



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

MARIA KAROLINA BORBA CARDOSO

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM NOVO DESSALINIZADOR SOLAR TIPO
ONDULAR**

**CAMPINA GRANDE - PB
2020**



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - CCT/UEPB
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
TECNOLOGIA AMBIENTAL – PPGCTA
LINHA DE PESQUISA: TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE
ÁGUA E RESÍDUOS**

MARIA KAROLINA BORBA CARDOSO

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM NOVO DESSALINIZADOR SOLAR TIPO
ONDULAR**

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

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

Coorientadora: Profa. Dra. Keila Machado de Medeiros

CAMPINA GRANDE – PB

2020

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.

C268a Cardoso, Maria Karolina Borba.
Análise de desempenho de um novo dessalinizador solar tipo ondular [manuscrito] / Maria Karolina Borba Cardoso. - 2020.
82 p. : il. colorido.
Digitado.
Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2020.
"Orientação : Prof. Dr. Carlos Antônio 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. Dessalinização solar. 2. Poços. 3. Escassez hídrica. I.
Título
21. ed. CDD 628.167

MARIA KAROLINA BORBA CARDOSO


**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM NOVO DESSALINIZADOR SOLAR
TIPO ONDULAR**

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

Data: 30 de outubro de 2020

Conceito: **APROVADA**

Banca Examinadora:



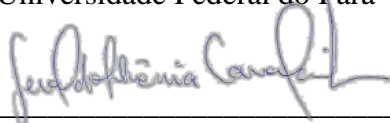
Prof. Dr. Carlos Antônio Pereira de Lima (Orientador)
Universidade Estadual da Paraíba – UEPB



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



Prof^ª. Dr^ª. Marcelle Fonseca Passos (Examinadora Externa)
Universidade Federal do Pará - UFPA



Prof^ª. Dr^ª. Geralda Gilvania Cavalcante de Lima (Examinadora Interna)
Universidade Estadual da Paraíba - UEPB



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

**CAMPINA GRANDE, PB
2020**

AGRADECIMENTOS

Agradeço,

A Deus e minha família, sobretudo, pelo alicerce concreto que muito contribuiu em minha formação pessoal.

A meus pais, Matheus e minha avó, pela experiência de vida incrível.

Aos amigos do mestrado, pela convivência nessa caminhada e também por persistirem nesta conquista, que é nossa.

A Carlos, meu professor e orientador, pela dedicação, pela atenção e oportunidades, pela confiança, pelo compartilhar de conhecimentos que engradeceram este relato.

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

Aos colegas do GRUTAA, em especial Adriano, Camylla, Karyna e Yohanna, por toda ajuda para realização deste estudo e a Carla Arruda que sempre ajudou desde a graduação em Química Industrial.

Aos amigos em geral, que não mediram esforços para ajudar-me.

Aos professores do PPGCTA pelos valiosos ensinamentos transmitidos ao longo da minha trajetória acadêmica.

Ao Laboratório de Pesquisa em Ciências Ambientais (LAPECA) por ceder os equipamentos para a caracterização das águas.

A coordenação do PPGCTA, em especial à secretária Nadilma pela atenção e gentileza aos alunos.

A CAPES pelo apoio financeiro na realização deste trabalho.

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

A concretização deste trabalho agradeço a todos que estiveram comigo e contribuíram para sua construção de maneira direta ou indireta, ao compartilhar deste contexto.

RESUMO

Para o consumo humano e outras atividades domésticas, os moradores do semiárido brasileiro utilizam águas de diversas fontes, deste modo, a qualidade da água é de vital importância, principalmente por utilizarem águas de poços, que geralmente possuem alto teor de salinidade. Por a região Nordeste possuir um alto potencial de energia solar, utiliza-se os processos de dessalinização solar, para potabilizar essas águas salobras. Nesta pesquisa, foi avaliado comportamento térmico e a eficiência de um inédito dessalinizador solar do tipo ondular, para dessalinização de águas salobras, visando a sua implantação no semiárido paraibano. O dessalinizador foi alimentado com água salobra coletada nos poços artesianos, do sítio Paulo de Sousa, na cidade de Caturité - PB e no sítio Escurinho de Cima na cidade de Juazeirinho – PB, operando com três vazões diferentes. O sistema foi operado em batelada com recirculação e monitorado no intervalo de 07 às 17 horas. Foram realizadas análises físico-químicas de alcalinidade, cloreto, condutividade elétrica, dureza, pH, sódio e potássio, com o objetivo de determinar a qualidade da água antes e após o processo de dessalinização solar. De maneira geral, foi visto que a produção de água dessalinizada está diretamente relacionada com a incidência de radiação solar. Além disso, foi constatado que a eficiência térmica do dessalinizador acompanhou o fluxo de radiação solar e que tem relação direta com a produtividade. Foi obtida para os experimentos uma produtividade média no dessalinizador de $1.767,0 \text{ mL.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. As águas salobras provenientes dos poços artesianos possuíam um alto teor de salinidade e após o processo de dessalinização, todos os parâmetros físico-químicos apresentaram uma redução, estando de acordo com os padrões de potabilidade para o consumo humano, exigidos pela Portaria do Ministério da Saúde vigente no país. Portanto, foi comprovado a eficiência do dessalinizador, para a obtenção de água doce, podendo ser aplicado não apenas para fins de pesquisa, mas também como uma alternativa de adquirir água de qualidade para comunidades isoladas do semiárido paraibano, onde ocorre escassez de água potável.

Palavras-chave: Dessalinização solar, Poços, Semiárido, Escassez hídrica.

ABSTRACT

For human consumption and other domestic activities, residents of the Brazilian semiarid use water from different sources, thus, water quality is of vital importance, mainly because they use well water, which generally has a high level of salinity. Observing that the Northeast region has a high potential for the exploitation of solar energy, in this way, it uses the processes of solar desalination to potable these waters, which is a renewable, sustainable and simple energy, used to purify the water through the processes evaporation and condensation. In this research, a thermal analysis of a new desalinator was carried out via wave-type solar energy as a function of solar energy, in the city of Campina Grande, PB, Brazil (latitude $7^{\circ} 13' 11''$ south and longitude $35^{\circ} 52' 31''$ west, with an average altitude of 550 meters above sea level). Samples were collected from wells at Sítio Paulo de Sousa in the city of Caturité-PB (Poço-P1) and at Sítio Escurinho de Cima in the city of Juazeirinho-PB (Poço-P2). Physical-chemical analyzes of alkalinity, chloride, electrical conductivity, hardness, pH, sodium, potassium were carried out in order to determine the water quality before and after the solar desalination process. In general, it was seen that the production of desalinated water is directly related to the incidence of solar radiation. In addition, it was found that the thermal efficiency of the desalinator accompanied the flow of solar radiation and that it has a direct relationship with productivity. From flow 1, sodium, chloride and potassium values were obtained according to the maximum permissible. For chlorides, values of 250 mg.L^{-1} were found, resulting in a significant reduction for well P1 and P2, 99% and 97%, respectively. For flows 2 and 3, sodium showed a 100% reduction, after the desalination process. Therefore, all physical-chemical parameters showed a significant reduction, in accordance with the potability standards for human consumption, required by the Ministry of Health Ordinance in force in the country, proving the efficiency of the desalinator, for obtaining fresh water, it can be applied not only for research purposes, but also as an alternative to acquire quality water for isolated communities in the semi-arid region of Paraíba, where there is a shortage of drinking water.

