do Sudeste do Brasil é caracterizada pelas condições climáticas dominantes de semiaridez, dado que apresenta precipitação pluviométrica média anual igual ou inferior a 800 mm, um índice de aridez de *Thornthwaite* (razão entre a precipitação pluviométrica e a evapotranspiração potencial) igual ou inferior a 0,50 e o percentual diário de déficit hídrico igual ou superior a 60%, considerando todos os dias do ano (INSA, 2013; SUDENE, 2017).

Um total de 1.262 municípios estão localizados na região do semiárido, dos quais 194 são paraibanos, o que coloca o Estado em segundo lugar entre os entes federativos com mais municípios na região supracitada, ficando atrás apenas do Estado da Bahia com 278 municípios (SUDENE, 2017).

O clima semiárido mais severo, com duração de 11 meses secos, ocorre na Paraíba e no Sertão baiano, abrangendo, no Estado da Paraíba, parte do território dos municípios de Barra de São Miguel, Cabaceiras, Gurjão, Juazeirinho, São Domingos do Cariri, São João do Cariri, São Vicente do Seridó e Soledade (INSA, 2013). Além da Paraíba e da Bahia, os Estados do Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Minas Gerais apresentam percentuais de seu território no semiárido, como mostra a Figura 1.

Figura 1 - Delimitação do semiárido brasileiro



Fonte: SUDENE (2017)

Segundo Andrade e Nunes (2017), a sobrevivência da população no semiárido está vinculada diretamente à disponibilidade hídrica, a qual é deficitária, irregular com variações anuais acentuadas. Segundo Coelho *et al.* (2014) o semiárido é um ambiente de intensos conflitos sociais, imortalizado em diversas obras literárias como os Sertões de Euclides da Cunha, em que a sobrevivência da população está ligada a uma luta diária para ter acesso aos escassos recursos hídricos.

A disponibilidade de água para consumo humano no semiárido 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 ocorra por meio de carros-pipas e da utilização de água de poços, muitas vezes salobra, e que necessita ser dessalinizada (Whately; Campanilli, 2016).

Para atenuar os problemas de acesso a água, a dessalinização é um método que permite a produção de água purificada, principalmente a dessalinização solar, que além dos custos reduzidos, apresenta-se como uma alternativa sustentável e de baixo

consumo energético, uma vez que a principal fonte de energia para esse sistema é a solar.

2.2 Dessalinização solar

O uso de dessalinizadores solares, atualmente, é uma das melhores práticas para dessalinizar águas em regiões semiáridas, uma vez que utilizam a energia solar, uma energia limpa e que se denota como um grande potencial energético no semiárido brasileiro (Silva *et al.*, 2016).

A dessalinização é um processo pelo qual a água salgada ou salobra é tratada com o objetivo de remover os sais minerais, resultando em uma água purificada, tornando-a numa solução competitiva e viável para o fornecimento de água à populações que enfrentam dificuldades no acesso ao recurso de qualidade (Shatat; Worall; Riffat, 2013).

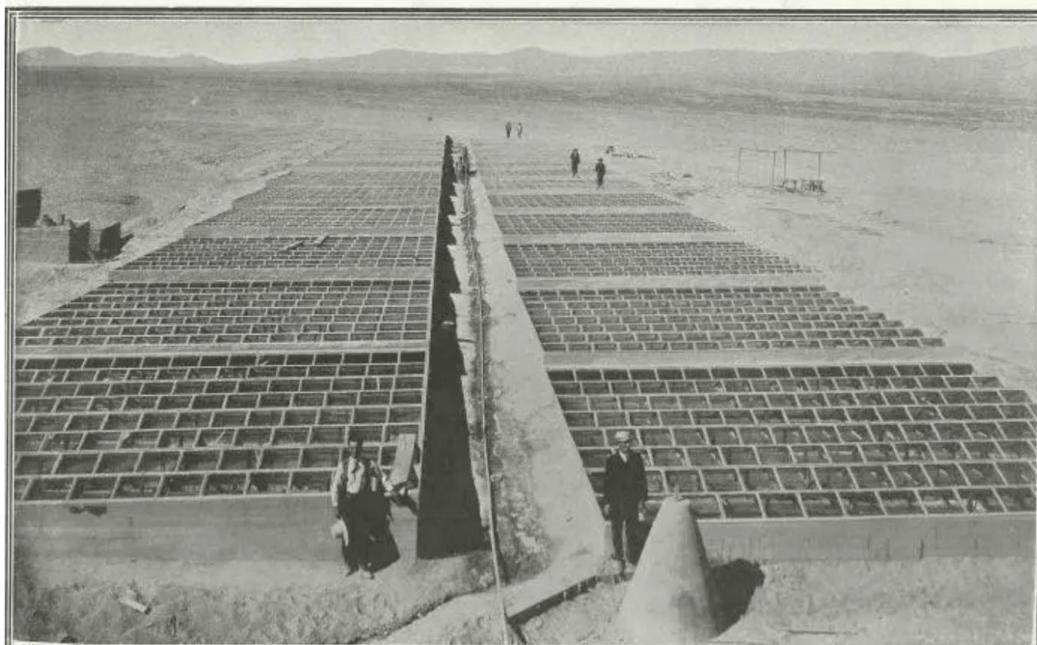
Os dessalinizadores solares são equipamentos térmicos que utilizam a radiação solar como fonte de energia. A radiação solar aquece a superfície do reservatório (bandeja), assim como a lâmina d'água salobra, então, há o aumento na taxa de evaporação e, posteriormente, a água evaporada condensa na cobertura do equipamento (tampa). A água que condensou na cobertura (tampa) escorre por gravidade para pequenas canaletas que direcionam o fluxo à um reservatório/coletor. Nesse reservatório/coletor, pode-se afirmar que a água que antes era salobra, já está purificada (Kaushal; Varum, 2010).

A literatura científica sobre processos de dessalinização é bastante vasta e difundida pelo mundo. Nair e Kumar (2013) apontam três relatos do uso da dessalinização, as quais são: o navegador e explorador francês Jean de Lary que utilizou a água do mar dessalinizada em uma viagem ao Brasil em 1565; Sir Frances Bacon que sugeriu o uso de filtros de areia para dessalinizar a água salobra, e no século XX o aumento do uso de dessalinizadores, por membrana, no pós-segunda guerra mundial pelos países que mantinham tropas em regiões áridas, como Iraque, Afeganistão e Arábia Saudita.

Campos *et al.* (2019) relatam o uso da dessalinização por vários povos, especificam o trabalho do químico Lavoisier, que concentrava energia solar em garrafas de destilação utilizando lentes de vidro em 1862, e, também o uso da

dessalinização solar na cidade de *Las Salinas*, em 1872, para atender à demanda de água potável de mineiros da região. A Figura 02 apresenta a situação.

Figura 2 - Planta de destilação solar em Las Salinas no deserto do Atacama em 1872



Fonte: Acervo *on line* do Museu de Antofagasta, 2023

Para Dawoud (2011) a dessalinização tornou-se um grande mercado a partir dos anos 80 com o surgimento de tecnologias de troca de calor mais eficientes, as quais permitiram aumentar a dessalinização a nível industrial, e assim atender uma demanda crescente por água tratada.

Entre os processos de dessalinização, a destilação solar se destaca como a tecnologia de dessalinização mais simples e mais barata, devido principalmente ao fato de ser utilizada uma energia renovável, gratuita e de grande potencial no Semiárido Brasileiro, a energia solar (Dal Bianco; Schwambach, 2013; Shatat; Worall; Riffat, 2013).

No processo de dessalinização solar, basicamente, a energia solar promove a evaporação da água e a subsequente condensação: a água a dessalinizar encontra-se em tanques cobertos por vidro ou outro tipo de material transparente, a radiação passa através da superfície e é aprisionada (efeito de estufa), o que irá promover o aumento da temperatura da água e a consequente evaporação; a acumulação de

vapor no interior irá condensar e a água escoar através de pontos de recolha; ocorrendo assim, uma separação da água, dos sais minerais e impurezas, transformando-a em água potável (Shatat; Worall; Riffat, 2013).

Para Shahzad *et al.* (2017) o processo térmico de dessalinização solar corresponde ao processo natural do ciclo da água, ou seja, a água salgada aquece, evapora, condensa e precipita sob a forma de água potável. Ainda segundo os autores, para que ocorra a evaporação da água, é necessário atingir-se temperatura adequada em relação à temperatura ambiental, dado que o dessalinizador receber energia, acumula essa energia na forma de calor e precisa trocar calor com o ambiente. Então, o dessalinizador em operação sempre terá uma temperatura mais elevada do que a do ambiente.

Na Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), o Grupo de Pesquisa em Tratamentos Avançados de Água (GRUTAA), o qual esta tese é vinculada, possui uma vertente que desenvolve trabalhos na área de dessalinização solar. O GRUTAA já projetou, construiu e patenteou alguns equipamentos, contudo, ainda sim, a área de dessalinização solar necessita de novos estudos para tornar essa tecnologia mais eficiente no volume de produção de água.

Para Singh *et al.* (2019) e Velmurugan *et al.* (2008), esforços científicos têm sido feitos a fim de melhorar a produtividade, seja buscando melhorias no desenho do dessalinizador ou empregando materiais com propriedades radiantes mais adequadas na composição da placa absorvedora, ou ainda, melhorando as propriedades térmicas e ópticas da salmoura a partir do desenvolvimento de nanofluidos. Conforme os autores, a otimização dos dessalinizadores solares passa, inevitavelmente, por três aspectos extremamente importantes, sendo-os: custo, desempenho e segurança.

Então, pesquisas na área de dessalinização solar buscam ampliar a produtividade dos equipamentos, seja aumentando a quantidade de energia absorvida e diminuindo as perdas dessa energia (sistemas de reaproveitamento de calor), ou fornecer energia extra de fonte externa ao dessalinizador, a exemplo dos tubos evacuados e sistemas de coletores solares, para aumentar a eficiência, e, conseqüentemente, a produtividade.

2.3 Fatores que interferem na dessalinização solar

Além dos fatores relacionados com os materiais de construção e desenho do dessalinizador solar, existem outros fatores, como apontam Abujazar *et al.* (2016) na sua pesquisa de revisão bibliográfica. Os autores elencam 5 (cinco) fatores ambientais, 3 (três) fatores relacionados aos parâmetros de operação e mais 3 fatores associados aos modelos matemáticos propostos para o projeto.

Sobre os fatores ambientais, especificamente os fatores meteorológicos, a intensidade da radiação solar que incide sob um dessalinizador é primordial para determinar sua produtividade (Sampathkumar *et al.*, 2010; Muftah *et al.*, 2014). Portanto, regiões do planeta em que as taxas de incidência solar são elevadas, possuem alto potencial do uso da energia solar para a dessalinização.

Então, como a irradiância solar varia de acordo com o ângulo de incidência dos raios solares (ângulo zenital), tem-se que os locais com o menor valor do ângulo zenital recebem mais radiação solar. Esses locais apresentam baixas latitudes e quanto mais próximo ao local estiver da linha do equador, mais incidência solar irá receber (Mousazadeh *et al.*, 2009; Muftah *et al.*, 2014).

Outro fator é a temperatura ambiente que, conforme Al-Hinai, Al-Nassri e Jubran (2002), quanto mais elevada for a temperatura ambiente, maior será a produtividade do dessalinizador solar. Muftah *et al.* (2014) ainda destaca a umidade relativa, velocidade do vento e as nuvens e outras formas de cobertura da atmosfera (areia, poeira) que podem interferir no desempenho de um dessalinizador solar.

Abujazar *et al.* (2016) comenta que os modelos matemáticos, sejam de transferência de calor por convecção, por condução e evaporativo, que são utilizados para simular e prever as taxas de transferência de calor nos dessalinizadores, também são importantes e contribuem para entender os fenômenos termodinâmicos e estimar parâmetros construtivos e de funcionamento desses equipamentos. O Quadro 1 resume os parâmetros que interferem no desempenho de um dessalinizador solar conforme Abujazar *et al.* (2016).

Quadro 1 - Parâmetros que interferem na dessalinização solar

Fatores	Agentes	Resumo
Ambientais	Radiação solar	Utilização de equipamentos e materiais de construção que consigam absorver mais radiação solar
	Temperatura ambiente	Busca por regiões que ofereçam uma alta temperatura
	Umidade relativa	Influência na evaporação
	Velocidade do vento	Poderá aumentar as perdas de calor para o meio
	Nuvem e cobertura da radiação (areia, poeira)	Manutenção e limpeza do equipamento
Parâmetros operacionais	Alimentação da água no equipamento	Definição da forma de alimentação do equipamento (alimentação estática ou dinâmica).
	Posição em relação a incidência solar	Orientação da posição do dessalinizador em relação ao menor ângulo zenital possível.
	Manutenção do equipamento	Definição do ciclo de limpeza e remoção de materiais que possam acumular e prejudicar o desempenho do equipamento.

Fonte: Adaptado de Abujazar *et al.* (2016)

2.4 Componentes básicos de um dessalinizador solar

Baseando-se no trabalho de Kumar *et al.* (2015), pode-se entender que os dessalinizadores solares, por ter um funcionamento simples e utilizarem os princípios da termodinâmica da transferência de calor, tendo a radiação solar como uma fonte sustentável de energia, são máquinas térmicas eficientes, pois para purificar a água não necessita que ela atinja seu ponto de ebulição, assim economizando energia. Então, conforme Kaushal, Kaushal e Varum (2010) e Arunkumar *et al.* (2019), os componentes básicos de funcionamento de um dessalinizador solar são:

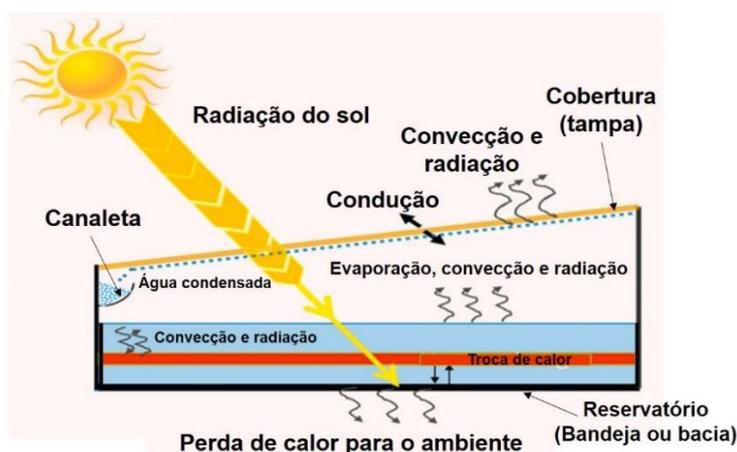
- Reservatório (bandeja ou bacia): esta componente é responsável pelo armazenamento da lâmina d'água salobra, sua superfície recebe uma cobertura que facilita a absorção da radiação solar, podendo ser uma superfície enegrecida como uma tinta especial na cor preta ou outro material absorvente de calor, como por exemplo o basalto. A altura da lâmina d'água é variável conforme o projeto do equipamento, sendo este, um parâmetro que influencia na produtividade. Para Tiwari e Tiwari (2007) a altura da lâmina d'água é inversamente proporcional à produtividade em um dessalinizador solar convencional.
- Cobertura (tampa): É a superfície que permite a entrada da radiação solar, corrobora com o aprisionamento do calor ("um pequeno efeito estufa"), minimiza as perdas térmicas e é o local onde a água condensa dentro do equipamento. A

geometria, as propriedades físicas e químicas do material de cobertura, são parâmetros que influenciam também na produtividade do dessalinizador. Geralmente, o vidro e o acrílico são os materiais mais utilizados para a construção da cobertura, em que, a espessura, a composição e a condutividade térmica desses materiais influenciam diretamente na produção de água purificada. Para Ghoneyem e Ileri (1997) as propriedades ópticas do vidro dependem da porcentagem de óxido de ferro (Fe_2O_3) na composição do material, em que um vidro com baixo teor de (Fe_2O_3) torna-se mais eficiente no incremento da produção de um dessalinizador solar. Os autores afirmam que quanto menor a temperatura da cobertura do dessalinizador solar em relação à temperatura do reservatório (bacia), maior a produtividade do equipamento, pois o aumento do gradiente de temperatura da cobertura e do reservatório provoca o acréscimo das taxas de transferência de calor (por convecção e por evaporação).

- Canaletas: ou também chamada de calhas, são responsáveis por recolher a água que condensou na parte interna da cobertura (tampa) do dessalinizador solar. Geralmente são instaladas nos dessalinizadores de forma que a água seja recolhida por gravidade até o reservatório de água purificada.

A Figura 03 apresenta a configuração básica de um dessalinizador solar.

Figura 3 - Esquema básico de um dessalinizador solar



Fonte: adaptado de Iqbal *et al.* (2021)

2.5 Classificação dos projetos de dessalinizadores solares

Além dos componentes básicos dos dessalinizadores solares, esses equipamentos poderão apresentar outras variações. Na literatura específica é possível encontrar o emprego de outras tecnologias concomitantes ao dessalinizador

convencional, assim como, o emprego de diversos materiais de construção (madeira, alumínio, minerais etc.).

São diversos os modelos de dessalinizadores solares, no trabalho de Kumar *et al.* (2015) foram levantados dados sobre os vários tipos de sistemas de dessalinização. Os autores separaram os dessalinizadores em 3 grandes categorias, sendo-as: processos térmicos; uso de membranas e sistemas que utilizam energias renováveis. Este último, é a classe a qual os autores classificaram os dessalinizadores solares.

Já nos trabalhos de Arunkumar *et al.* (2019) e Singh *et al.* (2019), a classificação dos dessalinizadores solares acontece por meio do tipo de sistema de captação de energia, ou pela produtividade, ou ainda pelo *design* e parâmetros de operação dos equipamentos.

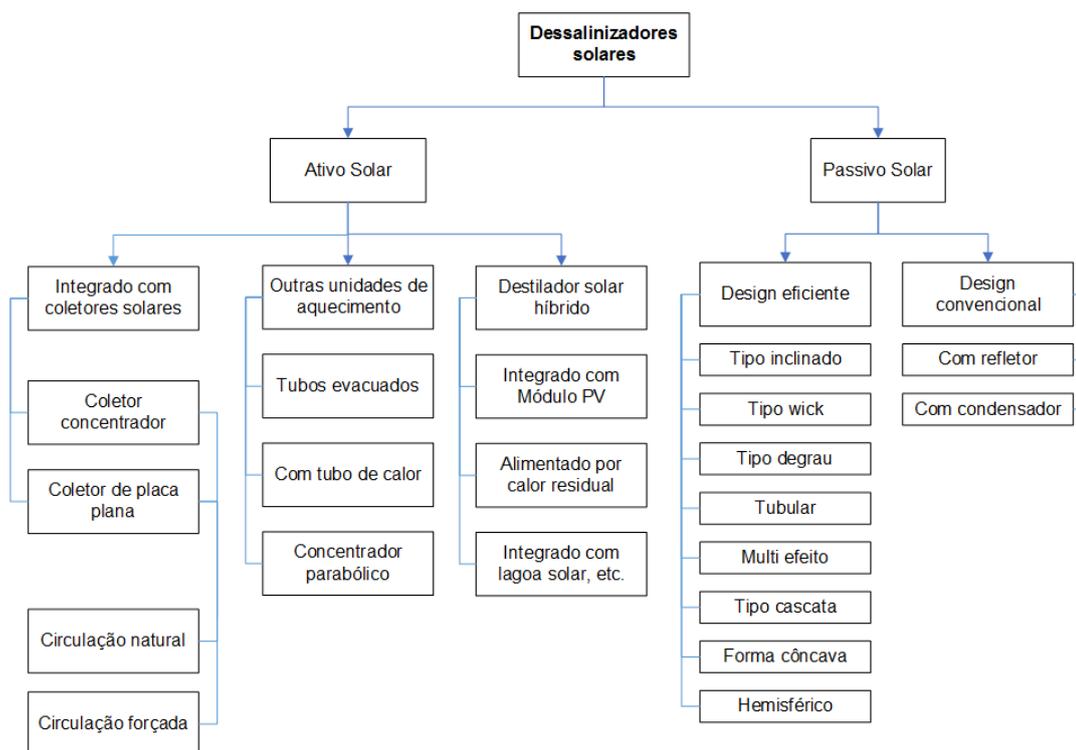
2.5.1 Dessalinizador solar ativo e dessalinizador solar passivo

Os sistemas de dessalinização solar podem ser classificados com relação ao tipo de energia aplicada no reservatório (bandeja) de água, sendo divididos em sistemas passivos e sistemas ativos (Kumar *et al.*, 2015; Kabeel *et al.*, 2020).

Os dois sistemas diferenciam-se à medida que para um sistema ser considerado ativo, deve haver a introdução de uma fonte de energia térmica externa no mesmo, especificamente no reservatório de água, por meio de um coletor ou concentrador solar, por exemplo, para auxiliar na adição de calor e assim obter uma evaporação mais acelerada (Tiwari; Dimri; Chel, 2009; Kabeel *et al.*, 2020). Quando não há uso de nenhum modo de energia extra, ou seja, o uso apenas da energia solar que cai no reservatório (bacia), o dessalinizador é classificado como passivo (Kabeel *et al.*, 2020).

Ao comparar os dois tipos de sistemas, a solução mais economicamente recomendada é o dessalinizador solar passivo, uma vez que o dessalinizador ativo requer alto custo de operação e manutenção e também um alto custo de investimento inicial (Tiwari; Tiwari, 2007; Kabeel *et al.*, 2020). No entanto, a desvantagem do dessalinizador passivo com relação ao ativo, é uma menor produtividade, como constataram Tiwari, Dimiri e Chel (2009), em seu estudo. A Figura 04 apresenta a classificação dos dessalinizadores solares.

Figura 4 - Classificação dos sistemas de dessalinização solar



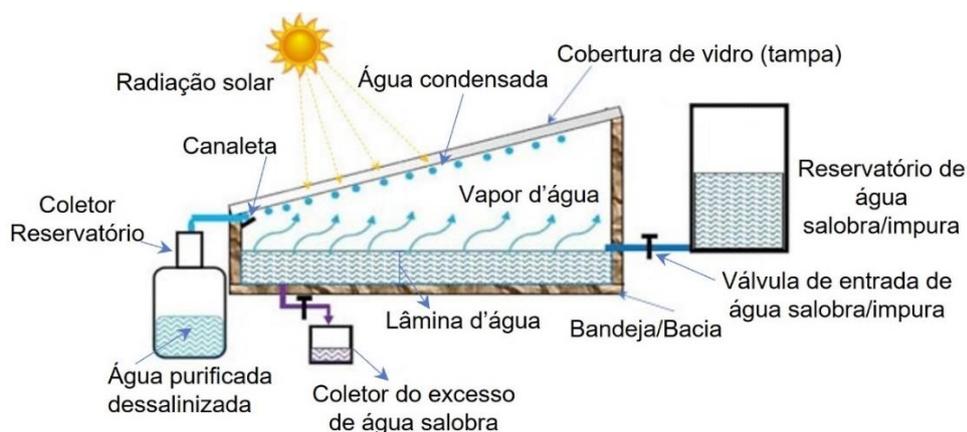
Fonte: Adaptado de Manchanda e Kumar (2015)

Kabeel *et al.* (2020) sugerem que combinações de sistemas de dessalinização solar ativa e passiva poderão ser realizadas para potencializar a produtividade dos equipamentos.

2.5.2 Dessalinizador solar com uma única inclinação

Também chamado de dessalinizador solar convencional, o dessalinizador solar passivo com uma única inclinação, do inglês *Single Slop Solar Still* (SSSS), pode ser utilizado para dessalinizar água em pequenos volumes, pois, apresenta baixa eficiência, apesar de que seu custo é relativamente baixo. O funcionamento é simples, e consiste basicamente na captura do vapor de água condensado, aquecido pela radiação solar dentro do equipamento, por uma superfície fria (tampa de vidro). Então, pela única inclinação, o vapor condensado flui da maior cota (altura) para o lado com a menor cota, por meio de canaletas até o reservatório de água dessalinizada (Badran; Abu-Khader, 2007). A Figura 5 apresenta um modelo genérico para a esquematização de um SSSS.

Figura 5 - Esquemática de um dessalinizador solar de inclinação única



Fonte: Adaptado de Sharshir *et al.* (2016)

2.5.3 Dessalinizador solar de dupla inclinação

O destilador solar de inclinação dupla, do inglês “*double slope solar still* (DSSS)”, da mesma forma que o dessalinizador solar de inclinação única (SSSS), trata-se de uma tecnologia simples e econômica, que atua absorvendo a radiação solar por meio de uma tampa transparente, geralmente de vidro, que é então transmitida para a água (Akash *et al.*, 1998; Castillo-Téllez, 2015). Na Figura 6 é possível observar um exemplo de um dessalinizador solar de inclinação dupla (DSSS).

Figura 6 - Visão de um destilador solar de inclinação dupla



Fonte: Morad, El-Maghawry e Wasfy (2015)

Os estudos dos processos de evaporação e condensação, tanto do SSSS quanto do DSSS são complexos devido à variação dos parâmetros ambientais e das propriedades dos materiais (Castillo-Téllez, 2015), no entanto a produção diária de

um DSSS é muito maior do que um SSSS, considerando parâmetros meteorológicos idênticos (Dutt *et al.*, 1989).

Um dessalinizador do tipo DSSS é recomendado para locais de baixa latitude, pois, os dois lados da cobertura estarão sob a exposição da radiação solar, caso contrário, somente um lado receberá a radiação (Murugavel; Chockalingam; Srithar, 2008).

A análise da eficiência de um dessalinizador solar envolve propriedades do material e parâmetros geométricos, desse modo, a capacidade de produção de água purificada em um DSSS pode ser melhorada se seus parâmetros operacionais forem otimizados e principalmente, quando a capacidade de absorção da radiação solar aumenta, desse modo, são diversos os estudos acerca da influência do ângulo de inclinação da cobertura nesse tipo de dessalinizador, abordados na literatura (Al-Garni *et al.*, 2011; Castillo-Téllez, 2015; El-Maghlany, 2015; Altarawneh *et al.*, 2017; Murugavel *et al.*, 2010).

De acordo com Murugavel *et al.* (2010), para o cálculo da energia disponível na bacia, devem ser consideradas a energia de radiação recebida nas coberturas de vidro inclinadas e as variações de transmitância das coberturas de vidro.

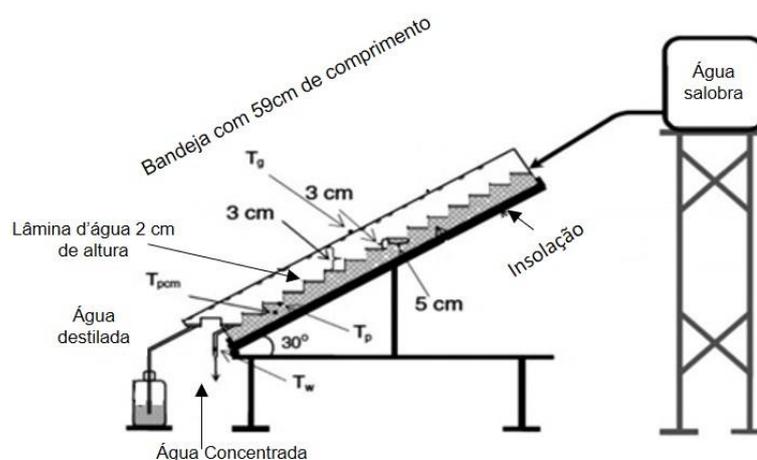
Além disso, em busca do aumento da produtividade dos dessalinizadores solares de dupla inclinação, diferentes estudos também têm sido realizados com relação ao uso de materiais absorventes (Akash; Mohsen; Nayfeh, 2000; Murugavel *et al.*, 2010; Srithar, 2011; Murugavel; Pal *et al.*, 2017; Gnanaraj; Velmurugan, 2019), quanto ao uso de nanopartículas na água da bacia (Sahota; Tiwari, 2016a; Sahota; Tiwari, 2016b), bem como, com relação ao uso de aquecedor de água (Al-Garni, 2012; Bait; Si-Ameur; Benmoussa, 2015), entre outros.

2.5.4 Dessalinizador solar do tipo degrau (cascata)

Também chamado de dessalinizador solar escalonado, um dessalinizador solar do tipo degrau, do inglês “*stepped solar still*”, conforme Alaudeen *et al.* (2014), é um dessalinizador solar que o formato do reservatório da água salobra (bandeja) possui o formato de um degrau (semelhante a uma escada), pode utilizar vários estágios, e existe uma pequena inclinação entre a base do degrau e o suporte.

Essa inclinação garante um mínimo de fluxo d'água para que aumente a absorção e a evaporação da lâmina d'água dentro do equipamento. A Figura 7 apresenta o equipamento com inclinação de 30° (graus) da base em relação ao solo, em que, cada degrau possui o comprimento de 5 cm (extensão da lâmina d'água) com a altura de 3 cm (profundidade da lâmina d'água). O material absorvedor reveste o toda a extensão do reservatório de água salobra (bacia) e a coleta do destilado é realizada por uma calha até o reservatório de água purificada.

Figura 7 - Esquematização de um dessalinizador solar do tipo degrau



Fonte: Arunkumar *et al.* (2019)

Para Arunkumar *et al.* (2019), esse modelo de dessalinizador solar é mais produtivo do que o modelo convencional, pois, é capaz de aumentar a evaporação e a condensação na cobertura do equipamento.

2.5.5 Dessalinizador com pirâmide solar

Dessalinizador com pirâmide solar, do inglês “*pyramid solar still (PSS)*”, ou dessalinizador solar em formato de pirâmide, que segundo Singh *et al.* (2019), são mais eficientes se comparado ao dessalinizador solar convencional (SSSS), e seu funcionamento segue o mesmo princípio. A diferença está na cobertura de vidro da tampa, que neste caso, possui formato piramidal.

Para Nayi e Modi (2018), os dessalinizadores do tipo PSS podem assumir dois principais tipos de cobertura, sendo-as: os de pirâmide solar triangular (Figura 8 a) e os de pirâmide solar quadrada (Figura 8 b). Os autores complementam que as principais vantagens dos dessalinizadores com pirâmide solar em relação aos

dessalinizadores convencionais são: independem da posição da inclinação da tampa do equipamento ser voltada para sol; o sombreamento da parede lateral do equipamento na superfície da água é menor; e a área de condensação do vapor de água na tampa do equipamento é maior, conseqüentemente, aumentando a produtividade.

Figura 8 - Dessalinizadores solar do tipo pirâmide



Fonte: Adaptado de Nayi e Modi (2018)

Legenda: a - dessalinizador com pirâmide solar quadrada; b - dessalinizador com pirâmide solar triangular

2.5.6 Dessalinizador solar do tipo tubular

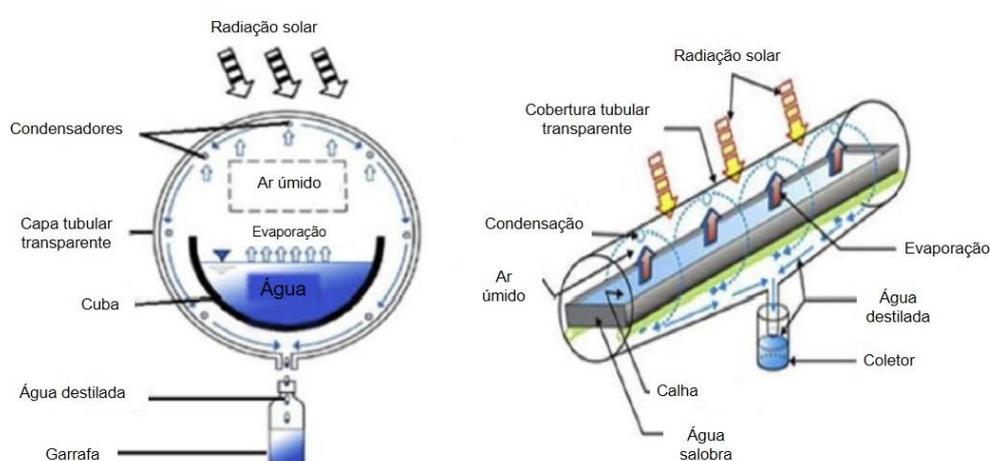
O dessalinizador solar do tipo tubular, do inglês *Tubular Solar Stills* (TSS), apresenta seu desenho obedecendo uma geometria de um cilindro reto. Para Kabeel *et al.* (2020), esse modelo de dessalinizador, geralmente é construído com materiais de baixo custo e que possam ser adquiridos facilmente no mercado local, podendo também ser construído utilizando materiais reaproveitáveis.

Ainda na perspectiva de Kabeel *et al.* (2020), os dessalinizadores solares tubulares consistem, principalmente, de tubos cilíndricos transparentes, na posição vertical ou horizontal, em que, o reservatório de água é um absorvedor retangular, que é instalado no centro do tubo. Nesse modelo de equipamento, a intensidade solar é transmitida por meio de uma tampa tubular transparente que atingi o absorvedor,

aquecendo a água. Tanto a cobertura tubular quanto a calha absorvem o restante da incidência solar.

O dessalinizador solar do tipo tubular, segundo Singh *et al.* (2019), é mais eficiente do que um dessalinizador solar convencional, pois possui uma área de superfície evaporativa maior, assim, aumentando o rendimento. A Figura 9 apresenta a esquematização de um dessalinizador do tipo TSS horizontal.

Figura 9 - Esquematização de um de dessalinizador solar tubular



Fonte: Adaptado de Kabeel *et al.* (2020)

2.5.7 Dessalinizador solar hemisférico

Dessalinizador solar hemisférico, do inglês *Hemispherical Solar Still* (HSS), é um equipamento que o desenho do reservatório (bacia) assim como da cobertura (tampa) é esférico, podendo a cobertura variar entre distintos formatos semiesféricos côncavos ou convexos (Basel, 2009).

Para Arunkumar *et al.* (2012), o formato (hemisférico/esférico) possibilita aumentar a quantidade de energia solar coletada pelo equipamento, assim como, facilita a operação, uma vez que não necessariamente precisará de correções na posição (direcionar o equipamento ao sol). Na Figura 10 o dessalinizador é do tipo HSS com o reservatório de água salobra (bacia) cônica.

Figura 10 - Visão de um dessalinizador solar hemisférico

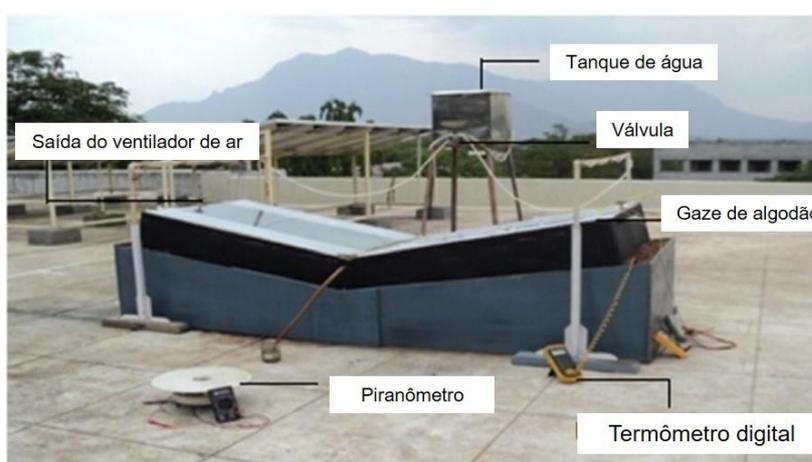


Fonte: Adaptado de Ismail (2009) e Arunkumar *et al.* (2012)

2.5.8 Dessalinizador solar com cobertura em “V”

O dessalinizador solar com cobertura em “V” é semelhante a um equipamento com dupla inclinação, porém, com os vértices voltados para o interior do dessalinizador (invertidos). Os ângulos da cobertura são projetados levando-se em consideração a latitude do local de instalação do equipamento. Sua produtividade é relativamente baixa e se assemelha a um destilador solar de inclinação dupla invertida. A Figura 11 aborda um dessalinizador solar com cobertura em “V” e com uso de gazes de algodão.

Figura 11 - Visão de um dessalinizador solar com cobertura em “V”



Fonte: Suneesh *et al.* (2014)

2.6 Comparação entre sistemas de dessalinização solar

Como já mencionado em outras partes deste trabalho, existem diversos tipos de dessalinizadores solares. Cada modelo é adequado para uma condição ambiental, econômica e social distinta. No trabalho de Panchal *et al.* (2021), os autores estudaram os benefícios da lagoa solar na contribuição dos dessalinizadores solares. Já no trabalho de Kumar *et al.* (2015), nota-se que os dessalinizadores solares ativos produzem mais destilado do que os sistemas passivos, porém existem também uma tendência do custo do equipamento ativo ser maior em relação ao equipamento passivo.

No trabalho de Zoori *et al.* (2013), os autores encontram que utilizar placas absorvedoras de calor em conjunto com um dessalinizador, deixa-o mais produtivo. Já no trabalho de Katekar e Deshmukh (2020) enfatiza que existem diferentes potenciais de aplicação dos variados tipos de dessalinizadores solares. Os autores listam 46 tipos de dessalinizadores solares, os quais são os pontos de convergência da classe científica sobre os modelos de dessalinizadores.

Então, uma simples comparação entre os diferentes tipos de dessalinizadores solares não consegue representar o conjunto de variáveis que os equipamentos abarcam, pois um tipo de dessalinizador poderá ser muito produtivo, mas de custo alto e de difícil adaptação tecnológica (população local não conseguirá operar o dessalinizador). Ou, ser muito produtivo, porém de materiais de difícil aquisição local, como os equipamentos que utilizam materiais de mudança de fase, ou lentes de Fresnel.

Portanto, a utilização de um tipo de dessalinizador solar irá depender de muitos fatores que, os quais, ponderadamente, devem ser analisados para determinar o custo-benefício da tecnologia.

2.7 Tecnologias para aumentar a produtividade

Além dos componentes básicos de um dessalinizador solar, do desenho (geometria) e da composição dos materiais de construção, os dessalinizadores solares podem ter sua produtividade aumentada pela aplicação de tecnologias que absorvam e concentrem o calor da radiação solar (Kabeel *et al.*, 2020). Essas tecnologias almejam potencializar a evaporação e a condensação dentro do equipamento, assim como, minimizar as perdas de calor para o meio.

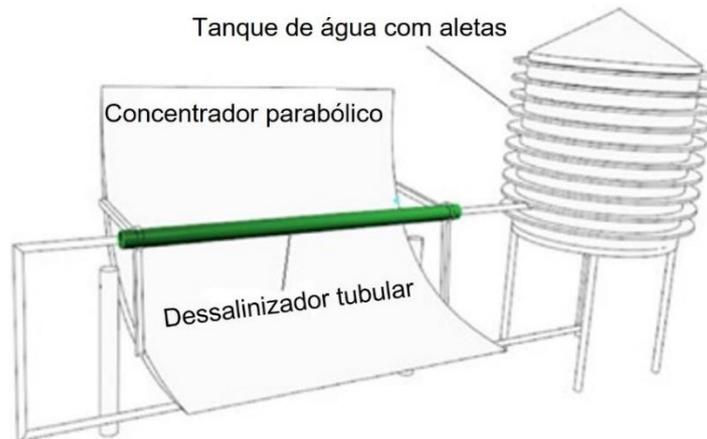
É comum o uso de concentradores e coletores solares, como também, outras formas de fornecimento de energia extra para o sistema. Bombas de calor, tubos evacuados e refletores solares podem ser associados com diferentes tipos de dessalinizadores solares.

Para Farid *et al.* (2014), materiais e métodos que consigam armazenar o calor latente, podem ser empregados para aumentar a produção de água purificada de um dessalinizador solar. Os autores recomendam a utilização de materiais de mudança de fase, "*Phase Change Materials (PCMs)*", para elevar as taxas de transferência de calor. Na perspectiva de Arunkumar *et al.* (2019), o emprego de PCMs nos dessalinizadores solares podem garantir a produção até mesmo durante o período noturno, uma vez que, esses materiais possuem grande capacidade de acumular calor.

Omara, Kabeel e Essa (2015) utilizaram nanofluidos (nanopartículas de óxido de alumínio e óxido de cobre) dissolvidos na água salobra do reservatório (bacia) em um dessalinizador SSSS com acréscimo de um condensador extra. Os autores concluíram que a adição dessas nanopartículas, juntamente com o condensador, possibilitou um aumento de 255% na produtividade do equipamento em relação a um dessalinizador convencional.

Já o estudo de Al-Nimr e Dahdolan (2015), apresentou um dessalinizador solar tubular acoplado a um concentrador parabólico (Figura 12). O equipamento possuía um tanque com aletas para aquecer a água salobra antes de sua entrada no sistema. Além disso, utilizaram um sistema de evaporação por poros dentro do dessalinizador. O sistema apresentou uma eficiência de 17,1% a 23,3% maior do que um dessalinizador SSSS.

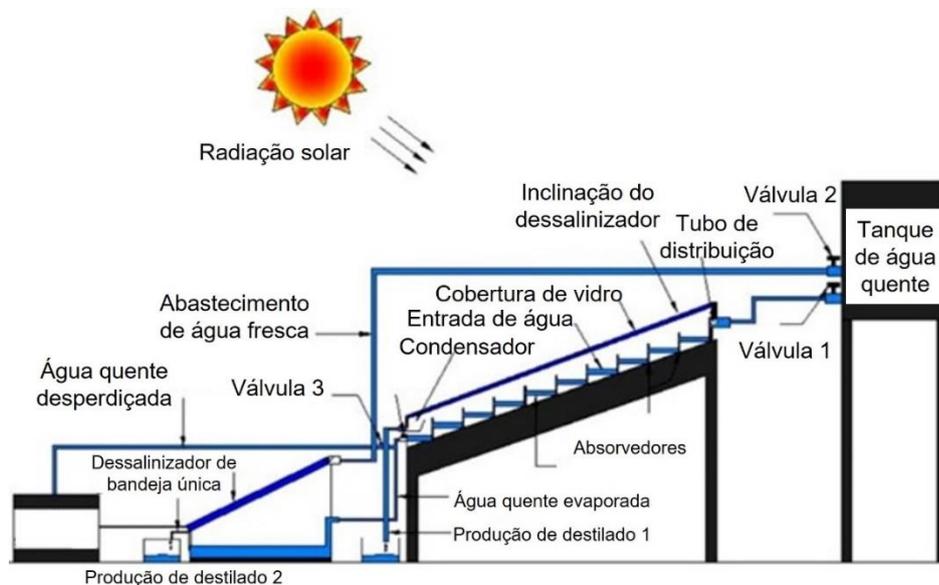
Figura 12 - Dessalinizador solar tubular acoplado a um concentrador parabólico



Fonte: Al-Nimr e Dahdolan (2015)

Na pesquisa de Hansen e Murugavel (2017) foi apresentado um equipamento híbrido, o qual combinou um dessalinizador convencional com um dessalinizador do tipo degrau (Figura 13). O sistema recebia água pré-aquecida e ainda utilizava placas absorvedoras em forma de aleta com pequenas ranhuras. Os autores objetivaram aumentar a produtividade do equipamento pela recuperação da energia térmica residual. As modificações possibilitaram um incremento de 75% em relação a um dessalinizador convencional.

Figura 13 - Esquematização de equipamento de dessalinização híbrido

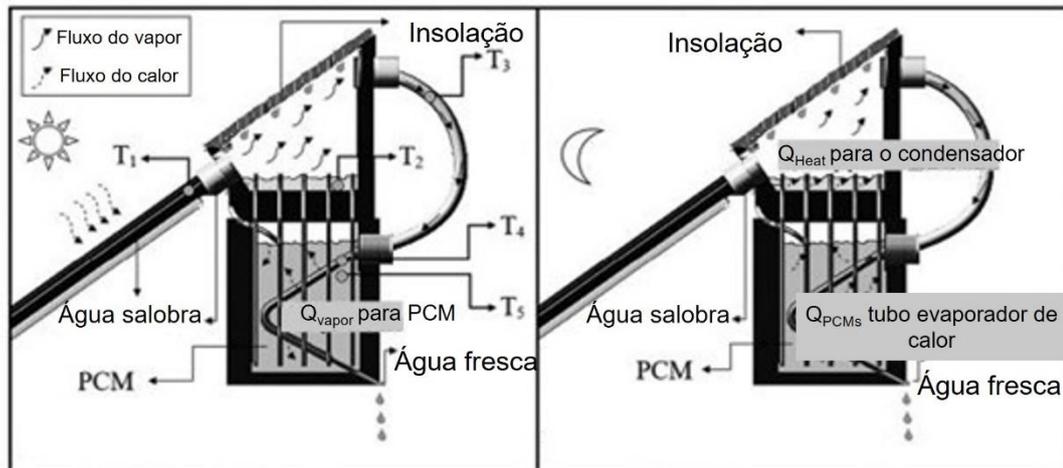


Fonte: Hansen e Murugavel (2017)

O projeto de Faegh e Shafii (2017) integrou um dessalinizador solar SSSS com tubos evacuados à um condensador externo contendo PCMs (Figura 14). O

equipamento foi capaz de produzir água dessalinizada até mesmo durante a noite, uma vez que, acumulava o calor latente e perdia menos energia para o meio ambiente. O rendimento foi cerca de 86% a mais do que um modelo convencional.

Figura 14 - Dessalinizador com tubos evacuados, condensador e PCM



Fonte: Faegh e Shafii (2017)

No estudo de Chen *et al.* (2017) foi apresentado um dessalinizador solar de inclinação única com três estágios integrado à tubos evacuados (Figura 15). Após a estabilização do sistema, os autores concluíram que o maior rendimento, para esta configuração, estava associado com uma lâmina d'água de 2 cm (centímetros) nos reservatórios de água salobra (bacia/bandeja), uma vez que, os estágios superiores eram aquecidos pelo calor dos estágios inferiores, assim, aumentando o rendimento.

Figura 15 - Dessalinizador de inclinação única com três estágios e evacuados

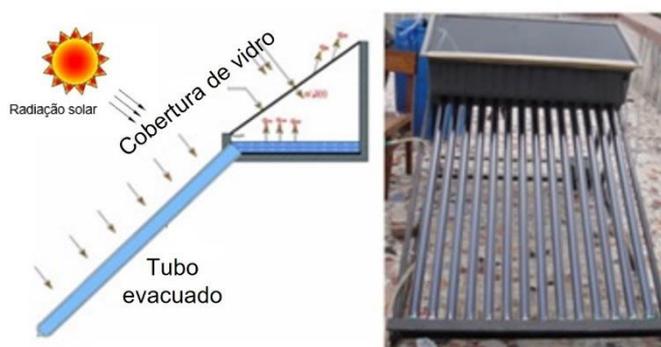


Fonte: Adaptado de Chen *et al.* (2017)

No protótipo de Panchal e Awasthi (2017) (Figura 16) foram utilizados tubos evacuados em um dessalinizador solar do tipo SSSS. Os autores estabeleceram uma

altura de 0,04 metros para a lâmina d'água no reservatório de água salobra (bacia) e repetiram o experimento durante seis meses. Eles concluíram que os tubos evacuados possibilitaram um incremento considerável na produção do destilado, na ordem de 140%, e mesmo durante a noite foi possível ter produção de água purificada.

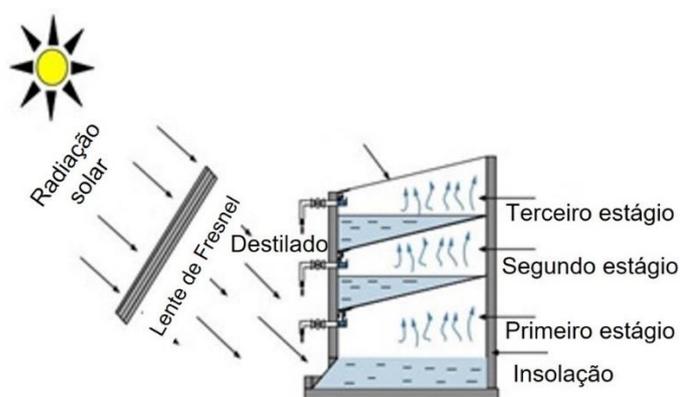
Figura 16 - Dessalinizador solar SSSS com tubos evacuados



Fonte: Adaptado de Panchal e Awasthi (2017)

No projeto proposto por Younas, Banat e Islam (2015) foi construído um dessalinizador solar de única inclinação com 3 estágios acoplado a uma lente de Fresnel (Figura 17). Apesar da produtividade encontrada ser maior do que um dessalinizador solar convencional, os custos do equipamento são elevados, dado que, a lente de Fresnel, acoplada e com a função de concentrar a radiação solar, elevava os custos do equipamento.

Figura 17 - Dessalinizador solar de única inclinação de três estágios acoplado a lente Fresnel



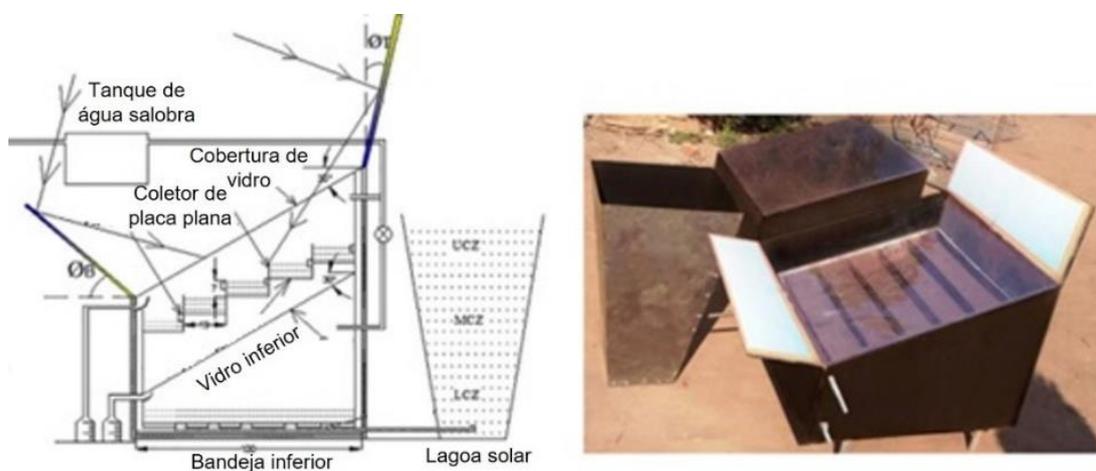
Fonte: Younas, Banat e Islam (2015)

Os dessalinizadores solares experimentais propostos por Gnanaraj, Ramachand e Christopher (2017) são inovações incrementais da junção de um SSSS

com dois reservatórios de água salobra. Os equipamentos apresentam o reservatório inferior na forma convencional, mas, o reservatório superior segue o modelo de um dessalinizador solar escalonado/por degrau.

Além disso, os equipamentos recebem energia solar extra por meio de refletores solares instalados nas bordas superior e inferior, em oposição ao ângulo da cobertura de uma única inclinação. Os autores concluíram que o uso das duas bandejas em um único equipamento pode aumentar a produtividade em mais de 30%. A Figura 18 apresenta a esquematização.

Figura 18 - Dessalinizador SSSS com dois reservatórios de água



Fonte: Adaptado de Gnanaraj, Ramachand e Christopher (2017)

São diversos os modelos de dessalinizadores solares encontrados na literatura como afirmam Arunkumar *et al.* (2019) e Singh *et al.* (2019). O campo de pesquisa sobre o emprego de tecnologias limpas para purificação de água é vasto e ainda está em desenvolvimento. Então, novas pesquisas com inovações incrementais ou radicais são comuns nessa área, sendo este, mais um motivo para a elaboração desta tese.

Na perspectiva de Katekar e Deshmukh (2020) existem projetos de dessalinizadores solares que são inovadores, pois utilizam design mais eficiente para o objetivo proposto. Então, os autores elaboraram um quadro com a classificação e comparação dos dessalinizadores solares ativos, passivos, design diferenciado e híbridos. Neste quadro é demonstrada a performance média desses modelos e para qual situação é indicado. O Quadro 2 apresenta a situação.

Quadro 2 - Comparação entre sistemas de dessalinização solar

Dessalinização solar			
Tipo de sistema	Tipo de equipamento	Melhor performance	Indicação
Sistemas passivos	Dessalinizador solar passivo de bandeja e inclinação única (convencional).	O maior aumento de produtividade de 638% (em relação ao dessalinizador convencional) foi registrado para o modelo que adicionou uma lente de Fresnel.	Aplicação doméstica em pequena escala. Fácil construção, de menor custo e pode ser modificado para receber outras tecnologias. Indica-se utilizar o dessalinizador solar convencional modificado em cascata (<i>Steps</i>).
	Dessalinizador solar passivo de bandeja única e múltipla inclinação.	O maior aprimoramento em produtividade foi encontrado como sendo de 171,43% (em relação ao dessalinizador convencional) para o equipamento que adicionou 3 tipos de acessórios, sendo-os: pávio de algodão corrugado com aletas de inclinação dupla integradas com refletor externo.	Para aplicação industrial, De construção mais complexa e produtividade maior do que um equipamento convencional, Este modelo é indicado para situações de demandas de água purificada superiores a quantidade mínima de uso doméstico. Indica-se o design tubular como mais eficiente.
Sistemas ativos	Dessalinizador solar ativo de bandeja e inclinação única (convencional).	A melhoria mais substancial em termos de produtividade foi de 307,54% (em relação ao dessalinizador convencional) registrada para o equipamento de sistema ativo, design cônico, única bandeja, com PCM e integrado com concentrador, o qual pré-aquece a água antes de entrar no aparelho).	Não há indicações exclusivas de aplicações. Portanto, pode-se utilizar em vários ambientes à critério dos projetistas.
	Dessalinizador solar ativo de bandeja única e múltipla inclinação.		
	Dessalinizador solar ativo de bandeja e inclinação múltipla.		
Design diferenciado	Dessalinizador solar com estufa	Dos dessalinizadores solares com design diferenciado, destaque-se o equipamento desenvolvido por Elashmawy (2017). O dessalinizador solar tubular possuía uma calha semicircular preenchida com um tecido preto e refletores solares. O equipamento atingiu 676% de produtividade em relação a um dessalinizador solar convencional.	Indicação para uso residencial, pois a tecnologia ainda está sendo aprimorada para a produção em larga escala.
	Dessalinizador solar tubular		
	Dessalinizador solar hemisférico		
	Dessalinizador solar esférico		
	Dessalinizador solar de bandeja cônica		
Híbridos	Dessalinizador solar híbrido de bandeja e inclinação única (convencional).	Dos sistemas híbridos, o dessalinizador solar desenvolvido por Al-Hamadani e Yaseen (2019) foi o mais produtivo, o qual alcançou 370% de performance em comparação a um sistema convencional.	Não há indicações exclusivas de aplicação.
	Dessalinizador solar híbrido de bandeja única e dupla inclinação.		

Fonte: Adaptado de Katekar e Deshmukh (2020)

2.8 Balanço energético em um dessalinizador solar

Compreender como acontecem os processos de transferência de energia térmica, em um dessalinizador solar, pode ajudar a tornar o equipamento mais eficiente, e, assim, mais produtivo. Dado que, por meio da modelagem dos processos térmicos, é possível teoricamente, antecipar e mensurar variáveis, como a temperatura da água na bandeja do equipamento, ou quantificar a energia que entra no sistema, por meio da radiação, e perda também por radiação, convecção e condução.

Para Dunkler (1961) existem diversos modelos que ajudam a descrever os processos de transferência de energia térmica em dessalinizadores solares, porém deve-se levar em conta a diversidade de equipamentos de dessalinização solar, uma vez que o balanço energético identifica as contribuições e as perdas de energia dentro do sistema.

Assim, um modelo genérico de balanço energético em um dessalinizador solar pode ser adaptado, desde que leve em consideração os ganhos e perdas de energia do sistema.

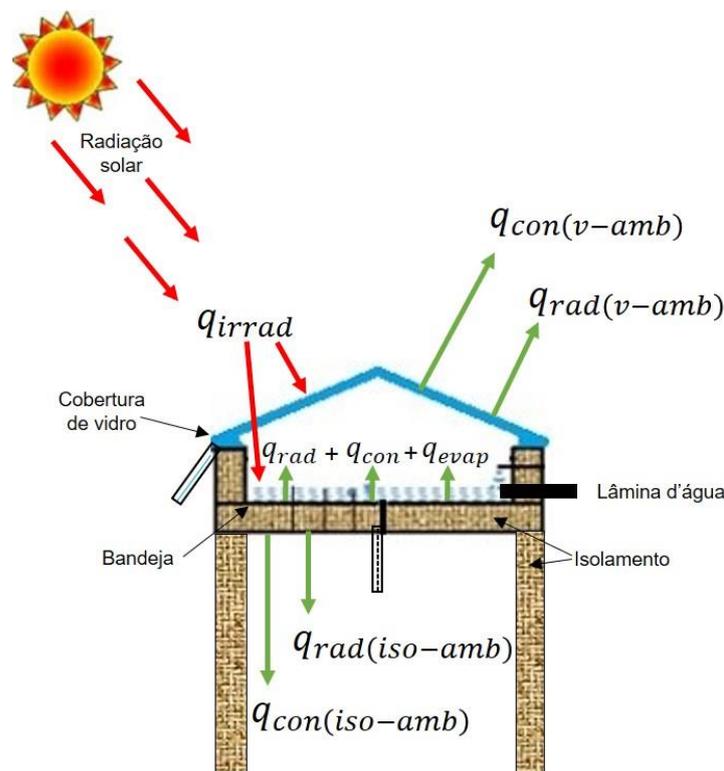
Dunkler (1961) também afirma que para a execução de um modelo de balanço energético em um dessalinizador solar ser realizado, precisam-se assumir as seguintes hipóteses:

- A temperatura de cada componente é uniforme;
- No início do processo todas as temperaturas de todos os componentes são iguais;
- A condensação ocorre somente na superfície de vidro;
- O equipamento está livre de vazamentos;
- O dessalinizador solar opera em regime transiente.

Somando a isso, os resultados numéricos são obtidos por meio de equações de balanço de energia para a cobertura de vidro, para a lâmina d'água, da bandeja, dos isolamentos térmicos do dessalinizador e de todos os componentes que fornecem ou retiram energia do equipamento.

Conforme Tiwari e Tiwari (2008) e Elango *et al.* (2015) e o processo de transferência de energia térmica em um dessalinizador solar pode ser classificado em processos de transferência de calor interno e externo, os quais se baseiam no fluxo de energia absorvida (irradiação) e energia perdida/emitida (radiação, convecção e condução) para fora do equipamento. A Figura 19 apresenta o modelo de balanço de fluxo de energia no dessalinizador objeto desta tese.

Figura 19 - Balanço de energia no dessalinizador solar



Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo a Figura 19 o fluxo de calor (q_{irrad}) representa a irradiação solar que transpassa a cobertura de vidro e incide sobre a lâmina d'água, na bandeja e paredes do equipamento. Já as variáveis (q_{rad} ; q_{con} e q_{evap}) correspondem aos fluxos de calor radiativo, convectivo e evaporativo, os quais representam a energia perdida para o ambiente, podendo a perda ser:

Do vidro para o ambiente: Fluxo de calor convectivo do vidro para o ambiente ($q_{con(v-amb)}$) e Fluxo de calor radiativo do vidro para o ambiente ($q_{rad(v-amb)}$);

Do isolamento para o ambiente: Fluxo de calor convectivo do isolamento para o ambiente ($q_{con(iso-amb)}$) e Fluxo de calor radiativo do isolamento para o ambiente ($q_{rad(iso-amb)}$).

Dessa forma, levando-se em conta os trabalhos de Dunkler (1961); El-Dessouky; Ettouney (2002); Incropera; Dewitt (2003); Tiwari; Tiwari (2008); Elango *et al.*, (2015), conforme a Equação 1, pode-se modelar o balanço energético global para o dessalinizador solar convencional proposto nesta tese.

$$m_a C_a \frac{dT}{dt} = I(t) \alpha_v A_v - \{h_{con(cober.vidro-amb)} A_v (T_v - T_{amb}) + h_{rad(cober.vidro-amb)} A_v (T_v - T_{amb}) + h_{con(iso-amb)} A_{iso} (T_{iso} - T_{amb}) + h_{rad(iso-amb)} A_{iso} (T_{iso} - T_{amb})\} \quad (1)$$

Em que:

m_a = Massa de água [Kg];

C_a = Calor específico da água [J.Kg⁻¹.K⁻¹];

$\frac{dT}{dt}$ = Gradiente da temperatura em relação ao tempo [K.s⁻¹];

$I(t)$ = Intensidade da radiação solar [W.m⁻²];

A_v = Área da cobertura de vidro [m²];

α_v = Absortividade do vidro;

T_{vi} = Temperatura interna da cobertura de vidro [K];

$h_{con(cober.vidro-amb)}$ = Coeficiente de transferência de calor convectivo da cobertura de vidro para o ambiente [W.m⁻².K⁻¹];

$h_{rad(cober.vidro-amb)}$ = Coeficiente de transferência de calor radiativo da cobertura de vidro para o ambiente [W.m⁻².K⁻¹];

$h_{con(iso-amb)}$ = Coeficiente de transferência de calor convectivo do isolamento para o ambiente [W.m⁻².K⁻¹];

A_{iso} = Área do isolamento [m²];

T_{iso} = Temperatura do isolamento [K];

$h_{rad (iso-amb)}$ = Coeficiente de transferência de calor radiativo do isolamento para o ambiente [$W.m^{-2}.K^{-1}$];

Já o balanço energético global para o dessalinizador solar modificado com tubos evacuados também pode ser aproximado conforme a Equação 1. Porém, o equipamento recebe mais uma fonte de energia, e, esta, contribui no balanço energético com as variáveis ($I(t)\alpha_{tubo}A_{tubo}$), que representam: $I(t)$ = Intensidade da radiação solar [$W.m^{-2}$]; α_{tubo} = Absortividade do tubo evacuado e a A_{tubo} = Área da tubo evacuado [m^2]. Então, de acordo com a Equação 2, tem-se:

$$m_a C_a \frac{dT}{dt} = I(t)\alpha_v A_v + I(t)\alpha_{tubo} A_{tubo} - \{h_{con(cober.vidro-amb)} A_v (T_v - T_{amb}) + h_{rad(cober.vidro-amb)} A_v (T_v - T_{amb}) + h_{con(iso-amb)} A_{iso} (T_{iso} - T_{amb}) + h_{rad(iso-amb)} A_{iso} (T_{iso} - T_{amb})\} \quad (2)$$

As Equações 1 e 2 são modelos gerais para o balanço energético dos dessalinizadores utilizados neste trabalho. Contudo, e conforme Tiwari e Tiwari (2008), os processos de transferência de calor em um dessalinizador solar podem ser divididos entre processos de transferência de calor internos e externos.

De acordo com Elango *et al.* (2015) os processos de transferência de calor internos são os responsáveis pela troca de calor entre a superfície da água e o interior da superfície da cobertura de vidro, sendo-os:

- Coeficiente interno de transferência de calor convectivo entre a superfície da água e a superfície da cobertura de vidro $h_{con(água-v)}$ [$W.m^{-2}.K^{-1}$] de acordo a Equação 3.

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

Onde:

T_a = Temperatura da água na bandeja do dessalinizador [$^{\circ}C$];

T_{vi} = Temperatura interna da cobertura de vidro [$^{\circ}C$];

P_a = Pressão parcial do vapor de saturação d'água [N.m^{-2}];

P_{vi} = Pressão parcial do vapor de saturação d'água na superfície interna do vidro de cobertura [N.m^{-2}];

Conforme Elango *et al.* (2015) e Lopes *et al.* (2021), a pressão parcial do vapor de saturação d'água (P_a) é o valor da pressão de saturação da água salobra, e, pode ser calculado por meio da Equação 4. Assim como, o valor para a pressão parcial do vapor de saturação d'água na superfície interna do vidro de cobertura (P_{vi}), na Equação 5 (Tiwari; Tiwari, 2008).

$$P_a = \exp\left(25,317 - \frac{5144}{T_a + 273}\right) \quad (4)$$

$$P_{vi} = \exp\left(25,317 - \frac{5144}{T_{vi} + 273}\right) \quad (5)$$

- Coeficiente interno de transferência de calor radiativo entre a superfície da água e a superfície da cobertura de vidro $h_{rad(\text{água}-v)}$ [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$] de acordo a Equação 6.

$$h_{rad(\text{água}-v)} = \epsilon_{eff} * \sigma [(T_a + 273)^2 + (T_{vi} + 273)^2] * (T_a + T_{vi} + 546) \quad (6)$$

Onde:

ϵ_{eff} = Emissividade efetiva;

σ = Constante de Stefan-Boltzmann [$5,67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$];

Já a Emissividade efetiva (ϵ_{eff}) pode ser calculada conforme a Equação 7.

$$\epsilon_{eff} = \left(\frac{1}{\epsilon_a} + \frac{1}{\epsilon_v} - 1\right)^{-1} \quad (7)$$

Dado que;

ϵ_a = Emissividade da superfície da água na bandeja do dessalinizador;

ϵ_v = Emissividade da parte interna da cobertura de vidro.

- Coeficiente interno de transferência de calor evaporativo entre a superfície da água e a superfície da cobertura de vidro $h_{evap(\text{água}-v)}$ [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$] de acordo a Equação 8.

$$h_{evap(\acute{a}gua-v)} = 0,01627 * h_{con(\acute{a}gua-v)} * \left[\frac{P_a - P_{vi}}{T_a - T_{vi}} \right] \quad (8)$$

Para Tiwari *et al.* (2007) e Gupta *et al.* (2013) faz parte dos coeficientes internos de transferência de calor, a transferência de energia que ocorre entre a bandeja do dessalinizador solar para a massa d'água, a qual ocupa a superfície de dessalinização. Então, define-se o $h_{con(bandeja-\acute{a}gua)}$ [W.m⁻².K⁻¹] como sendo o coeficiente interno de transferência de calor convectivo entre a bandeja do dessalinizador para a massa d'água, conforme mostra a Equação 9.

$$h_{con(bandeja-\acute{a}gua)} = \frac{K_{\acute{a}gua}}{X_{\acute{a}gua}} * Cn * \left(\frac{G_r}{P_r} \right)^n \quad (9)$$

Em que:

$K_{\acute{a}gua}$ = Condutividade térmica da água [W.m⁻¹.°C⁻¹];

$X_{\acute{a}gua}$ = Comprimento característico (razão entre o volume ocupado pela massa d'água e a área da superfície da bandeja) [m];

Cn = Constante de convecção natural [adota-se o valor de 0,54 conforme Gupta *et al.* (2013)];

G_r = Número de Grashof;

P_r = Número de Prandtl;

n = [expoente no valor de 1/4, conforme Gupta *et al.* (2013)].

O $h_{con(bandeja-\acute{a}gua)}$ quando o volume da massa d'água é pequeno pode ser desprezado. Por fim, e de acordo com Abu-Arabi *et al.* (2002) e Incropera; Dewitt (2003), pode-se calcular o coeficiente total interno de transferência de calor $h_{int-total}$ [W.m⁻².K⁻¹] por meio da Equação 10.

$$h_{int-total} = h_{con(\acute{a}gua-v)} + h_{rad(\acute{a}gua-v)} + h_{evap(\acute{a}gua-v)} + h_{con(bandeja-\acute{a}gua)} \quad (10)$$

Além dos processos internos de transferência de calor, pode-se elencar os processos externos, os quais são subdivididos em: processos de transferência de calor por perda superior e processos de transferência de calor por perda inferior e

pelas laterais (Kaushal; Varun, 2010); Elango; Gunasekaran; Sampathkumar, 2015; Bouzaid *et al.*, 2019). Então, entre os processos externos têm-se:

- Processos de transferência de calor por perda superior - a energia externa da cobertura de vidro é perdida para a atmosfera por convecção e radiação, então, pode estimar os dois coeficientes em:
 - Coeficiente externo de transferência de calor convectivo entre a cobertura de vidro e o ambiente $h_{con(cober.vidro-amb)}$ [$W.m^{-2}.K^{-1}$] de acordo com a Equação (11).

$$h_{con(cober.vidro-amb)} = 2,8 + (3,0 * v) \quad (11)$$

Em que:

v = Velocidade do vento [$m.s^{-1}$].

- Coeficiente externo de transferência de calor radiativo entre a cobertura de vidro e o ambiente $h_{rad(cober.vidro-amb)}$ [$W.m^{-2}.K^{-1}$] de acordo com a Equação (12).

$$h_{rad(cober.vidro-amb)} = \epsilon_v * \sigma \left[\frac{(T_{vi}+273)^4 - (T_{viz}+273)^4}{(T_{vi} - T_{atm})} \right] \quad (12)$$

Em que:

T_{atm} = Temperatura Atmosférica [K];

T_{viz} = Temperatura da vizinhança [K], onde $T_{viz} = T_{atm} - 6$.

Então, de acordo com a Equação 13, pode-se obter o coeficiente total externo de transferência de calor da cobertura de vidro para o ambiente $h_{ext-total-sup}$.

$$h_{ext-total-sup} = h_{con(cober.vidro-amb)} + h_{rad(cober.vidro-amb)} \quad (13)$$

Conforme Elango *et al.* (2015) o valor para o $h_{ext-total-sup}$ pode ser aproximado pela Equação 14.

$$h_{ext-total-sup} = 5,7 + (3,8 * v) \quad (14)$$

Em que:

v = Velocidade do vento [m.s⁻¹].

- Processos de transferência de calor por perda inferior e pelas laterais - a energia externa é perdida da água para a atmosfera, por meio, do revestimento e isolamento da bandeja. A perda pode ser (Tsilingiris, 2009):

- Perda de calor inferior entre a bandeja e o ambiente - Coeficientes externo de transferência de calor condutivo entre a bandeja e o ambiente $h_{cond(bandeja-amb)}$ [W.m⁻².K⁻¹] de acordo com a Equação 15.

$$h_{cond(bandeja-amb)} = \left[\frac{L_{ins}}{K_{ins}} + \frac{1}{h_{total(bandeja-amb)}} \right]^{-1} \quad (15)$$

Em que, o L_{ins} é a espessura do isolante [m] e o K_{ins} representa a condutividade térmica do material isolante [W.m⁻¹.K⁻¹]. Pode-se aproximar o valor do $h_{total(bandeja-amb)}$ de acordo com a Equação 16.

$$h_{total(bandeja-amb)} = 5,7 + (3,8 * v) \quad (16)$$

- Perda de calor inferior entre a massa d'água e o ambiente - Coeficiente externo de transferência de calor condutivo entre a massa d'água e o ambiente $h_{cond(massa.água-amb)}$ [W.m⁻².K⁻¹] de acordo com a Equação 17.

$$h_{cond(massa.água-amb)} = \frac{h_{con(bandeja-água)} * h_{total(bandeja-amb)}}{h_{con(bandeja-água)} + h_{total(bandeja-amb)}} \quad (17)$$

Onde $h_{con(bandeja-água)}$ é o coeficiente convectivo externo de transferência de calor entre a bandeja e a massa d'água [W.m⁻².K⁻¹].

Conforme Tiwari *et al.* (2007) e Gupta *et al.* (2013) é necessário realizar o balanço de energia no isolamento do dessalinizador solar. Então, têm-se:

- Coeficiente de transferência de calor radiativo entre o isolamento e o ambiente $h_{rad(iso-amb)}$ [W.m⁻².K⁻¹], dado pela Equação 18:

$$h_{rad(is-amb)} = \sigma \varepsilon_{iso} (T_{ext-iso}^2 + T_{amb}^2) * (T_e + T_{amb}) \quad (18)$$

Em que:

σ = Constante de Stefan-Boltzmann [5,67 x 10⁻⁸ W.m⁻².K⁻⁴];

ε_{iso} = Emissividade do isolamento;

$T_{ext-iso}$ = Temperatura externa do isolamento [K];

T_{amb} = Temperatura do ambiente [K];

- Coeficiente de transferência de calor convectivo entre o isolamento e o ambiente

$h_{con (iso-amb)}$ [W.m⁻².K⁻¹], dado pela Equação 19:

$$h_{con (iso-amb)} = 1,78 * (T_{ext-iso} + T_{amb})^{0,25} \quad (19)$$

2.9 Produtividade e eficiência em um dessalinizador solar

A produtividade de um dessalinizador solar [M_{prod}], conforme Tiwari, Dimri e Chel (2009), pode ser estimada utilizando o coeficiente de transferência de calor [$h_{evap(água-v)}$]; a área da bandeja do dessalinizador [A_b]; a área da cobertura de vidro [A_v]; o calor latente da evaporação da água [λ_a em (J.kg⁻¹)]; a temperatura da água na bandeja do dessalinizador [T_a] e a temperatura interna da cobertura de vidro [T_{vi}], como mostra a Equação 20.

$$M_{prod} = h_{evap(água-v)} * \left(\frac{A_v}{A_b}\right) * \left(\frac{T_a - T_{vi}}{\lambda_a}\right) * 3600 \quad (20)$$

A produtividade M_{prod} é expressa em [Kg.m⁻¹.dia⁻¹], e para calcular o calor latente da evaporação da água [λ_a em (J.kg⁻¹)] e a área da cobertura de vidro [A_v], Tiwari e Tiwari (2007) propuseram dois modelos, os quais são apresentados nas Equações 21 e 22 respectivamente.

$$\lambda_a = 3161500 - 2407,9 * (T_a + 273) \quad (21)$$

$$A_v = \left[\left(\frac{\tan \theta_1}{\sin \theta_2 + \cos \theta_2 * \tan \theta_1} \right) + \left(\frac{\tan \theta_2}{\sin \theta_1 + \cos \theta_1 * \tan \theta_2} \right) \right] * c * l \quad (22)$$

Em que:

θ_1 = Ângulo 1 de inclinação da cobertura do dessalinizador [°];

θ_2 = Ângulo 2 de inclinação da cobertura do dessalinizador [°];

c = Comprimento do vidro [m];

l = Largura do vidro [m].

Após a definição da produtividade, é possível também determinar a eficiência [η (%)] de um dessalinizador solar. Para El-dessouky e Ettouney (2002); Tiwari, Dimri e Chel (2009); Elango *et al.* (2015) e Lopes *et al.* (2021) é preciso primeiro conhecer o tipo de sistema do dessalinizador, se é um sistema passivo ou ativo. Pois, os modelos de cálculo da eficiência levam em consideração a quantidade de energia que entra no sistema, e, um equipamento de dessalinização solar ativo terá mais ganho de energia, porém, não necessariamente, será mais eficiente do que um equipamento que utiliza um sistema de dessalinização solar passivo.

Então, conforme os autores acima citados, a eficiência pode ser calculada por meio da Equação 23, para dessalinizadores solares passivos, e, por meio da Equação 24, para dessalinizadores solares ativos.

$$\eta = \frac{h_{evap(\acute{a}gua-v)} * A_v * (T_a - T_{vi})}{\sum I_{(t)} * A_b} \quad (23)$$

$$\eta = \frac{h_{evap(\acute{a}gua-v)} * A_v * (T_a - T_{vi})}{\sum I_{(t)} * A_b * 3600 + \sum I_{(t)} * A_{ext} * 3600} \quad (24)$$

A variável A_{ext} [m²] representa a área externa que fornece energia extra ao sistema de dessalinização solar.

2.10 Avaliação econômica em um dessalinizador solar

Além da eficiência e a produtividade, Macdonald (2010); Ranjan; Kaushik (2016) e Johnson *et al.* (2019) defendem que sistemas de dessalinização solar devem ser avaliados economicamente. Pois, desta forma, é possível determinar se um tipo de dessalinizador solar é mais indicado para certas condições do que outro.

Os autores também corroboram que uma avaliação econômica torna possível precificar o litro de água purificada em cada equipamento por metro quadrado de área da bandeja, assim, podendo ser um critério julgador na escolha do tipo de sistema de dessalinização.

Então conforme os modelos de Macdonald (2010) e Johnson *et al.* (2019) a avaliação econômica de um dessalinizador leva em consideração a vida útil de 10 anos, os custos com manutenção e operação do equipamento, os custos relacionados ao capital investido e a precificação, pelo mercado, do equipamento.

Então, de acordo com a Equação 25, tem se que:

$$CPL = \frac{AFC+AMC-ASV}{m\acute{a}gua} \quad (25)$$

Dado que:

CPL = Custo do litro de água dessalinizada;

AFC = Taxa fixa anual do dessalinizador;

AMC = Custo anual de manutenção e operação do sistema; estimado em $(0,15 \times AFC)$

ASV = Valor residual anual;

SV = Amortização do custo fixo em 20%;

$m\acute{a}gua$ = Produção anual de água dessalinizada por metro quadrado.

O valor do AFC é obtido pela Equação 26:

$$AFC = k . FC \quad (26)$$

Dado que:

FC = Custo fixo (custo de produção);

k = Fator de recuperação de capital

O Valor de k pode ser obtido pela Equação 27 abaixo:

$$k = \frac{i x (i+1)^n}{(i+1)^n - 1} \quad (27)$$

i = Juros por ano; que segundo Ranjan e Kaushik (2016) é de 12% ao ano.

n = Vida útil do equipamento (10 anos);

Para o ASV , pode-se estimar esse parâmetro pela Equação 28:

$$ASV = \mu . SV \quad (28)$$

$SV = 0,2 . FC$;

μ = Fator de amortização.