Keywords: Solar desalination, Wells, Semi-arid, Water scarcity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Delimitação do semiárido brasileiro.	20
Figura 2 - Espectro da radiação solar.	18
Figura 3 - Efeitos das radiações direta e difusa na superfície terrestre.	19
Figura 4 – Energia solar nas regiões brasileiras.	20
Figura 5 - Dessalinizador solar tipo pirâmide	25
Figura 6 - Destilador solar do tipo multiestágio.	25
Figura 7 – Dessalinizador solar do tipo filme capilar.	26
Figura 8 – Dessalinizador solar do tipo mecha.	30
Figura 9 - Dessalinizador solar do tipo cascata.	30
Figura 10 – Dessalinizador solar do tipo ondular.	37
Figura 11 – Balanço global de energia no dessalinizador ondular.	40
Figura 12 – Balanço de energia térmica para a cobertura de vidro	41
Figura 13 - Balanço de energia térmica para a água salobra	44
Figura 14 - Balanço de energia térmica para a placa absorvedora ondular.	42
Figura 15 - Balanço de energia térmica para o isolante térmico.	43
Figura 16 – Perfis de temperatura e radiação do dessalinizador para a vazão V1 e água do poço P1.	44
Figura 17 – Perfis de temperatura e radiação do dessalinizador para a vazão V1 e água do poço P2.	45
Figura 18 – Perfis de temperatura e radiação do dessalinizador para a vazão V2 e água do poço P1.	46
Figura 19 – Perfis de temperatura e radiação do dessalinizador para vazão V2 e água do poço P2.	50
Figura 20 – Perfis de temperatura e radiação do dessalinizador para vazão V3 e água do poço P1.	48
Figura 21 – Perfis de temperatura e radiação do dessalinizador para a vazão V3 e água do poço P2.	48
Figura 22 – Produção de água dessalinizada do dessalinizador para a vazão V1 e água do poço P1.	49
Figura 23 – Produção de água dessalinizada do dessalinizador para a vazão V1 e água do poço P2.	50

Figura 24 – Produção de água dessalinizada do dessalinizador para a vazão V2 e água do poço P1.....	51
Figura 25 – Produção de água dessalinizada do dessalinizador para a vazão V2 e água do poço P2.....	51
Figura 26 – Produção de água dessalinizada do dessalinizador para a vazão V3 e água do poço P1.....	52
Figura 27 – Produção de água dessalinizada do dessalinizador para a vazão V3 e água do poço P2.....	53
Figura 28 – Variação da eficiência horária do dessalinizador para a vazão V1 e água do poço P1.....	54
Figura 29 – Variação da eficiência horária do dessalinizador para a vazão V1 e água do poço P2.....	54
Figura 30 – Variação da eficiência horária do dessalinizador para a vazão V2 e água do poço P1.....	55
Figura 31 – Variação da eficiência horária do dessalinizador para a vazão V2 e água do poço P2.....	56
Figura 32 – Variação da eficiência horária do dessalinizador para a vazão V3 e água do poço P1.....	60
Figura 33 – Variação da eficiência horária do dessalinizador para a vazão V3 e água do poço P2.....	60
Figura 34 - Coeficientes de transferência de calor do dessalinizador para vazão V1 e água do poço P1.....	58
Figura 35 - Coeficientes de transferência de calor do dessalinizador para vazão V1 e água do poço P2.....	59
Figura 36 - Coeficientes de transferência de calor do dessalinizador para vazão V2 e água do poço P1.....	60
Figura 37 - Coeficientes de transferência de calor do dessalinizador para vazão V2 e água do poço P2.....	60
Figura 38 - Coeficientes de transferência de calor do dessalinizador para vazão V3 e água do poço P1.....	61
Figura 39 - Coeficientes de transferência de calor do dessalinizador para vazão V3 e água do poço P2.....	61
Figura 40 - Perfis de temperatura da água do dessalinizador para água do poço P1: (—) teórico e (o) experimental.....	62

Figura 41 - Perfis de temperatura da água do dessalinizador para água do poço P2: (—) teórico e (o) experimental.....	63
Figura 42 - Perfis de temperatura da placa do dessalinizador para água do poço P1: (—) teórico e (o) experimental.....	64
Figura 43 - Perfis de temperatura da placa do dessalinizador para água do poço P2: (—) teórico e (o) experimental.....	64
Figura 44 - Perfis de temperatura do vidro do dessalinizador para água do poço P1: (—) teórico e (o) experimental.....	65
Figura 45 - Perfis de temperatura do vidro do dessalinizador para água do poço P2: (—) teórico e (o) experimental.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Os países mais ricos em termos de recursos hídricos	14
Tabela 2 – Parâmetros físico-químicos da água salobra e dessalinizada para vazão V1.	66
Tabela 3 – Parâmetros físico-químicos da água salobra e dessalinizada para vazão V2.	71
Tabela 4 – Parâmetros físico-químicos da água salobra e dessalinizada para vazão V3.	69

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS.....	12
2.1	OBJETIVO GERAL	12
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
3	FUNDAMETAÇÃO TEÓRICA.....	13
3.1	PANORAMA DA ÁGUA NO MUNDO E NO BRASIL	13
3.2	SEMIÁRIDO BRASILEIRO.....	16
3.3	ENERGIA E RADIAÇÃO SOLAR	18
3.4	DESSALINIZAÇÃO	20
3.4.1	Osmose inversa (OI).....	21
3.4.2	Eletrodialise (ED).....	21
3.4.3	Dessalinização do flash de vários estágios (MSF)	21
3.4.4	Dessalinização de múltiplos efeitos (MED)	22
3.4.5	Dessalinização por compressão de vapor (VC).....	22
3.5	DESSALINIZAÇÃO SOLAR.....	22
3.5.1	Tipos de dessalinizadores solares.....	24
3.5.2	Eficiência dos dessalinizadores solares	28
3.6	TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO DESSALINIZADOR.....	30
4	MATERIAIS E MÉTODOS	33
4.1	PRÓTOTIPO DO DESSALINIZADOR SOLAR DO TIPO ONDULAR.....	33
4.2	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO	34
4.3	MODO OPERACIONAL DO DESSALINIZADOR.....	34
4.4	ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DAS ÁGUAS.....	35
4.5	BALANÇO DE ENERGIA NO DESSALINIZADOR.....	36
4.5.1	Balanço global de energia.....	36
4.5.2	Balanço energético na cobertura de vidro	38
4.5.3	Balanço energético na água salobra.....	40
4.5.4	Balanço energético na placa absorvedora ondular	41
4.5.5	Balanço energético no isolante térmico.....	42
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1	PERFIS DE TEMPERATURA E DE RADIAÇÃO.....	44

5.2	PRODUÇÃO DE ÁGUA DESSALINIZADA.....	49
5.3	EFICIÊNCIA TÉRMICA DO DESSALINIZADOR	53
5.4	COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO DESSALINIZADOR.....	58
5.5	ANÁLISE TÉRMICA DO DESSALINIZADOR SOLAR	62
5.6	MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA	66
6	CONCLUSÕES.....	70
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	72
	REFERÊNCIAS	73

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso de fundamental importância, uma vez que é vital para a vida humana e para a vida do planeta. Apesar dos ambiciosos objetivos e realizações da Organização das Nações Unidas (ONU), mais de 800 milhões de pessoas em todo o mundo ainda não têm acesso à água potável (MAPUNDA, CHEN e YU, 2018). A disponibilidade e fornecimento de água é um dos principais problemas em muitas regiões do mundo, principalmente nas semiáridas, onde, além de escassa, grande parte é salobra e imprópria para o consumo humano.