O valor do fator de amortização μ pode ser obtido pela Equação 29:

$$\mu = \frac{i}{(i+1)^n - 1} \quad (29)$$

Para estimar o valor do *mágu*, considerará a maior produção diária do sistema pelo número de dias de operação conforme especifica Pakdel *et al.* (2017).

É uma forma de precificação o equipamento é utilizando o modelo de Ranjan e Kaushik (2016) que estabelece a seguinte relação na Equação 30:

$$P_{mer} = mágu \cdot pv_{ag} \quad (30)$$

Em que:

P_{mer} = Precificação do equipamento no mercado;

pv_{ag} = Valor do litro da água destilada vendida no mercado.

2.11 Tecnologias sociais

Segundo o Instituto de Tecnologia Social do Brasil (ITS - Brasil) tecnologia social pode ser entendida como: “um conjunto de técnicas, metodologias transformadoras, desenvolvidas e/ou aplicadas na interação com a população e apropriadas por ela, que representam soluções para inclusão social e melhoria das condições de vida”.

Para Barretto e Piazzalunga (2012) o Brasil passou a adotar o termo de “tecnologias sociais” para definir os produtos, técnicas e/ou metodologias reaplicáveis, desenvolvidas na interação com a comunidade e que represente efetivas soluções de transformação social. Dado que, as tecnologias sociais associam soluções inovadoras com características de uso das tecnologias (principalmente as tecnologias da informação) para resolver ou atenuar um problema social e/ou econômico específico.

Para Costa (2013) e Castro *et al.* (2020) as tecnologias sociais ou simplesmente (TS) surgem como possibilidade reais de alternativas modernas, simples e de baixo custo para a solução de problemas estruturais das camadas mais excluídas da sociedade.

Em 2017, o Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE) publicou uma cartilha explicativa de como as tecnologias sociais podem transformar a realidade de comunidades. Nessa cartilha o SEBRAE adota a postura de incentivo as TS e enfatiza que as soluções não convencionais e não mercadológicas, onde as ideias são construídas a partir de experimentações e conhecimentos locais, porém baratas, que usam mão de obra, talentos e recursos disponíveis, são maneiras de enfrentar determinadas questões, indo além das formas mercantis e comerciais oferecidas pelo mercado. Essas soluções são pautadas nos princípios da economia solidária com ferramentas e/ou iniciativas de baixo custo e alto potencial para resolução de problemas locais.

O Quadro 3 apresenta algumas experiências de tecnologias sociais, a descrição da problemática e realidade a qual foi empregada (Costa, 2013).

Quadro 3 - Experiências de tecnologias sociais

Experiência	Tema	Descrição
Calha alternativa	Habitação e meio ambiente	Micro experiência na Região Metropolitana de Recife (PE) em que um garoto desenvolveu uma tecnologia baseada em calhas feitas de garrafa pet cujo objetivo é reduzir o assoreamento do solo em regiões com risco de desabamento.
Cisternas nas escolas	Educação e recursos hídricos	Ação de uma organização da sociedade civil, com financiamento do Governo do Estado da Bahia, que implanta cisternas para consumo de água e produção de hortas em escolas públicas sem acesso à rede de abastecimento de água. As cisternas também são usadas como instrumento pedagógico para crianças e seus familiares sobre aspectos da convivência com o Semiárido.
Reciclagem de resíduo eletroeletrônico	Meio ambiente e renda	Experiência que desenvolveu uma máquina para que catadores de materiais recicláveis reciclem monitores de computador, contribuindo para reduzir o lixo eletrônico jogado em aterros e lixões. A aplicação da tecnologia social visa integrar os catadores no ciclo de gestão dos resíduos eletroeletrônicos.
Fossas sépticas para o meio rural	Saneamento	Duas propostas de saneamento básico alternativo para instalação em propriedades familiares rurais. Os sistemas são simples, podendo ser mantidos pelas próprias famílias. Foram analisadas uma política da Prefeitura Municipal de Caratinga e uma proposta de fossa não contaminadora do lençol freático da Embrapa de São Carlos, SP.

Fonte: Adaptado de Costa (2013)

A dessalinização solar pode ser entendida como uma tecnologia social que visa atenuar a escassez de água potável nas regiões semiáridas do nordeste brasileiro.

Nesse contexto, é de extrema importância que o projetista do dessalinizador solar conheça a realidade em que o equipamento visa atenuar os problemas da falta de água potável. Assim como na Análise Ergonômica do Trabalho (AET) que a experiência do pesquisador influencia na compreensão da problemática (Guérin *et al.*, 2001), no projeto e implementação de uma tecnologia social, como a construção de um equipamento de dessalinização solar, precisa-se necessariamente conhecer a realidade local e a população em que se pretende atender com o projeto.

Portanto, a frase proposta por Guérin *et al.* (2001) “conhecer o trabalho para transformá-lo” pode ser ampliada para “vivenciar a realidade do problema local para transformá-lo em uma solução viável econômico, ambiental e socialmente”.

3 METODOLOGIA

Este trabalho de caráter tecno-científico adota uma metodologia que envolve elementos da pesquisa aplicada e experimental. Neste índice são explicitados os assuntos referentes ao procedimento metodológico.

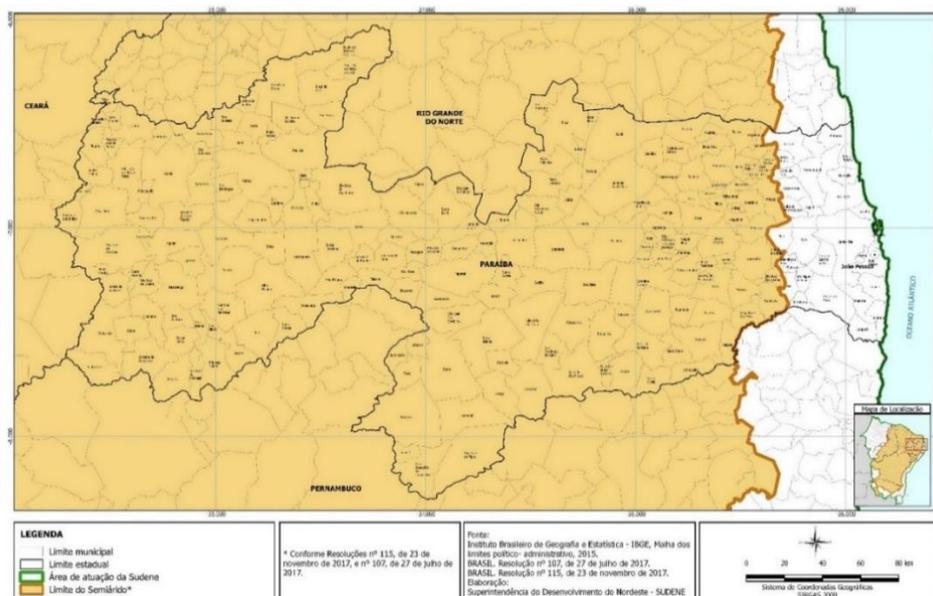
3.1 Caracterização da área de estudo

Este estudo foi desenvolvido na região do semiárido brasileiro, especificamente no semiárido paraibano, na mesorregião do agreste e microrregião de Campina Grande.

A região semiárida foi escolhida como foco do estudo, uma vez que há uma grande variabilidade espacial da precipitação pluviométrica, a qual é frequente a ocorrência de dias sem chuva, acarretando assim em eventos de “seca” (Correia *et al.*, 2011). A distribuição irregular das chuvas faz parte do clima da região, e políticas públicas de convivência com a seca são desenvolvidas e incentivadas, seja por meio de instituições de pesquisas e/ou universidades.

Conforme a Figura 20 a delimitação da aplicação da pesquisa concentra-se no semiárido paraibano, dado que o dessalinizador solar foi desenvolvido e testado experimentalmente no semiárido paraibano.

Figura 20 - Delimitação do semiárido paraibano



Fonte: SUDENE (2017)

Foram construídos e operados dois protótipos de dessalinizadores solares nas dependências do Laboratório de Pesquisa em Ciências Ambientais (LAPECA), no Centro de Ciências e Tecnologia (CCT) da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), o qual localiza-se na Cidade de Campina Grande - PB, a uma latitude 7°13'11" sul e longitude 35°52'31" oeste, com altitude média de 550 metros.

3.2 Classificação da pesquisa

Pelas características da palavra engenharia, que de acordo com o dicionário Michaelis da língua portuguesa, significa “arte de aplicar os conhecimentos científicos à invenção, aperfeiçoamento ou utilização da técnica industrial em todas as suas determinações”. Pode-se associar diretamente as pesquisas em engenharia com a pesquisa aplicada.

A pesquisa aplicada na perspectiva de Podranov e Freitas (2013) é definida como um tipo de pesquisa que objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática dirigida à solução de problemas específicos. Assim, em relação à natureza deste trabalho, pode-se classificá-lo como uma pesquisa aplicada, pois busca o aperfeiçoamento da tecnologia de dessalinização solar para minimizar os problemas da escassez de água.

Enquanto ao método científico e as hipóteses definidas nesta pesquisa, pode-se classificá-la como uma pesquisa baseada no modelo Hipotético-Dedutivo, que segundo Marconi e Lakatos (2019), é um método que formula hipóteses para expressar as dificuldades do problema, de onde são deduzidas consequências que deverão ser testadas ou falseadas.

Sobre a classificação da pesquisa enquanto seus objetivos, este trabalho assume o formato de uma pesquisa explicativa, que para Gil (2019), é o tipo de pesquisa que se centra na identificação dos fatores que determinam ou que contribuem para a ocorrência dos fenômenos analisados, assim, aprofundando o conhecimento da realidade, buscando uma explicação racional para esses fenômenos.

Com relação a abordagem da pesquisa, pode-se classificá-la como de abordagem mista ou quali-quantitativa. Essa abordagem é definida por Creswell e Plano Clark (2011); Cauchick Miguel (2012) e Paranhos *et al.* (2016) como uma

combinação de métodos qualitativos e quantitativos para coleta e análise de dados, os quais possibilitem, de acordo com o desenho do estudo, uma conclusão analítica a respeito do entendimento do problema.

Por fim, classificando a pesquisa em relação aos procedimentos técnicos, esta pesquisa assume 2 diferentes tipologias, sendo-as:

1) Pesquisa bibliográfica: Segundo Podranov e Freitas (2013) e Marconi e Lakatos (2019), é o procedimento técnico que abrange a análise da bibliografia já publicada em relação ao tema de estudo, com finalidade de colocar o pesquisador em contato direto com tudo o que foi escrito, dito ou filmado sobre determinado assunto.

2) Pesquisa experimental: Nesse tipo de pesquisa, o pesquisador procura refazer as condições de um fato a ser estudado, para observá-lo sob controle, estudando, portanto, a relação entre fenômenos, procurando saber se um é a causa do outro (Prodanov; Freitas, 2013).

3.3 Revisão sistemática da Literatura (RSL)

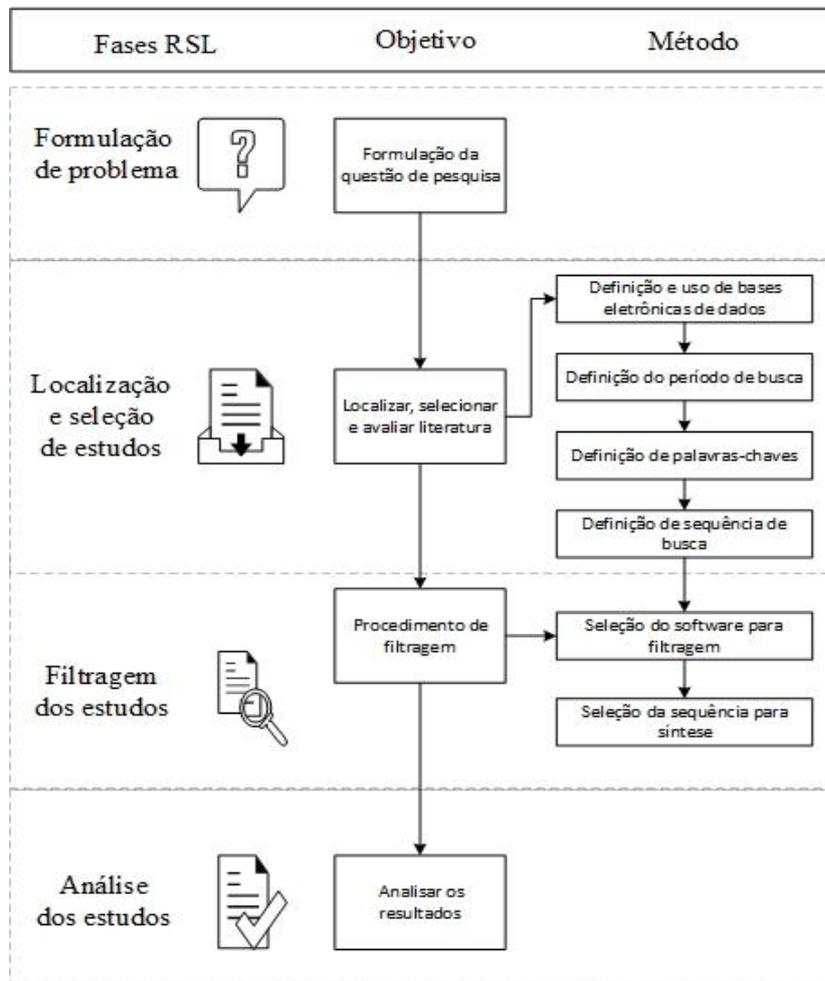
Inicialmente foi utilizado o método de revisão sistemática da literatura (RSL), com o objetivo de identificar os materiais, tecnologias e modelos mais indicados para a prospecção de um dessalinizador solar de alta eficiência e fácil usabilidade. A RSL foi utilizada por ser uma técnica que supera uma revisão bibliográfica tradicional, à medida que estabelece critérios técnicos para a busca, a análise, e o refinamento dos dados que comporão o estado da arte de uma pesquisa (Khirfan; Peck; Mohtat, 2020).

A RSL atenua as generalidades que são cometidas nas pesquisas bibliográficas comuns, pois estabelece critérios explícitos para incluir e/ou excluir a literatura sobre um assunto, desse modo, procura reunir, avaliar e interpretar o máximo possível da literatura disponível e relevante (Greenhalgh, 1997; Seuring; Gold, 2012). Assim, a RSL atenua as deficiências da generalidade de uma revisão tradicional, tanto no escopo (número de artigos revisados) e na natureza (protocolo não estruturado e replicabilidade reduzida) que causam um viés na pesquisa e pode produzir inconsistências entre as revisões do mesmo assunto (Gough; Thomas; Oliver, 2012; Boland; Cherry; Dickson, 2017; Khirfan; Peck; Mohtat, 2020).

A lógica da RSL para a produção desta pesquisa foi elaborada visando um aprofundamento do conhecimento sobre o emprego dos dessalinizadores solares de baixo custo e alta eficiência. Desse modo, tornando possível aglomerar o saber científico sobre os tipos de dessalinizadores solares; os *designs*; os tipos de coletores; os tipos de concentradores; os materiais empregados na construção dos equipamentos; os materiais com melhores índices de aproveitamento e retenção de calor; os custos de produção e manutenção do equipamento; a eficiência e outras informação importantes para o andamento deste estudo.

A Figura 21 resume as fases da RSL utilizadas neste estudo, bem como seu objetivo e método utilizado. As fases serão descritas a seguir.

Figura 21 - Lógica da Revisão Sistemática da Literatura (RSL)



Fonte: Adaptado de Garza-Reyes (2015) e Farias *et al.* (2019)

3.3.1 Formulação do problema

O primeiro passo para realizar a RSL foi referente à formulação de uma questão de pesquisa, etapa importante para se ter um foco no procedimento de busca. Desse modo, foi definida a seguinte questão de pesquisa: “quais os parâmetros (materiais de construção, modelos, tecnologias e desenhos) mais indicados pela literatura específica para o projeto de construção de um dessalinizador solar?”

3.3.2 Localização e seleção de estudos

Na sequência, optou-se por 3 bases de dados científicos, uma vez que, utilizar mais de uma base possibilita enriquecer a bibliografia com diferentes perspectivas. As bases de dados escolhidas foram: *Web of Science (WOS)*, *Science Direct* e *Scielo*.

O período de busca foi definido em 10 anos, o qual obedeceu ao intervalo de 2011 até 2021. Foram definidas para as buscas e suas combinações (duplas e triplas) com os operadores Booleanos “AND” as palavras-chaves: “*Solar Still*”; “*Desalination*”; “*Fresh water*”; “*Low cost*” e “*Efficiency*”. Utilizou-se a sequência “tópico-tópico” na combinação para a base de dados *Web of Science*, e nos títulos, resumos e palavras-chave, para as bases de dados *Science Direct* e *Scielo*.

Ao realizar a busca na base *Web of Science* foi possível encontrar um total de 1858 estudos, na base de dados da *Science Direct* o quantitativo encontrado foi de 1050 publicações, e na base de dados da *Scielo* só foi possível encontrar um total de 6 publicações. Desse modo, após realizar as buscas nas bases de dados, chegou-se a um total de 2914 artigos.

3.3.3 Filtragem dos estudos

Para a filtragem e síntese dos estudos, seguiu-se uma sequência de oito etapas: (i) exclusão de livros e capítulos de livros, está sendo realizada logo após a busca em cada base de dados; (ii) eliminação de trabalhos duplicados; (iii) análise de títulos; (iv) análise de citações; (v) análise de resumos; (vi) análise de artigos excluídos dos últimos dois anos; (vii) análise de disponibilidade; e (viii) leitura integral dos artigos do portfólio final.

Para a organização dos estudos foi utilizado o software *EndNote*, que reuniu, armazenou e organizou as referências (Donato; Donato, 2019), e, assim, foi realizada a eliminação de duplicatas, exclusão de anônimos e análise de títulos.

Na sequência os dados foram exportados utilizando o software *Microsoft Excel*, onde foi realizada a análise de citações e a análise de resumos. Para a análise de citações, fez-se o somatório da quantidade de citações dos trabalhos resultantes da análise de títulos e foram selecionados os artigos incluídos em um percentual de 80% do total de citações, como sugerido por Farias *et al.* (2019). Utilizou-se o *Google Scholar* para realizar a busca do quantitativo de citações.

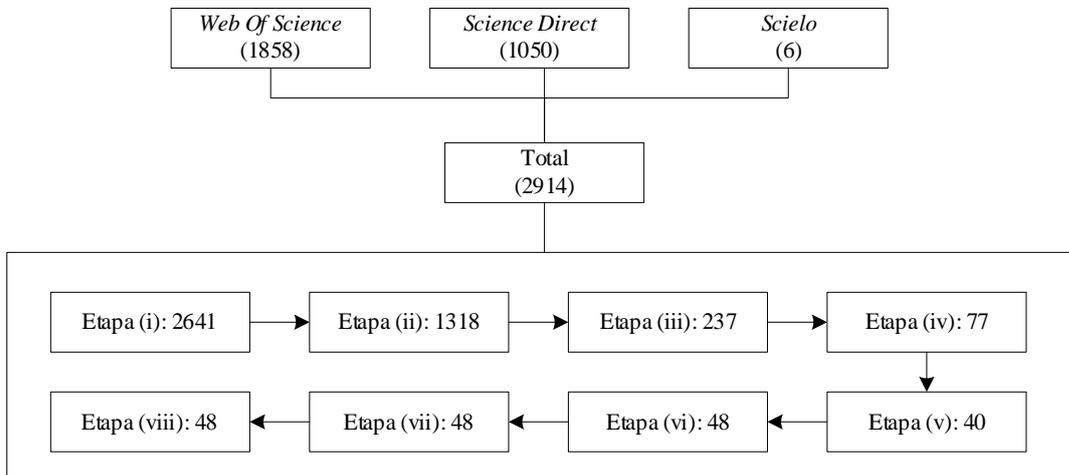
Após a análise dos resumos, foi feita uma análise dos artigos dos últimos dois anos, (2020 - 2021), com o intuito de verificar estudos que tenham sido excluídos na análise de citações, mas que sejam importantes para o desenvolvimento do trabalho. Dessa análise, 8 artigos foram reincluídos no conjunto. O Quadro 4 apresenta as etapas de filtragem dos estudos.

Quadro 4 - Descrição detalhada das etapas da RSL

Etapas		Descrição da etapa
i	Exclusão de livros e capítulos de livros	Todos os estudos que não são artigos científicos publicados em periódicos serão excluídos
ii	Eliminação de trabalhos duplicados	É realizada uma análise de interseção com os títulos dos trabalhos, em que se elimina os duplicados. Esta etapa é realizada por meio do software EndNote
iii	Análise de títulos	O título do trabalho é relacionado com a temática da pesquisa, caso constate-se falta de compatibilidade entre o título e a temática da pesquisa, o trabalho é eliminado.
iv	Análise de citações	Baseia-se no total de citações da base Google Scholar. Os trabalhos são ordenados pelo número de citações do mais ao menos citado. Após essa ordenação, soma-se todas as citações e permanecem na pesquisa os trabalhos que somam até 80% do total de citações.
v	Análise de resumos	Nesta etapa lê-se todos os resumos e se for identificada falta de compatibilidade entre a temática da pesquisa e o resumo do trabalho, este é excluído.
vi	Análise de artigos excluídos dos últimos dois anos	Todos os trabalhos dos últimos 2 anos que passaram na etapa (iii) são lidos e relacionados com a pesquisa. Pois, como são recentes, há possibilidade de serem relevantes para a pesquisa, porém novos para terem muitas citações.
vii	Análise de disponibilidade	Permanecem na pesquisa os trabalhos que são disponibilizados integralmente. Caso não se tenha acesso integral ao trabalho, este é excluído da pesquisa.
viii	Leitura integral dos artigos do portfólio final	Todos os trabalhos são lidos integralmente. Permanecem na pesquisa os trabalhos que podem ser relacionados diretamente com a temática da pesquisa. Caso seja identificado algum trabalho que fuja da linha temática da pesquisa, este é excluído.

A quantidade de artigos após as buscas nas bases de dados, bem como, de cada etapa do procedimento de filtragem pode ser observada na representação esquemática conforme Figura 22.

Figura 22 - Quantitativos da busca e procedimento de filtragem



Fonte: Elaborado pelo autor

3.3.4 Análise dos estudos

Por fim, os selecionou-se 48 estudos, os quais foram analisados qualitativa e quantitativamente. A análise quantitativa foi realizada quanto aos anos das publicações, periódicos publicados, fator de impacto ou indicador de impacto das publicações, e em suma, com relação as metodologias utilizadas pelos estudos. Para análise do fator de impacto ou indicador de impacto das publicações, serão identificados o fator de impacto (*Journal Impact Factor* - JIF) ou o indicador de impacto (*SCImago Journal Rank* - SJR), de cada um dos periódicos. Sendo o JIF uma métrica do *Journal Citation Reports (JCR)*, para os artigos indexados na base de dados do *Web of Science*, e o SJR uma métrica alternativa para aqueles estudos que não estão indexados no WOS.

Para a análise qualitativa, inicialmente foi feito um levantamento dos parâmetros que afetam a produtividade dos dessalinizadores solares, e na sequência, uma análise das técnicas descritas nos estudos que tiveram o intuito de melhorar o desempenho dos dessalinizadores, buscando uma maior eficiência e um menor custo. Os resultados dessa fase serão apresentados seção de resultados e discussões.

3.4 Experimento

Foram construídos dois módulos de dessalinizadores solares, o Gruta 1 e o Gruta 2. Os equipamentos possuem as mesmas dimensões, formatos e materiais de construção. O Gruta 1 é o equipamento teste, o qual recebeu as modificações projetadas e implementadas, já o Gruta 2 é o equipamento de controle, uma vez que será o ponto de comparação entre o equipamento melhorado (Gruta 1) e o equipamento simples (Gruta 02).

Além dos módulos, projetou-se as modificações do equipamento, que neste caso foi utilizado em conjunto com o módulo de dessalinização Gruta 1. O Gruta 1 em conjunto com as modificações compreendem o que nomeou-se de equipamento completo e faz parte desse equipamento completo os seguintes itens: 3 tubos evacuados; 1 serpentina de cobre de ¼"; reservatório de condensação (reservatório de água pré-dessalinização); armação de madeira (pinus 3mx0,3m na chapa 20mm) e metalon (20mmx30mm na chapa 18); reservatório de água dessalinizada, tubos e conexões em PVC; registro regulador de vazão; e tubos de isolamento térmico. No tópico resultados, é realizado o detalhamento de cada componente do equipamento.

No primeiro momento, utilizou-se água salobra coletada em um poço artesiano localizado na zona rural do município de Barra de Santana - PB, mais precisamente no sítio Umbuzeiro Preto, para realizar a parametrização dos módulos Gruta 1 e 2. A etapa de parametrização consistiu em operar os dois módulos simultaneamente nas mesmas condições ambientais, e, comparar a produtividade.

Assim, estatisticamente, foi possível, detectar se existem diferenças entre os módulos Gruta 1 (somente o módulo de dessalinização) com o Gruta 2. A etapa de parametrização também permitiu definir os parâmetros relacionados a altura da lâmina d'água dentro dos dessalinizadores, o volume de água bruta operado, e o tempo necessário para manutenção, limpeza dos sais acumulados na bandeja e verificação de vazamentos (seja no sistema hidráulico ou nas vedações). O processo de funcionamento dos equipamentos é por batelada em regime transiente.

Após a etapa de parametrização e com os parâmetros de funcionamento definidos, os dessalinizadores foram operados, sendo o Gruta 1 acoplado as melhorias e o Gruta 2 somente com o módulo de dessalinização. A operação ocorreu

na primeira semana de novembro de 2023 no estacionamento do Laboratório de Pesquisa em Ciências Ambientais (LAPECA), do Centro de Ciência e Tecnologia (CCT), da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), em Cidade de Campina Grande - PB, a uma latitude 7°13'11" sul e longitude 35°52'31" oeste, com altitude média de 550 metros.

Foram utilizadas as águas salobras de um poço do sítio Alto dos Cordeiros no município de Queimadas - PB, após a etapa de calibragem. As águas foram analisadas para aferir e comparar os padrões físico-químicos antes e depois do processo de dessalinização. As amostras foram comparadas levando em consideração os parâmetros como concentração de sólidos, turbidez, dureza, pH, temperatura, cloretos, sódio e potássio e outros conforme o *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (Baird; Eaton; Rice, 2017).

Além disso, também analisou-se a condutividade elétrica, uma vez que para a água ser considerada pura, a mesma deve ser uma má condutora de corrente elétrica, levando-se em consideração a quantidade de sólidos dissolvidos na água (Araújo; Vasconcelos, 2019). A Água doce apresenta salinidade menor do que 5 partes por mil de sais dissolvidos. O Quadro 5 resume os parâmetros, as unidades e os métodos da análise.

Quadro 5 - Dados para análise experimental

Parâmetro	Unidade	Métodos
pH	adimensional	Potenciométrico
Condutividade elétrica	$\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	Conduímetro
Cloreto	$\text{mg Cl}\cdot\text{L}^{-1}$	Mohr
Dureza	$\text{mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$	Titulométrico - EDTA
Alcalinidade	$\text{mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$	Titulométrico com indicador
Turbidez	NTU	Nefelométrica
Sódio	$\text{mg Na}^+\cdot\text{L}^{-1}$	Fotometria de chama
Potássio	$\text{mg K}^+\cdot\text{L}^{-1}$	Fotometria de chama
Temperatura	°C	Termopar

Fonte: Elaborado pelo autor

Foram avaliados também com o auxílio de termopares de ligas metálicas, conectados ao instrumento de medição eletrônica *Data Logger* (ALCALITECH – Fabricação de Aparelhos e Equipamentos de Medida e Controle Ltda) desenvolvido por Ramos *et al.* (2021), que consiste em uma estação de medição multiparâmetros de água e atmosfera), as temperaturas da água na bandeja, bem como as temperaturas no interior e no exterior da cobertura de vidro, levando em consideração

um intervalo de tempo de 30 minutos a cada medição. Esse mesmo intervalo de tempo foi empregado na medição da quantidade de água dessalinizada produzida pelos módulos Gruta 1 e 2.

Para determinar os parâmetros meteorológicos, umidade relativa do ar e temperatura ambiente, fez-se uso do termohigrômetro digital (com precisão de $\pm 0,1^\circ\text{C}$ e erro de 0,25%), para a velocidade do vento utilizou um anemômetro digital. Já a radiação solar foi medida com o radiômetro SL 200 17957 da marca KIMO.

As águas utilizadas passaram por análises físico-químicas antes e depois do processo de dessalinização. As amostras foram comparadas levando em consideração os parâmetros como turbidez, dureza, pH, cloretos e alcalinidade. Além disso, também foi analisada a condutividade elétrica (Araújo; Vasconcelos, 2019).

Utilizou-se o das equações [1-19] de transferência de energia térmica, demonstradas na revisão de literatura, para os cálculos dos coeficientes de transferência de calor (interno e externos) convectivos, radiativos e evaporativos nos dessalinizadores.

Além disso, utilizou-se das Equações 20; 21; 22; 23 e 24 para os cálculos da produtividade e da eficiência dos equipamentos. E para a avaliação econômica, foi utilizado a adaptação dos modelos de avaliação econômica de dessalinizadores solares propostos por Macdonald (2010); Ranjan; Kaushik (2016); Johnson *et al.*, (2019), sendo-as equações 25; 26; 27; 28; 29 e 30.

Sobre o aspecto dos parâmetros ambientais, pois estes, conforme Abujazar *et al.*, (2016) podem interferir na produtividade do equipamento, a Figura 23 resume as informações climáticas do período de operação do Gruta 1 e 2, tanto na etapa de calibragem quanto na operação com as melhorias projetadas.

Figura 23 - Resumo dos parâmetros meteorológicos em novembro de 2023



Fonte: Adaptado de <https://pt.weatherspark.com/m/31387/11/Condi%C3%A7%C3%B5es-meteorol%C3%B3gicas-caracter%C3%ADsticas-de-Campina-Grande-Brasil-em-novembro>

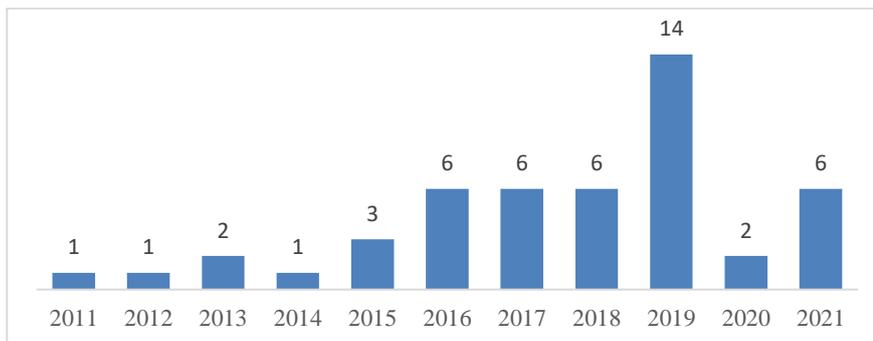
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O índice 4 apresenta os resultados da RSL, os desenhos dos equipamentos projetados, as justificativas e todos os componentes dos dessalinizadores. O índice 4 também apresenta o funcionamento dos equipamentos, os dados experimentais e todas as informações relativas ao operacional dos equipamentos.

4.1 Análise quantitativa da Revisão Sistemática da Literatura (RSL)

Para a análise quantitativa dos 48 estudos selecionados a partir da RSL, inicialmente foi realizada a análise da evolução das publicações, a qual pode ser verificada na Figura 24.

Figura 24 - Evolução das publicações



Fonte: Elaborado pelo autor

Percebe-se uma grande quantidade de publicações concentrada no ano de 2019, sendo possível observar um padrão crescente do volume publicado até o referido ano. Nota-se uma redução no crescimento de publicações no ano de 2020, e a volta do crescimento no ano de 2021. Essa característica pode estar relacionada à pandemia do COVID-19 a qual o mundo como um todo foi impactado, sendo o ano de 2020 o início da pandemia, uma vez que ocorreu uma grande redução do crescimento dos estudos, e uma retomada no ano de 2021, ano em que foi descoberta a vacina da COVID-19 e iniciada a vacinação da população mundial. Apesar dessa quebra, é possível constatar que o tema é um campo de pesquisa emergente, com o número de publicações crescendo ao longo do tempo.

No que se refere aos periódicos publicados, os estudos distribuíram-se em 19 periódicos distintos, estando o maior número de publicações no periódico “*Desalination*”, que possui fator de impacto de 9.501. Como pode-se verificar na

Tabela 1, os periódicos foram classificados de acordo com o fator de impacto ou o indicador de impacto dos periódicos, estando o periódico “*Renewable and Sustainable Energy Reviews*” na primeira colocação, com um fator de impacto de 14.982, este com um total de 7 artigos publicados no período de busca da RSL, estando, desse modo, em segundo lugar com relação ao número de estudos. Outro periódico que se destacou na quantidade de artigos encontrados, foi o periódico “*Journal of Cleaner Production*”, com um total de 6 artigos e um fator de impacto de 9.297. Assim, é possível constatar que a maior quantidade de estudos na temática concentrou-se nos cinco periódicos de maior impacto, totalizando 29 estudos, entre os 48 encontrados, equivalendo, portanto, a um percentual de 60,42%. Tal fato aproxima-se com o princípio de Pareto, pois cerca de 25% dos periódicos mais influentes somam mais de 60% de todas as publicações.

Tabela 1 - Quantidade de artigos por periódico e seu fator de impacto

Periódicos	Fator de impacto/indicador de impacto	Nº de artigos
Renewable and Sustainable Energy Reviews	16.3	7
Applied Energy	11.4	2
Energy Conversion and Management	11,1	2
Desalination	9.7	12
Journal of Cleaner Production	11.1	6
Renewable Energy	8.63	1
Journal of Energy Storage	7.8	1
Solar Energy	7.2	1
Applied Thermal Engineering	7.0	4
Environmental Science and Pollution Research	5.4	1
Environmental Progress & Sustainable Energy	4.0	1
Journal of Solar Energy Engineering	2.3	1
Thermal Science	2.5	1
Groundwater for Sustainable Development	6.7	1
Energy Procedia	1.4	1
International Journal of Ambient Energy	2.0	2
Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy	1.5	1
Materials Today: Proceedings	1.8	3

Fonte: Elaborado pelo autor

Por fim, em se tratando da metodologia utilizada pelos autores nos artigos encontrados, foi possível verificar que os estudos na temática se concentram em

artigos de revisão da literatura e em estudos experimentais. Verificou-se o interesse dos pesquisadores por ambas as tecnologias é alto, uma vez que foram encontrados um total de 26 artigos de revisão da literatura e 22 artigos de estudos experimentais, equivalendo, portanto, a um percentual de 54,17% e 45,83%.

Nos anos de 2022, 2023 e 2024, que não fizeram parte do escopo dessa Revisão Sistemática da Literatura, pode-se encontrar estudos que priorizaram o uso de equipamentos de dessalinização solar combinados com outras tecnologias. Na base de dados *Web of Science* é possível encontrar, nesse intervalo de anos, 798 artigos que trabalham com a temática de dessalinização solar.

Entre os 3 estudos mais citados estão os trabalhos de Moustafa, Hammad e Elsheikh (2022), que utilizou um aquecedor elétrico alimentado por um painel solar fotovoltaico, para potenciar o ganho de energia em um dessalinizador solar tubular; O estudo de Elsheikh *et al.* (2022) que utilizou uma estrutura bicamada de localização de calor de baixo custo para aumentar as taxas de evaporação.

Elsheikh *et al.* (2022) também inovaram na utilização de métodos de *machine learning* como ferramentas preditivas para obter a produção de água dos dessalinizadores solares. Por fim, o terceiro trabalho mais citado foi o de Mevada *et al.* (2022), em que os pesquisadores testaram diferentes materiais de armazenamento de energia em dessalinizadores solares, os materiais foram: o granito preto, bola de vidro preta e pedra de mármore branco. Os autores concluíram que a adição desses materiais em um dessalinizador solar pode aumentar sua eficiência em até 72%.

A Índia, o Egito e a Arábia Saudita são os países com mais publicações recentes sobre a dessalinização solar. E o estudo de Elsheikh *et al.* (2024) relaciona o emprego de dessalinizadores solares com o cumprimento dos objetivos 6, 13 e 14 do desenvolvimento sustentável, os quais são: o acesso universal sustentável à água potável e saneamento; ações contra os impactos ambientais e prevenir as alterações climáticas e alcançar a utilização sustentável dos mares e oceanos.

4.2 Análise qualitativa da Revisão Sistemática da Literatura (RSL)

Para a análise qualitativa dos estudos encontrados a partir da RSL, a mesma foi realizada com relação aos parâmetros que interferem nos projetos dos

dessalinizadores solares e aos modelos e técnicas utilizadas nos dessalinizadores solares, os quais serão apresentados a seguir.

4.2.1 Parâmetros que interferem nos dessalinizadores solares

Ao analisar os artigos obtidos a partir da RSL, foi possível identificar diversos aspectos com relação à dessalinização solar, principalmente em se tratando da produtividade de água potável dos dessalinizadores solares, e parâmetros que podem influenciar a mesma. São diversos os parâmetros citados que podem interferir nessa produtividade, os quais podem ser classificados em parâmetros ambientais, de *design* e operacionais (Abujazar *et al.*, 2016; Nougriaya *et al.*, 2021).

Os parâmetros ambientais se referem aos fatores meteorológicos, como a radiação solar, temperatura do ar, ou temperatura ambiente, e velocidade do vento, os quais são imprevisíveis e não podem ser controlados (Panchal; Awasthi, 2017; Selvaraj; Natarajanb, 2018; Sharshir *et al.*, 2016; Yadav; Sudhakarb, 2015). A produtividade do dessalinizador solar está diretamente relacionada à intensidade da radiação solar, à temperatura ambiente e à velocidade do vento (Panchal; Awasthi, 2017; Sharshir *et al.*, 2016).

Com relação aos parâmetros de *design*, os autores abordam principalmente aspectos relacionados à cobertura do dessalinizador, bem como, a área da superfície e profundidade da lâmina d'água na bandeja do dessalinizador. Para a cobertura do dessalinizador, ela sendo uma tampa de vidro é o mais utilizado, pois, em comparação com as coberturas de materiais poliméricos, tais quais o polimetilmetacrilato ou o polietileno, o vidro apresenta os melhores resultados na produtividade ao longo do tempo dos dessalinizadores (Sharshir *et al.*, 2016).

O ângulo de inclinação da cobertura também possui relação com a produtividade, sendo o ângulo ideal de inclinação do dessalinizador solar equivalente ao da latitude do local, uma vez que irá permitir que a cobertura receba a radiação solar próxima do normal em todas as estações do ano (Khalifa, 2011; Panchal; Awasthi, 2017; Nayi; Modi, 2018; Sathyamurth *et al.*, 2017; Selvaraj; Natarajanb, 2018; Sharshir *et al.*, 2016).

Diversos estudos afirmam que a temperatura da cobertura de vidro desempenha um papel importante na produtividade do dessalinizador, à medida que baixar a temperatura da cobertura de vidro ajuda a aumentar a produtividade, uma vez que a taxa de condensação no dessalinizador solar é aumentada pelo

resfriamento da cobertura de vidro (Sathyamurth *et al.*, 2017; Panchal; Awasthi, 2017; Arunkumar *et al.*, 2019; Kabeel *et al.*, 2020; Kumar *et al.*, 2021).

A condutividade térmica do material de cobertura também está associada ao desempenho do dessalinizador (Panchal; Awasthi, 2017). Desse modo, conforme os estudos de Faeilzadeh *et al.* (2017); Kabeel, Samadon e Maghlany (2018); Cheng, Huo e Niam (2019) e Kabeel *et al.* (2019a), é preferível uma espessura em torno de 4mm para o vidro que servirá cobertura do dessalinizador.

A temperatura da água no dessalinizador também é discutida nos trabalhos encontrados, uma vez que ao aumentar a temperatura inicial da água na bandeja do dessalinizador, a produtividade do mesmo também é aumentada (Kabeel *et al.*, 2017; Panchal; Awasthi, 2017; Sathyamurth *et al.*, 2017; Selvaraj; Natarajanb, 2018).

A profundidade da lâmina d'água na bandeja do dessalinizador solar também possui relação com a produtividade, uma vez que a diminuição da altura da lâmina d'água proporciona uma maior produtividade, pois o coeficiente de transferência de calor evaporativo aumenta, ou seja, a mudança de fase da água para o vapor ocorre rapidamente com a menor profundidade, sendo esta considerada mais produtiva quando varia de 1cm até 2 cm (Sharshir *et al.*, 2016; Kabeel *et al.*, 2017; Jani; Modi, 2018; Nayi; Modi, 2018; Natarajanb, 2018; Nougriaya *et al.*, 2021; Selvaraj). Já o aumento da área de superfície livre da água aumenta a taxa de evaporação, por isso em muitos equipamentos são utilizadas superfícies rugosas, capilares de algodão e outros materiais que possam ampliar o contato da massa d'água com o ar aquecido, assim, aumentar a área de superfície para a evaporação, conseqüentemente também aumentando a produtividade (Selvaraj; Natarajanb, 2018).

No que tange aos parâmetros operacionais, estes se referem ao uso de diferentes modelos e técnicas para os dessalinizadores solares, com o intuito de melhorar o desempenho deles, buscando uma maior eficiência e um menor custo. Nesse sentido, na seção a seguir são apresentados os modelos e técnicas identificadas a partir da RSL que impactaram na melhoria do desempenho dos dessalinizadores.

4.2.2 Modelos e técnicas utilizados nos dessalinizadores solares

De acordo com Arunkumar *et al.* (2019), a produtividade de um dessalinizador solar convencional é de cerca de 2 a 5 L.m⁻².dia⁻¹, porém, para que um indivíduo leve

uma vida adequada, mais do 1m² é necessário por pessoa, assim, essa quantidade de água produzida se mostra insuficiente. Desse modo, diversos estudos abordam os modelos e materiais que podem ser utilizados para a construção de dessalinizadores mais eficientes e menos dispendiosos.

Sharshir *et al.* (2016), identificou as seguintes técnicas utilizadas para melhoria do desempenho dos dessalinizadores: uso de cubos de esponja e mechas, técnica de vácuo por condensador externo e interno, combinação dos dessalinizadores solares com refletores solares, dessalinizador solar convencional acoplado a coletor solar e utilização de materiais de mudança de fase (PCM), dessalinizador solar escalonado modificado e dessalinizador solar convencional com nanopartículas.

Os materiais de mudança de fase (PCM), e materiais absorventes, usados no dessalinizador solar convencional contribuem para uma produção eficiente, uma vez que aumentam o armazenamento de energia interna no sistema (Kabeel *et al.*, 2017; Naveenkumar *et al.*, 2020; Kumar *et al.*, 2021). A parafina como material de PCM foi estudada, devido às suas propriedades físicas, químicas e econômicas com segurança e confiabilidade (Nougriaya *et al.*, 2021). No estudo de Tuly *et al.* (2021), a produtividade teve uma melhoria substancial em um sistema de dessalinização assistida por concentrador utilizando cera de parafina como PCM.

O uso de materiais absorventes ajuda a manter a profundidade mínima da lâmina d'água da bandeja do dessalinizador (Kumar *et al.*, 2021). De acordo com Panchal e Awasthi (2017), o cascalho de granito preto e as rochas pretas são um bom material de absorção de energia a fim de armazenar a energia solar e aumentar a produtividade. A borracha preta também pode ser adicionada à bandeja para o aumento da taxa de absorção (Sathyamurth *et al.*, 2017).

A temperatura mais alta inicial de água pode ser obtida usando tubos evacuados, uma vez que o vácuo dentro do tubo de vidro permite armazenar uma alta porcentagem de calor (Mevada *et al.*, 2019). Nanopartículas de alta condutividade térmica, como por exemplo o Al₂O₃, SnO₂, ZnO, CuO, SiC, GO-Fe³O₄, MnO₂ TiO₂, Cu₂O e nanotubos de carbono, aumentam a diferença de temperatura entre a água e a cobertura, aumentando assim a produtividade do dessalinizador solar (Tuly *et al.*, 2021).

Mevada *et al.* (2019) identificou que a adição de materiais absorventes, como o material de juta preta, com tubos evacuados, também aumentou a produtividade em diferentes aplicações de dessalinizadores solares. Conforme os autores, o uso de nanofluido também com tubo evacuado proporciona uma maior eficiência e aumenta a produtividade (Mevada *et al.*, 2019). Ainda para uma melhor absorção do calor, a bandeja deve ser obrigatoriamente revestida com tinta preta fosca anticorrosiva (Selvaraj; Natarajanb, 2018).

Kabeel *et al.* (2019a), ao analisar dessalinizadores inclinados, identificaram que os modelos mais eficientes são o dessalinizador solar em cascata do tipo açude com PCM (64% de eficiência, com produção diária de 6.7 kg/m²), e o dessalinizador simples de única inclinação (SSS) com aletas de fixação na bandeja, espelhos retrovisores internos e externos e condensador externo (60% de eficiência, com produção diária de 8.9 kg/m²).

De acordo com Tiwari e Sahota (2017), os dessalinizadores solares passivos de inclinação dupla têm melhor desempenho do que os destiladores solares passivos de inclinação única com base no rendimento. Os autores também afirmam que o dessalinizador solar de inclinação dupla é mais econômico e sustentável, bem como possui maior eficiência exergética em comparação com o dessalinizador solar de inclinação única (Tiwari; Sahota, 2017).

Sathyamurth *et al.* (2017) verificou que ao integrar o dessalinizador solar inclinado ao dessalinizador solar convencional, o rendimento é aumentado e a um baixo custo, pois uma vez que a alimentação de água salina do dessalinizador solar inclinado é feita pelo método de alimentação por gravidade, nenhuma bomba adicional faz-se necessário, aumentando assim a taxa de evaporação do dessalinizador solar convencional e o rendimento então é coletado de ambos.

EL-Sebaili e Elbialy (2015) identificaram, ao analisar a literatura, que o dessalinizador solar passivo de bacia tripla, dessalinizador solar escalonado com refletores internos, absorvedor invertido DBSS (dessalinizador solar de bacia dupla), DBSS passivo de inclinação dupla, efeito único com pavio, e DBSS com condensador extra, possuem um baixo custo fixo, baixo custo por litro e um alto rendimento anual. De acordo com os autores, o dessalinizador solar passivo de bacia tripla e o dessalinizador solar escalonado com refletores internos têm o menor custo de produção, de cerca de 0.0099 e 0.0197 \$/L, respectivamente.

Katekar e Deshmukhb (2021), por sua vez, ao realizar uma análise técnico-econômica de diversos projetos de dessalinizadores, identificaram que para todos os projetos de dessalinizadores solares passivos, o de inclinação única e bacia única com bandejas e espelhos internos é o projeto mais econômico (0.0955 \$/L), já para todos os projetos de dessalinizadores solares ativos, o de bacia única com inclinação dupla e coletor de placa plana é o projeto mais econômico (4.31 L/m²/dia e 0.0078 \$/L). Ainda de acordo com os autores, comparando todos os projetos de dessalinizadores solares, verificou-se que o dessalinizador solar fotovoltaico-térmico de baixa concentração é o projeto mais econômico (0.0013 \$/L), dessalinizador híbrido. Os autores concluem que o dessalinizador solar tubular com sistema de rastreamento do sol com concentrador parabólico é considerado o projeto ideal com produtividade de 4.71 L/m²/dia e custo de 0.033 \$/L.

A Tabela 2 a seguir contém uma síntese das informações obtidas dos trabalhos experimentais encontrados a partir da RSL.

Tabela 2 - Síntese dos trabalhos experimentais

Autor e ano	País	Tipo de dessalinizador	Tecnologias extras envolvidas	Altura da lâmina d'água	Materiais de construção citados	Produtividade L/m²/dia	Produtividade em relação ao CSS	Custo de água purificada	Custo de fabricação
Karuppusamy (2012)	Índia	Dessalinizador solar acoplado à tubos evacuados	Emprego do cascalho preto como PCN	-	Alumínio; vidro; espuma de poliuretano	-	> 49,7%	<0.022US\$/L	>US\$212
Ahsan <i>et al.</i> (2013)	Malásia	Dessalinizador solar triangular	-	(1.5; 2.5) cm	Polietileno; Tubos de PVC (policloreto de vinila); polimetilmetacrilato (Perspex); Linha de Nylon; Fita adesiva; Madeira	(1.55; 1.60)	-	-	US\$358.72
Singh <i>et al.</i> (2013)	Índia	Dessalinizador solar de inclinação única	Dessalinizador integrado com coletor tubular evacuado	3 cm	Bacia em concreto, chapa de ferro galvanizado (GI), plástico reforçado com fibra (GRP) ou plástico reforçado com fibra (FRP); Cobertura de vidro transparente com grampos de ferro; vedação com massa para janela.	3.8	-	-	-
Kumar, Dubey e Tiwari (2014)	Índia	Dessalinizador solar de inclinação única	Dessalinizador integrado com coletor de tubo evacuado; bomba d'água	3 cm	Cobertura de vidro; tubos evacuados concêntricos de borossilicato	3.9	-	\$ 31.02/m ³	-
Bhardwaj, Kortenaar e Mudde (2015)	Países baixos	Dessalinizador solar convencional acoplado a condensadores extras	Aquecedor elétrico; Aumento da área da superfície de condensação; Condensador; Design diferenciado	-	Polimetilmetacrilato (acrílico) para os condensadores extras; Vidro	-	50%	-	-

Kabeel e Abdelgaied (2016)	Egito	Dessalinizador solar convencional com emprego de materiais de mudança de fase	Materiais de mudança de fase (PCN)	2 cm	Aço galvanizado; madeira; vidro; Parafina; tubos de PVC	7,54	67.18%	0.032US\$/L	-
Kumar, Esakkimuthu e Murugavel (2016)	Índia	Dessalinizador convencional com adição de condensador externo e eixo agitador	Emprego da energia solar para alimentar motor do exaustor e eixo agitador	1 cm	Aço galvanizado, vidro; painel de energia solar, exaustor; condensador; eixo agitador		30.49%		
Faegh e Shafii (2017)	Irã	Dessalinizador solar equipado com um sistema externo de armazenamento de calor latente e coletores de tubos evacuados	Utilização de PCNs e tubos de termossifão em um taque extra	2 cm	Tubos evacuados; parafina; tubos de termossifão; vidro; aço	6.555	86%	0.015 US\$/L	-
Faeilzadeh <i>et al.</i> (2017)	Irã	Dessalinizador solar convencional	Variação de diferentes alturas da parede dos dessalinizadores e suas proporções (comprimento e largura)	2 cm	Vidro com 4mm e alumínio	-	-	-	-
Al-harahsheh <i>et al.</i> (2018)	Jordânia	Dessalinizador solar convencional com emprego de materiais de mudança de fase	Acoplado a um coletor solar e recirculação da água bruta; Bandeja do dessalinizador revestida com tiosulfato de sódio pentahidratado	(5; 8; 10) cm	Aço inoxidável; Vidro comum, baia e válvula de controle da água; Bobina de alumínio trocadora de calor; coletor solar modelo DSC 25; bomba de recirculação;	4.3	-	0.05 US\$/L	US\$2000

			atuando como PCN; Camada dupla da tampa de cobertura de vidro		Tiosulfato de sódio pentahidratado (PCN)				
Kabeel <i>et al.</i> (2018)	Egito	Dessalinizador solar convencional; Dessalinizador solar com utilização de materiais de mudança de fase	Utilização de PCN/placas de grafite na bandeja	2 cm	Vidro, madeira, chapa galvanizada	>7.00	74.89% - 80.5%	-	-
Cheng, Huo e Niam (2019)	China	Dessalinizador solar convencional com emprego de materiais de mudança de fase	Utilização de PCN nas placas absorvedoras em substituição à utilização de um metal convencional	2 cm	Vidro; Aço inoxidável	3.41	43.30%	0.0243 US\$/L	US\$152.00
Kabeel <i>et al.</i> (2019b)	Egito	Dessalinizador solar do tipo pirâmide	Materiais de mudança de fase (PCN)	[1 à 3,5] cm	Vidro; aço; acrílico; madeira	6.6	-	0.0107 US\$/L	~US\$200.00
Kabeel, Abdelaziz e El-Said (2019)	Egito	Dessalinizador solar com refletor interno com material de mudança de fase (PCN) e armazenamento de energia térmica	Materiais de mudança de fase (PCN)	-	Aço galvanizado; madeira; vidro; Parafina; Cascalho preto	3.27	-	~0.0014 US\$/L	US\$200.00
Yousef, Hassan e Sekiguchid (2019)	Egito	Dessalinizador solar de inclinação única	Materiais absorventes	-	Vidro; Fibras de malha de aço (um novo meio poroso) e aletas de pino cilíndrico oco como materiais absorventes; forro da bacia em ferro	-	16% com aletas de pino cilíndrico oco e 25% com fibras de lã de aço	0.0416 \$ (com aletas) e 0.0343 \$ (com fibras) l/m ²	-

					zincado; folha isolante Armaflex.				
Yousef <i>et al.</i> (2019)	Egito	Dessalinizador solar de inclinação única	Dessalinizador com PCM; Dessalinizador com dissipador de calor com aletas de pino embutido no PCM	1.5cm	Vidro; Ferro galvanizado para revestimento da bacia; folha de isolamento Armaflex como isolante térmico; junta de borracha para vedação da tampa; cera de parafina como PCM	-	Dessalinizador com PCM (redução de 7% durante o dia); Dessalinizador com dissipador de calor com aletas de pino embutido no PCM (aumento de 17%)	-	-
Yousef e Hassan (2019b)	Egito	Dessalinizador solar de inclinação única	Destilador solar acoplado a material de mudança de fase; Dessalinizador com aletas cilíndricas ocas embutidas no material de mudança de fase; Dessalinizador com material de mudança de fase e fibras de lã de aço; Dessalinizador com apenas fibras de lã de aço.	-	Vidro; revestimento da bacia em ferro galvanizado; folha de isolamento Armaflex; como isolante térmico; cera de parafina como PCM; junta de borracha para vedação da tampa	-	Maior produtividade do dessalinizador com apenas fibras de lã de aço na bacia (25%)	-	-
Yousef e Hassan (2019a)	Egito	Dessalinizador solar de inclinação única	Dessalinizador com PCM (PCM); Dessalinizador com PCM e dissipador de	-	ferro galvanizado para forro da bacia; isolamento Armaflex como isolante térmico; junta de borracha	3.572 (PCM); 3.81 (PCM-PF); 3.685 (PCM-SWF)	-	\$0.051 (PCM); \$0.054 (PCM-PF); 0.05(PCM-SWF) l/m ²	-

			calor com aletas de pino; Dessalinizador com PCM e fibras de malha de aço pretas na bacia (PCM-SWF)		para vedação; cera de parafina como PCM				
Wilson <i>et al.</i> (2019)	Índia	Dessalinizador solar de inclinação única	Absorvedor fototérmico	-	Algodão revestido de fuligem de vela como absorvedor	-	-	-	-
Vigneswaran <i>et al.</i> (2019)	Índia	Dessalinizador solar de inclinação única	Dessalinizador com material de mudança de fase (I); Dessalinizador com dois materiais de mudança de fase (II).		bacia com ferro galvanizado; fundo isolado com compensado; folha de borracha abaixo do dessalinizador; cera de parafina como PCM;	I - 4.020; II - 4.400	I (42.29%); II (46.29%)	-	-
Abdullah <i>et al.</i> (2020)	Arábia Saudita	Dessalinizador solar convencional; Dessalinizador solar de inclinação única com bandeja solar	Refletores solares (com variação entre modelos com espelhos internos e externos)	(0.5; 1.0; 1.5; 2.0) cm	Aço galvanizado; Vidro; Fibra de vidro	4.5	95% a mais do que o CSS	0.021 US\$/L	-
Fang, Mu e Wenrong (2021)	China	Dessalinizador solar de inclinação única	Três lentes ao redor do dessalinizador; um refletor na parte de trás do dessalinizador	15cm	Vidro; Lentes de Fresnel	2.5	32%	0.043 \$ / kg	\$ 282.49

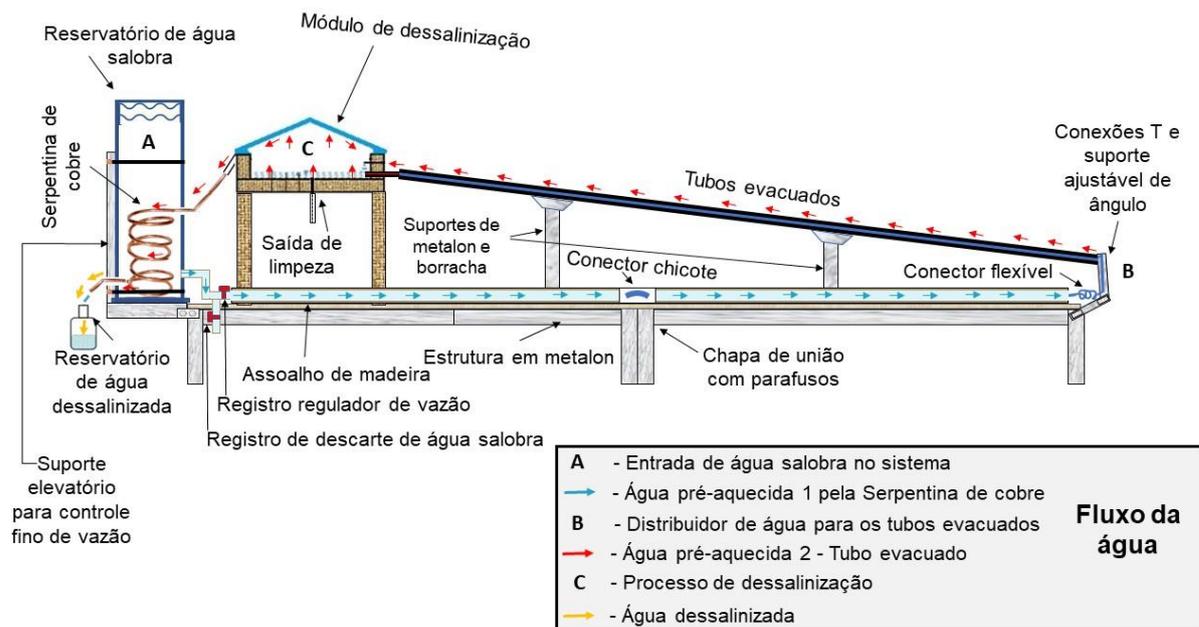
Fonte: Elaborado pelo o autor

Por fim, e de acordo com a primeira hipótese desse trabalho, é possível afirmar que a RSL definiu os padrões necessários para desenvolver um dessalinizador solar adequado às condições do estudo.

4.3 Resultados: processo de construção

Conforme evidenciado na RSL e exemplificado na Tabela 02 com os 48 estudos que constam no portfólio da pesquisa, adotou-se tecnologias que possibilitem ganhos extras de energia para o sistema. Assim, pode-se definir que o equipamento projetado e construído é um dessalinizador solar do tipo pirâmide com tubos evacuados e sistema de recuperação de calor, a Figura 25 apresenta o equipamento inédito.

Figura 25 - Dessalinizador solar projetado



Fonte: Elaborado pelo autor

O equipamento compreende o módulo de dessalinização Gruta 1; 3 tubos evacuados; 1 serpentina de cobre; assoalho em madeira; reservatório de água salobra; reservatório de água dessalinizada, tubos e conexões em PVC; registros reguladores de vazão; isolantes térmicos e suporte antiderrapante nos 8 pés de apoio do equipamento.

O equipamento é um sistema de dessalinização solar móvel, dado que poderá ser desmontado, transportado e remontado conforme as necessidades de operação. Todos os componentes do equipamento podem ser encontrados no mercado local ou adaptados, e os custos são reduzidos, uma vez que utiliza materiais de baixo custo que poderão ser advindos de reutilização, reciclagem ou reaproveitamento de outras máquinas. O custo de desenvolvimento e produção do protótipo foi entorno de R\$5.000,00.

Para entender os motivos que levaram ao projeto desse equipamento, é necessário voltar ao resultado da RSL. Conforme os 48 estudos selecionados, primeiro optou-se pelo projeto de um dessalinizador solar que eliminasse a necessidade de rastreamento da posição do sol, visto que os equipamentos convencionais demandam uma constante reorientação geralmente por hora, da localização da face inclinada da cobertura de vidro do equipamento em relação à posição do sol no céu.

Posteriormente, optou-se por sistemas de fornecimento extra de energia térmica, no caso em questão, de tubos evacuados, em virtude da possibilidade de pré-aquecer a água salobra antes da entrada no módulo de dessalinização, assim, aumentando a eficiência. Então com base na RSL e no trabalho de Nayi e Modi (2018), idealizou-se um dessalinizador com 12 tubos evacuados conectados diretamente na carcaça do aparelho.

Em seguida, e de posse dos dados da RSL, idealizou-se o formato da cobertura da tampa desse dessalinizador solar, que no primeiro momento seria no formato hemisférico de vidro incolor.

De posse dessas informações e antes do desenho final do equipamento mostrado na Figura 25, foram elencados pontos de ajustes no projeto idealizado, sendo-os:

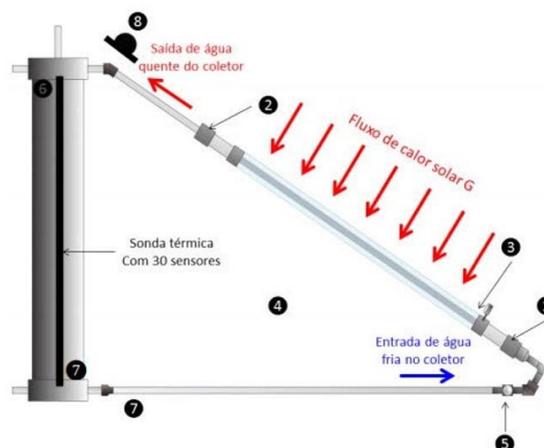
1. A cobertura da tampa de vidro incolor com 3mm de espessura no formato hemisférico pode ser substituída por uma cobertura de material acrílico incolor;
2. O total de 12 tubos evacuados encarecem o projeto;
3. Um único reservatório de água salobra para levar água aos tubos evacuados necessitaria de uma bomba d'água externa;

4. Dificil fabricação e de complexos ajustes nas posições dos tubos evacuados com o ângulo necessário para a entrada de água no sistema de dessalinização;

Sobre o ponto 1, a viabilidade financeira da cobertura da tampa de vidro do equipamento no formato hemisférico não está alinhada com os objetivos de projetar um equipamento adaptável, dado que não existem fabricantes no Estado da Paraíba que produzem hemisférios de vidros ou de material acrílico ou de vidro, assim, necessitando-se de encomendar de fabricantes do sul/sudeste do Brasil, encarecendo o projeto. Então, optou-se por uma cobertura de vidro no formato de pirâmide quadrangular, já que este formato não precisa de constante reorientação da posição do equipamento em relação ao sol, pode ser fabricada localmente dado que utiliza 4 faces triangulares de vidro comum incolor de 4 milímetros, e são encontrados facilmente em mercados regionais a um custo baixo.

Já o ponto 2, precisou ser revisto, uma vez que o custo de aquisição de um tubo evacuado com 2 metros de comprimento está em torno de U\$\$200,00 (duzentos dólares), o que inviabiliza os objetivos desta tese. Então, optou-se por restringir o número de tubos evacuados de 12 para somente 3 tubos, as quais serão fabricados nas dependências do LAPECA, com base no trabalho de Avallone (2017) que projetou, fabricou e estudou a eficiência térmica de um tubo evacuado. A Figura 26 apresenta a esquematização do tubo evacuado projetado por Avallone 2017.

Figura 26 - Tubo evacuado projeto por Avallone



Fonte: Adaptado de Avallone 2017

O ponto 3 foi modificado para o uso de 1 reservatório de água salobra, o qual contém uma serpentina de cobre que aproveita o calor da saída de água dessalinizada

para pré-aquecer a água salobra, assim, ganhando mais produtividade. O reservatório de água salobra está sobre um pequeno dispositivo que permite o ajuste de altura, assim, facilitando adequar a altura da coluna d'água dentro do sistema e não necessitando de uma bomba para levar água as outras parte da operação.

Para o ponto de ajuste 4, optou-se pelo uso de um sistema de armação de perfil de metalon (20x30)mm na chapa 18 mm e assoalho de madeira. Os perfis de metalon são de fácil manipulação e baixo custo, em que é relativamente comum encontrar no comércio local esse tipo de material, juntamente com os eletrodos de solda, serra de arco e lixas para metal. Já o assoalho, consiste em chapas de madeira pinus (300x300)mm com 20 mm de espessura, uma vez que esse tipo de madeira possui baixo custo, também de fácil manipulação e pode ser encontrada facilmente no comércio local.

O Quadro 6 apresenta os componentes do equipamento, as justificativas e os materiais que fazem parte do projeto do dessalinizador solar do tipo pirâmide com tubos evacuados mostrado na Figura 25.

Quadro 6 - Descrição dos componentes do equipamento

Componente	Justificativa	Material
Reservatório de água salobra Volume ≈ 17,8L	Estocagem da água salobra e garantir a diferença de nível para manter o funcionamento do sistema por gravidade. possui uma serpentina de cobre que reaproveita o calor da água que sai do módulo de dessalinização para pré-aquecer a água salobra. Além disso, este reservatório possui um pequeno elevador, que possibilita um ajuste fino de altura, assim regulando o quanto de água entra no sistema.	Tubo de PVC 150 mm e 1m de comprimento, Cap de PVC para tubo de 150 mm; Parafusos sextavados 5/8" de roscas completas e comprimento 5cm; porcas e arruelas. Presilhas de chapa de aço na chapa 1mm e 30 mm de largura.
Registro regulador de vazão	Possibilitar o controle da vazão e do nível da altura da coluna d'água dentro do equipamento	Registro tipo esfera soldável 20mm de PVC
Assoalho de madeira	Suporte estrutural para todos os outros equipamentos. Um dos isolantes térmicos no módulo de dessalinização GRUTA-01	Madeira tipo pinos em forma de chapas com 20 milímetros de espessura e (0,3x3)m de comprimento e largura; $\lambda = 0.12 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
Tubos de PVC	Fazer as conexões entre as partes do equipamento	Tubos de PVC 20 mm (policloreto de vinila) soldáveis
Conexões T em PVC	Conectar os tubos evacuados com o módulo GRUTA-01 e a água pré-dessalinizada	Conexões PVC 20mm (policloreto de vinila) soldáveis
Suportes para os tubos evacuados	Garantir a correta inclinação e ligação entre os tubos evacuados, o módulo GRUTA-01 e a base do equipamento	Cavaletes de metalon (20x30) na chapa 18 acoplados com parafusos sextavados 5/8" de roscas completas e comprimento 5cm; porcas e arruelas.
Tubos evacuados	Fornece energia térmica extra ao sistema aquecendo a água antes de entrar no módulo de dessalinização GRUTA-01	Tubo de borossilicato com 25 milímetros de diâmetro externo e com 3 mm de espessura. Isolado termicamente com dois tampões de acetato-vinilo de etileno (EVA) e preenchido no centro com um tubo de cobre com 15 milímetros de diâmetro externo e 2 milímetros de espessura pintado com tinta preta fosca para altas temperaturas.
Módulo GRUTA-01	Dessalinizar a água salobra	Módulo de dessalinização composto por caixa de madeira pinos 20mm de espessura, bandeja quadrada de alumínio 37,5x37,5x7cm, lâ de vidro, teto em formato de pirâmide quadrangular com 4 milímetros de espessura, calhas e tubos de alumínio.
Serpentina de cobre	Aumentar a troca de calor entre a água dessalinizada aquecida e a água salobra fria	Tubo de cobre de diâmetro interno de 1/4" com 1 milímetro de espessura, comprimento de 1,5m.
Reservatório de água dessalinizada	Armazenar a água dessalinizada para as medições e análises físico-químicas.	Proveta de volume máximo de 0,5L e graduada em 10 ml.
Suporte de pé	Facilitar o posicionamento e transporte do equipamento	Ponteira interna de borracha para perfil de metalon 20x30mm.
Isolantes térmicos	Tubos de isolamento térmico e fita aluminizada para garantir o mínimo de perdas térmicas do sistema	Tubo Isolante Esponjoso 3/4" e largura interna de 3 cm fabricado em polietileno expandido e fita adesiva convencional aluminizada.

Fonte: Elaborado pelo autor

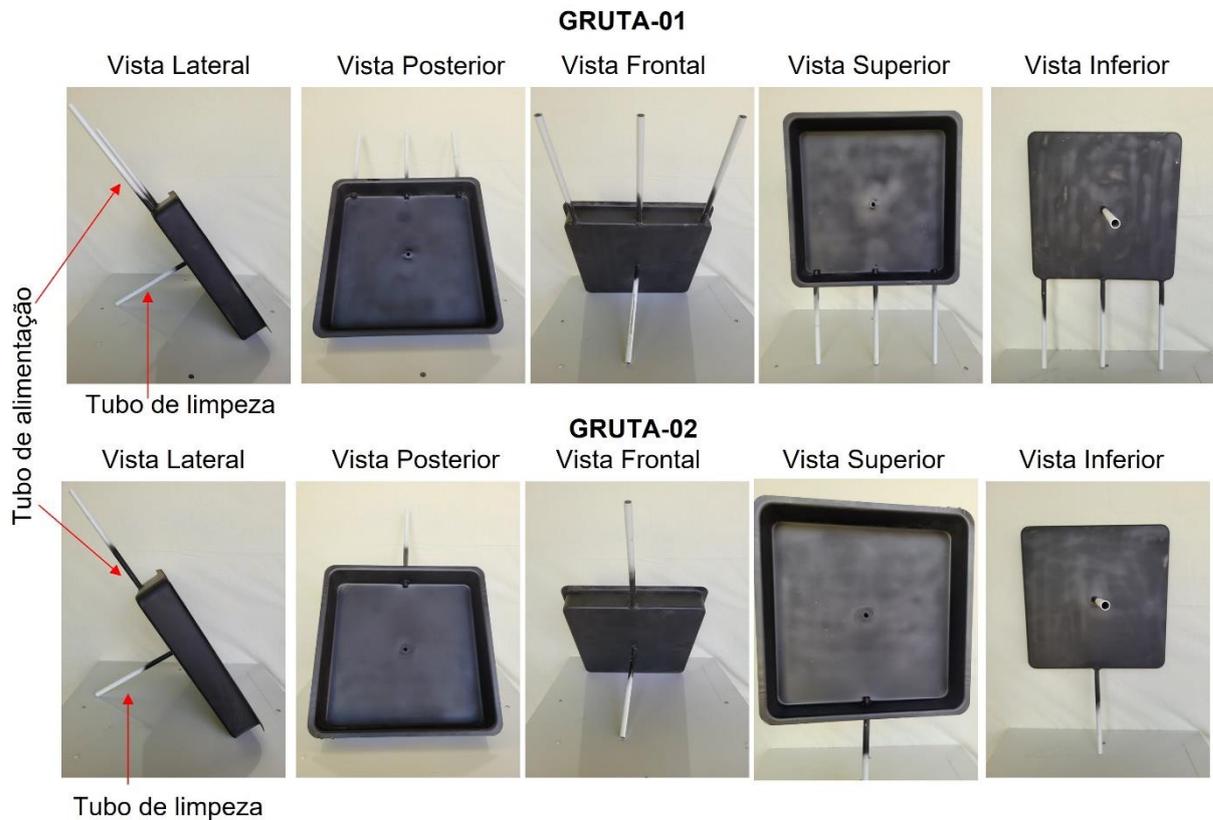
4.3.1 Processo de construção dos módulos de dessalinização solar

Em primeiro e já definido o desenho do equipamento mostrado na Figura 25, seguiu-se o processo de escolha dos materiais e de construção dos módulos de dessalinização. Os módulos Gruta 1 e Gruta 2 são compostos basicamente por uma caixa de madeira, bandeja de alumínio, tubos de alumínio, lâ de vidro, cobertura da tampa em vidro incolor com espessura de 4 milímetros, tinta fosca preta comercial para altas temperaturas e calhas em perfil de alumínio. Silva *et al.* (2023) também usou madeira e alumínio para construir as caixas dos dessalinizadores e obteve excelentes resultados.

O ponto de partida na construção dos módulos de dessalinização solar foi a determinação do tamanho das bandejas, que neste projeto são em formato quadrangular com 37,5x37,5 centímetros de medidas externas por 7 centímetros de altura, com abas laterais com 1,3 centímetros levemente arredondadas e espessura da chapa de alumínio de 1 milímetro. A bandeja de alumínio foi escolhida por meio da RSL, dado que possui $\lambda = 237 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ (alta condutividade térmica) e baixo custo podendo ser encontrado no mercado local, para Brito *et al.* (2020), o alumínio é barato, de fácil manipulação e proporciona elevados índices de trocas térmicas com a água salobra.

Foram soldados tubos de alumínio com 1,3 centímetros de diâmetro externo e 1 milímetro de espessura para a entrada de água salobra e de limpeza dos equipamentos. A única diferença entre a bandeja do Gruta 1 e o Gruta 2 é que o primeiro equipamento possui 3 tubos de alimentação (uma alimentação de água salobra para cada tubo evacuado que será conectado) e o segundo possui somente um tubo de alimentação. A Figura 27 exhibe as informações.

Figura 27 - Bandejas de alumínio

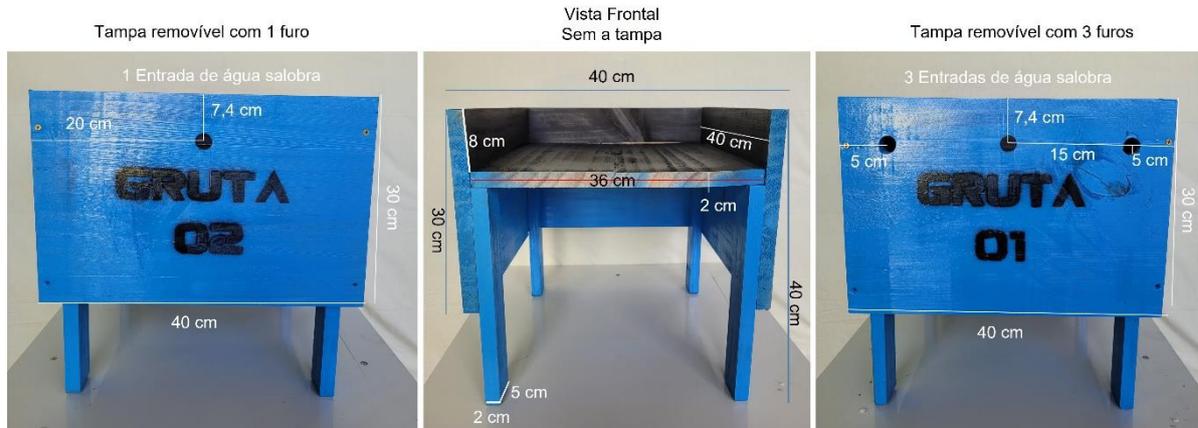


Fonte: Elaborado pelo autor

As bandejas foram lixadas com lixa para metal de granulometria 80 (facilitar a adesão da tinta) e pintadas com tinta *spray* preto fosco comercial para altas temperaturas. A função principal da bandeja é receber a radiação solar e transferir a energia térmica para a água salobra, então o material da bandeja necessariamente deve apresentar características de excelentes absorvedores de radiação térmica solar e de excelentes condutores térmicos (Brito *et al.*, 2020).

Em seguida, confeccionou-se as caixas de madeira para os equipamentos. Utilizou-se chapas de madeira pinus seco com 20 milímetros de espessura. As caixas de madeira são quadradas com 40x40 centímetros foram pintadas e identificadas conforme apresenta a Figura 28.

Figura 28 - Caixas de madeira

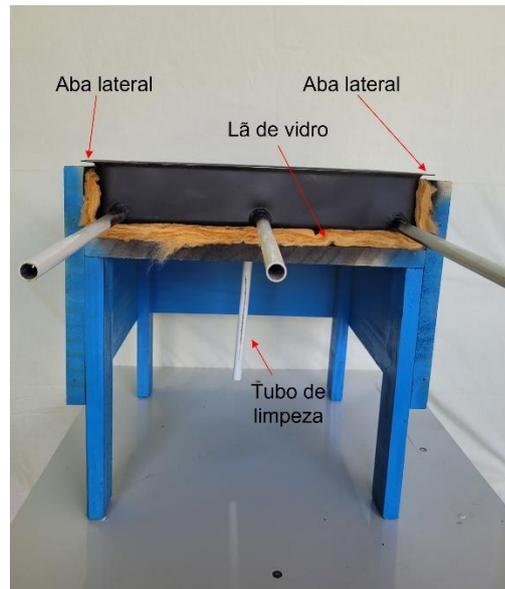


Fonte: Elaborado pelo autor

A vista frontal apresenta a caixa sem a tampa do equipamento, pois foi projetado de forma que a tampa seja removível, assim facilitando a operação. A colocação da tampa do equipamento é feita por meio de 4 parafusos para madeira cabeça chata tipo Phillips 3,5 por 35 milímetros. A diferença entre as caixas do Gruta 1 e do Gruta 2 acontece somente na tampa, pois o primeiro apresenta 3 furos para os tubos evacuados e o segundo apresenta somente um furo de entrada de água salobra (todos os furos possuem 1,5 centímetros de diâmetro). As caixas também possuem 1 furo central na parte inferior de limpeza do equipamento. Utilizou-se cola branca PVC para madeira além de parafusos cabeça chata tipo Phillips 3,5 por 35 milímetros na produção das caixas. As partes externas das caixas foram pintadas com tinta *spray* azul comercial e a parte interna com tinta *spray* preto fosco comercial para altas temperaturas, como indica Bezerra *et al.* (2021).