O consumo de água diretamente dos rios, lagos, mares e reservatórios subterrâneos geralmente não é aconselhável, uma vez que estes podem possuir características físicas, químicas e microbiológicas prejudiciais ao ser humano. Esta condição leva à necessidade da utilização de equipamentos e técnicas para tratamentos e posterior utilização.

A escassez global de água é um dos maiores problemas do século XXI que afeta bilhões de pessoas em todo o mundo. Este problema generalizado motivou o desenvolvimento de várias tecnologias de dessalinização para produzir água doce a partir da água do mar, por meio de membranas ou processos térmicos (HUANG et al., 2020). Contudo, essas tecnologias existentes exigem infraestrutura de suporte complexa e grandes instalações centralizadas, o que inviabiliza em regiões em desenvolvimento, como áreas remotas (GHAF FOUR e MUJTABA, 2018).

No semiárido brasileiro é claro a carência de água, afetando o comportamento da biota e das comunidades que vivem nessa região, além de apresentar limitada disponibilidade de recursos hídricos possui elevado teor de sais. O tratamento dessas águas salobras, é cada vez mais uma solução competitiva e sustentável, cujo objetivo é aumentar a disponibilidade de água e segurança hídrica à população (SHATAT, WORALL e RIFFAT, 2013).

Nas comunidades rurais do Nordeste brasileiro, a utilização de águas subterrâneas de poços tubulares é uma alternativa ao abastecimento d'água. A água de poços e fontes vem sendo utilizada intensamente para diversos fins, tais como abastecimento humano, irrigação, indústria e lazer. No entanto, há uma grande limitação na utilização desses poços para enfrentamento da escassez hídrica, que é o elevado teor de sais dissolvidos na água (NEVES et al., 2017).

Os problemas existentes comumente estão vinculados em colocar em funcionamento as políticas públicas direcionadas a gestão dos recursos hídricos. Essas políticas públicas com base em uma solução tecnológica específica têm passado pelo semiárido como costume: a pequena açudagem, os poços com dessalinizadores por membranas e as cisternas são algumas delas, são

importantes tecnologias que buscam reverter o paradigma de políticas utilizadas para prevenção e convivência com a seca no semiárido (ANA, 2012).

Existem várias tecnologias para a produção de água potável como a osmose inversa, eletrodialise, compressão de vapor, destilação *flash* multiestágio, destilação multiefeito e a dessalinização solar. Dentre estas tecnologias, a dessalinização solar, utiliza uma fonte de energia inesgotável em percepção humana (utiliza a energia solar como fonte de energia), de fácil operação, baixa manutenção e de simples tecnologia, podendo ser, deste modo, uma solução integrada quer para os problemas de escassez de água potável que o planeta terra enfrenta. Embora tenha sido previsto que a questão da escassez de água crescerá na maioria dos países até 2025, também é importante notar que existe energia solar abundante em todo o mundo, como alternativa energética utilizada nos processos de dessalinização para a diminuição dessa escassez (ALSAGRI, CHIASSON e GADALLA, 2019).

A dessalinização solar tornou-se uma solução adequada para superar a escassez de água doce em regiões isoladas, sendo um processo que usa uma fonte de energia inesgotável. Sistemas de dessalinização de pequena escala representam uma fonte valiosa para o fornecimento de água doce quando há disponibilidade de água salgada ou salobra (MALIK et al., 1996). Portanto, este fato demonstra a importância de desenvolver um novo dessalinizador solar tipo ondular como uma alternativa viável, utilizando materiais de baixo custo, fácil aquisição e que atenda as características desejadas, para uma boa funcionalidade e eficiência na obtenção de uma água tratada com padrões de potabilidade para o consumo humano, com o intuito de suprir a demanda de água doce em comunidades isoladas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Construir e estudar o comportamento térmico e a eficiência de um novo dessalinizador solar do tipo ondular, para dessalinização de águas salobras, visando a sua implantação no semiárido paraibano.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o desempenho do protótipo, através da análise térmica, na produção de água dessalinizada;
- Estimar a produção de água dessalinizada em função das variações climáticas;
- Analisar a qualidade físico-química da água antes e depois do tratamento por dessalinização solar;

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 PANORAMA DA ÁGUA NO MUNDO E NO BRASIL

A água é a substância mais abundante na superfície da terra, com 96,5% do seu volume (1,338 bilhões de km³) contida nos oceanos, sendo os maiores depósitos de água, e desempenham um papel essencial no ciclo da água como a principal fonte de água para a atmosfera. As geleiras e a cobertura permanente de neve contêm 24,3 milhões de km³ de água, equivalente a 50 vezes menos que o volume do oceano (cerca de 1,72% dos recursos hídricos globais). No entanto, a água sólida, cuja parte predominante é gelo e cobertura permanente de neve nas regiões Antártica, Ártica e montanhosas, contém cerca de 69,6% do total de recursos de água doce (ARUNKUMAR et al., 2019)

A hidrosfera congelada (criosfera) é o maior reservatório de água doce, mas a água subterrânea é a maior fonte disponível de água doce com um volume de 23,4 milhões de km³. Todos os lagos da terra contêm 176.400 km³ de água, com água doce constituindo mais da metade do volume total. Aproximadamente 16.500 km³ de água são armazenados no solo (0,05% da total de água doce), enquanto todos os rios do mundo transportam em média cerca de 2120 km³, sendo apenas 0,006% do total de água doce (KUNDZEWICZ, 2018).

A disponibilidade de água é dependente da localização geográfica, as regiões equatoriais podem apresentar superávit de água devido os índices de precipitação ser maior que o de evaporação. No entanto, nas regiões subtropicais, a evaporação excede a precipitação e, portanto, pode haver escassez de água (KANADE, e BHATTACHARYA, 2016). Assim, a disponibilidade de água per capita em muitos locais do mundo está constantemente alterando, provavelmente devido a crescente proporção da população global em relação à água disponível.

A população global aumentou de 2 bilhões em 1950 para uma população atual de 7,4 bilhões, possuindo a mesma disponibilidade global de água per capita, diminuindo por um fator maior que 3 durante este período. No entanto, existem duas razões pelas quais essa conclusão não é global. Em primeiro lugar, a distribuição do aumento populacional não é uniforme, por exemplo, o crescimento urbano é significativamente diferente nas áreas da Ásia e África em comparação com a Europa e a Austrália. A segunda razão é que em muitas regiões do mundo, a água subterrânea é uma fonte predominante explorada, com taxas de retirada de águas excedentes desses aquíferos (LAKSHMI, FAYNE e BOLTEN, 2018).

No nível continental, a América tem a maior parte do total de recursos de água doce do mundo, cerca de 45%, seguido da Ásia com 28% de participação, a Europa com 15,5% e a África com 9%. Em todo o mundo existem países ricos e pobres em água. Os oito países mais ricos em termos de fontes de recursos hídricos, listadas na Tabela 1, representam 60% dos recursos naturais de água doce disponível por habitante (FAO, 2003).

Os dez países mais pobres em termos de fontes de recursos hídricos, por habitante, são Bahrein, Jordânia, Kuwait, Líbia, Maldivas, Malta, Catar, Arábia Saudita, Emirados Árabes Unidos e Iêmen.

Tabela 1 – Os países mais ricos em termos de recursos hídricos

País	Total de água disponível por habitante (km ³ /ano)
Brasil	8233
Rússia	4507
Canadá	2902
Indonésia	2838
Colômbia	2132
USA	2071
Índia	1897

Fonte: FAO, 2003.