Após as montagens das caixas colocou-se as bandejas e as coberturas de lã de vidro. Optou-se pela utilização de uma manta com espessura de 50 milímetros de lã de vidro como isolante térmico ($\lambda \approx 0,045 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), aliado com a própria madeira (20 milímetros de espessura) e o fechamento da caixa em todas as direções, sendo a exceção a parte superior onde está a bandeja, assim, evitando-se o máximo de perda. Figura 29 apresenta a situação.

Figura 29 - Isolantes térmicos

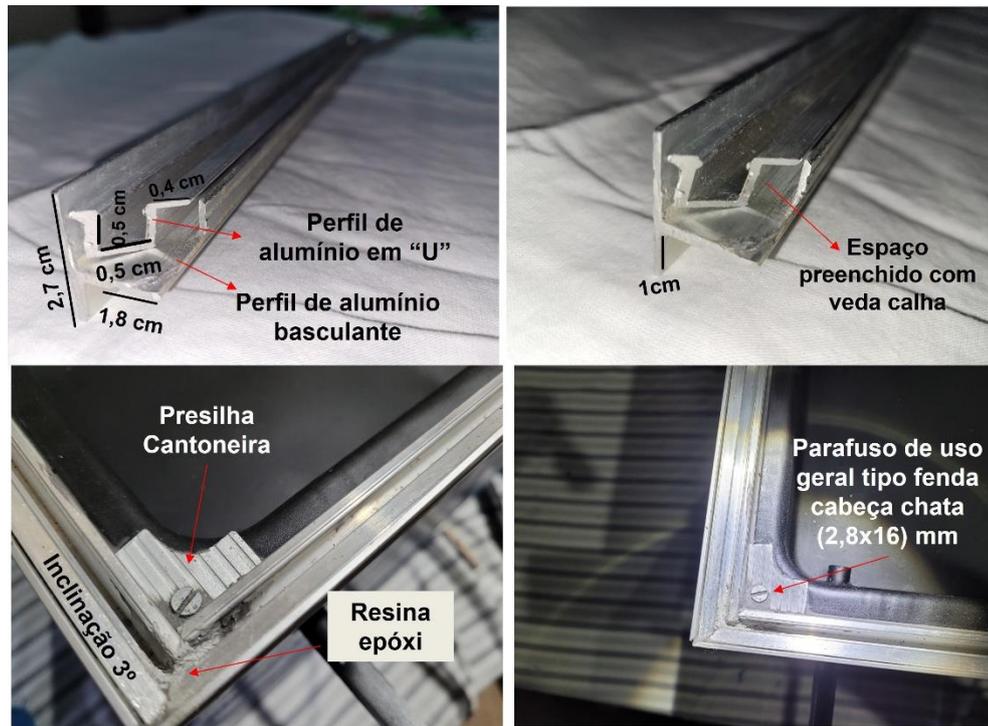


Fonte: Elaborado pelo autor

Para diminuir a troca de calor entre a bandeja e o ambiente, projetou-se a caixa de madeira de forma que os pontos de fixação entre a bandeja de alumínio e a madeira seja somente nas abas laterais, uma vez que diminui a área de contato.

Na definição das calhas do equipamento, optou-se pelo uso da combinação de dois perfis de alumínio, de espessura de 1 milímetro, sendo o primeiro um perfil basculante e o segundo um perfil em “U” de embutir. Ambos os perfis são encontrados facilmente em lojas e comércios de materiais de moveis e esquadrias. A combinação desses dois perfis permitiu criar um suporte para cobertura de vidro e criar as calhas com 0,5 centímetros de altura por 0,5 centímetros de largura, assim minimizando as perdas de produtividade pelo acúmulo de água dentro das calhas, uma vez que um espaço reduzido permite o escoamento da água dessalinizada de forma mais rápida. A Figura 30 evidencia os perfis de alumínio, a colocação das resinas epóxis e a fixação da bandeja por meio de presilhas nas abas laterais.

Figura 30 - Calhas



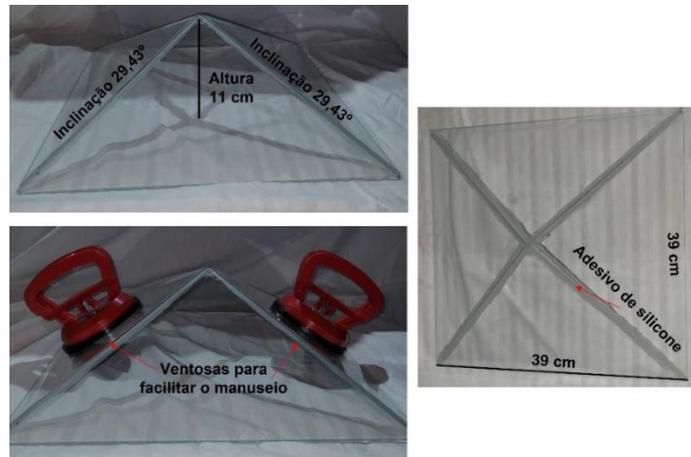
Fonte: Elaborado pelo autor

As calhas possuem inclinação de 3 graus (3°), dado que permite o escoamento dos lados com maior cota para o lado de menor cota, a inclinação foi feita por meio de 4 calços de alumínio confeccionados com as sombras dos materiais das calhas, assim como as presilhas cantoneiras. Optou-se em somente um ponto para convergência da água dessalinizada, dado que as calhas conduzem a um único ponto de saída, o qual fica na parte frontal do equipamento.

As coberturas das tampas dos equipamentos foram construídas com vidro comum incolor de 4 milímetros de espessura, em que os materiais foram cortados, lixados e colados com adesivo à base de silicone no formato de pirâmide quadrangular. Então, pode-se afirmar que a cobertura dos equipamentos consiste em 4 triângulos isósceles de base 39 centímetros e lados de 24,42 centímetros. A altura da pirâmide é de 11 centímetros e a inclinação é de $29,43^\circ$. Segundo Murugavel; Chockalingam; Srithar (2008); Arunkumar *et al.* (2019); Nayi e Modi (2018) e Kabeel *et al.* (2019b) a inclinação da cobertura de vidro deve levar em consideração a latitude, e neste trabalho optou-se por um ângulo maior, uma vez que facilita a colagem e

fabricação da peça. Este fator poderia interferir na usabilidade do equipamento. A Figura 31 elenca a questão.

Figura 31 - Cobertura da tampa de vidro



Fonte: Elaborado pelo autor

A cobertura de vidro é encaixada nos módulos de dessalinização por meio das calhas de perfil de alumínio e são vendadas com adesivo a base de silicone. Os módulos de dessalinização solar Gruta 1 e Gruta 2 finalizados correspondem à Figura 32.

Figura 32 - Módulos Gruta 1 e Gruta 2



Fonte: Elaborado pelo autor

4.4 Parametrização e primeiros dados

Nos trabalhos de Silva *et al.*, (2020); Brito *et al.*, (2020); Bezerra *et al.*, (2021) e Silva *et al.*, (2023) evidencia que é necessário levantar os dados, sobre a produção de água dessalinizada, dos equipamentos convencionais que serão utilizados modificados e comparados pelas proposições de melhoria dos pesquisadores.

Essa etapa é chamada de parametrização e consiste basicamente em garantir que os dessalinizadores, que serão comparados, produzem uma quantidade de água dessalinizada sem diferenças estatísticas relevantes, assim, tornando possível comparar o equipamento convencional (de controle) com o equipamento que sofrerá as modificações. E, dessa forma, mensurar o ganho ou perda que as modificações trouxeram ao dessalinizador.

Então, os módulos de dessalinização Gruta 1 e Gruta 2 passaram pela etapa de parametrização. Os módulos foram construídos da mesma forma, e, foi estabelecido que, por meio do Mann-Whitney com significância de 5%, comparando o volume por hora na produção de água dessalinizada, assim, sendo possível, analisar se existem diferenças estatísticas relevantes entre os equipamentos.

Os experimentos foram realizados com altura de lâmina de água na bandeja de 0,5 e 1,0 cm respectivamente. O processo de funcionamento dos equipamentos ocorreu por batelada em regime transiente, com início às 08:00 e fim às 16:00. A alimentação dos dessalinizadores se deu com uma água salobra coletada em um poço artesiano localizado na zona rural do município de Barra de Santana - PB, mais precisamente no sítio Umbuzeiro Preto.

Utilizou-se as seguintes metodologias: Condutimetria; PHmetria; Nefelometria; Mohr; Titulométrico EDTA e Titulométrico com indicador. A Tabela 03 apresenta os resultados das análises físico-químicas da etapa de parametrização e (%) representa o percentual de redução do parâmetro com o processo de dessalinização solar.

Tabela 3 - Resultados das análises físico-químicas na parametrização

Parâmetro	Água bruta	Água dessalinizada							
		Gruta 1 (0,5cm)		Gruta 2 (0,5cm)		Gruta 1 (1cm)		Gruta 2 (1cm)	
		Med.	Redução %	Med.	Redução %	Med.	Redução %	Med.	Redução %
Condutividade e elétrica ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	880	5,55	99,37%	2,85	99,7%	9,98	98,87%	2,51	99,71%
pH	7,4	7	-	7	-	6,5	-	7	-
Turbidez (NTU)	2	1	50,00%	1	50,0%	1	50,00%	0	100,00%
Cloretos (mg Cl.L^{-1})	2935,5	7,09	99,76%	7,09	99,8%	21,27	99,28%	7,09	99,76%
Dureza ($\text{mg CaCO}_3.\text{L}^{-1}$)	399	0	100,00%	0	100,0%	0	100,00%	0	100,00%
Alcalinidade ($\text{mg CaCO}_3.\text{L}^{-1}$)	282,24	15,01	94,68%	11,01	96,1%	10,01	96,45%	10,01	96,45%

Fonte: Elaborado pelo autor

Em relação a condutividade elétrica, os módulos Gruta 1 e 2 foram capazes de reduzir de $880 \mu\text{S.cm}^{-1}$ da água bruta para, em média $7,76 \mu\text{S.cm}^{-1}$ e $2,68 \mu\text{S.cm}^{-1}$ do Gruta 1 e do Gruta 2 respectivamente, o que corresponde a mais de 99% de redução do valor inicial para ambos os módulos. Para a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) (2019), a redução dos parâmetros de condutividade elétrica estão associados a baixa concentração de sais dissolvidos na água, assim, permitindo a sua potabilidade.

Na análise do pH, que para Von Sperling (2011) representa a concentração dos íons hidrogênio, e, indicam sobre a condição de acidez, neutralidade e alcalinidade da água, os módulos Gruta 1 e 2 foram capazes de reduzir o pH para valores máximos de até 7. Valores que também foram semelhantes aos encontrados por Cardoso *et al.* (2020), que utilizou águas de regiões geográficas próximas em seus experimentos de dessalinização solar.

Já a turbidez foi reduzida em ambos os módulos, em que a água bruta apresentava 2 NTU e chegou-se até mesmo em uma das avaliações a 0 NTU. Em média, os módulos foram capazes de reduzir a turbidez em mais de 50%, e, uma turbidez reduzida, segundo a Portaria GM/MS nº 888, 4 de maio de 2021 e a CETESB (2016), indica baixíssima quantidade de partículas inorgânicas (areia, silte, argila) e detritos orgânicos, tais como algas e bactérias, plâncton em geral e etc. Trabalhos como o de Lied *et al.* (2018) também chegaram a reduções na turbidez de forma eficiente.

A redução da quantidade de íons cloretos foi superior a 99% em ambos os módulos, e, em relação a dureza, também obteve-se reduções significativas, as quais estão dentro dos parâmetros estipulados pela Portaria GM/MS nº 888, 4 de maio de 2021. Esses resultados corroboram com os de Viana *et al.* (2023), que também utilizou um dessalinizador solar na pesquisa com águas da mesma região geográfica que este trabalho.

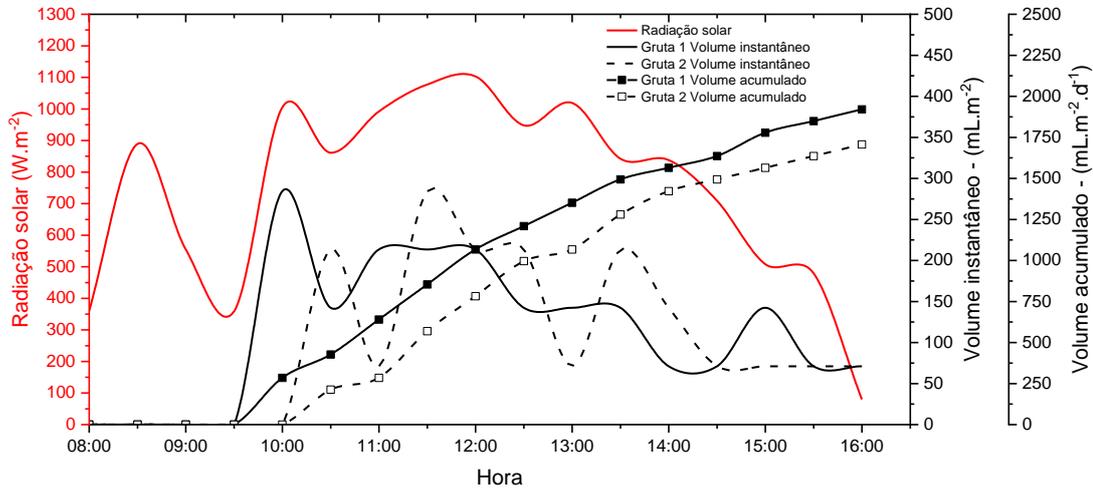
Já a alcalinidade, observa-se que os módulos Gruta 1 e 2 foram capazes de reduzir em mais de 99% o valor desse parâmetro da água bruta. Para a CETESB, as águas com elevados parâmetros de alcalinidade podem conter concentrações elevadas de esgotos e efluentes, e os resultados mostraram-se bastante satisfatórios na redução da alcalinidade. Silva *et al.* (2020) também chegou em resultados próximos com um equipamento semelhante e água bruta de região geográfica próxima.

Constata-se que os módulos Gruta 1 e 2 foram capazes de purificar a água bruta, dado que alcançou níveis de parâmetros de potabilidade de água dentro dos intervalos recomendados pela Portaria GM/MS nº 888, 4 de maio de 2021, a qual versa sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

Em relação a produtividade, a Figura 33 evidencia que praticamente o comportamento do módulo Gruta 1 e do módulo Gruta 2 foram semelhantes ao longo do dia, na data de 20/09 com 0,5 cm de lâmina d'água. A produtividade foi crescente e teve seu ponto máximo às 12:00 horas, e longo depois, com diminuição da radiação solar, ambos equipamentos tiveram reduções drásticas até chegar às 16:00 horas,

(com pouquíssima radiação solar e produção de água destilada). Viana *et al* (2023) chegou a resultados próximos com seus equipamentos.

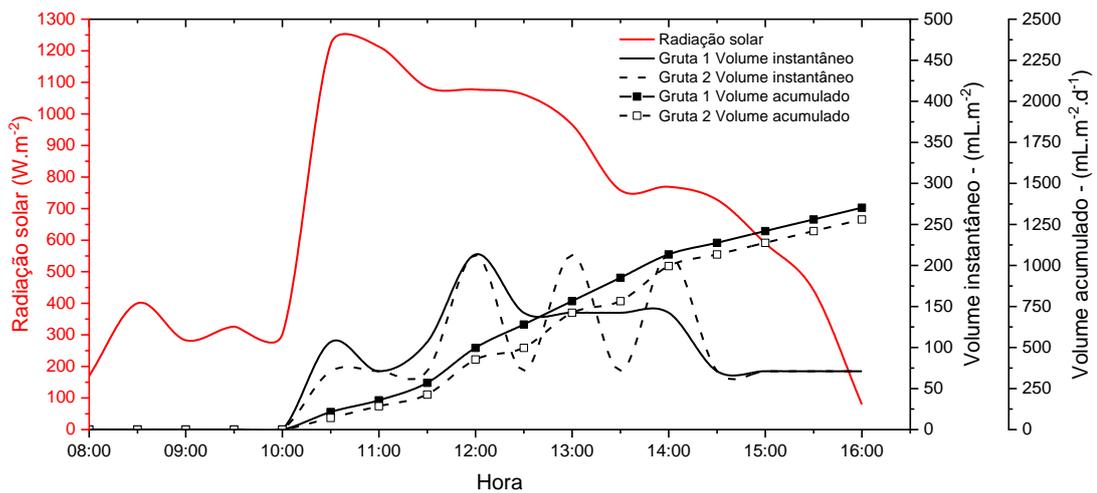
Figura 33 - Comparação das produtividades do Gruta 1 e Gruta 2 com lâmina d'água de 0,5cm



Fonte: Elaborado pelo autor

Para a lâmina d'água com 1 cm, os resultados foram parecidos, porém ambos dessalinizadores produziram menos, conforme mostra a Figura 34.

Figura 34 - Comparação das produtividades do Gruta 1 e Gruta 2 com lâmina d'água de 1,0cm



Fonte: Elaborado pelo autor

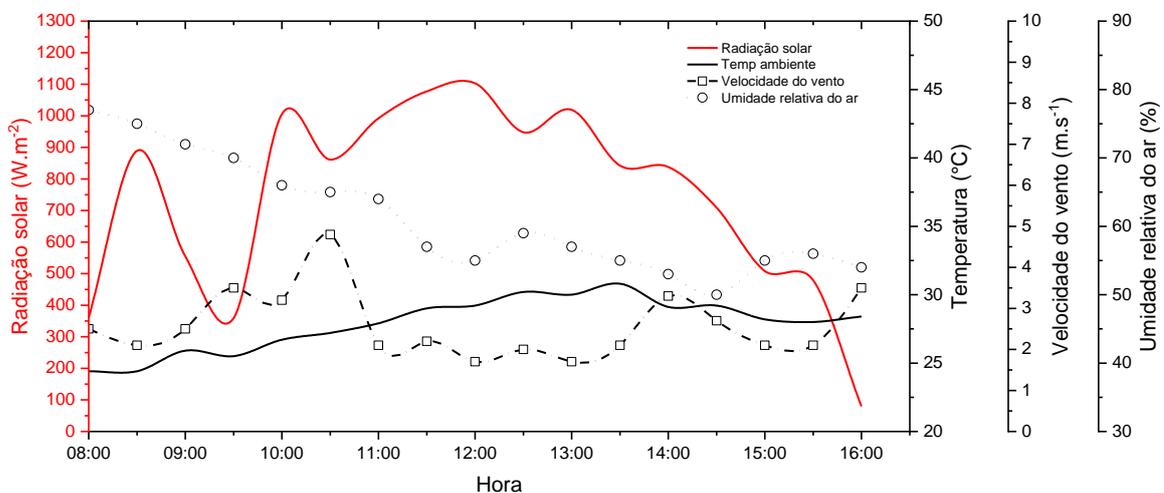
Elaborou-se um teste de Mann-Whitney com a produtividade dos módulos Gruta 1 e Gruta 2 para os dois dias de operação. Dado que a produtividade se

comporta como uma distribuição não-paramétrica, considerando o nível de significância de 0,05 e que as amostras são independentes.

Os resultados para o ρ – *valor* do dia 20/09 (lâmina d'água de 0,5 cm) foi de 0,645 e para o dia 21/09 (lâmina d'água de 1,0 cm) foi de 0,599 a um nível de significância de 5% (podem ser conferidos no Anexo A). Então, como os ρ – *valores* dos dias analisados não foram inferiores a 0,05, logo não rejeita a hipótese nula e considera-se que ambos os módulos Gruta 1 e Gruta 2 apresentam produtividade sem diferenças estatísticas relevantes.

Assim, pode-se afirmar que na etapa de parametrização, evidenciou-se que os módulos operam e produzem água dessalinizada da mesma forma, sendo possível comparar e mensurar ganhos ou perdas de produtividade do Gruta 1 (equipamento que receberá as modificações) com o módulo Gruta 2 (equipamento sem modificações ou equipamento de controle). As Figuras 35 e 36 apresentam as condições ambientais de operação dos módulos Gruta 1 e Gruta 2.

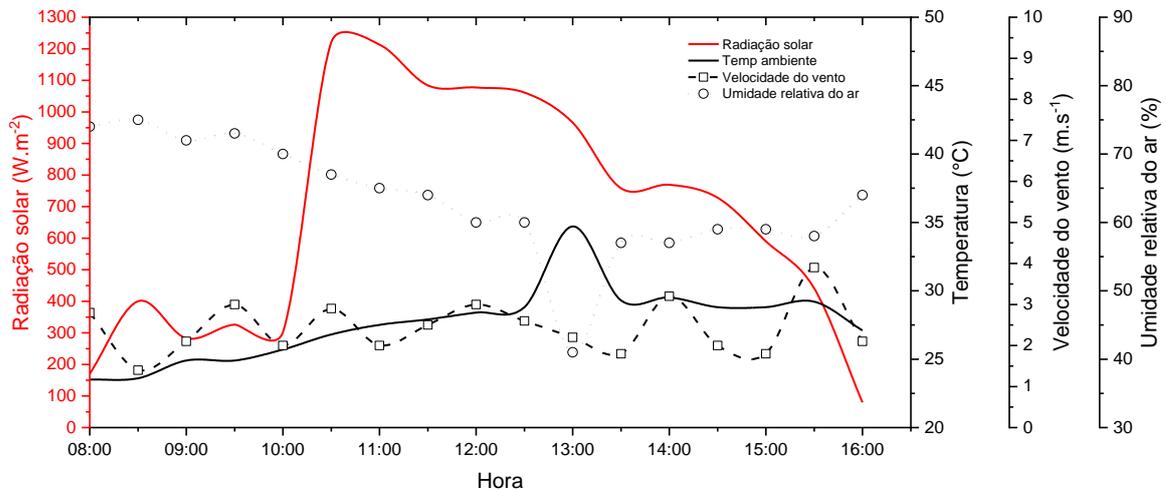
Figura 35 - Dados ambientais da etapa de parametrização para 0,5cm de lâmina d'água



Fonte: Elaborado pelo autor

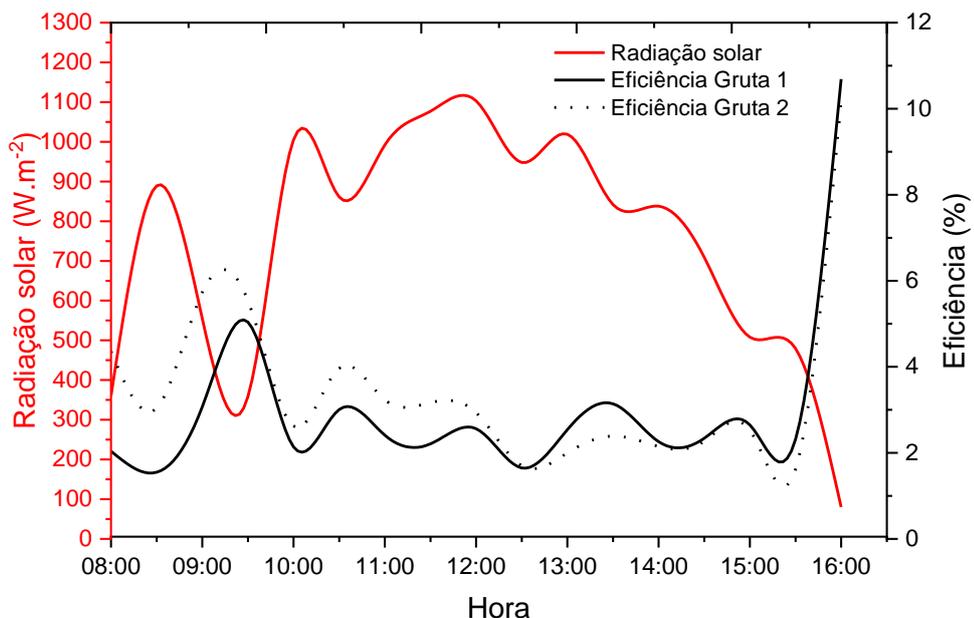
Conforme a umidade relativa e a velocidade do vento diminuíram, os equipamentos produziram mais, contudo, após as 15:30, com a queda da radiação solar e o aumento da velocidade do vento, os equipamentos Gruta 1 e Gruta 2 diminuíram drasticamente a produção de água dessalinizada.

Figura 36 - Dados ambientais da etapa de parametrização para 1,0 cm de lâmina d'água



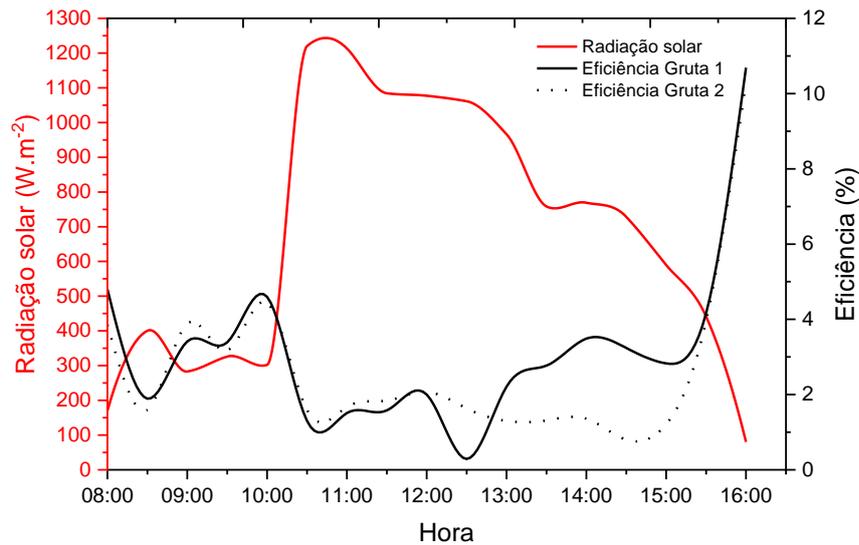
O pico da radiação solar ocorreu às 12:00h, em ambos os dias de experimentos, ultrapassando os 1000W.m^{-2} . A temperatura ambiente não apresentou grandes variações. Silva *et. al*, (2023) também realizou trabalhos com dessalinizadores solares na mesma região deste estudo, e, os resultados foram semelhantes aos medidos durante a etapa de parametrização. Em relação as eficiências, as Figuras 37 e 38 apresentam os dados para as lâminas d'águas de 0,5 cm e 1 cm.

Figura 37 - Eficiência na etapa de parametrização para 0,5cm de lâmina d'água



As eficiências foram semelhantes, e não foram registradas variações significantes entre os equipamentos. Tal fato corrobora com o *t* de *Student* realizado para as produtividades, pois os equipamentos produzem água dessalinizada em condições muito próximas.

Figura 38 - Eficiência na etapa de parametrização para 1,0 cm de lâmina d'água

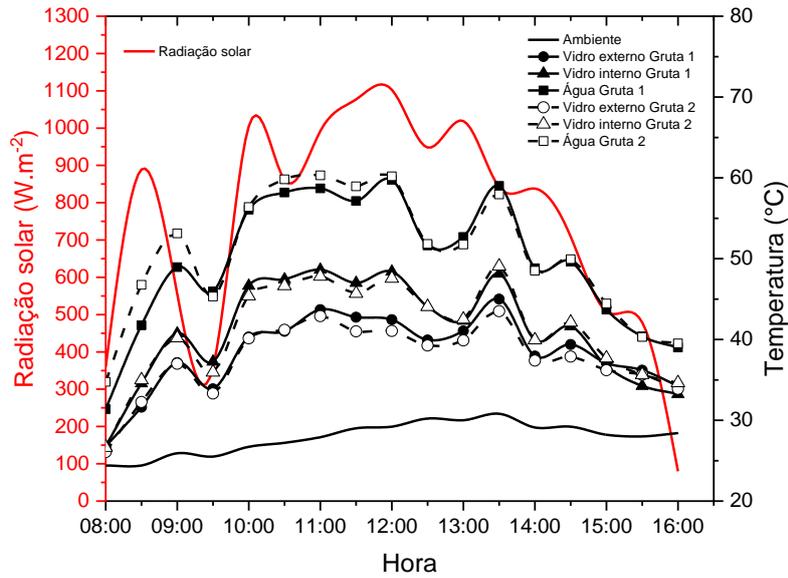


Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme enfatizam as Figuras 37 e 38, os equipamentos são eficientes do ponto de vista do fluxo de energia, dado que transfere parte dessa energia para a massa de água, que, conseqüentemente, evapora, e garante a produtividade do dessalinizador. Silva *et al.*, (2019) também realizou estudos na mesma região com dessalinizadores solares de inclinação única, e chegou a resultados semelhantes.

Com relação as temperaturas medidas no processo de parametrização, as Figuras 39 e 40 apresentam os perfis para a: temperatura ambiente, da área externa e interna da cobertura de vidro, da água para o Gruta 1 e o Gruta 2 com lâminas d'águas de 0,5 cm e 1,0 cm, respectivamente.

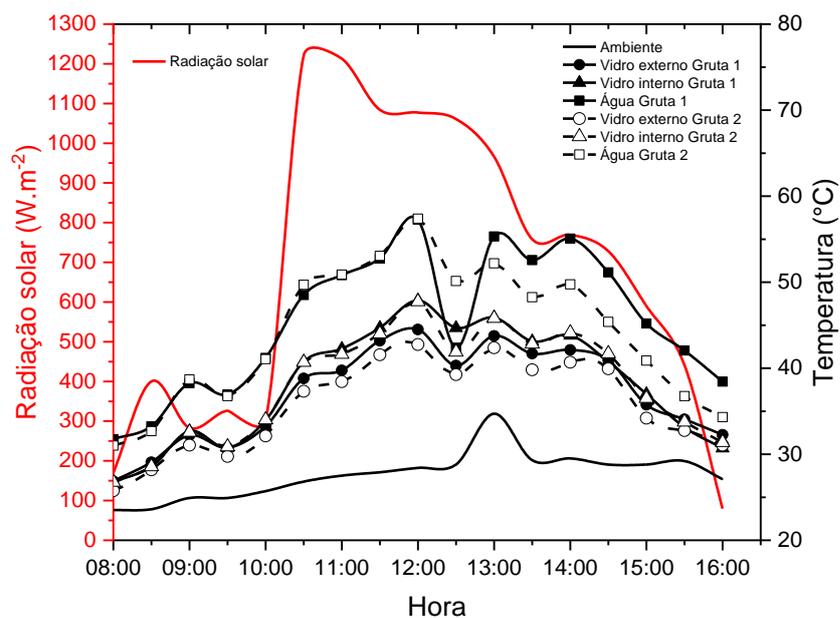
Figura 39 - Perfis de temperatura na parametrização para 0,5 cm de lâmina d'água



Os equipamentos Gruta 1 e Gruta 2 possuem sua produtividade tão próxima que existe sobreposição de curvas nos perfis de temperatura. As temperaturas mais alta são medidas nas águas contidas nas bandejas dos dessalinizadores, seguida das temperaturas internas das coberturas de vidro. O pico da radiação solar ocorre às 12:00, assim como o pico da temperatura da água nos dessalinizadores.

Para a altura de lâmina d'água 1,0 cm a Figura 40 mostra a situação.

Figura 40 - Perfis de temperatura na parametrização para 1,0 cm de lâmina d'água



Como as temperaturas da água do Gruta 1 e do Gruta 2 foram praticamente as mesmas, e pela análise do teste Mann-Whitney, pode-se afirmar que as diferenças estatísticas de produtividade entre os módulos são insignificantes. Após as 14:30h, com acentuada diminuição da radiação solar para índices inferiores à 400W.m^2 , observa-se que os equipamentos apresentam uma acelerada perda de temperatura, consequentemente de produtividade. Ahmed e Alfaylakawi (2012) constaram que a velocidade do vento quando direcionada para a cobertura de vidro favorece a condensação, e, portanto a produtividade do dessalinizador. Por fim, a Figura 41 mostra os módulos em operação.

Figura 41 - Módulos Gruta 1 e 2 em operação



Legenda: a - vista em perspectiva; b - vista frontal
Fonte: Elaborado pelo autor

No final do experimento, constatou-se que o módulo Gruta 1 produziu em média $1,63 \text{ L.m}^2.\text{dia}^{-1}$ e o módulo Gruta 2 produziu em média $1,50 \text{ L.m}^2.\text{dia}^{-1}$. Esta etapa também serviu para consertar vazamentos nos equipamentos, uma vez que no final do segundo dia de experimentos, o módulo Gruta 2 apresentou um pequeno vazamento na calha de recolhimento da água dessalinizada. Informa-se que este problema foi sanado. Singh *et al.* (2019) construiu um dessalinizador solar do tipo pirâmide e relatou pontos de melhorias, como estipular uma parede menor na base do equipamento para evitar sombreamentos.

4.5 Desenvolvimento das melhorias no módulo Gruta 1

Esta etapa apresenta-se como um grande diferencial nas teses em língua portuguesa na área de dessalinização solar, pois além de apresentar os resultados da operação do módulo Gruta 1 acoplado aos tubos evacuados e serpentina de cobre,

mostra todo o processo de construção, o passo-a-passo de como cada item do equipamento foi planejado, construído e operado.

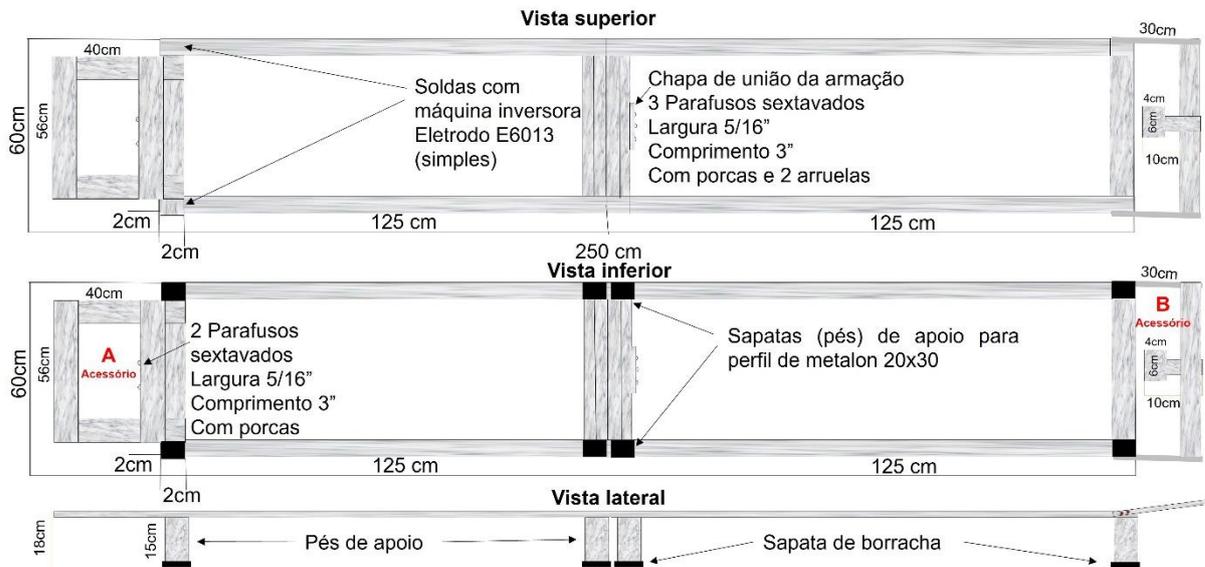
Não foram encontradas teses da área com esse nível de detalhamento, que pode ser entendido como o conhecimento tácito adquirido durante o processo de desenvolvimento deste trabalho. Para Takeuchi e Nonaka (2008) o conhecimento tácito é um dos ativos mais importantes em uma organização, pois é a tradução do saber em experiência prática e real. Quando fala-se em novas tecnologias, o “*Know-How* - saber como” é uma vantagem competitiva que os primeiros desenvolvedores conseguem adquirir por meio da experiência e vivência.

Então, esta tese ensina ao leitor o como fazer um dessalinizador solar, conforme a literatura especializada, de baixo custo e eficiente.

Após o levantamento do estado da arte, por meio da RSL, definiu-se que as melhorias em um dessalinizador solar de baixo custo e fácil operação seria: transformação do equipamento passivo para um equipamento ativo (essa transformação decorre do fato do fornecimento de energia extra ao sistema térmico do dessalinizador); O uso de tubos evacuados para fornecer energia extra ao sistema; Utilização de sistema de recuperação de energia para pré-aquecer a água; Sistema de isolamento térmico e controle da vazão. Não foram adicionados materiais de mudança de fase (PCM), pois potencializavam o aumento dos custos com dificuldades de encontrar esses materiais no comércio local. Os trabalhos de Shafii *et al.* (2017); Sharshir *et al.* (2019); Panchal *et al.* (2020); Kabeel *et al.* (2020); Sharshir *et al.* (2022); Farghaly *et al.* (2023); Eswaran, Subrananiam e Athikesavan (2023) já abordaram a adição de PCM com tubos evacuados aos dessalinizadores solares.

A Figura 42 apresenta a armação do equipamento. Ela foi feita a partir de perfis retangulares de metalon (20x30) mm na chapa 18 mm (espessura de 18mm).

Figura 42 - Armação de metalon



Fonte: Elaborado pelo autor

Assim como no trabalho de Farghaly *et al.* (2023), o perfil de metalon foi escolhido, pois apresenta baixo custo, fácil manuseio e a resistência necessária para suportar o peso do equipamento. O perfil retangular de metalon (20x30)mm na chapa 18 é vendido, por volta de R\$67,00, a peça com 6 metros de comprimento, e, utilizou-se duas peças para desenvolver a armação do equipamento.

Visando a montagem e a mobilidade do equipamento, optou-se por dividir o produto basicamente em:

- 2 retângulos de metalon de medidas externas de 125cm x 60cm;
- Acessório A (retângulo de 56cm x 40cm);
- Acessório B (uma barra de metalon de 60cm de comprimento; duas barras de metalon de 30 cm de comprimento, uma barra de 10cm de comprimento e uma chapa retangular de aço de medidas 6cm x 4cm e espessura 10mm);
- 8 barras de 15cm de comprimento (pés com sapatas de borracha).

Essa divisão possibilita acoplar e desacoplar os retângulos e os acessórios, por meio de parafusos, assim facilitando a movimentação, transporte e guarda.

Então, cortou-se 4 barras de perfil de metalon de comprimento 125cm. Depois, cortou-se mais 6 barras, sendo 4 de comprimento de 56cm, uma com 60cm e a última com 10cm. Utilizou-se um arco de serra com lâmina bimetal de 18 dentes da marca

Starrett. Seguindo, cortou-se mais 4 barras de metalon de comprimento 36cm e 56cm respectivamente, e para os pés e partes do acessório B do equipamento, cortou-se mais oito pedaços de comprimento 15cm e dois com 30cm. Por conseguinte, a armação do equipamento teve as pontas das barras lixadas com uma esmerilhadeira de lixa do tipo *flap* para metais.

Logo em seguida, soldou-se o primeiro retângulo (2 barras de metalon de 125cm, 2 barras de metalon de comprimento 56cm e 4 pés - barras de 15cm), assim, obtendo um retângulo de medidas externas de (125 cm x 60 cm). Posteriormente, soldou-se o segundo retângulo e os acessórios (A e B). O acessório A consiste em um retângulo de (56x40)cm que é acoplado a armação por meio de dois parafusos, sua função é suportar o peso do reservatório de água salobra e pode ser desacoplado da armação para facilitar o transporte. Já o acessório B, corresponde ao suporte dos engates dos tubos evacuados ao tubo de conexão central (conectado por meio de tubos de PVC isolados termicamente, ao reservatório de água salobra). Sua união é feita por meio de 4 parafusos e pode ser desacoplado também para facilitar o transporte.

Para o assoalho, e conforme os trabalhos de Ahsan *et al.* (2013); Kabeel e Abdelgaied (2016) e Kabeel *et al.* (2019b), entre a relação custo/benefício, optou-se pela madeira pinus, pois apresenta baixa condutividade térmica, baixo custo e fácil maneabilidade. Utilizou-se duas pranchas com 3cm de espessura, 30cm de largura e 300cm de comprimento a um custo de R\$70,00 cada. A prancha nessa espessura, garante sustentação e isolamento térmico ao sistema.

Por fim, cortou-se quatro pedaços com 125cm de comprimento. Utilizou-se uma serra circular convencional com disco de espessura de corte de 2,5mm. O assoalho foi parafusado nos perfis de metalon por meio de 20 parafusos do tipo francês rosca completa (3/16" e comprimento 3"), com porcas e arruelas, sendo 10 em cada parte do equipamento. A Figura 43 apresenta a situação.

Figura 43 - Assoalho de madeira

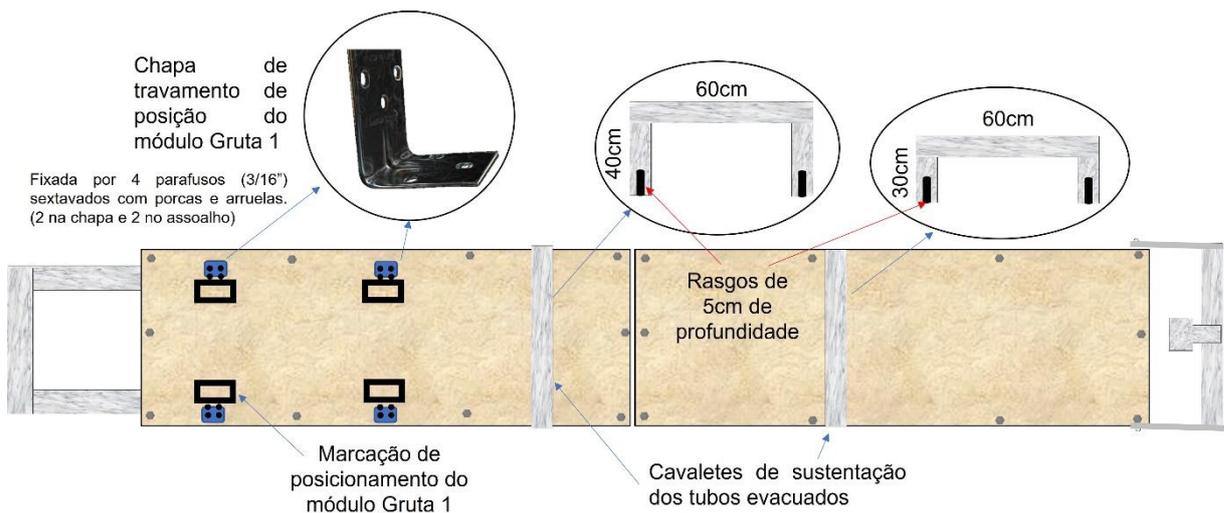


Fonte: Elaborado pelo autor

O assoalho parafusado desta forma permite desmontar o equipamento em duas grandes partes facilitando a movimentação e o transporte. Em síntese, tanto o assoalho de madeira como a armação em metalon foram pintados com tinta zarcão cinza escuro anticorrosão.

Depois, foram cortados mais 6 barras de metalon, sendo-as: duas barras com 60cm; duas barras com 40cm e mais duas com 30cm. Essas barras têm a função de suporte dos tubos evacuados e foram soldadas três peças. Além dessas barras, utilizou-se quatro chapas de aço (espessura 10mm) e de dimensões (8x4)cm em formato de “L” para ter a função de prendedores do módulo Gruta 1 ao assoalho do equipamento. A Figura 44 apresenta as situações.

Figura 44 - Chapa de apoio e cavaletes

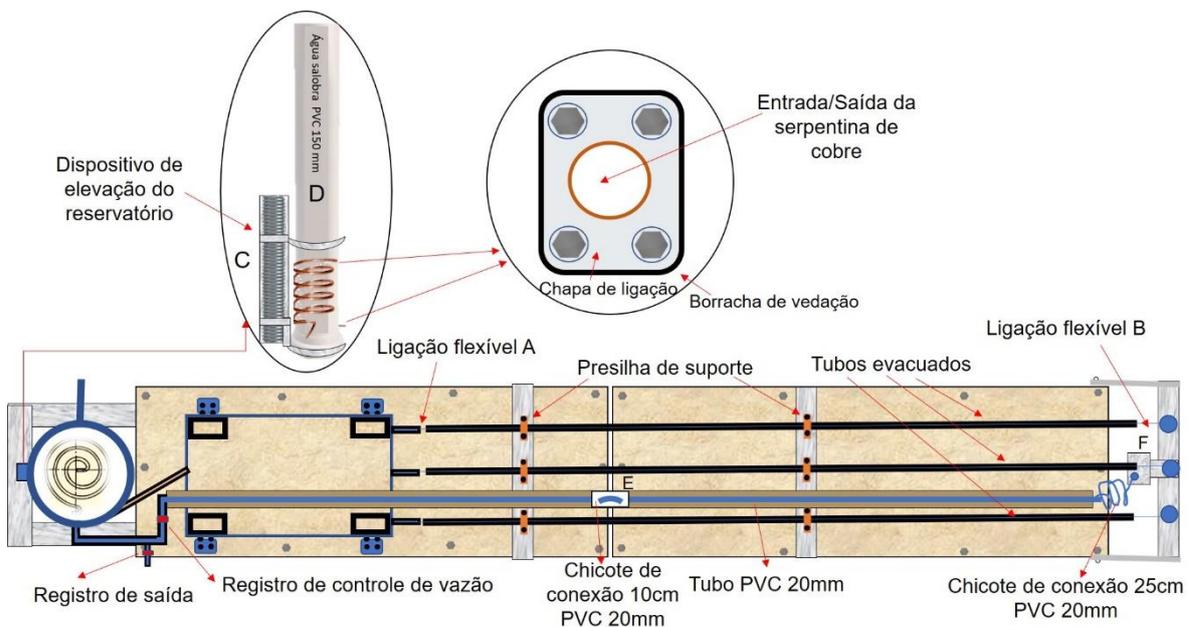


Fonte: Elaborado pelo autor

Os cavaletes são acoplados a armação por meio de 2 parafusos sextavados (1/4” e de comprimento 2”) em cada lado, com uma porca e duas arruelas cada, e, possuem um rasgo central com profundidade de 5cm, em ambos os lados, para

possíveis ajustes de altura dos tubos evacuados. Adiante, o módulo Gruta 1 foi acoplado ao equipamento, assim como os tubos evacuados, o encanamento de PVC e o reservatório de água salobra com a serpentina de cobre. A Figura 45 apresenta a situação.

Figura 45 - Gruta 1 acoplado vista superior



Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com a Figura 45, tem-se:

- **Ligação flexível A:** feita por meio de uma mangueira $\frac{1}{2}$ " por dentro de outra mangueira $\frac{3}{4}$ " ligando os tubos evacuados com a base do Gruta 1. Usa-se duas abraçadeiras de aço 50mm para prender as mangueiras. Permite uma ligação flexível, fácil e removível;
- **Ligação flexível B:** feita da mesma forma do que a ligação flexível A, porém liga os tubos evacuados com o "T" de distribuição da água salobra que conecta-se ao encanamento de PVC que origina-se do reservatório de água salobra;
- **C:** dispositivo de elevação que consiste em uma barra rosqueada ($\frac{5}{8}$ ") com 40cm de comprimento fixada, em dois pontos, em uma barra de metalon de 40 cm. Além disso, foram soldados dois prendedores (inferior e superior) para fixar o reservatório de água salobra. A barra possui uma porca soldada na parte superior, e, cada volta na porca possibilita elevar ou declinar, em cerca de 1mm, o reservatório de água salobra. O dispositivo permite o controle fino da coluna de água (lâmina d'água) dentro do módulo Gruta 1, permite até 20cm de ajuste);

- **D:** reservatório de água salobra (tubo de PVC de 150mm e comprimento 1m) que está conectado, por meio de um tubo de cobre de ¼” com a saída da calha do módulo Gruta 1. Recebe a água dessalinizada quente que entra no reservatório e percorre a serpentina de cobre, de ¼” e comprimento de 1,5m, e troca calor com a água salobra fria. O reservatório possui uma saída de água dessalinizada fria. As águas salobras e dessalinizadas não se misturam e o reservatório tem o volume de $\approx 17,8L$, para água fria, e de $\approx 0,036L$ (36 mililitros) para água quente. Tanto a entrada de água dessalinizada quanto a sua saída, foram feitas utilizando quatro chapas de aço (5x5)cm que seguem a curvatura do tubo de PVC, uma lado interno e outra lado externo do tubo, fixadas por meio de 4 parafusos sextavados de ¼” com duas porcas e duas arruelas cada par de chapa. Ainda, utilizou-se uma manta de borracha de espessura de 3mm, nas dimensões das chapas, para ajudar na vedação;
- **E:** chicote de conexão 10cm, que permite conectar a parte 1 do equipamento com a parte 2. Desta forma, facilita o transporte e ajuste do equipamento;
- **F:** conexão “T” que recebe a água salobra do chicote de conexão 25cm e distribui para os três tubos evacuados. Este chicote possui 25cm para facilitar o ajuste da conexão, pois, pode-se alterar o ângulo dos tubos evacuados, então, é impercebível que o conector seja flexível;
- **Registros:** o equipamento possui dois registros, sendo-os: registro para controle “grosso” de vazão” (que permite controlar a entrada de água no tubo de PVC até chegar no módulo Gruta 1, e assim, fechar/abrir a passagem da água); registro de saída, que permite esvaziar o reservatório de água salobra e todo o equipamento;
- **Presilhas de suporte:** ao todo são 6 presilhas que prendem os três tubos evacuados nos dois cavaletes de sustentação. Usa-se dois parafusos sextavados de ¼”, de comprimento 6,35cm, com porcas e arruelas em cada presilha.

O Quadro 7 detalha as partes do equipamento mostrando, por meio de imagens reais, o como foi projetado, construído e conectado ao Gruta 1, as melhorias, tubos evacuados, reservatório de água salobra, tubos de PVC e outros.

Quadro 7 - Detalhamento do projeto

Esquemática geral



- 1 - Reservatório de água salobra**
 A1: Prendedor superior.
 A2: Prendedor inferior.
 B1: Suporte de encaixe do reservatório.
 C: Saída de água salobra.
 D: Registro de saída.
 E: Registro de controle fino de vazão.
 F: Gruta 1.
 G: Saída de água quente dessalinizada para trocar calor na serpentina de cobre.
 H: Saída de água fria dessalinizada.
 I: Radiômetro.



2 - Registros de controle

A: Saída de água salobra.
 B: Entrada de água salobra nos Tubos de PVC.
 C: Registro de saída.
 D: Registro de controle fino de vazão.
 E: Prendedores da tubulação de PVC (Tubulação está a 2 cm de altura).



3 - Assoalho

A: Armação de metalon parte 1.
 B: Armação de metalon parte 2.
 C: Assoalho de madeira.
 D: Chapa e parafusos de união da armação.
 E: Chapa e parafusos de união da armação.



4 - Módulo Gruta 1

A: Saída de água dessalinizada quente.
 B: Pirâmide de vidro (condensador).
 C: Entrada de água salobra pré-aquecida pelos tubos evacuados e pela serpentina de cobre.



5 - Tubulação de PVC; 6 - Cavaletes de suporte; 7 - Acessório B

A: Os cavaletes de suporte permitem o ajuste de altura do ângulo.
 B: O acessório B permite alterar o ângulo para encaixar os tubos evacuados.
 C: Tubulação de PVC com isolamento térmico.



**8 - Ligação flexível A
 9 - Ligação flexível B
 10 Conexão "T"**

A: A ligação flexível A permite desmontar e desconectar facilmente as partes 1 e 2 do equipamento.

B: A ligação flexível B conecta a tubulação ao "T" de distribuição que alimenta os tubos evacuados. Todas as conexões foram feitas com tubos de PVC 20mm, nips e joelhos.

C: Trata-se de um T feito de metalon que serve de suporte para os tubos e conectores de PVC.



<p>11 e 12 - Entradas e saídas dos tubos evacuados</p> <p>A: Conectores dos tubos evacuados ao "T" de distribuição.</p> <p>B: Conectores dos tubos ao módulo Gruta 1.</p> <p>C: Sensor de temperatura.</p>	
<p>13 - Saída da água dessalinizada, 14 - Saída da água dessalinizada fria</p> <p>A: Saída do módulo Gruta 1.</p> <p>B: Conector redutor de tubo 1/2" para 1/4".</p> <p>C: Tubo de cobre de 1/4" curvado de ligação.</p> <p>D: Chapa de ligação que permite a troca de calor sem a mistura dos líquidos.</p> <p>E: Nip de conexão de cobre 1/4" que liga-se a entrada da serpentina de cobre.</p>	 <p>F: Isolamentos térmicos colocados em todo o sistema.</p> <p>G: Saída da água dessalinizada fria, após trocar calor, pela serpentina de cobre, com a água salobra.</p>
<p>15 - Gruta 2</p> <p>A: Módulo Gruta 2 em operação.</p> <p>B: Módulo Gruta 1, em operação, acoplado às melhorias.</p>	

4.6 Resultados da operação do módulo Gruta 1 e suas melhorias

Inspirado nos trabalhos de Elango, Gunasekaran e Sampathkumar (2015); Avallone (2017); Conserva (2023); Silva *et al.* (2023) e Viana *et al.* (2023) foram definidos os pontos de medição de temperatura no equipamento e os locais de medição das variáveis climáticas. O Quadro 8 resume as informações.

Quadro 8 - Posicionamento dos termopares no equipamento

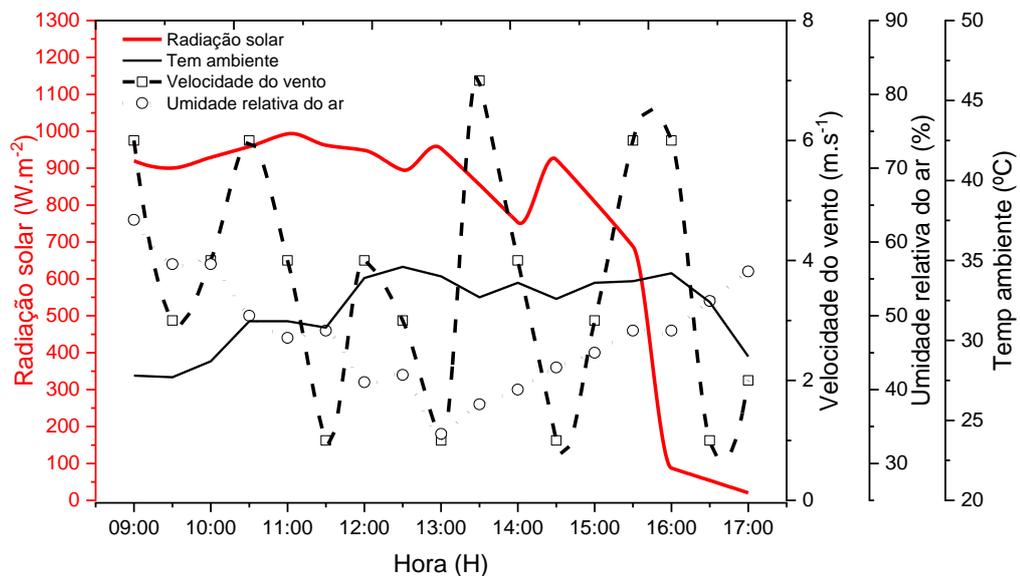




Fonte: Elaborado pelo autor

O módulo Gruta 1 acoplado as melhorias e o módulo Gruta 2 (dessalinizador solar convencional) foram operados nas datas de: 31/10/2023 com altura da lâmina d'água de 0,5 cm; e 01/11/2023 com altura da lâmina d'água de 1,0 cm. A Figura 23, na página 57, já apresentou e resumiu os parâmetros atmosféricos desse período. E, as Figuras 46 e 47 mostram os dados sobre as horas de operação, a radiação solar, velocidade do vento, umidade relativa do ar e a temperatura ambiente.

Figura 46 - Dados ambientais para 0,5 cm de lâmina d'água



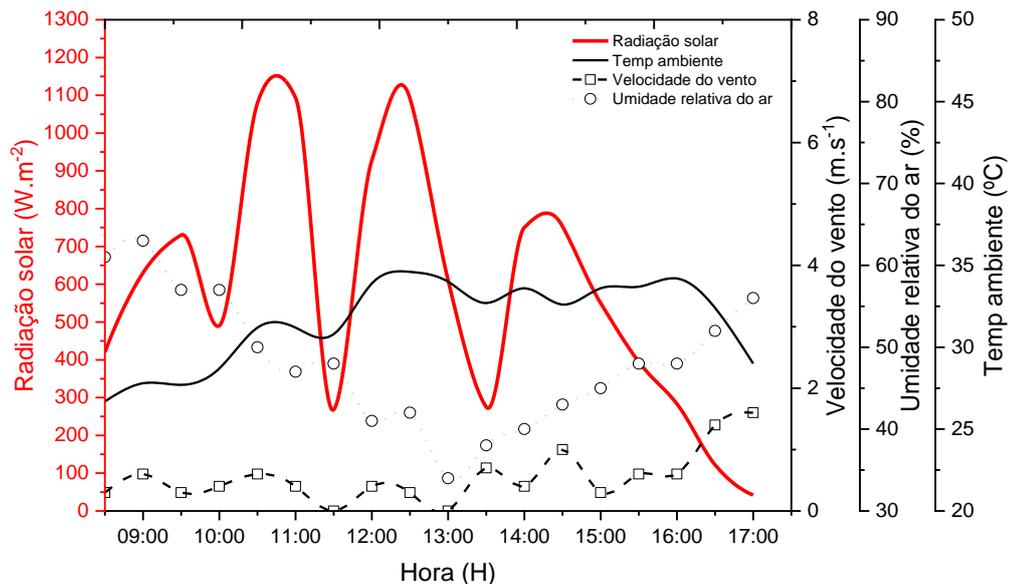
Fonte: Elaborado pelo autor

Os picos da radiação solar, em ambos os dias, ocorreram entre as 11 horas da manhã até às 12:30, em que, no dia 01 de novembro marcou o maior valor, sendo

este de $1.093\text{W}/\text{m}^2$. No dia 31 de outubro, chama-se atenção que os valores medidos da radiação solar foram elevados desde as primeiras horas do experimento, e a umidade relativa do ar apresentou-se extremamente baixa marcando 26%, que segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS), representa estado de atenção à saúde.

No dia 31 de outubro a temperatura ambiente chegou a marca impressionante de $41,30^\circ\text{C}$, porém, lembra-se ao leitor que o sensor estava exposto diretamente a radiação solar. Este dia apresentou condições extremamente favoráveis aos equipamentos de dessalinização solar, pois combinou elevada radiação solar, baixa umidade relativa do ar e velocidade do vento, e, por fim, temperatura ambiente elevada (Velmurugan; Srithar, 2011). A Figura 47 mostra a situação as condições ambientais para a operação com a lâmina d'água de 1cm.

Figura 47 - Dados ambientais para 1,0 cm de lâmina d'água

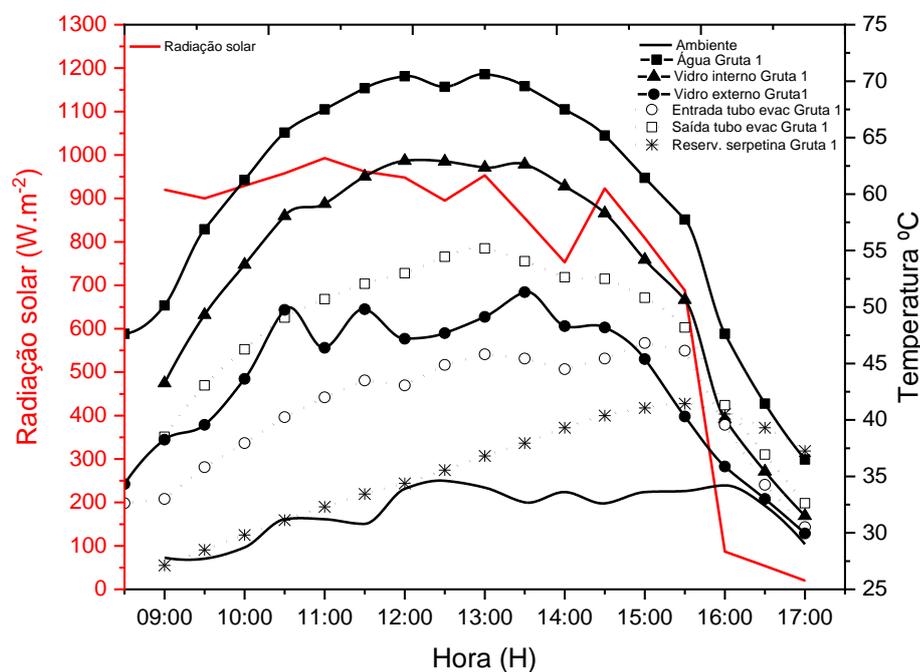


Fonte: Elaborado pelo autor

Neste dia de operação, ocorreu grandes variações na exposição a radiação solar devido a nebulosidade. Conserva (2023) também relatou situações semelhantes quando realizou seus trabalhos de dessalinização na mesma região. Foram realizadas 18 medições e no dia 31 de outubro, com lâmina d'água de 0,5cm, precisou-se realizar diversas calibrações no registro de vazão do sistema do Gruta 1, o que indica maior vazão e conseqüentemente, maior produção de água dessalinizada (Arunkumar *et al.*, 2019).

As Figuras 48 e 49 mostram os perfis de temperatura do Gruta 1 e Gruta 2 com a lâmina d'água de 0,5cm e as Figuras 50 e 51 mostram os perfis de temperatura com a lâmina d'água de 1 cm, respectivamente. Notou-se um aumento gradativo de todas as temperaturas conforme a hora se aproximava do meio dia. Contudo, e muito próximo dos resultados encontrados por Silva *et al.* (2023), a maior temperatura foi registrada pelo sensor termopar C (conforme o Quadro 8), em que este foi responsável pela medição da temperatura da água na bandeja do dessalinizador.

Figura 48 - Perfis de temperatura Gruta 1 com lâmina d'água 0,5cm

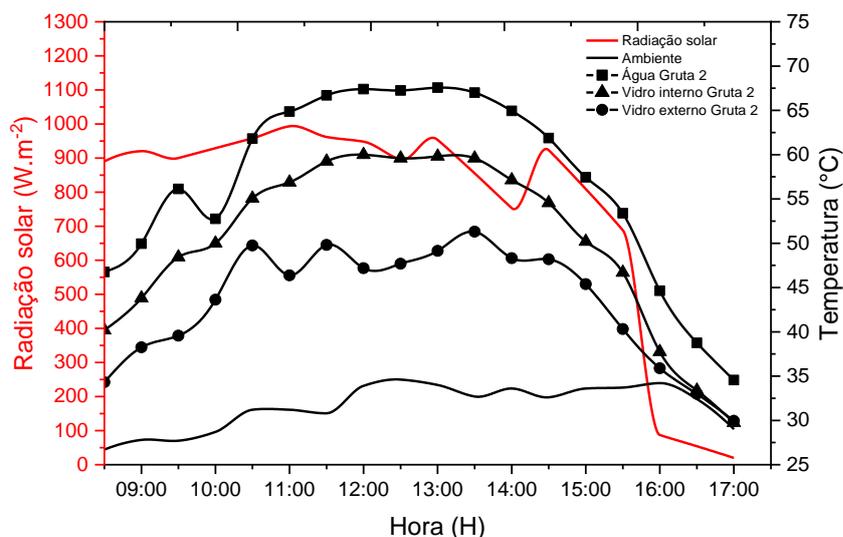


Fonte: Elaborado pelo autor

A temperatura da água na bandeja do dessalinizador Gruta 1 foi, em média, 2,8°C a mais do que a temperatura da água na bandeja do dessalinizador Gruta 2. Tal fato, indica que o sistema do Gruta 1 ganhou mais energia, ou seja, calor latente. Cardoso *et al.* (2020) e Conserva (2023) também encontraram resultados semelhantes para a temperatura da água na bandeja utilizando sistemas semelhantes. Também é possível notar o ganho de calor entre a entrada do tubo evacuado e a saída, em que o ganho médio de temperatura foi superior a 6°C.

A Figura 49 mostra os perfis de temperatura do Gruta 2 com 0,5 cm de lâmina d'água.

Figura 49 - Perfis de temperatura Gruta 2 com lâmina d'água 0,5cm



Fonte: Elaborado pelo autor

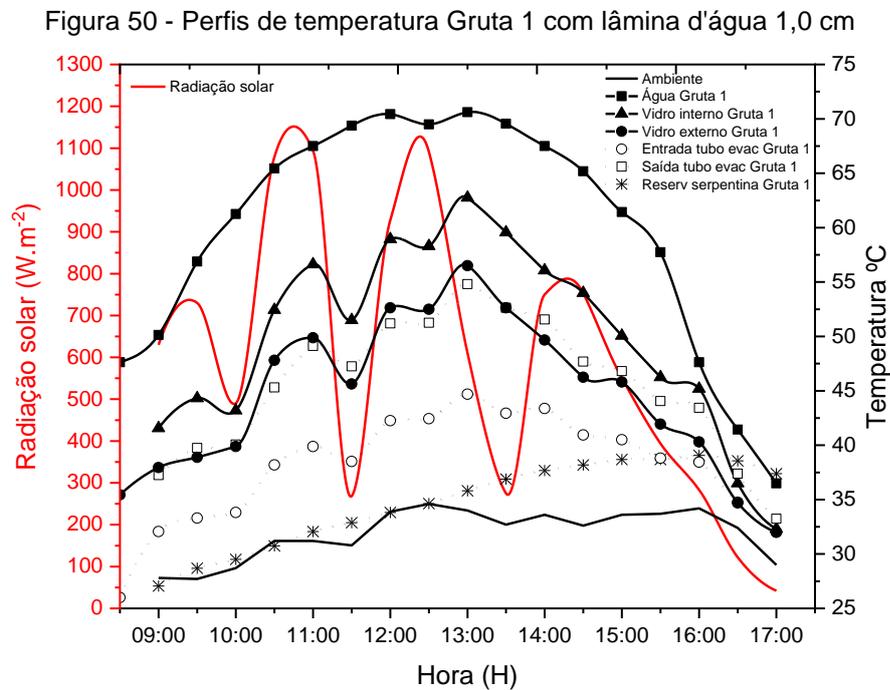
Ambos dessalinizadores começaram a operar com temperaturas praticamente iguais, mas, conforme o Gruta 1 ganhava mais calor pelos tubos evacuados, o processo de dessalinização era mais produtivo. Pois, o calor extra acelerou o processo de produção do destilado. Em média, entre a entrada de água salobra com o sistema de recuperação de calor, até a saída dos tubos evacuados, constatou-se um ganho superior a 8 °C, e mesmo após às 16 horas (com baixa radiação solar), a temperatura do reservatório de água salobra subiu para mais de 36 °C em todos os dias de operação. Conserva (2023) também constatou esse aumento da temperatura após às 16 horas, e tal fato, corrobora com a premissa de que o calor gerado pelo processo de dessalinização pode ser reaproveitado para pré-aquecer a água antes de entrar no sistema de dessalinização. Assim, tornando o equipamento mais eficiente.

Conforme o Gruta 1 produzia, este recuperava mais calor pela serpentina de cobre, e aumentava a temperatura no reservatório de água salobra, assim, o pico da radiação solar, que aconteceu ente às 11 até às 12 horas, não foi o momento de maior contribuição do sistema de recuperação de calor. Este momento ocorreu após as 15 horas, dado que os índices de radiação solar já estavam decrescentes e o dessalinizador continuava a produzir com o calor acumulado pelo agrupamento dos sistemas (recuperação de calor e tubos evacuados).

O dessalinizador Gruta 1 conseguiu atingir picos de temperaturas, para a água na bandeja, superiores a 70°C. Elashmawy (2017); Al-harshsheh *et al.* (2018);

Eswaran; Subrananiam; Athikesavan (2023); Farghaly *et al.* (2023) obtiveram resultados parecidos para a temperatura da água nas bandejas dos dessalinizadores com sistemas similares e condições climáticas semelhantes.

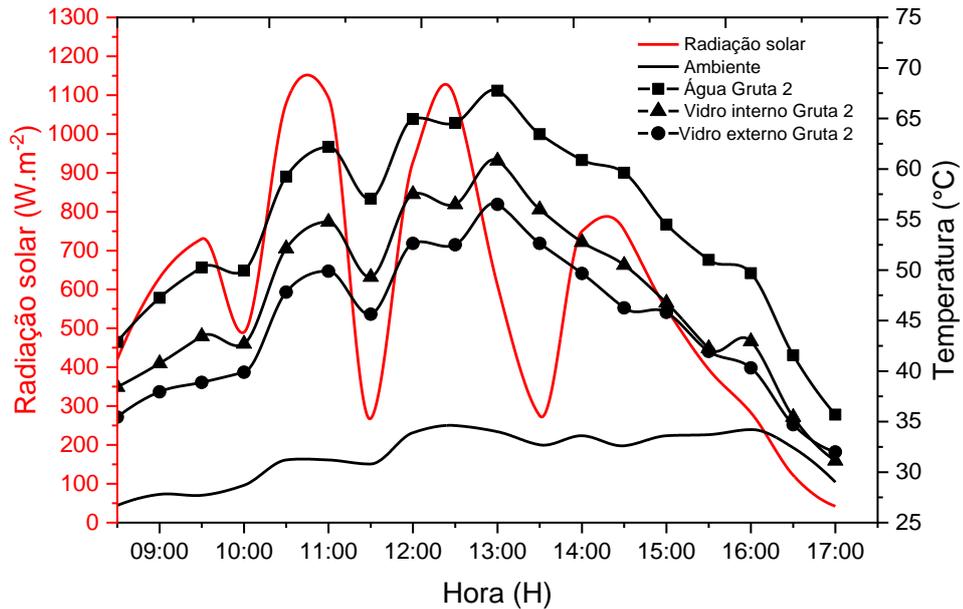
Sobre a altura da lâmina d'água, notou-se que a lâmina de 0,5cm consegue ser mais eficiente do que com uma coluna de água maior na bandeja do dessalinizador. Corrobora para esta afirmação o fato de que com a lâmina de 0,5cm, o Gruta 1 conseguiu uma produção diária, por metro quadrado, de 2,695 litros, e, para uma lâmina d'água de 1cm a produção diária, por metro quadrado, foi de 1,521 litros. As Figuras 50 e 51 apresentam os dados para a lâmina d'água de 1cm.



Fonte: Elaborado pelo autor

Apesar da nebulosidade interferir na radiação solar, o comportamento esperado para o Gruta 1 foi novamente constatado, dado que conforme os índices de radiação solar aumentavam, aumentavam também os valores dos perfis de temperatura, e, conseqüentemente a produtividade. A Figura 51 representa os perfis de temperatura do Gruta 2 com lâmina d'água de 1 cm.

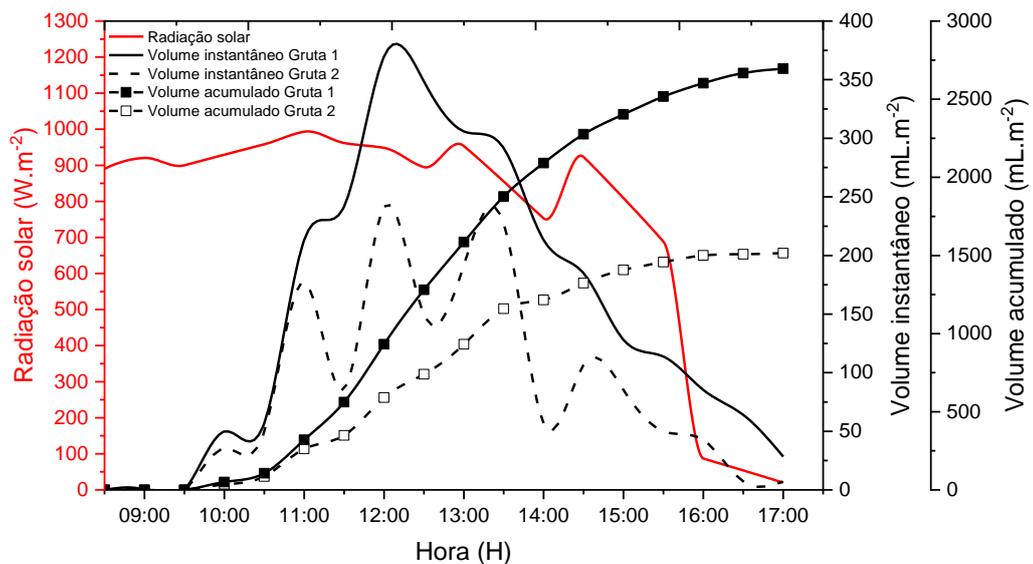
Figura 51 - Perfis de temperatura Gruta 2 com lâmina d'água 1,0 cm



Fonte: Elaborado pelo autor

Na comparação da produção de água dessalinizada entre o Gruta 1 (dessalinizador modificado) e o Gruta 2 (dessalinizador convencional), observa-se que, nas datas de operação de 31 de outubro e 1 de novembro, o Gruta 1 atingiu 2,695 litros e 1,521 litros, e o Gruta 2 foi de 1,514 litros e 0,839 litros respectivamente. As Figuras 52 e 53 mostram as produtividades dos Grutas 1 e 2 para as lâminas d'água de 0,5cm e 1cm, respectivamente.

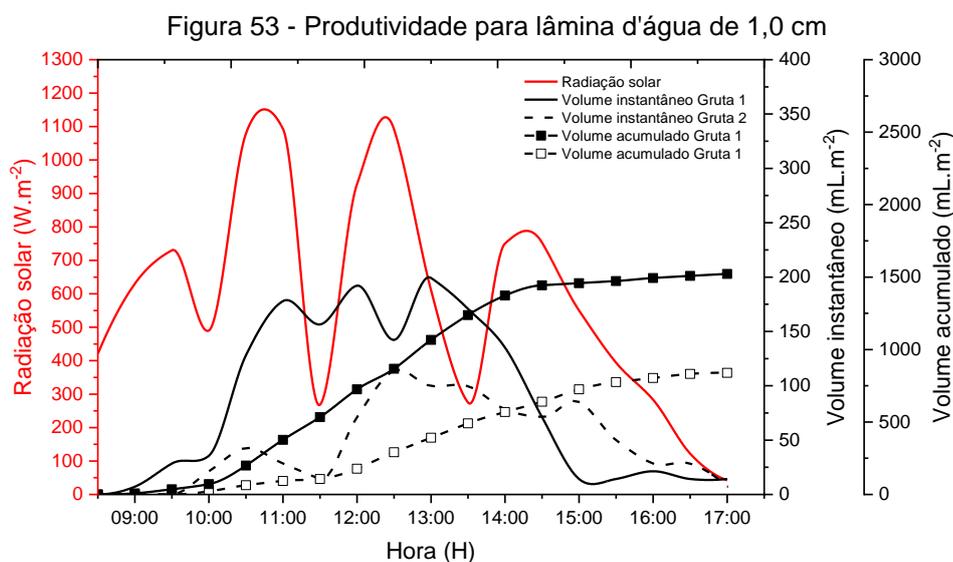
Figura 52 - Produtividade para lâmina d'água de 0,5cm



Fonte: Elaborado pelo autor

Os dados permitem observar que o processo de dessalinização do Gruta 1 inicia com a mesma produtividade do Gruta 2, porém, ganha energia térmica rapidamente, e conforme produz água dessalinizada, mais energia ele recupera, assim, sendo mais eficiente do que o Gruta 2. Faegh e Shafii (2017) chegaram em resultados próximos, porém potencializam o acúmulo de calor utilizando materiais de mudança de fase.

Às 10:00 da manhã e começando o pico da radiação solar, o Gruta 1 consegue ganhar mais calor e acumular essa energia de forma mais rápida devido aos tubos evacuados e o sistema de recuperação de calor. El-nashar (2019) conseguiu atingir 30% mais produtividade em seu dessalinizador modificado com tubos evacuados do que um dessalinizador convencional, e, Kabeel *et al.* (2019a) chegaram em números superiores a 40% de ganho de produtividade. A Figura 51 mostra a produtividade para a lâmina d'água de 1 cm. O Gruta 1 produziu 1,51 L e o Gruta 2 produziu 0,839 L, e mais uma vez o Gruta 1 foi mais produtivo.