A falta de água tornou-se um problema que afeta todo o sistema global. A escassez de água, energia e suprimentos de alimentos e a demanda devem aumentar de 40 a 50% até 2050 devido ao aumento da população (KALAIR, 2019). Essa escassez pode ser atribuída a vários fatores dos quais, os principais estão listados a seguir (KANADE e BHATTACHARYA, 2016):

- Distribuição desigual da precipitação;
- Água da chuva que flui para os oceanos e mares;
- Mudança nos padrões de precipitação devido ao aquecimento global;
- Insuficiência de recursos hídricos disponíveis a serem utilizados; sendo poluído por resíduos industriais e agrícolas;
- Aumento da população levando a uma maior demanda por água;
- Maior demanda por água de irrigação que formam um parte muito importante da tecnologia agrícola moderna.

Em vários lugares do mundo, foi observado um rápido crescimento da população, o que resultou em impactos como o aumento da demanda por recursos naturais e, mais especificamente, a água. Segundo Inman e Jeffrey (2006), embora isso tenha provocado maior consumo de água, a disponibilidade de água também está se tornando cada vez mais variável devido às mudanças climáticas globais (SANTOS, 2017).

O aumento do estresse hídrico continua a afetar mais e mais partes do mundo. De acordo com o Relatório Mundial de Desenvolvimento da Água da ONU, 3,7 bilhões de pessoas estão atualmente afetadas pela escassez de água. Em 2050, esse número poderia aumentar para até 5,7 bilhões. Atualmente, 3,5 milhões de pessoas morrem anualmente como resultado do fornecimento inadequado de água e saneamento, reforçando o papel da água como um recurso global crítico (WWAP, 2018). Embora a escassez de água não seja um problema generalizado, um número crescente de cientistas de várias partes do mundo está envolvido no desenvolvimento de práticas para a captação de água (ROCHA e SOARES, 2015).

Segundo a FAO e ONU, estima-se que 1,1 bilhão de pessoas no mundo carecem de acesso à água potável e 2,5 bilhões de pessoas de serviços de saneamento, além de 1,3 bilhões não terem acesso à eletricidade. E esses números só tendem a aumentar. Dos quinze países mais carentes desses recursos, doze deles estão no norte da África e no Oriente Médio. Essa crescente demanda por água doce pode reavivar confrontos entre esses países que já disputam espaço político e influência. Outros estudos realizados pela ONU apontam que cinquenta anos é o tempo estimado para que metade da população mundial conviva com a escassez crônica de água (PINTO, 2017).

No Brasil, a distribuição dos recursos hídricos entre as regiões geográficas também é desigual e, assim como acontece com os continentes, estão sujeitos a severa degradação devido a múltiplos fatores, como crescimento populacional, mudanças no uso da terra, expansão agrícola e urbana, além da super exploração por causa do desenvolvimento econômico. Entre os efeitos previstos estão, as mudanças climáticas globais, as secas de longo prazo e desequilíbrios no abastecimento de água (MITRICĂ et al., 2017).

O Brasil possui situação privilegiada em relação à disponibilidade hídrica, porém 68% da água doce do país circula na região amazônica, que é habitada por 8% da população. Os problemas de escassez hídrica no país decorrem, fundamentalmente, da combinação entre o crescimento exagerado das demandas localizadas e a degradação da qualidade das águas. Esse quadro é consequência dos processos desordenados de urbanização, industrialização e expansão agrícola. Além disso, criou-se no Brasil, a ideia de abundância, dando suporte à cultura do desperdício da água disponível, à

sua pouca valorização como recurso e ao adiamento dos investimentos necessários à otimização de seu uso (SETTI, et al. 2000). Entretanto, para as pessoas que vivem no semiárido brasileiro o acesso à água é um grande desafio, convivendo de sete a oito meses de seca, esse espaço é marcado por uma crise de recursos hídricos e por contradições sociais.

3.2 SEMIÁRIDO BRASILEIRO

O semiárido brasileiro é o maior do mundo em extensão territorial e a densidade demográfica possui 27.870.241 habitantes, uma área em torno de 1.128.697 km², a insuficiência de chuvas, as temperaturas elevadas e as altas taxas de evaporação influenciam fortemente as demais condições naturais e sociais desse meio. Essas características influem diretamente nos recursos hídricos, nos solos, na paisagem e na vegetação, predominantemente constituída pelo bioma caatinga, e a multiplicidade de espécies que compõem essa biodiversidade. É composto por 1.067 municípios, dos estados do Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e Minas Gerais. Os critérios para delimitação do semiárido foram aprovados pelas Resoluções do Conselho Deliberativo da Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) de nº 107, de 27/07/2017 e de nº 115, de 2 nº 107, de 27/07/2017 3/11/2017/3/11/2017 representado na Figura 1 (IBGE, 2017).

De acordo com o IBGE (2017), esta área da região nordestina abrange cerca de 53% do seu território, onde as chuvas são irregulares e escassas, com grande potencial torrencial pelo fato de se concentrarem em curtos períodos que dura geralmente de 3 a 5 meses.

O que diferencia o semiárido brasileiro de seus similares no planeta é que a maioria das regiões semiáridas em outras partes do mundo possuem uma precipitação pluviométrica média anual de 80 a 250 mm, enquanto no sertão nordestino esta média é de 300 a 800 mm, com a característica de que acontecem entre um período de três a cinco meses durante o ano, podendo variar de região para região geográfica dentro do chamado “Polígono das Secas”. O Polígono das Secas é composto de diferentes zonas geográficas com distintos índices de aridez e sujeita a repetidas crises de prolongamento das estiagens. Esta variação e imprevisibilidade podem causar enchentes em anos mais chuvosos. Seu subsolo é 70% cristalino, o que faz com que grande parte da água não seja armazenada e escoe pela superfície (REBOUÇAS, 1997).

Figura 1 – Delimitação do semiárido brasileiro.



Fonte: IBGE (2017).

Segundo a Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil de 2017, entre 2013 e 2016, 48 milhões de pessoas foram afetadas por secas duradouras ou estiagens passageiras no território nacional. Durante este período, foram registrados 4.824 eventos de seca com danos humanos. O ano mais crítico em impactos para a população foi 2016, cerca de 18 milhões de habitantes foram afetados por este fenômeno climático, sendo que 84% dos impactados viviam no Nordeste.

A seca é um fenômeno natural reversível, de ocorrência esporádica ou repetida numa periodicidade complexa e não esclarecida, no semiárido brasileiro não ocorre de forma homogênea, podendo haver anos de seca total, com efeitos observados em todas as áreas da região e secas parciais, onde apenas algumas áreas são atingidas. O subsolo é formado em 70% por rochas cristalinas rasas, o que dificulta a formação de mananciais perenes e a potabilidade da água, normalmente salinizada (SAMPAIO et al., 2003).

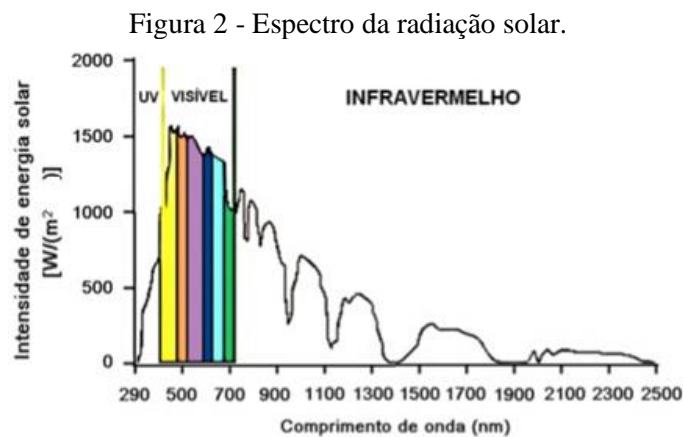
A crise hídrica na região Nordeste é resultado de uma seca que dura vários anos, desta forma a disponibilidade de água para consumo humano depende das condições climáticas, em períodos de estiagem a disponibilidade de água diminui comprometendo sua qualidade e fazendo com que as comunidades recorram ao fornecimento por meio de carros-pipas e a utilização de água de poços, que muitas vezes são salobras, e necessitam ser dessalinizadas.

Neste sentido, atualmente tem-se a busca de tecnologias para fomentar uma maior oferta de água para atender as necessidades hídricas locais. Em busca de soluções para escassez periódica de água no semiárido brasileiro, o homem tem utilizado as águas subterrâneas como alternativa para atender suas necessidades hídricas. Isso ocorre, principalmente, através da perfuração de poços (SILVA et al., 2017).

3.3 ENERGIA E RADIAÇÃO SOLAR

O sol é uma esfera de matéria gasosa e intensamente quente, com um diâmetro de $1,39 \times 10^6$ km, está a uma distância média, de $1,5 \times 10^8$ km da terra. Sua superfície atinge uma temperatura de cerca de 6.000 °C. A troca de energia entre a terra e o sol ocorre por meio da radiação eletromagnética, que emite energia capaz de ser absorvida em maior ou menor intensidade pelos diversos materiais constituintes terrestres (DUFFIE e BECKMAN, 2013).

A Figura 2 ilustra o espectro da radiação solar, sendo este, em grande parte cerca de 46%, correspondente ao comprimento de onda visível, que produz ao olho humano a sensação de luminosidade (IKEMATSU, 2007). O espectro eletromagnético pode ser dividido em faixas, conforme os comprimentos de onda (λ) das radiações: radiação ultravioleta ($\lambda < 0,38 \mu\text{m}$); radiação visível ($0,38 \mu\text{m} < \lambda < 0,78 \mu\text{m}$) e radiação infravermelha ($\lambda > 0,78 \mu\text{m}$) (DUFFIE e BECKMAN, 2013).

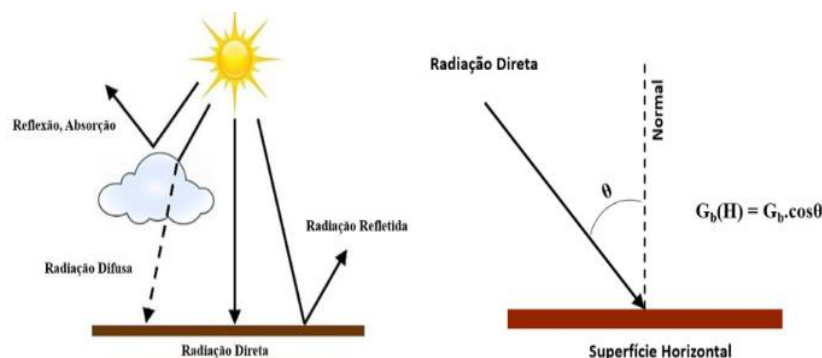


Fonte: Adaptado de Ikematsu (2007).

Conforme Pereira et al. (2010), a radiação global que atinge um plano localizado na superfície terrestre pode ser decomposta em três componentes, conforme apresenta a Figura 3.

A radiação direta é constituída pelos raios solares recebidos do sol, que é a radiação que chega à superfície vinda diretamente do disco solar, com cerca de 70% do total da radiação. A radiação difusa é proveniente de todo o céu visível, excluindo o disco solar, originada pelos raios não diretos e dispersos pela atmosfera, é muito variável no tempo, sendo a radiação que é dissipada pelas nuvens e poeiras em suspensão, com cerca de 28% do total da radiação. A radiação refletida é constituída pela parcela de radiação que é refletida ao atingir o solo, denominada de radiação de albedo, que é a radiação que chega a uma superfície ao ser refletida por outra superfície, possuindo cerca de 2% do total da radiação.

Figura 3 - Efeitos das radiações direta e difusa na superfície terrestre.



Fonte: FREITAS, 2017.

A radiação difusa é inicialmente interceptada por constituintes do ar, como vapor de água, dióxido de carbono, nuvens, poeiras, para depois ser liberada em várias direções. Com isso, as proporções relativas às radiações difusa e direta vão depender do local, estação do ano, elevação do nível médio do mar e período do dia (SEN, 2004).

O fluxo médio anual da radiação solar que chega à terra, sobre uma superfície horizontal é denominado constante solar (I_{on}), sendo seu valor de 1367 W.m^{-2} fora da atmosfera (DUFFIE e BECKMAN, 2013). O Brasil é privilegiado em termos de incidência de radiação solar global no semiárido, devido a sua posição privilegiada no globo terrestre em toda sua grande extensão territorial, e por ser um país tropical onde algumas regiões apresentam temperaturas elevadas na maior parte do ano, energia ainda muito pouco explorada. Segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar (2006), o nordeste apresentou irradiação entre $5,7$ e $6,1 \text{ kWh.m}^{-2}$, sendo considerado uma região com grande potencial de aproveitamento de energia solar, seguido da região norte com variação entre $5,2$ e $5,8 \text{ kWh.m}^{-2}$, e com a maior variabilidade interanual na região sul, entre $4,6$ e $6,0 \text{ kWh.m}^{-2}$, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Energia solar nas regiões brasileiras.



Fonte: Adaptado de Atlas Brasileiro de Energia Solar (2006).

3.4 DESSALINIZAÇÃO

A dessalinização é uma tecnologia comprovada que envolve o processo de remoção de sais dissolvidos de uma solução salina, para transformá-lo em água potável (SANTOSH et al., 2019). Os processos de dessalinização podem ser térmicos ou por membranas. Na dessalinização térmica, a água doce é produzida através de um processo de mudança de fase, usando evaporação e condensação para separar os sais da água, enquanto por membranas os processos de dessalinização são baseados em barreiras para restringir a passagem de sal (ANIS, HASHAIKEH e HILAL, 2019).

Os processos de dessalinização por membranas dependem da eletricidade como principal fonte de energia. A membrana é definida como uma barreira que permite a passagem de moléculas de água e evita à passagem de outras moléculas maiores, como sais, bactérias, metais e vírus (KOCHKODAN e HILAL, 2015).

Alguns processos de dessalinização são: Osmose inversa (OI), Eletrodialise (ED), Dessalinização do flash de vários estágios (MSF), Dessalinização de múltiplos efeitos (MED), Dessalinização por compressão de vapor (VC) e a Dessalinização solar.

3.4.1 Osmose inversa (OI)

É um processo que utiliza membranas semipermeáveis para separar contaminantes da água de alimentação sob a influência da pressão osmótica, geralmente são necessárias altas pressões (50–80 bar) para superar a pressão osmótica, de modo que a água possa passar através de uma área unitária da membrana. É classificado como o processo de maior eficiência energética usado na produção de água doce, com cerca de 45% da capacidade global de dessalinização (WANG et al., 2017).

3.4.2 Eletrodialise (ED)

É o transporte de íons através de uma membrana semipermeável sob a força propulsora da diferença de potencial (LOUTATIDOU et al., 2017). A ED tem sido usado para dessalinização de água salobra em diferentes regiões do mundo (STRATHMANN, 2010). Esse processo remove os íons de sal através da aplicação de uma corrente elétrica contínua (CC), na qual a água de alimentação salina que contém sais é separada, movendo-se em direção aos eletrodos carregados de carga que estão imersos no eletrólito (AL-OTHAMAN et al., 2019).