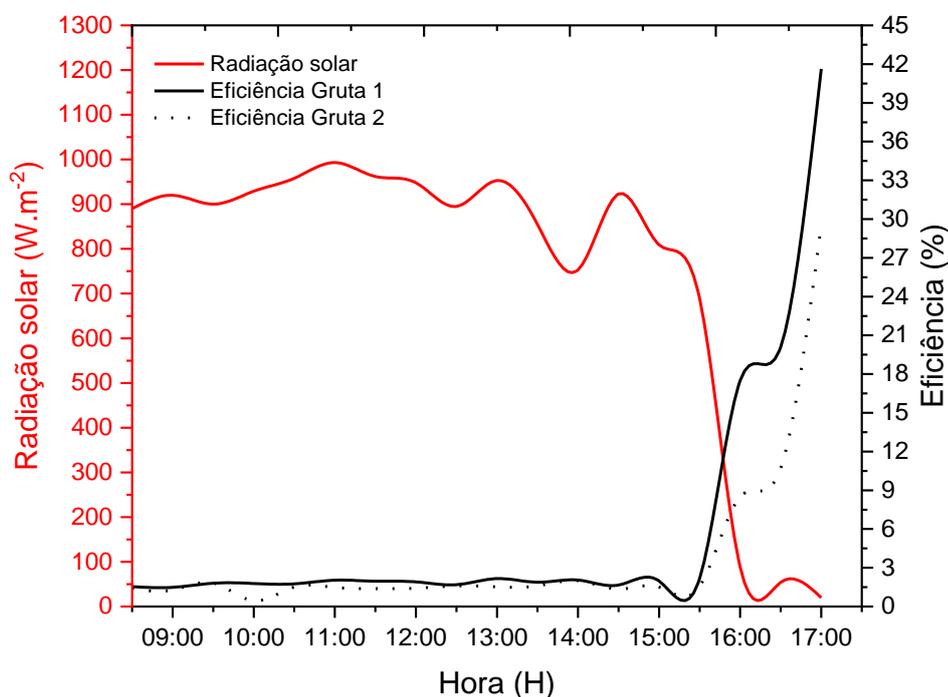


Fonte: Elaborado pelo autor

No trabalho de Fang, Mu e Wenrong (2021) a produtividade alcançada foi de $2,5 \text{ L.m}^{-2}.\text{D}^{-1}$ utilizando refletores solares para potencializar o ganho de energia. No estudo de Abdullah *et al.* (2020) a produtividade superou os $4,5 \text{ L.m}^{-2}.\text{D}^{-1}$, porém fazendo a combinação de refletores solares e espelhos internos e externos no dessalinizador. Quando compare-se a produtividade com outros equipamentos de dessalinização solar acoplados a tubos evacuados, como o trabalho de Karuppusamy (2012), nota-se que o Gruta 1 é um equipamento produtivo.

Em relação a eficiência, o Gruta 1 superou os 41% de eficiência, já o Gruta 2 alcançou 29% de eficiência, ambos com lâmina d'água de 0,5 cm. Quando compara-se o Gruta 1 com outros equipamentos semelhantes, como os dessalinizadores solares de Bhardwaj, Kortenaar e Mudde (2015); Kumar, Esakkimuthu e Murugavel (2016); Yousef, Hassan e Sekiguchid (2019); Yousef et al. (2019); Yousef e Hassan (2019b) e Fang, Mu e Wenrong (2021), o Gruta 1 apresentou eficiência maior. A Figura 54 mostra as eficiências para lâmina d'água de 0,5 cm.

Figura 54 - Eficiência final para lâmina d'água de 0,5 cm

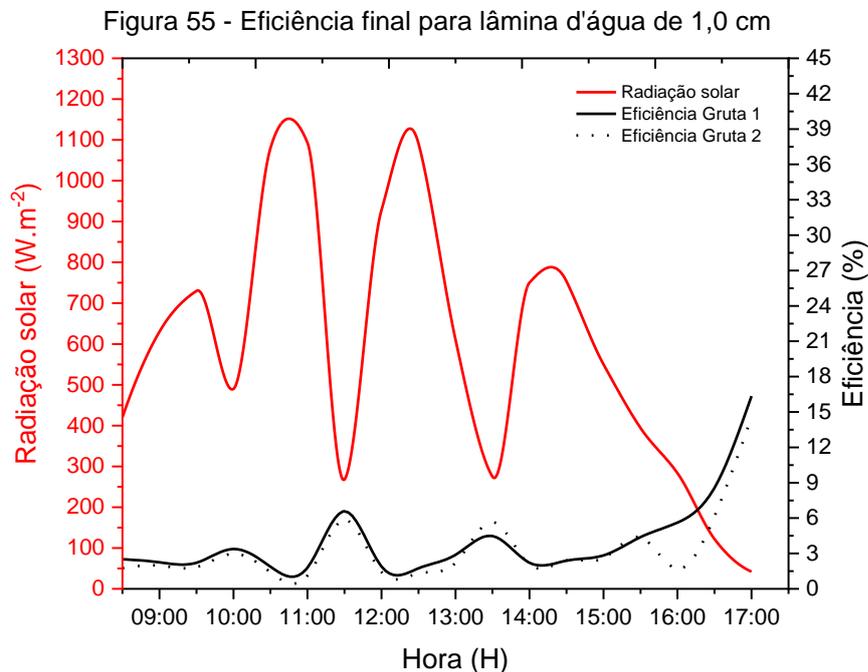


Fonte: Elaborado pelo autor

Para a lâmina d'água de 1cm, as eficiências diminuíram, ou seja, quanto maior a lâmina d'água, menos eficientes eram os dessalinizadores. Arunkumar *et al.* (2019) e Kumar, Esakkimuthu e Murugavel (2016) já afirmavam que quanto menor a coluna d'água, maior a probabilidade do equipamento ser eficiente.

A Figura 55 mostra as eficiências para lâmina d'água de 1cm. Novamente o Gruta 1 foi mais eficiente alcançando mais de 16%, contra os 14% do Gruta 2. A nebulosidade interferiu significativamente na operação. Porém, os experimentos mostraram que quanto menor a lâmina d'água, maior a eficiência. Cheng, Huo e Niam (2019) e Yousef e Hassan (2019b) chegaram em números próximos à 25% de

eficiência empregando materiais de mudança de fase para acumular mais calor, e, conseqüentemente mais energia no sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme a Equação 2, o conjunto de tubos evacuados potencializou o ganho de calor, em média, de cerca de $24 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, já contabilizando as perdas por condução, convecção e radiação. Diferente do trabalho de Faegh e Shafii (2017), esta quantificação considerou a área útil de exposição à radiação solar do tubo evacuado como sendo ($1/2$ da área total do tubo = $0,078\text{m}^2$), dado que o mesmo somente recebe energia na superfície que está exposta diretamente a radiação solar. Adotou-se 0,78 para a emissividade do cobre pintado com tinta preta fosca.

Os Anexos B e C apresentam, em forma de gráfico, os cálculos do calor latente; das pressões parciais do vapor de saturação d'água; pressões parciais do vapor de saturação d'água na superfície interna do vidro de cobertura e dos coeficientes de transferência de calor: internos; externos; de perda superior e perda inferior e pelas laterais para as lâminas d'água de 0,5 cm e 1,0 cm respectivamente.

De acordo com os Anexos A e B, nota-se que o Gruta 1 perde menos calor do que o Gruta 2. Tal fato corrobora para afirmar que o sistema de recuperação de calor consegue manter a temperatura do Gruta 1 mais alta, por muito mais tempo, do que o Gruta 2, pois, a energia que seria perdida para o ambiente pré-aquece a água

salobra antes de entrar nos tubos evacuados. A energia acumulada pelo sistema de recuperação de calor foi um achado impressionante, devido que a temperatura na serpentina de cobre continuou aumentando e teve seu pico às 16:00 horas (como evidenciou as Figuras 48 e 50), mostrando que quanto mais o Gruta 1 produzia, mais energia térmica passava pela serpentina de cobre e pré-aquecia a água. Kabeel, Abdelaziz e El-Said (2019) e Yousef e Hassan (2019a) conseguiram efeitos parecidos, porém utilizando materiais de mudança de fase. Em relação as análises físico-químicas, novamente como na etapa de parametrização, a Tabela 4 apresenta os dados.

Tabela 4 - Resultados das análises físico-químicas finais

Parâmetro	Água bruta	Água dessalinizada							
		Gruta 1 (0,5cm)		Gruta 2 (0,5cm)		Gruta 1 (1cm)		Gruta 2 (1cm)	
		Med.	Redução %	Med.	Redução %	Med.	Redução %	Med.	Redução %
Condutividade elétrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	2024	8,16	99,60%	3,4	99,8%	3,4	99,83%	2,73	99,87%
pH	7,6	6,09	-	6,52	-	6,75	-	6,95	-
Turbidez (NTU)	5	3	40,00%	3	40,0%	3	40,00%	2	60,00%
Cloretos ($\text{mg Cl}^{-1}\cdot\text{L}^{-1}$)	440,2	7,1	98,39%	7,1	98,4%	7,1	98,39%	7,1	98,39%
Dureza ($\text{mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$)	330	0,1	99,97%	0	100,0%	0	100,00%	0	100,00%
Alcalinidade ($\text{mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$)	286	15	94,76%	12,01	95,8%	12,3	95,70%	12	95,80%
Sódio ($\text{mg Na}^{+}\cdot\text{L}^{-1}$)	390	3	99,23	2	99,48	2	99,48	2	99,48
Potássio ($\text{mg K}^{+}\cdot\text{L}^{-1}$)	1	1	-	0	100	0	100	0	100

Fonte: Elaborado pelo autor

Em relação a condutividade elétrica, novamente o Gruta 1 e o Gruta 2 foram capazes de reduzir de $2024 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ da água bruta para, em média $8,16 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$; $3,4 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$; $3,4 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$; $2,73 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ respectivamente. Tanto o pH quanto a turbidez alcançaram níveis conforme a Portaria GM/MS nº 888, 4 de maio de 2021, em que os valores estão dentro da faixa recomendada para água potável.

Para as concentrações de íons cloretos, as reduções foram superiores a 98% em ambos os módulos, e, em relação a dureza, os índices praticamente zeraram. Já a alcalinidade, observa-se que os módulos Gruta 1 e 2 foram capazes de reduzir em mais de 95% o valor desse parâmetro da água bruta. As concentrações de sódio foram reduzidas em mais de 99% e as de potássio praticamente zeraram. Então, pode inferir que tanto o Gruta 1 quanto o Gruta 2 são eficientes na purificação de água do ponto de vista dos parâmetros físico-químicos, assim como a maior parte dos dessalinizadores solares citados neste trabalho, como evidenciou a Tabela 2.

4.7 Resultados da avaliação econômica

Conforme Barton, Love e Taylor (2001) os custos de um projeto de produto representam 70% dos custos do produto. Neste projeto, o custo estimado de desenvolvimento, construção e operação do Gruta 1 e 2 foi de R\$5.000,00.

Desse valor, R\$1.750,00 (35%) foram gastos para a construção do Gruta 1. Dos R\$3.250,00 restantes do orçamento particular do projeto, foram gastos com materiais, testes, mão de obra, transporte e deslocamento, frete, alimentação e impostos.

Desse modo, como este trabalho utilizou os conceitos da cultura “*Do It Yourself - D.I.Y*”, “Faça você mesmo”, projetou-se o equipamento para que fosse possível sua construção com o mínimo de mão de obra especializada, dado que boa parte do equipamento pode ser construído e adquirido por uma pessoa sem, necessariamente, perícia na área.

É importante frisar que o custo de produção não é o custo de desenvolvimento do equipamento. Então, de acordo com as equações (25 a 30), elaborou-se a avaliação econômica demonstrada no Tabela 5.

Tabela 5 - Análise econômica

Variável	Valor	Definição
<i>FC</i>	R\$1.750,00	Custo fixo ou de desenvolvimento do protótipo
<i>AFC</i>	R\$192,50	Taxa fixa anual do dessalinizador
<i>k</i>	0,11	Fator de recuperação de capital
<i>i</i>	12% ao ano	Juros por ano conforme Ranjan e Kaushik (2016)
<i>n</i>	10 anos	Vida útil do equipamento (10 anos)
<i>AMC</i>	R\$28,87	Custo anual de manutenção e operação do sistema);
<i>SV</i>	R\$350,00	Amortização do custo fixo em 20%);
<i>ASV</i>	R\$31,50	Valor residual anual);
<i>mágua</i>	852,73 Litros/ano	$2,66 \text{ L.m}^{-2}.\text{D}^{-1} \times (365-48)$
Dias de operação	317 dias	Produção diária = $2,66 \text{ L.m}^{-2}$
Pausas anuais	48 dias	Estimativa de paradas para manutenção
<i>CPL</i>	R\$0,22	Custo por litro da água dessalinizada

Fonte: Elaborado pelo autor

O custo médio anual de um litro de água dessalinizada (*CPL*) foi de R\$0,22. Resultado esse muito semelhante aos custos, atualizados para 2024, dos trabalhos de Ranjan e Kaushik (2016) que foi de R\$0,23. No trabalho de Karuppusamy (2012) o custo foi de R\$0,22 por litro, já no estudo de Kumar, Dubey e Tiwari (2014) o custo foi de R\$0,27; no trabalho de Kabeel e Abdelgaied (2016) o custo do litro foi de R\$0,25; no estudo de Al-harahsheh *et al.*, (2018) o custo por litro foi de R\$0,33 e, no estudo de Fang, Mu e Wenrong (2021) o custo por litro foi de R\$0,25. Comparando-se as tecnologias empregadas pelos autores citados, e atualizando todos os custos para o ano de 2024, observa-se que o custo do litro de água purificada pelo Gruta 1 é compatível com equipamentos semelhantes.

Então, como um equipamento que tem o objetivo de purificar água para dessedentação humana, em regiões de escassez hídrica e de vulnerabilidade social, a produção de $2,66 \text{ L.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ é extremamente relevante, dado que possuir quase 3 L de água purificada em um lugar onde não existe essa disponibilidade, é, garantir a sobrevivência de um indivíduo.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

Este trabalho se propôs estudar um tema dentro da área da engenharia ambiental, que é a água. Uma vez dentro deste tema, a tese delineou-se para estudar formas sustentáveis e acessíveis para tornar viável o acesso a água purificada em locais que este recurso é extremamente escasso.

Então, apresentou a dessalinização solar, a qual é uma técnica que pode minimizar as dificuldades do acesso a água purificada em regiões, onde este recurso é insuficiente, o poder econômico local é frágil e o poder governamental é deficitário.

Por consequência, este trabalho definiu como seu objetivo projetar um dessalinizador solar de alta eficiência e com sistema de reaproveitamento de calor adaptado para a região semiárida do nordeste brasileiro. E, assim, o fez, dado que cumpriu todos os objetivos específicos, e conclui:

1 - Sobre a realização de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) - a RSL foi eficiente, pois conseguiu estudar, resumir e sintetizar informações que possibilitaram desenvolver um dessalinizador solar eficiente, otimizado, acessível economicamente e com materiais adaptáveis. Conclui-se que a RSL foi a base das informações que viabilizaram a construção do equipamento;

2 - Sobre projetar, construir e determinar o custo do protótipo do dessalinizador solar - conclui-se que foi projetado, construído, estudado e determinado os custos do dessalinizador, dado que apresentou ao leitor, um manual com instruções claras de como construir o equipamento, sendo este um grande diferencial das teses, em língua portuguesa na área de dessalinização solar, pois não foram encontrados trabalhos que ensinassem ao leitor o como fazer um equipamento, ou seja, que operacionalizasse o conhecimento tácito. E, assim, esta tese o fez;

3 - Sobre analisar a eficiência térmica do protótipo - foi realizada a análise térmica e o cálculo da eficiência, em que a eficiência ultrapassou os 20%, e, o dessalinizador solar Gruta 1 foi 1,7 vezes mais produtivo do que um dessalinizador solar convencional Gruta 2. Então, conclui-se que termicamente o equipamento projetado, construído e operado foi eficiente e atendeu os requisitos do projeto;

4 - Sobre analisar os níveis de condutividade elétrica, cloreto, dureza, alcalinidade, turbidez, sódio, potássio, cor e pH da água ao padrão de consumo - pode-se concluir que o dessalinizador solar Gruta 1 foi capaz de purificar a água salobra para níveis dentro da Portaria GM/MS nº 888 de 2023.

5 - Sobre elaborar um estudo de viabilidade econômica - conclui-se que o estudo de viabilidade econômica constatou R\$0,22 por litro de água dessalinizada no equipamento, sendo-o compatível com os custos encontrados por autores que usaram tecnologia e equipamentos semelhantes.

Por fim, conclui-se que o dessalinizador solar Gruta 1 cumpriu todos os objetivos programados, é uma tecnologia social que pode atenuar a dificuldade do acesso a água purificada em regiões em que este recurso é extremamente limitado.

5.2 Frutos da tese

Com o desenvolvimento e operação do dessalinizador solar Gruta 1 foi possível até o presente momento:

- Obter um registro de patente de invenção no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI). Sob o número de processo BR 10 2023 018736 6, e título “Dessalinizador solar com reaproveitamento de calor para pré-aquecimento e sistema de aquecimento híbrido”. Tendo seu depósito na data de 15/09/2023;

- Aprovar artigo científico de revisão bibliográfica na revista de engenharia sanitária da Sabesp (Revista DAE). Com mais de 80 anos de história, a Revista DAE, da Sabesp, é a publicação de engenharia sanitária mais antiga no Brasil. O Artigo foi aprovado em 2023 sob o título “Uma revisão sistemática da literatura sobre os parâmetros que influenciam na produtividade dos dessalinizadores solares”;

- Processo de elaboração de artigo científico, para a revista *Journal Cleaner Production*, intitulado de “Dessalinizador solar de com tubos evacuados e sistema de recuperação de calor“.;

- Obter premiação como Inventor (Patente) - Dessalinizador Solar com Reaproveitamento de Calor para Pré-aquecimento e Sistema de Aquecimento Híbrido, na Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), na Reunião Anual de

Ciência, Tecnologia, Inovação e Cultura do Recôncavo da Bahia (RECONCITEC - 2023);

5.3 Sugestões para trabalhos futuros

Como indicações para futuras pesquisas, aponta-se analisar, os dessalinizadores solares, utilizando a simulação computacional por meio da *Computer Fluid Dynamics* (CFD). Pois, minimizaria o tempo, os custos de construção e adaptação, e, principalmente, seria possível elaborar estudos para maximizar o potencial térmico dos dessalinizadores solares com parâmetros controlados. Assim, com aplicação do CFD, poder-se-ia alterar a geometria, condições de operação e outras condições térmicas para chega-se em soluções otimizadas, do ponto de vista da termodinâmica, no ganho de calor e conseqüentemente na produção de água purificada nos equipamentos. Cita-se os estudos de Purnachandrakumar *et al.* (2022) e Shoeibi *et al.* (2022) como referências na área.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Norma Brasileira NBR-9241-11:2002, Requisitos ergonômicos para trabalho de escritórios com computadores parte 11 - orientações sobre usabilidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

ABU-ARABI, M. et al. Modeling and performance analysis of a solar desalination unit with double-glass cover cooling. **Desalination**, v. 143, n. 2, p. 173-182, 2002.

ABU-BAKAR, H.; WILLIAMS, L.; HALLETT, S. H. Quantifying the impact of the COVID-19 lockdown on household water consumption patterns in England. **Clean Water - Nature**, v. 4, n. 1, p. 1-9, 2021.

ABUJAZAR, M. S. S. et al. The effects of design parameters on productivity performance of a solar still for seawater desalination: A review. **Desalination**, v. 385, p. 178-193, 2016.

ABDULLAH, A. S. et al. Improving the trays solar still performance using reflectors and phase change material with nanoparticles. **Journal of Energy Storage**, v. 31, p. 101744, 2020.

AL-HARAHSEH, M. et al. Solar desalination using solar still enhanced by external solar collector and PCM. **Applied Thermal Engineering**, v. 128, p. 1030-1040, 2018.

AHMED, H. M.; ALFAYLAKAWI, K. A. Productivity Enhancement of Conventional Solar Stills Using Water Sprinklers and Cooling Fan. **Journal of Advanced Science and Engineering Research**, v. 2, n. 3, p. 168-177, 2012.

ALAUDEEN, A. et al. 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. et al. Effect of glass slope angle and water depth on productivity of double slope solar still. **Journal of Scientific and Industrial Research**, v. 70, n. 10, p. 884-890, 2011.

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-HINAI, H.; AL-NASSRI, M. S.; JUBRAN, B. A. Effect of climatic, design and operational parameters on the yield of a simple solar still. **Energy Conversion and Management**, v. 43, n. 13, p. 1639-1650, 2002.

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**, 114, 8-16, 2015.

AKASH, B. A. et al. Experimental evaluation of a single-basin solar still using different absorbing materials. **Renewable energy**, v. 14, n. 1-4, p. 307-310, 1998.

AKASH, B. A.; MOHSEN, M. S.; NAYFEH, W. Experimental study of the basin type solar still under local climate conditions. **Energy conversion and management**, v. 41, n. 9, p. 883-890, 2000.

AL-HAMADANI, A. A.; YASEEN, A. H. Experimental Study of Multi Effect stages PV Panels Solar Still to Enhance the Productivity by Utilizing Water Heater and Cooling Fan. **Journal of University of Babylon for Engineering Sciences**, v. 27, n. 2, p. 275-286, 2019.

ALTARAWNEH, I. et al. Experimental and numerical performance analysis and optimization of single slope, double slope and pyramidal shaped solar stills. **Desalination**, v. 423, p. 124-134, 2017.

ANDRADE, J. A.; NUNES, M. A. Acesso à água no Semiárido Brasileiro: uma análise das políticas públicas implementadas na região. **Revista Espinhaço UFVJM**. p. 28-39, 2017.

ARAÚJO, V. P.; VASCONCELOS, A. K. P. Construção de um Destilador Solar como Alternativa de Desenvolvimento de Aulas Práticas no Ensino de Química. **Research, Society and Development**, v. 8, n. 7, p. e17871115-e17871115, 2019.

ARUNKUMAR, T. et al. A review of efficient high productivity solar stills. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 101, p. 197-220, 2019.

ARUNKUMAR, T. et al. An experimental study on a hemispherical solar still. **Desalination**, v. 286, p. 342-348, 2012.

AVALLONE, E. **Estudo de um coletor solar, tipo tubo evacuado modificado, utilizando um concentrador cilíndrico parabólico (CPC)**. Programa de Pós-graduação em Engenharia mecânica. Tese (Doutorado). Universidade Estadual Paulista (UNESP). Faculdade de Engenharia, Bauru, 2017.

BARRETTO, S. F. A.; PIAZZALUNGA, R. Tecnologias sociais. **Revista Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 64, n. 4, p. 4-5, dez., 2012.

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.

BAIT, O.; SI-AMEUR, M.; BENMOUSSA, A. Numerical approach of a double slope solar still combined with a cylindrical solar water heater: mass and heat energy balance mathematical model. **Journal Polytechnic Dergisi**, v. 18, n. 4, p. 227-234, 2015.

BAIRD, R. B.; EATON, A. D.; RICE, E. W. **Standard Methods for the examination of Water and Wastewater**. 1496 p. 23 th edition. Washington, USA: American Public Health Association, 2017.

BARTON, J. A.; LOVE, Doug M.; TAYLOR, G. D. Design determines 70% of cost? A review of implications for design evaluation. **Journal of Engineering Design**, v. 12, n. 1, p. 47-58, 2001.

BEZERRA, V. R. et al. Analysis of constructive parameters in the thermal performance of solar still: Review. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 10, n. 6, p. e24010615472, 2021.

BRASIL. **PORTARIA GM/MS Nº 888, DE 4 DE MAIO DE 2021 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.**

BIRD, R. B. et al. **Introductory transport phenomena**. vol. 1, New York: Wiley, 2010.

BRITO, Y. J. V. et al. Estudo experimental de um dessalinizador solar do tipo bandeja com dupla inclinação para potabilização de água no semiárido paraibano. **Águas Subterrâneas**, v. 34, n. 2, p. 156-165, 2020.

BHARDWAJ, R.; TEN KORTENAAR, M. V.; MUDDE, R. F. Inflatable plastic solar still with passive condenser for single family use. **Desalination**, v. 398, p. 151-156, 2016.

BOLAND, A.; CHERRY, G.; DICKSON, R. (Ed.). **Doing a systematic review: A student's guide**. ed. 2. London: SAGE, 2017.

BOUZAID, M. et al. Numerical Analysis of Thermal Performances for a Novel Cascade Solar Desalination Still Design. **Energy Procedia**, [S. N.], p. 1071–1082, 2019

CAMPOS, B. L. O. et al. Análise do processo de dessalinização solar com ênfase no método de umidificação e desumidificação. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 24, p. 861-873, 2019.

CAMPOS, M. A. S. et al. Impact of the COVID-19 pandemic on water consumption behaviour. **Water Supply**, 2021.

CARDOSO, M. K. B. et al. Dessalinizador solar do tipo cascata aplicado em poços artesianos no interior da Paraíba. **Águas Subterrâneas**, v. 34, n. 2, p. 135-142, 2020.

CARVALHO, B. S.; GUERRA, F. K.O. M.V. Dessalinizador solar com cobertura piramidal: aperfeiçoamento e análise térmica. **Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica**, v. 1, n. 2, p. 134-143, 2020.

CASTILLO-TÉLLEZ, M. et al. Experimental study on the air velocity effect on the efficiency and fresh water production in a forced convective double slope solar still. **Applied Thermal Engineering**, v. 75, p. 1192-1200, 2015.

CASTRO, L. R. C. et al. Panorama sanitário das populações ribeirinhas da Amazônia Brasileira e as tecnologias sociais aplicáveis. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 12, p. e5891210898-e5891210898, 2020.

CAUCHICK MIGUEL, P. A. (Org). **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2012.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). **Apêndice E - Significado Ambiental e Sanitário das Variáveis de Qualidade das Águas e dos Sedimentos e Metodologias Analíticas e de Amostragem**, 2016.

<Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2017/11/Arquivo-Indice-E-Significado-Ambiental-e-Sanitario-das-Variaveis-de-Qualidade-2016.pdf> >. Acesso em: nov. 2023.

CHEN, Z. et al. Analysis of heat and mass transferring mechanism of multi-stage stacked-tray solar seawater desalination still and experimental research on its performance. **Solar Energy**, v. 142, p. 278-287, 2017.

CHENG, W. L.; HUO, Y. K.; NIAN, Y. L. Performance of solar still using shape-stabilized PCM: Experimental and theoretical investigation. **Desalination**, v. 455, p. 89-99, 2019.

CRESWELL, J. W.; PLANO CLARK, V. L. **Designing and conducting mixed methods research**. 2nd. Los Angeles: SAGE Publications, 2011.

COELHO, V. H. R. et al. Dinâmica do uso e ocupação do solo em uma bacia hidrográfica do semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 1, p. 64-72, 2014.

CONSERVA, V. R. Avaliação do desempenho do dessalinizador solar híbrido com módulos termoeletrônicos acoplado ao gerador eólico. **Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental)**, Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Campina Grande - PB, 2023.

CORREIA, R. C. et al. **A região semiárida brasileira**. Embrapa Semiárido-Capítulo em livro científico (ALICE), 2011. In: VOLTOLINI, T. V. (Ed.). Produção de caprinos e ovinos no Semiárido. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2011.

COSTA, A. B. (Org.). **Tecnologia Social e Políticas Públicas**. São Paulo: Instituto Pólis; Brasília: Fundação Banco do Brasil, 2013.

DAWOUD, M. A. Water import and transfer versus desalination in arid regions: GCC countries case study. **Desalination and Water treatment**, v. 28, n. 1-3, p. 153-163, 2011.

DAL BIANCO, B. de M.; SCHWAMBACH, C. Dessalinização a partir de destilador solar. **Caderno PAIC**, v. 14, n. 1, p. 605-612, 2013.

DONATO, H.; DONATO, M. Stages for undertaking a systematic review. **Acta medica portuguesa**, v. 32, n. 3, p. 227-235, 2019.

DUNKLE, R. V. Solar water distillation, the roof type solar still and a multi effect diffusion still, International developments in heat transfer. **ASME Proceedings of International Heat Transfer, University of Colorado**, v. 5, 1961.

DUTT, D. K. et al. Performance of a double-basin solar still in the presence of dye. **Applied Energy**, v. 32, n. 3, p. 207-223, 1989.

EKUMAH, B. et al. Disparate on-site access to water, sanitation, and food storage heighten the risk of COVID-19 spread in Sub-Saharan Africa. **Environmental research**, v. 189, p. 109936, 2020.

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

EL-AGOUZ, S. A. Experimental investigation of stepped solar still with continuous water circulation. **Energy Conversion and Management**, v. 86, p. 186-193, 2014.

ELASHMAWY, M. An experimental investigation of a parabolic concentrator solar tracking system integrated with a tubular solar still. **Desalination**, v. 411, p. 1-8, 2017.

EL-DESSOUKY, H. T.; ETOUONEY, H. M. **Fundamentals of salt water desalination**. Elsevier, 2002.

EL-MAGHLANY, W. M. An approach to optimization of double slope solar still geometry for maximum collected solar energy. **Alexandria engineering journal**, v. 54, n. 4, p. 823-828, 2015.

EL-SEBAIL, A. A.; EL-BIALY, E. Advanced designs of solar desalination systems: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 1198-1212, 2015.

EL-NASHAR, A. M. Seasonal effect of dust deposition on a field of evacuated tube collectors on the performance of a solar desalination plant. **Desalination**, v. 239, n.

1-3, p. 66-81, 2019.

ELSHEIKH, A. H. et al. Low-cost bilayered structure for improving the performance of solar stills: Performance/cost analysis and water yield prediction using machine learning. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 49, p. 101783, 2022.

ELSHEIKH, A. et al. Augmentation and evaluation of solar still performance: A comprehensive review. **Desalination**, p. 117239, 2023.

ELTAWIL, M. A.; ZHENGMING, Z.; YUAN, L. A review of renewable energy technologies integrated with desalination systems. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 13, n. 9, p. 2245-2262, 2009.

ESWARAN, V.; SUBRANANIAM, B. S. K.; ATHIKESAVAN, M. M. Performance evaluation of solar still using evacuated tube collector with and without nanoparticles. **Environmental Science and Pollution Research**, p. 1-13, 2023.

FAEGH, M.; SHAFII, M. B. Experimental investigation of a solar still equipped with an external heat storage system using phase change materials and heat pipes. **Desalination**, v. 409, p. 128-135, 2017.

FARID, M. M. et al. A review on phase change energy storage: materials and applications. **Energy conversion and management**, v. 45, n. 9-10, p. 1597-1615, 2004.

FANG, S.; MU, L.; Wenrong, T. Application design and assessment of a novel small-decentralized solar distillation device based on energy, exergy, exergoeconomic, and enviroeconomic parameters. **Renewable Energy**, v. 164, p. 1350-1363, 2021.

FARIAS, L. M. S. et al. Criteria and practices for lean and green performance assessment: Systematic review and conceptual framework. **Journal of Cleaner Production**, v. 218, p. 746-762, 2019.

FARGHALY, M. B. et al. Experimental study of simultaneous effect of evacuated tube collectors coupled with parabolic reflectors on traditional single slope solar still efficiency. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 49, p. 103304, 2023.

FELIX, E. S. et al. Cultivo de palma forrageira (*Opuntia Stricta*) irrigada com água

salinizada. **Brazilian Applied Science Review**, v. 2, n. 6, p. 1869-1875, 2018.

FREITAS, F. et al. Virtual Reality on Product Usability Testing: A Systematic Literature Review. In: **2020 22nd Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR)**. IEEE, 2020. p. 67-73.

FORSBERG, C. H. **Heat Transfer Principles and Applications**. London: Academic Press, 2020.

FOX, S. Third Wave Do-It-Yourself (DIY): Potential for prosumption, innovation, and entrepreneurship by local populations in regions without industrial manufacturing infrastructure. **Technology in Society**, v. 39, pp. 18-30, 2014.

FU, You-Lei et al. A hybrid approach to product prototype usability testing based on surface EMG images and convolutional neural network classification. **Computer Methods and Programs in Biomedicine**, p. 106870, 2022.

GARZA-REYES, J. A. Lean and green—a systematic review of the state of the art literature. **Journal of Cleaner Production**, v. 102, p. 18-29, 2015.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

GNANARAJ, S. J. P.; VELMURUGAN, V. An experimental study on the efficacy of modifications in enhancing the performance of single basin double slope solar still. **Desalination**, v. 467, p. 12-28, 2019.

GNANARAJ, S. J. P.; RAMACHANDRAN, S.; CHRISTOPHER, D. S. Enhancing the design to optimize the performance of double basin solar still. **Desalination**, v. 411, p. 112-123, 2017.

GREENHALGH, T. How to read a paper: Papers that summarise other papers (systematic reviews and meta-analyses). **British Medical Journal (Student BMJ)**, v. 315, n. 7109, p. 672-675, 1997.

GUPTA, B. et al. Thermal modeling and efficiency of solar water distillation: A review. **American Journal of Engineering Research**, v. 2, n. 12, p. 203-213, 2013.

GOUGH, D.; THOMAS, J.; OLIVER, S. Clarifying differences between review designs and methods. **Systematic reviews**, v. 1, n. 1, p. 1-9, 2012.

GUÉRIN, F et al. **Comprender o trabalho para transformá-lo: a prática da ergonomia**. Tradução Giliane M. J. Ingratta, Marcos Maffei. São Paulo: Edgard Blücher: Fundação Vanzolini, 2001.

HANSEN, R. S.; MURUGAVEL, K. K. Enhancement of integrated solar still using different new absorber configurations: An experimental approach. **Desalination**, v. 422, p. 59-67, 2017.

IBGE. Instituto brasileiro de geografia e estatística. **Estimativas populacionais para os municípios brasileiros**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/>>. Acesso em novembro de 2019.

INCROPERA, F. P. e DEWITT, D. P. **Fundamentos da transferência de calor e massa**. 5. ed. Rio de Janeiro. Livros Técnicos e Científicos, 2003.

IIDA, I.; GUIMARÃES, L. B. M. **Ergonomia: Projeto e Produção**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2016.

INSA. **O semiárido brasileiro: riquezas, diversidade e saberes**. Aldrin Martin Perez-Marin, Ana Paula Silva dos Santos, coordenadores. Campina Grande: INSA/MCTI, 2013.

INSTITUTO DE TECNOLOGIA SOCIAL DO BRASIL (ITS - BRASIL). **Caderno de Debate - Tecnologia Social no Brasil**. São Paulo: ITS - Brasil, v. 26, 2004.

ISMAIL, B. I. Design and performance of a transportable hemispherical solar still. **Renewable Energy**, v. 34, n. 1, p. 145-150, 2009.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9241-11: 2018 - Ergonomics of Human-System Interaction - Part 11: Usability: Definitions and Concepts**. ISO standards catalogue, 2018.

IQBAL, A. et al. Evaluation of the nanofluid-assisted desalination through solar stills in the last decade. **Journal of Environmental Management**, v. 277, p. 111415, 2021.

JAIMES, A. S. Diseño, construcción y caracterización de un destilador solar de caseta. **Puente**, v. 3, n. 1, p. 7-16, 2009.

JOHNSON, A. et al. A thermal model for predicting the performance of a solar still with fresnel lens. **Water**, v. 11, n. 9, p. 1860, 2019.

KABEEL, A. E.; EL-SAMADONY, Y. A. F.; EL-MAGHLANY, W. M. Comparative study on the solar still performance utilizing different PCM. **Desalination**, v. 432, p. 89-96, 2018.

KABEEL, A. E. et al. A comprehensive review of tubular solar still designs, performance, and economic analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 246, p. 119030, 2020.

KABEEL, A. E.; ABDELGAIED, M. Improving the performance of solar still by using PCM as a thermal storage medium under Egyptian conditions. **Desalination**, Amsterdã, v. 383, p. 22-28, 2016.

KABEEL, A. E.; ABDELAZIZ, G. B.; EL-SAID, E. M. S. Experimental investigation of a solar still with composite material heat storage: energy, exergy and economic analysis. **Journal of cleaner production**, Amsterdã, v. 231, p. 21-34, 2019.

KABEEL, A. E.; ABDELGAIED, M.; EISA, A. Enhancing the performance of single basin solar still using high thermal conductivity sensible storage materials. **Journal of cleaner production**, Amsterdã, v. 183, p. 20-25, 2018.

KABEEL, A. E.; EL-SAMADONY, Y. A. F.; EL-MAGHLANY, W. M. Comparative study on the solar still performance utilizing different PCM. **Desalination**, Amsterdã, v. 432, p. 89-96, 2018.

KABEEL, A. E. et al. Performance enhancement of solar still through efficient heat exchange mechanism—a review. **Applied Thermal Engineering**, Amsterdã, v. 114, p. 815-836, 2017.

KABEEL, A. E. et al. A review on different design modifications employed in inclined solar still for enhancing the productivity. **Journal of Solar Energy Engineering**, Nova York, v. 141, n. 3, p. 1-10 031007, 2019a.

KABEEL, A. E. et al. Effect of water depth on a novel absorber plate of pyramid solar still coated with TiO₂ nano black paint. **Journal of cleaner production**, Amsterdã, v. 213, p. 185-191, 2019b.

KABEEL, A. E. et al. Improving the performance of stepped solar still using a

graphite and PCM as hybrid store materials with internal reflectors coupled with evacuated tube solar collector. **Heat and Mass Transfer**, v. 56, p. 891-899, 2018.

KARUPPUSAMY, S. An experimental study on single basin solar still augmented with evacuated tubes. **Thermal science**, v. 16, n. 2, p. 573, 2012.

KATEKAR, V. P.; DESHMUKH, S. S. A review on research trends in solar still designs for domestic and industrial applications. **Journal of cleaner production**, v. 257, p. 120544, 2020.

KHIRFAN, L.; PECK, M.; MOHTAT, N. Systematic content analysis: A combined method to analyze the literature on the daylighting (de-culverting) of urban streams. **MethodsX**, v. 7, p. 100984, 2020.

KOHLITZ, J.; CHONG, J.; WILLETTS, J. Rural drinking water safety under climate change: The importance of addressing physical, social, and environmental dimensions. **Resources**, v. 9, n. 6, p. 77, 2020.

KAUSHAL, A.; Varun, G. Solar stills: A review. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 14, n. 1, p. 446-453, 2010.

KUMAR, P. V. *et al.* Solar stills system design: A review. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 51, p. 153-181, 2015.