3.4.3 Dessalinização do flash de vários estágios (MSF)

A MSF foi introduzida no início dos anos 50, aquecendo a água em um recipiente e geralmente condensando-se o vapor em uma série de tubos que passam através do recipiente. Logo após esta água salina aquecida flui então para outro recipiente, esse denominado de estágio, onde a pressão favorece ferver a água imediatamente (HANSHIK et al., 2016). A entrada brusca da água aquecida na câmara faz com que a mesma ferva rapidamente, provocando uma quase explosão ou transformação rapidamente em vapor. Comumente uma pequena parcela desta água é convertida em vapor d'água, pois dependerá da pressão mantida no estágio, já a ebulição irá continuar apenas até o ponto em que a água resfriará. O vapor gerado pelo *flashing* será convertido em água doce através da condensação em tubos de troca de calor que correm através de cada estágio. O resfriamento dos tubos ocorrerá através da entrada de água que vai para o aquecedor de água salgada, isso aquece a água de forma que a quantidade de energia térmica necessária no aquecedor para aumentar a temperatura da água salgada seja minimizada (SOUSA, 2006).

3.4.4 Dessalinização de múltiplos efeitos (MED)

A MED está entre as mais antigas tecnologias praticadas na dessalinização, composta por vários pré-aquecedores, unidades de destilação e condensadores. O processo de evaporação da água salina ocorre na superfície de um feixe de tubos aquecidos pelo vapor, onde o mesmo condensa dentro dos tubos, e o vapor gerado em cada efeito é usado no efeito subsequente. O vapor é submetido a uma redução significativa de pressão e temperatura (AL-SHAMMIRI e SAFAR, 1999). A tecnologia MED é geralmente operada como um sistema único, sem uma grande quantidade de salmoura recirculando em torno da planta, reduzindo a necessidade de encanamento e a formação de incrustações (KALOGIROU, 2005).

3.4.5 Dessalinização por compressão de vapor (VC)

É semelhante a tecnologia MED, com a diferença de que a VC utiliza um compressor para o vapor de água gerado na evaporação da água a altas pressões. É utilizada para unidades de dessalinização de água salina em larga e média escala. O calor para evaporação da água vem da compressão do vapor. Na unidade em que ocorre a compressão do vapor, um jato de vapor é formado através de um orifício que direciona o vapor de água do recipiente principal, obtendo uma pressão ambiente mais baixa na unidade. O jato de vapor comprime o vapor de água extraído. Esta mistura é condensada nas paredes do tubo para fornecer energia (calor de condensação) para evaporar a água salina que é aplicada no lado externo das paredes do tubo no recipiente (SOUSA, 2006).

3.5 DESSALINIZAÇÃO SOLAR

Com o esgotamento das fontes de água doce causando uma ameaça iminente, o foco na dessalinização como um meio de atender à demanda global de água nunca foi tão grande. O aumento da população e o subsequente aumento da demanda por água consumível foram citados como os principais impulsionadores do mercado global de dessalinização (AHMED, HASHAIKEH e HILAL, 2019). É a tecnologia mais simples que emprega energia solar como energia ampla e renovável fonte para a dessalinização de água.

O processo térmico de dessalinização solar corresponde ao processo natural do ciclo da água, onde, a água salgada aquece, evapora, condensa e precipita sob a forma de água potável.

Para que ocorra a evaporação da água, é necessário atingir uma temperatura adequada em relação à temperatura ambiental e, ao mesmo tempo, assegurar uma grande quantidade de energia para manter o processo.

A utilização da energia solar para a obtenção de água destilada é uma técnica já experimentada na antiguidade. No século IV a.C., Aristóteles usou este método para evaporar água contaminada condensando-a para uso potável. Os primeiros trabalhos documentados na área de destilação solar datam do século XVI, onde os alquimistas árabes usavam este conceito para a produção de água potável (TIWARI e TRIPATHI, 2003). Em 1961, foram publicados dois importantes trabalhos na área de destilação solar: o trabalho de Dunkle sobre destiladores solares simples e múltiplo efeito e o trabalho de Lof, Eibling e Bloemer, sobre o balanço de energia em destiladores solares (PUGSLEY, et al., 2016).

Embora outras formas de energia renovável também tenham sido exploradas para processos de dessalinização, a energia solar é de especial interesse, pois é a fonte de energia permanente mais abundante na terra (THANGAVEL e SRIDEVI, 2014). Estudos destacaram que algumas das regiões mais áridas do mundo, que dependem da dessalinização para atender às suas necessidades de água, possuem alta irradiação solar. Nos últimos 25 anos o interesse em energia solar para dessalinização tem aumentado de maneira significativa (SHARON e REDDY, 2015).

A dessalinização solar é uma alternativa promissora que pode atender às necessidades humanas de água doce com uma fonte de energia sustentável. Apresenta uma vantagem econômica considerável sobre outros processos de destilação devido ao custo reduzido de operação e manutenção. Os sistemas de dessalinização solar são usados com uma ampla variedade de projetos, configurações, geometria, materiais de fabricação, e de simples operação (ELANGO, GUNASEKARAN e SAMPATHKUMAR, 2015).

O sistema de dessalinização pode ser direto quando a energia é captada diretamente no coletor solar, enquanto nos sistemas solares indiretos de dessalinização, a energia é convertida como energia térmica ou elétrica que por sua vez é usada para conduzir a dessalinização.

Nos últimos anos, novos materiais facilitaram a eficiência dos dessalinizadores, tornando a dessalinização solar direta uma tecnologia promissora. A produtividade de um dessalinizador depende dos vários parâmetros como a profundidade da lâmina de água, o isolamento térmico, a diferença de temperatura entre o vidro e a água, a velocidade do vento, a temperatura ambiente e a radiação solar (ARUNKUMAR et al., 2019).

3.5.1 Tipos de dessalinizadores solares

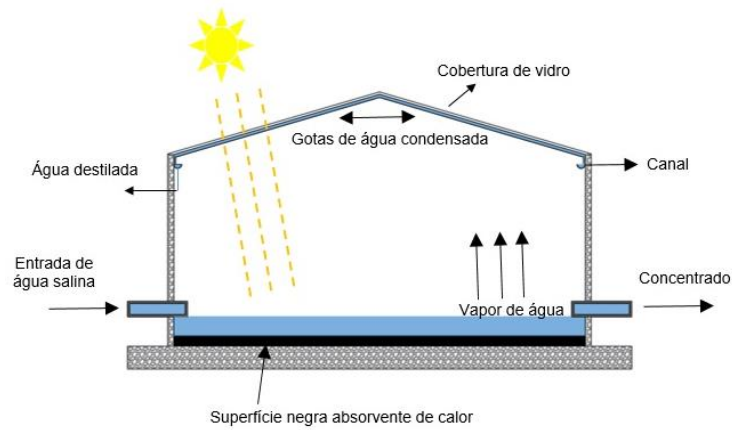
Na dessalinização, a energia solar pode ser utilizada para converter água salgada em água doce de uma forma simples e com custo reduzido. Podendo ser considerada uma tecnologia econômica, sendo adequada no fornecimento de água doce para pequenas comunidades e áreas rurais remotas. A salinidade da água de alimentação, a acessibilidade, o isolamento do local, a disponibilidade e viabilidade da rede elétrica e as infraestruturas disponíveis, são fatores que influenciam a escolha da energia solar como recurso para a dessalinização.

A fim de otimizar e aumentar os rendimentos visando a diminuição dos custos, surgiram outros modelos de dessalinizadores solar, como o tipo pirâmide, o solar de multiestágio, o do tipo filme capilar e o capilar com tecido ou tipo mecha. Esses modelos se baseiam no aumento da taxa de evaporação de água pelo aquecimento através de energia solar e a condensação da água destilada.

Dessalinizador solar tipo pirâmide

A dessalinização solar realizada por um dessalinizador tipo pirâmide é considerada uma tecnologia simples, pois reproduz o ciclo natural da água: a radiação solar aquece a lâmina d'água contida em uma bandeja ou recipiente raso de material condutor revestido por uma superfície negra; com a absorção da radiação e elevação da temperatura, a água se transforma em vapor; condensando ao entrar em contato com as faces da superfície da cobertura de vidro, com temperatura mais baixa. Logo após, a lâmina de água condensada é então coletada na parte lateral do dessalinizador. Ao evaporar, ficam contidos na bandeja os sais e as impurezas que havia na água, conforme ilustrado na Figura 5 (CARVALHO, 2015).

Figura 5 - Dessalinizador solar tipo pirâmide

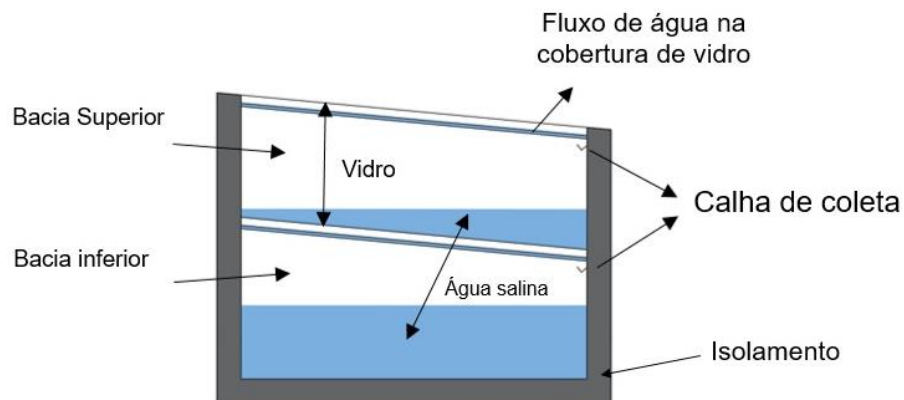


Fonte: Adaptado de Clayton (2006).

Dessalinizador solar do tipo multiestágio

É um conjunto de processos de destilação térmica constituído por estágios sucessivos, no qual há um decréscimo de suas temperaturas e pressões. Configura-se pelo aproveitamento do calor latente de condensação das bandejas anteriores. Em cada estágio acontece transferência de massa e calor entre a água condensada e a água ascendente. A nomenclatura “multiestágios” se justifica por conta da passagem da água por diversas células de ebulição condensação, garantindo elevado grau de pureza da água, apresentado na Figura 6 (KAVITI, YADAV e SHUKLA, 2016).

Figura 6 - Destilador solar do tipo multiestágio.

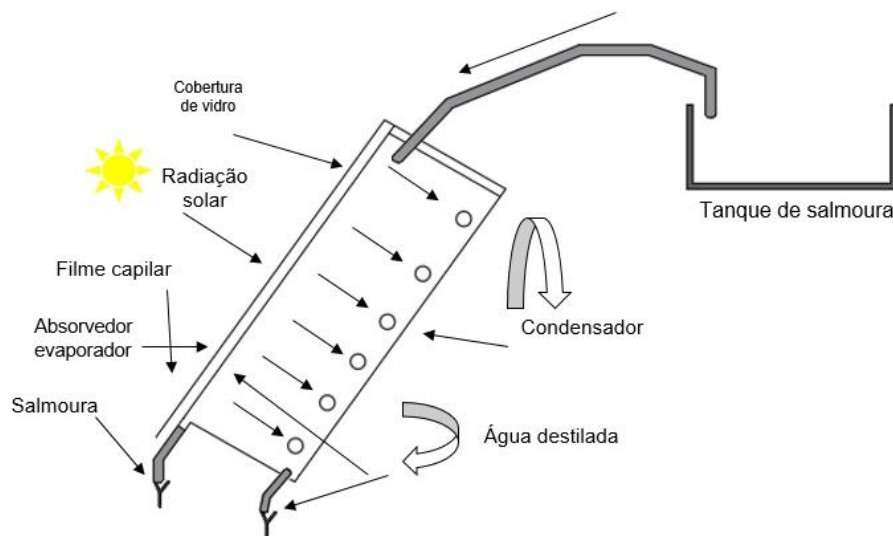


Fonte: Adaptado Kaviti, Yadav e Shukla (2016).

Dessalinizador do tipo filme capilar

São semelhantes ao de múltiplos estágios, pelo fato de aproveitarem o calor latente, mas diferenciam-se por utilizar a propriedade de capilaridade da água, representado na Figura 7. A utilização do filme capilar no dessalinizador solar, aumenta o tempo de permanência da água na placa absorvedora, devido ao fato da água salgada atingir rapidamente uma temperatura mais elevada e, conseqüentemente, aumentar a taxa de evaporação. A vantagem do dessalinizador tipo capilar é manter a salmoura o mais superficial possível, evitando os pontos secos. A eficiência desse modelo depende de parâmetros como absorvibilidade, capilaridade e condutividade térmica do tecido (KAVITI, YADAV e SHUKLA, 2016).

Figura 7 – Dessalinizador solar do tipo filme capilar.

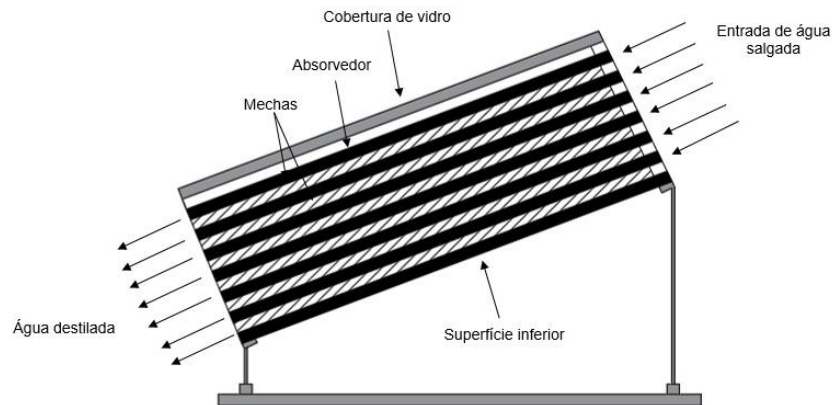


Fonte: Adaptado Carvalho (2015).

Desalinizador solar do tipo mecha

São caracterizados por possuírem uma espécie de tecido na superfície de evaporação que ficam encharcados com a água salobra. A água flui lentamente através do tecido poroso (mecha) que absorve a radiação. A vantagem em relação aos outros é que a mecha por onde flui a água pode ser inclinada, obtendo-se melhor ângulo com o sol, ocasionando menor reflexão e melhor aproveitamento da radiação, outra vantagem é que a mecha possibilita uma camada de água muito fina que pode ser aquecida mais rapidamente conforme ilustrado da Figura 8 (CARVALHO, 2015).

Figura 8 – Dessalinizador solar do tipo mecha.