KUMAR, S.; DUBEY, A.; TIWARI, G. N. A solar still augmented with an evacuated tube collector in forced mode. **Desalination**, v. 347, p. 15-24, 2014.

KUMAR, R. A. ; ESAKKIMUTHU, G.; MURUGAVEL, K. K. Performance enhancement of a single basin single slope solar still using agitation effect and external condenser. **Desalination**, v. 399, p. 198-202, 2016.

KAUSHAL, A.; Varun. Solar stills: A review. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 14, n. 1, p. 446-453, 2010.

LIED, E. B. *et al.* Destilador solar convencional para efluente agroindustrial. **Revista DAE**, v. 66, n. 211, 2018.

LI, X. *et al.* Graphene oxide-based efficient and scalable solar desalination under one sun with a confined 2D water path. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 113, n. 49, p. 13953-13958, 2016.

LOPES, J. T. et al. Eficiência de um dessalinizador solar simétrico com bacia parabólica composto disposto em paralelo. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 7, n. 4, p. 35722-35733, mar-abr 2021.

MACDONALD, G. M. Water, climate change, and sustainability in the southwest. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 107, n. 50, p. 21256-21262, 2010.

MANCHANDA, H.; KUMAR, M. A comprehensive decade review and analysis on designs and performance parameters of passive solar still. **Renewables: Wind, Water, and Solar**, v. 2, n. 1, p. 1-24, 2015.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Metodologia científica**. 7. ed. 3. reimp. São Paulo: Atlas, 2019.

MEVADA, D. et al. Investigation and performance analysis of solar still with energy storage materials: An energy-exergy efficiency analysis. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 29, p. 101687, 2022.

MORANDI, M. I. W. M.; CAMARGO, L. F. R. **Revisão sistemática da literatura. Design science research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia**. Porto Alegre: Bookman, pg. 141-175, 2015.

MOUSAZADEH, H. et al. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 13, n. 8, p. 1800-1818, 2009.

MORAD, M. M.; EL-MAGHAWRY, H. A. M.; WASFY, K. I. Improving the double slope solar still performance by using flat-plate solar collector and cooling glass cover. **Desalination**, v. 373, p. 1-9, 2015.

MURUGAVEL, K. K.; CHOCKALINGAM, K. K. S. K.; SRITHAR, K. Progresses in improving the effectiveness of the single basin passive solar still. **Desalination**, v. 220, n. 1-3, p. 677-686, 2008.

MURUGAVEL, K. K. et al. Single basin double slope solar still with minimum basin depth and energy storing materials. **Applied energy**, v. 87, n. 2, p. 514-523, 2010.

MURUGAVEL, K. K.; SRITHAR, K. Performance study on basin type double slope solar still with different wick materials and minimum mass of water. **Renewable**

Energy, v. 36, n. 2, p. 612-620, 2011.

MOUSTAFA, E. B.; HAMMAD, A. H.; ELSHEIKH, A. H. A new optimized artificial neural network model to predict thermal efficiency and water yield of tubular solar still. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 30, p. 101750, 2022.

MEDEIROS, R. M. *et al.* Avaliação das condições hídricas por meio do panorama de mudanças climáticas em cabaceiras-pb. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 6, n. 3, p. 227–239, 30 set. 2012.

MEKHILEF, S.; SAIDUR, R.; SAFARI, A.. A review on solar energy use in industries. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 4, p.1777-1790, maio, 2011.

MIHELICIC, J. R.; ZIMMERMAN, J. B. **Engenharia Ambiental: Fundamentos, Sustentabilidade e Projeto**. LTC: Rio de Janeiro, 2012.

MUFTAH, A. F. *et al.* Factors affecting basin type solar still productivity: A detailed review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 32, p. 430-447, 2014.

NAIR, M.; KUMAR, D. Water desalination and challenges: the Middle East perspective: a review. **Desalination and Water Treatment**, v. 51, n. 10-12, p. 2030-2040, 2013.

NAYI, K. H.; MODI, K. V. Pyramid solar still: A comprehensive review. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 81, p. 136-148, 2018.

OMARA, Z. M.; KABEEL, A. E.; ESSA, F. A. Effect of using nanofluids and providing vacuum on the yield of corrugated wick solar still. **Energy conversion and management**, v. 103, p. 965-972, 2015.

Organização Mundial da Saúde (OMS) *et al.* **Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2017: special focus on inequalities**. World Health Organization, 2019.

Organização das Nações Unidas (ONU). **Metade da população mundial não tem acesso a saneamento seguro**. ONU News. Data de publicação: 01 jun. 2023. URL: <<https://news.un.org/pt/story/2023/06/1816807#:~:text=Metade%20da%20popula%C3%A7%C3%A3o%20mundial%20n%C3%A3o%20tem%20acesso%20%C3%A0,pela>

%20ag%C3%AAncia%20nesta-
quinta%20feira%2C%20com%20dados%20de%202019>.

PADRÓN, R. S. et al. Observed changes in dry-season water availability attributed to human-induced climate change. **Nature geoscience**, v. 13, n. 7, p. 477-481, 2020.

PAL, P. et al. Performance analysis of modified basin type double slope multi-wick solar still. **Desalination**, v. 422, p. 68-82, 2017.

PAKDEL, M. A et al. An experimental study of a single-slope solar still with innovative side-troughs under natural circulation mode. **Desalination**, v. 422, p. 174-181, 2017.

PANCHAL, H; AWASTHI, A. Theoretical modeling and experimental analysis of solar still integrated with evacuated tubes. **Heat and Mass Transfer**, v. 53, n. 6, p. 1943-1955, 2017.

PANCHAL, H. et al. Solar still with evacuated tubes and calcium stones to enhance the yield: an experimental investigation. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 142, p. 150-155, 2020.

PANCHAL, H. et al. Enhancement of the yield of solar still with the use of solar pond: A review. **Heat Transfer**, v. 50, n. 2, p. 1392-1409, 2021.

PARANHOS, Ranulfo et al. Uma introdução aos métodos mistos. **Sociologias**, v. 18, n. 42, p. 384-411, 2016.

PRODANOV, C. C.; FREITAS; E. C. **Metodologia do trabalho científico [recurso eletrônico]: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. ed. 2. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

PORTARIA, GM/MS N°888. **Dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade**. Ministerio de Estado da Saúde, Distrito Federal, p. 1-49, 2021.

PRÜSS-USTÜN, A. et al. Burden of disease from inadequate water, sanitation and hygiene for selected adverse health outcomes: an updated analysis with a focus on low-and middle-income countries. **International journal of hygiene and environmental health**, v. 222, n. 5, p. 765-777, 2019.

PURNACHANDRAKUMAR, D. et al. Review on performance assessment of solar stills using computational fluid dynamics (CFD). **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 26, p. 38673-38714, 2022.

RABHI, K. et al. 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.

RAMOS, R. O. et al. Patente: Privilégio de Inovação. Número do registro: BR1020210075996, título: "Sistema Integrado Multianálise com Conectividade e Função Datalogger para Monitoramento de Estações de Dessalinização Solar e Outros Sistemas de Tratamento de Águas e Efluentes", Instituição de registro: **INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial**. Depósito: 21/04/2021. 2021.

RANJAN, K. R.; KAUSHIK, S. C. Economic feasibility evaluation of solar distillation systems based on the equivalent cost of environmental degradation and high-grade energy savings. **International journal of Low-carbon technologies**, v. 11, n. 1, p. 8-15, 2016.

SAHOTA, L.; TIWARI, G. N. Effect of Al₂O₃ nanoparticles on the performance of passive double slope solar still. **Solar Energy**, v. 130, p. 260-272, 2016a.

SAHOTA, L.; TIWARI, G. N. Effect of nanofluids on the performance of passive double slope solar still: a comparative study using characteristic curve. **Desalination**, v. 388, p. 9-21, 2016b.

SAMPATHKUMAR, K. et al. Active solar distillation: A detailed review. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 14, n. 6, p. 1503-1526, 2010.

SANTOS, T. S. *et al.* Analysis of Extreme Events in the Amazon Region. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 4, p. 1356-1370, 2013.

SANTOS, E. E. F. et al. Atributos químicos de solo cultivado com palma forrageira sob irrigação com água salobra. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, p. e698997531-e698997531, 2020.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS (SEBRAE). **Tecnologias sociais: como os negócios podem transformar**

comunidades. Cuiabá: Sebrae, 2017.

SEURING, S.; GOLD, S. Conducting content-analysis based literature reviews in supply chain management. **Supply Chain Management: An International Journal**, 2012.

SHAFII, M. B. et al. Examination of a novel solar still equipped with evacuated tube collectors and thermoelectric modules. **Desalination**, v. 382, p. 21-27, 2016.

SHAHZAD, M. W. *et al.* Energy-water-environment nexus underpinning future desalination sustainability. **Desalination**, v. 413, p. 52-64, 2017.

SHATAT, M., WORALL M., RIFFAT, S. Opportunities for solar water desalination worldwide: Review. **Sustainable cities and society**, v. 9, p. 67-80, 2013.

SHARSHIR, S. W. et al. Factors affecting solar stills productivity and improvement techniques: a detailed review. **Applied Thermal Engineering**, v. 100, p. 267-284, 2016.

SHARSHIR, S. W. et al. Augmentation of a pyramid solar still performance using evacuated tubes and nanofluid: experimental approach. **Applied Thermal Engineering**, v. 160, p. 113997, 2019.

SHARSHIR, S. W. et al. 4-E analysis of pyramid solar still augmented with external condenser, evacuated tubes, nanofluid and ultrasonic foggers: A comprehensive study. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 164, p. 408-417, 2022.

SHEFFIELD, J.; WOOD, E. F.; RODERICK, M. L. Little change in global drought over the past 60 years. **Nature**, v. 491, n. 7424, p. 435-8, 15 nov. 2012.

SHOEIBI, S. et al. Performance evaluation of a solar still using hybrid nanofluid glass cooling-CFD simulation and environmental analysis. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 49, p. 101728, 2022.

SILVA, K. S. et al. Study of solar still in groundwater treatment in Brazilian northeast. **Desalination and water treatment**. v. 293, p.14-26, 2023.

SINGH, A. K. *et al.* Performance analysis of specially designed single basin passive solar distillers incorporated with novel solar desalting stills: A review. **Solar Energy**,

v. 185, p. 146-164, 2019.

SIDDAWAY, A.P.; WOOD, A.M.; HEDGES, L. V. How to do a systematic review: a best practice guide for conducting and reporting narrative reviews, meta-analyses, and meta-syntheses. **Annual review of psychology**, 70, 747-770, 2019.

SILVA, J. A. L. *et al.* Obtenção de água potável a partir do uso da energia solar disponível na região do semiárido paraibano. **Revista ESPACIOS**. Vol. 37 (Nº 32) Año 2016, 2016.

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

SUNEESH, P. U. *et al.* Effect of air flow on “V” type solar still with cotton gauze cooling. **Desalination**, v. 337, p. 1-5, 2014.

SUDENE. Superintendência do desenvolvimento regional. **Resolução 115 de 2017**. Disponível em: <<http://www.sudene.gov.br/images/arquivos/conselhodeliberativo/documentos/resolucao1152017.pdf>>. Acesso em novembro de 2020.

SUDENE. Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. **Delimitação do semiárido**. sudene. gov. br/planejamento-regional/delimitação-dosemiarido. v. 16, n. 01, 2017.

TAKEUCHI, H.; NONAKA, I. **Gestão do conhecimento**. Porto Alegre: Bookman, 2008.

TIWARI, G. N.; TIWARI, Anil Kumar. **Solar distillation practice for water desalination systems**. Anshan Pub: New Delhi, 2008.

TIWARI, G. N. *et al.* Comparative thermal performance evaluation of an active solar distillation system. **International Journal of Energy Research**, v. 31, n. 15, p. 1465-1482, 2007.

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.; CHEL, A. Parametric study of an active and passive solar distillation system: energy and exergy analysis. **Desalination**, v. 242, n. 1-3, p. 1-18, 2009.

- TSILINGIRIS, P. Analysis of the heat and mass transfer processes in solar stills-The validation of a model. **Solar Energy**, p. 420–431, 2009.
- VELMURUGAN, V. et al. Single basin solar still with fin for enhancing productivity. **Energy Conversion and Management**, v. 49, n. 10, p. 2602-2608, 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.
- VIANA, W. F. et al. Influência de um condensador externo no dessalinizador solar do tipo bandeja para obter água dessalinizada no município de Queimadas. **Águas Subterrâneas**, v. 37, n. 2, 2023.
- VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade de águas e ao tratamento de esgotos**. v. 1. ed. 4. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011.
- WHO-UNICEF. **Progress on Drinking Water, Sanitation and Hygiene**; World Health Organization (WHO) and the United Nations Children's Fund (UNICEF): Geneva, Switzerland, 2017.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION et al. **Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2017: special focus on inequalities**. World Health Organization, 2019.
- WHATELY, M.; CAMPANILI, M. **O século da escassez: Uma nova cultura de cuidado com a Água: Impasses e Desafios**. Editora Schwarcz-Companhia das Letras: São Paulo, 2016.
- YAVARA, W. A. C.; TORRES, B. A. P.; ZAMBRA, C. E. S. Effect of different geographic altitudes on the performance of a conventional solar still with arsenic and boron removal efficiency in an arid zone. **Ingeniería y Universidad**, v. 22, n. 2, 2018.
- YOUSEF, M. S. et al. An experimental study on the performance of single slope solar still integrated with a PCM-based pin-finned heat sink. **Energy Procedia**, v. 156, p. 100-104, 2019.
- YOUSEF, M. S.; HASSAN, H. Energetic and exergetic performance assessment of

the inclusion of phase change materials (PCM) in a solar distillation system. **Energy conversion and management**, v. 179, p. 349-361, 2019a.

YOUSEF, M. S.; HASSAN, H. Assessment of different passive solar stills via exergoeconomic, exergoenvironmental, and exergoenvironoeconomic approaches: a comparative study. **Solar Energy**, v. 182, p. 316-331, 2019b.

YOUSEF, M. S.; HASSAN, H.; SEKIGUCHI, H. Energy, exergy, economic and environoeconomic (4E) analyses of solar distillation system using different absorbing materials. **Applied Thermal Engineering**, v. 150, p. 30-41, 2019.

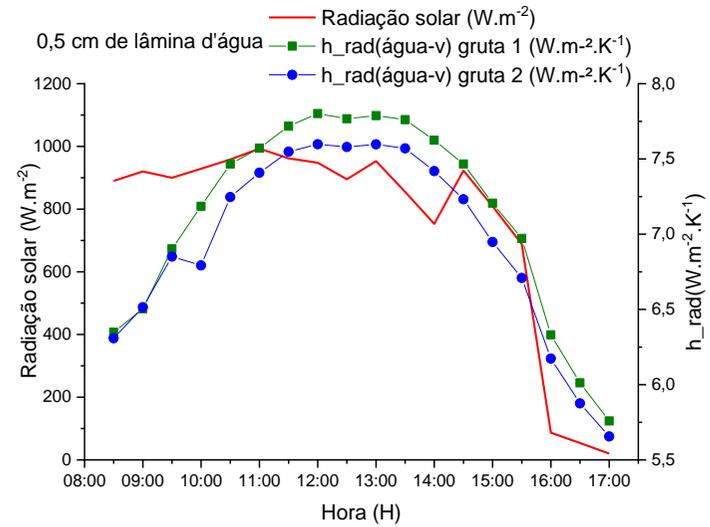
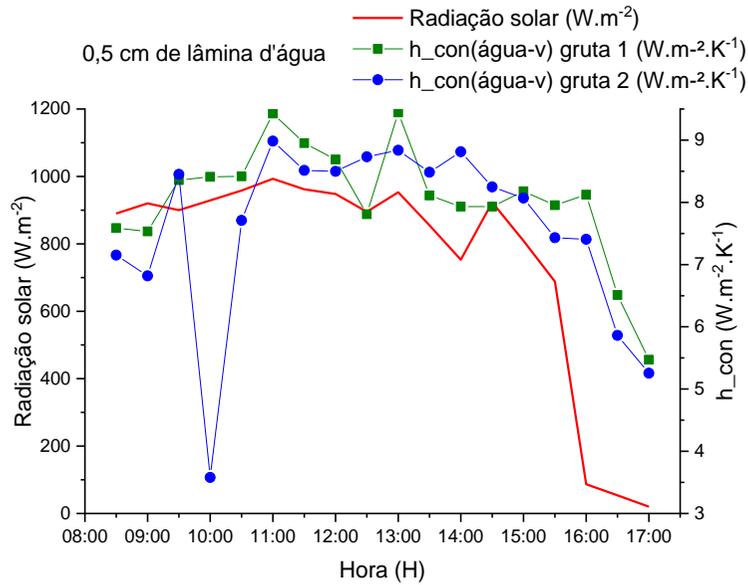
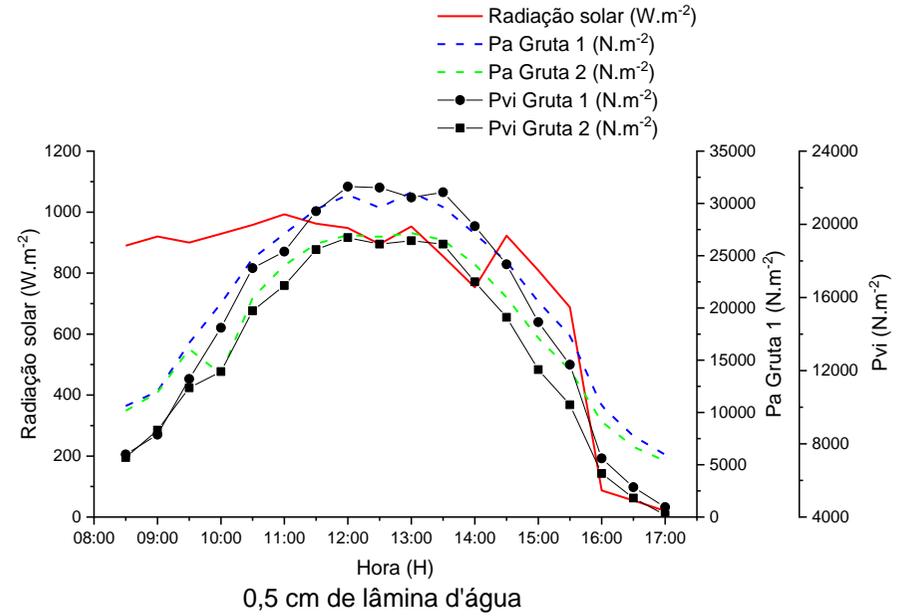
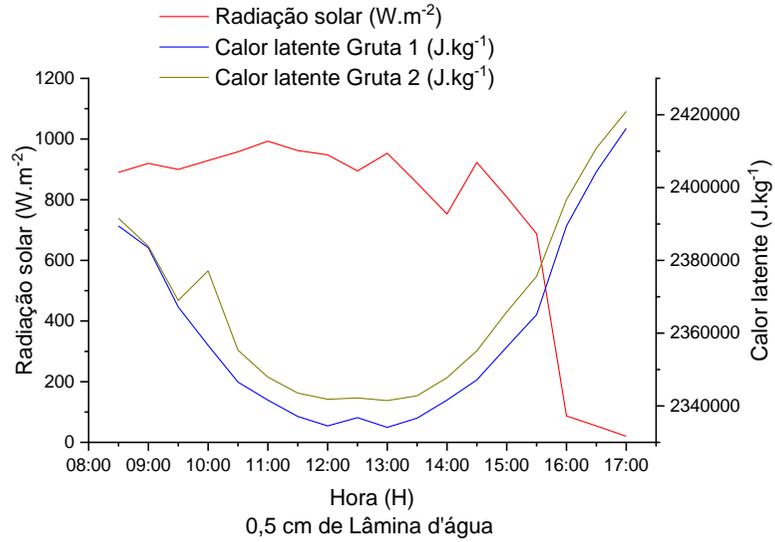
YOUNAS, O.; BANAT, F.; ISLAM, D. Seasonal behavior and techno economical analysis of a multi-stage solar still coupled with a point-focus Fresnel lens. **Desalination and Water Treatment**, v. 57, n. 11, p. 4796-4809, 2016.

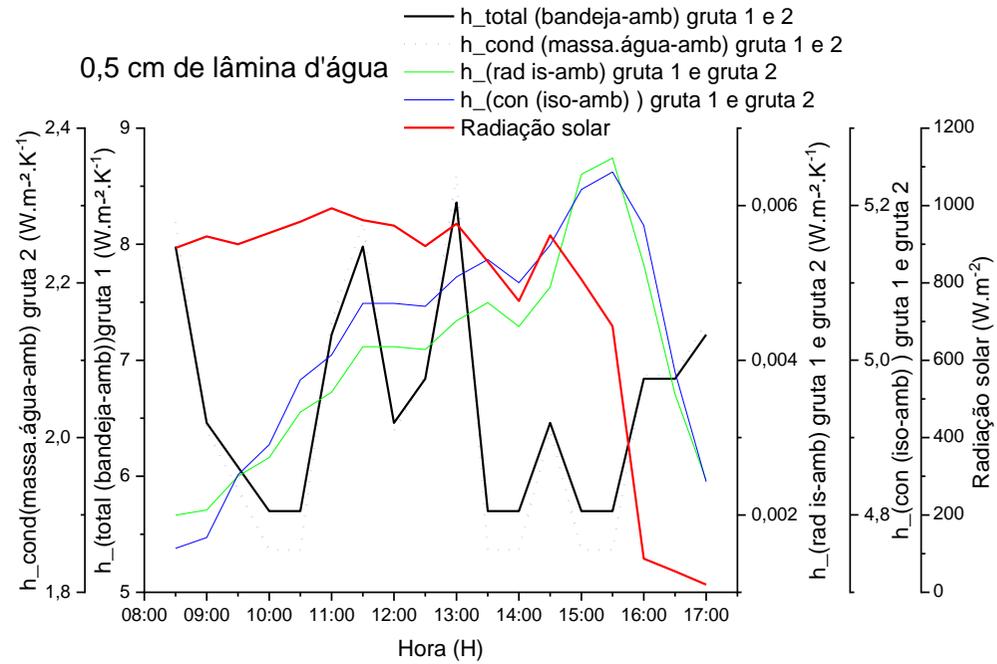
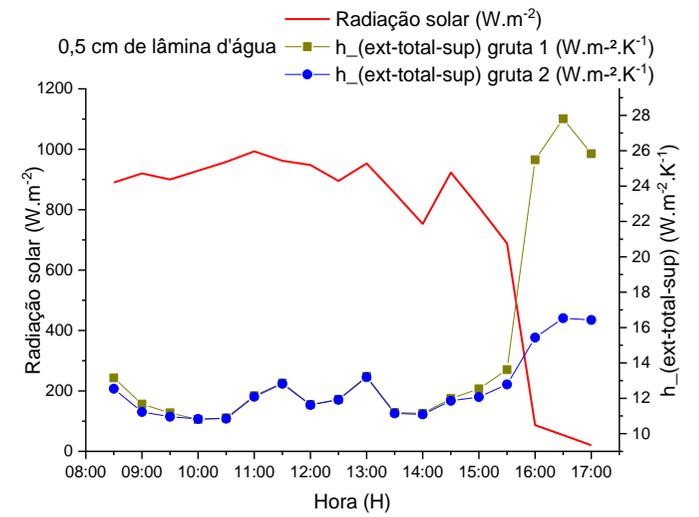
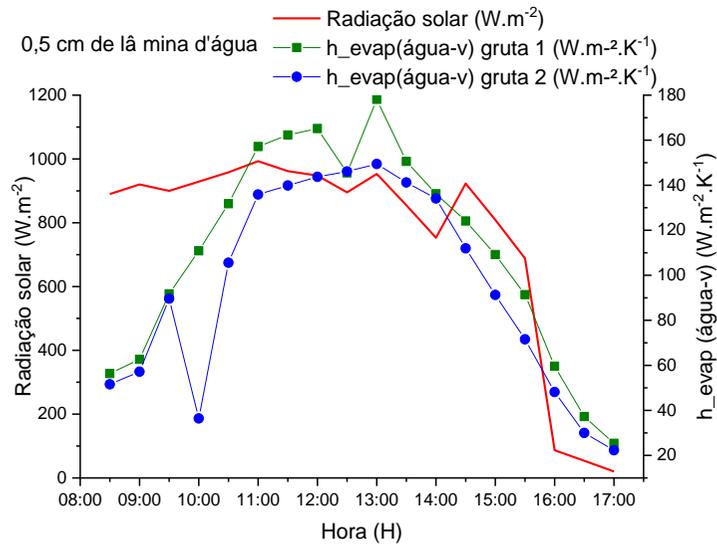
ZOORI, H. A. et al. Comparison between energy and exergy efficiencies in a weir type cascade solar still. **Desalination**, v. 325, p. 113-121, 2013.

ANEXO A - CÁLCULO DOS ρ – VALORES

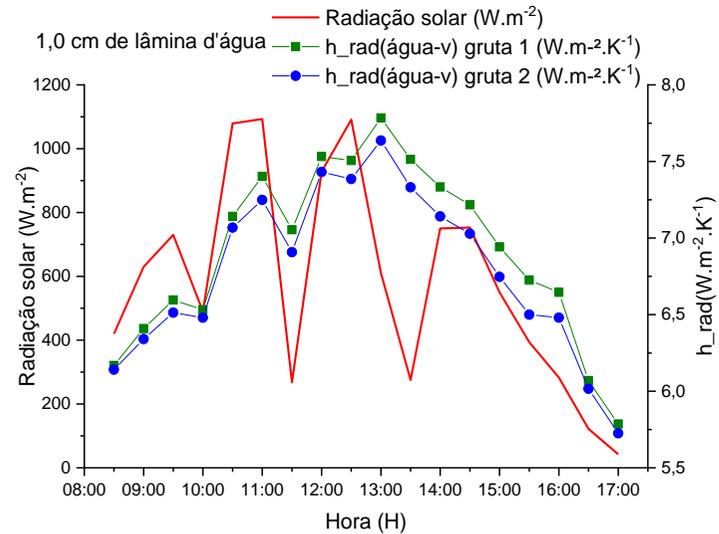
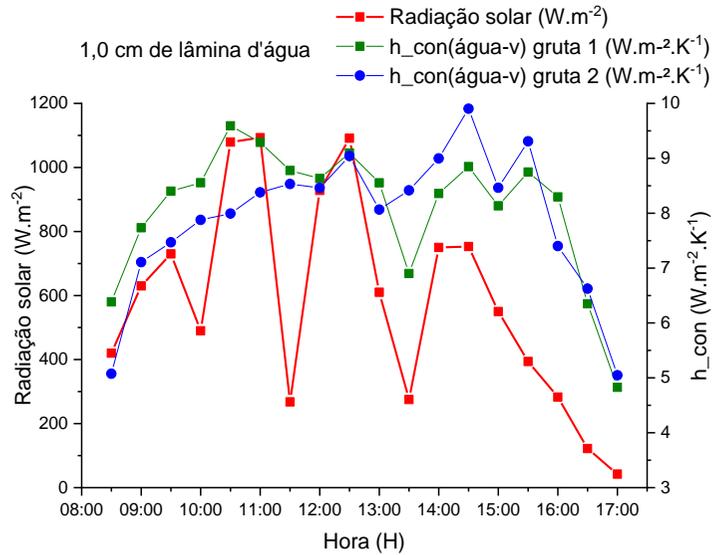
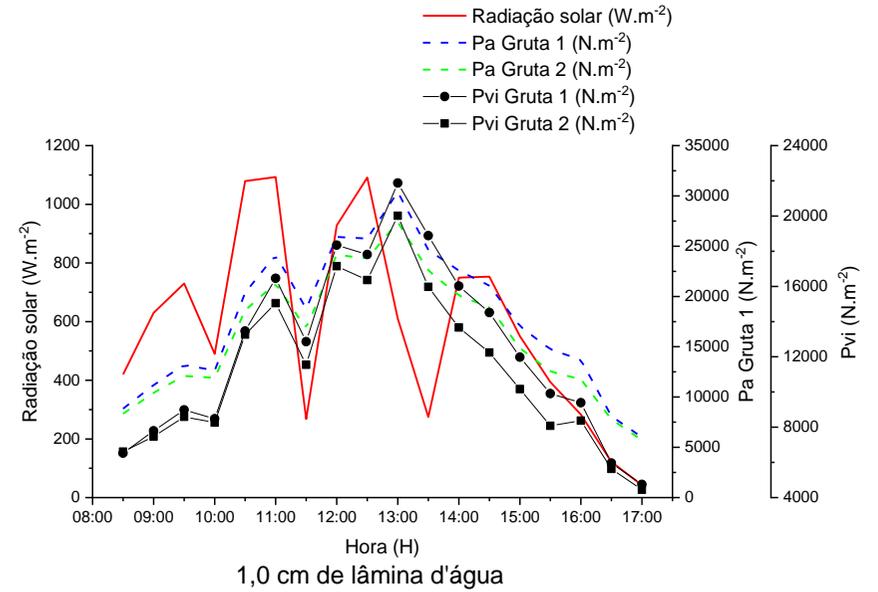
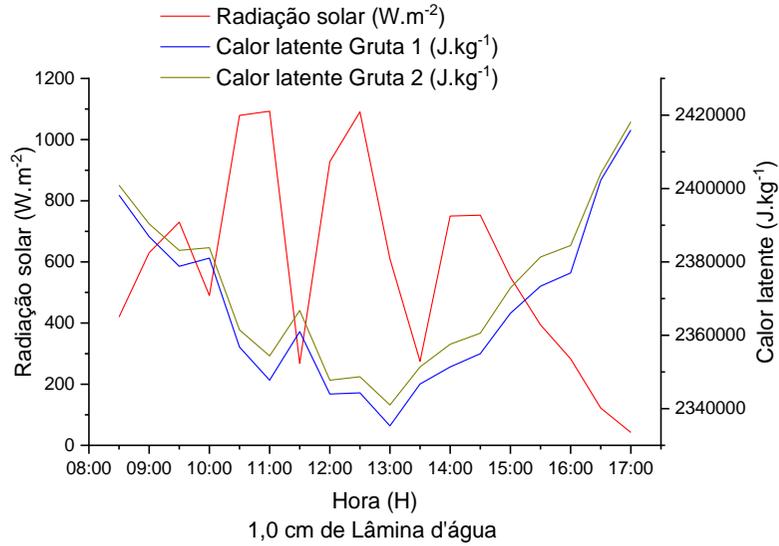
Hora (h)	20/09 (Lâmina 0,5cm)			21/09 (Lâmina 1cm)		
	Radiação (W.m ⁻²)	Produtividade (L.m ⁻² .dia ⁻¹)		Radiação (W.m ⁻²)	Produtividade (L.m ⁻² .dia ⁻¹)	
		Gruta 1	Gruta 2		Gruta 1	Gruta 2
08:00	360	0,00	0,00	170	0,00	0,00
08:30	889	0,00	0,00	400	0,00	0,00
09:00	555	0,00	0,00	283	0,00	0,00
09:30	359	0,00	0,00	326	0,00	0,00
10:00	1005	0,28	0,00	302	0,00	0,00
10:30	861	0,14	0,21	1220	0,11	0,07
11:00	992	0,21	0,07	1213	0,07	0,07
11:30	1077	0,21	0,28	1084	0,11	0,07
12:00	1103	0,21	0,21	1077	0,21	0,21
12:30	948	0,14	0,21	1061	0,14	0,07
13:00	1019	0,14	0,07	966	0,14	0,21
13:30	842	0,14	0,21	758	0,14	0,07
14:00	838	0,07	0,14	769	0,14	0,21
14:30	709	0,07	0,07	728	0,07	0,07
15:00	508	0,14	0,07	590	0,07	0,07
15:30	479	0,07	0,07	441	0,07	0,07
16:00	80	0,07	0,07	80	0,07	0,07
$\alpha=0,05$	ρ - valor	0,645		ρ - valor	0,599	

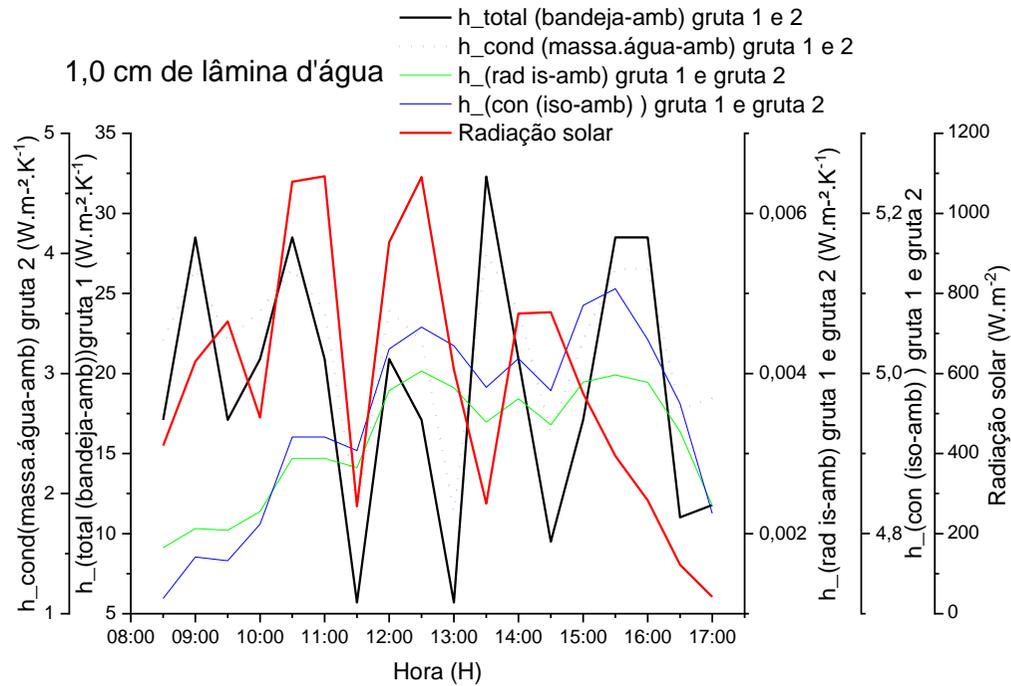
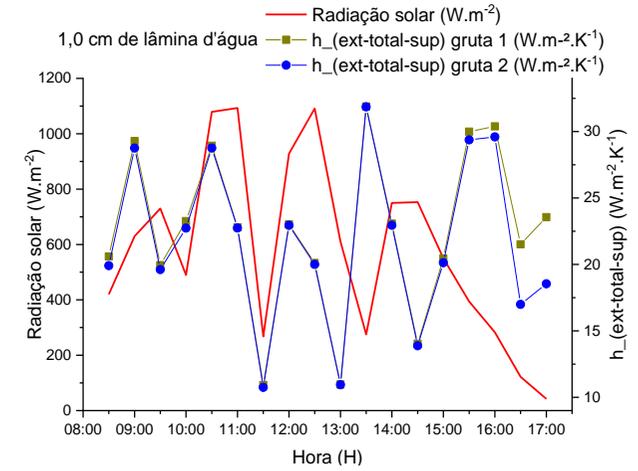
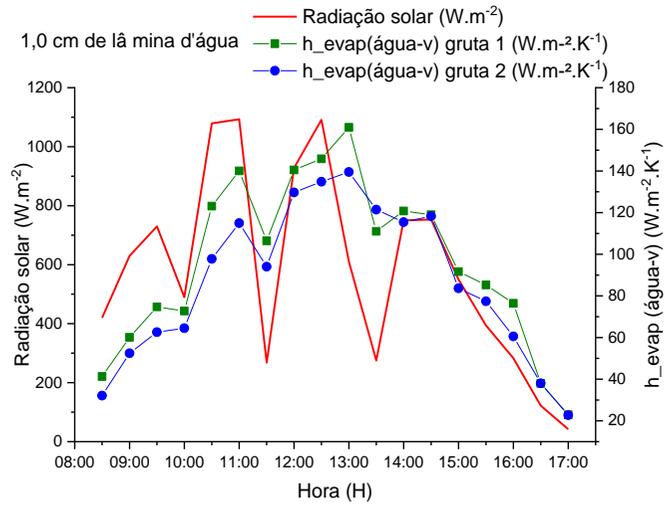
ANEXO B - VARIÁVEIS PARA LÂMINA D'ÁGUA COM 0,5 cm





ANEXO C - VARIÁVEIS PARA LÂMINA D'ÁGUA COM 1,0 cm





ANEXO D - FLUXOS DE CALOR 1

Fluxo de calor - Lâmina d'água de 0,5 cm				
Radiação solar [W.m ⁻²]	Gruta 1		Gruta 2	
	$q_{con (v-amb)}$ [W]	$q_{evap (v-amb)}$ [W]	$q_{con (v-amb)}$ [W]	$q_{evap (v-amb)}$ [W]
890	7,47	55,49	6,60	47,57
920	7,29	60,66	5,88	49,28
900	8,89	97,64	9,14	96,92
929	8,87	116,93	1,38	14,08
958	8,74	136,74	7,32	100,16
993	11,09	184,95	10,09	152,63
962	9,83	178,22	8,91	146,34
948	9,16	174,15	8,84	149,52
895	7,27	135,41	9,39	157,16
953	10,99	207,40	9,63	162,81
855	7,90	146,73	8,83	146,96
753	7,59	130,40	9,68	147,29
923	7,67	120,05	8,48	115,05
809	8,34	111,30	8,22	93,03
688	7,96	91,48	6,99	67,31
87	8,65	63,46	7,16	46,60
54	5,49	31,44	4,43	22,65
20	3,85	17,83	3,55	15,07

ANEXO E - FLUXOS DE CALOR 2

Fluxo de calor - Lâmina d'água de 1,0 cm				
Radiação solar [$W.m^{-2}$]	Gruta 1		Gruta 2	
	$q_{con (v-amb)}$ [W]	$q_{evap (v-amb)}$ [W]	$q_{con (v-amb)}$ [W]	$q_{evap (v-amb)}$ [W]
420	1,48	9,61	1,04	6,59
630	1,99	15,54	1,75	12,96
730	2,27	20,29	1,90	15,94
490	2,33	19,90	2,05	16,88
1079	2,85	36,73	2,15	26,32
1093	2,75	41,65	2,33	32,03
268	2,48	30,15	2,36	26,05
928	2,47	40,39	2,38	36,66
1091	2,68	43,13	2,64	39,47
610	2,47	46,68	2,23	38,76
275	1,73	27,94	2,35	34,06
750	2,33	33,74	2,59	33,26
753	2,53	34,11	2,98	35,67
550	2,19	24,78	2,31	22,93
394	2,43	23,76	2,65	22,08
283	2,24	20,66	1,87	15,33
122	1,47	8,81	1,57	9,02
42	0,97	4,59	1,04	4,68