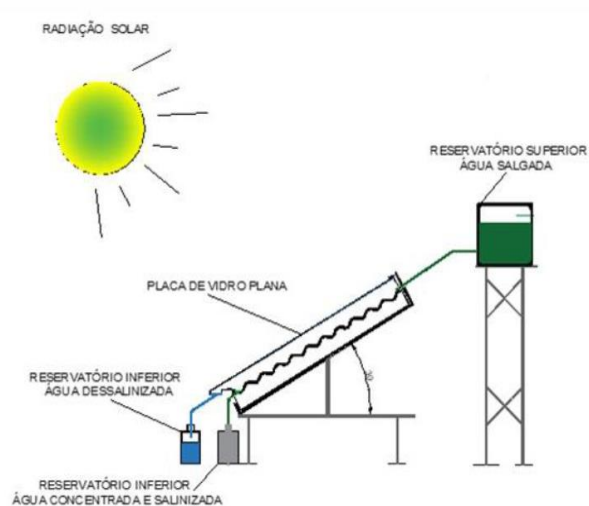


Fonte: Adaptado Kaviti, Yadav, Shukla (2016).

Desalinizador solar do tipo cascata

O dessalinizador do tipo cascata consiste de um tanque de armazenamento, uma placa absorvedora de calor, uma tampa de vidro, o isolamento, e uma carcaça externa, e dispositivos de medição de temperatura e radiação, conforme apresentada na Figura 9. Yadav (2017), relata que o modelo inclinado da cobertura de vidro facilita a transmissão da radiação e a condensação da água destilada.

Figura 9 - Dessalinizador solar do tipo cascata.



Fonte: Adaptado de Dashtban e Tabrizi (2011).

Na Figura 9, a água de alimentação do tanque de armazenamento com vazão constante entra no dessalinizador através de mangueiras flexíveis e válvulas. A placa absorvedora possui uma estrutura composta por degraus, é pintada com tinta preta fosca para melhorar sua capacidade de absorção. Possui uma inclinação de acordo com a latitude da implantação do dessalinizador, no qual obtém o máximo rendimento anual (DASHTBAN e TABRIZI, 2011).

O acúmulo de água formado em cada degrau auxilia o fluxo de água salgada uniformemente na superfície de evaporação. Além disso, ajuda a aumentar o tempo gasto na evaporação. A pequena espessura da água na superfície de evaporação aumenta significativamente a temperatura da água e a taxa de evaporação (TABRIZI, DASHTBAN e MOGHADDAM, 2010). Segundo Sadineni et al. (2008) o desalinizador solar do tipo inclinado mostrou que a produtividade do tipo ondular ainda era aproximadamente 20% superior ao tipo de bandeja.

3.5.2 Eficiência dos dessalinizadores solares

A eficiência dos dessalinizadores solar, pode ser de dois tipos: horária e diária. A eficiência horária reflete a relação entre o calor latente médio gerado pela água produzida de hora em hora e a quantidade total de energia solar absorvida. A variação da irradiância solar durante o dia gera, obviamente, uma variação horária da eficiência da energia solar (RABHI, et al., 2017). A eficiência horária e diária foram calculadas pela Equação 1 e 2, respectivamente (EL-AGOUZ, 2014):

$$\eta_h = \frac{(M_a \times \lambda_a) / 3600}{(A_p \times I)} \quad (1)$$

$$\eta_D = \frac{1}{n} \sum_n \eta_h \quad (2)$$

Onde, M_a (kg) é a produção horária de água, A_p (m²) a área da placa, n é a quantidade de horas do experimento, I (W.m⁻²) irradiação solar e λ_a o calor latente da água (J.Kg⁻¹), que é calculado de acordo com a Equação 3, com referência a temperatura da água T_a (°C) (EL-DESSOUKY e ETTOUNEY, 2002):

$$\lambda_a = (2501.9 - 2.40706T_a + 1.192217 \times 10^{-3}T_a^2 - 1.5863 \times 10^{-5}T_a^3) \times 10^3 \quad (3)$$

Segundo Nafey et al. (2000) o aumento da radiação solar leva ao aumento da produtividade do dessalinizador solar, isto é, intensidades de radiação solar mais altas resultam em aumento da temperatura da massa de água e facilitam o processo de evaporação. Portanto, o material da cobertura de condensação desempenha um papel importante no processo de absorção de radiação solar, influenciando na produtividade do sistema. O aumento da radiação solar resulta em aumento do rendimento do dessalinizador, devido ao aumento das diferenças entre a temperatura da água a ser tratada e a da cobertura de vidro.

Os outros fatores que afetam a produtividade dos dessalinizadores solar, são a velocidade do vento, temperatura ambiente, diferença de temperatura entre a água e o vidro, área superficial da água, profundidade da água, temperatura da água de entrada, área da placa absorvedora e ângulo da cobertura de vidro. A intensidade da radiação solar, a velocidade do vento e a temperatura ambiente não podem ser controladas porque são fatores meteorológicos. Considerando tais fatores que afetam a produtividade dos dessalinizadores solar, várias modificações foram feitas para melhorar a produtividade (VELMURUGAN e SRITHAR, 2011).

Estudos apresentados por Tiwari e Tiwari (2007) afirmam que a profundidade da lâmina da água na bandeja é um parâmetro de grande importância na produtividade dos destiladores solares, cuja relação de grandezas é inversamente proporcional. Recentemente, desalinizadores solar inclinados têm recebido muita atenção devido à maior produtividade do que os tipos de bandeja.

Aumentar a diferença de temperatura entre a cobertura de vidro e a água da bandeja leva a um aumento na circulação natural da massa de ar dentro do dessalinizador solar, como também aumenta a transferência de calor por evaporação e por convecção da água da bandeja para a cobertura de vidro. A diferença de temperatura entre a cobertura de vidro e a água é considerada como a força motriz do processo de condensação (SHARSHIR et al., 2016).

Singh, Bhatnagar e Tiwari (1996) relataram que o rendimento do dessalinizador solar atinge um valor máximo quando a inclinação da cobertura do vidro de condensação é igual à latitude do local, desta forma, a transferência de calor é maior através da cobertura de vidro.

Os dessalinizadores solar inclinados receberam muita atenção devido a produtividade superior aos do tipo de bandeja. Dashtban e Tabrizi (2011), projetaram um dessalinizador inclinado e relataram que a produtividade foi de aproximadamente 20% superior ao tipo de bandeja. Além disso foi observado que a escolha do material da cobertura, influenciou a

eficiência, podendo ser feita de plástico ou vidro. O vidro é o preferido por causa de sua maior transmitância solar para diferentes ângulos de incidência e seu uso a longo prazo, enquanto o polímero pode ser usado para uso a curto prazo.

3.6 TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO DESSALINIZADOR

A ciência da transferência de calor está relacionada com a razão de troca de calor entre corpos quentes e frios chamados de fonte e receptor. Conforme Dewitt e Incropera (2003), a transferência de calor é a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura. Existindo uma diferença de temperatura entre duas regiões, ocorre a passagem de calor de uma região para a outra (COSTA, 1974). Portanto corpos que estejam a temperaturas diferentes trocam calor, os mais quentes perdendo e os mais frios ganhando, sendo que o calor envolvido é denominado calor sensível (FROTA e SCHIFFER, 2001).

Os mecanismos internos e externos da dessalinização solar são pela transferência de calor, em forma de radiação, convecção e condução, que são processos em que não há mudança de fase. Também existem outros fenômenos importantes neste processo, como a evaporação e a condensação, que são processos em que há mudança de fase (BIRD et al., 2004).

Condução de calor

A condução de calor pode ser vista como a transferência de energia das partículas mais energéticas para as partículas de menor energia, em um meio, devido às interações entre elas (DEWITT e INCROPERA, 2003). A Equação 4 representa a taxa de transferência de calor, e é definida pela Lei de Fourier, representada da seguinte forma:

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (4)$$

Em que, q (W) é a taxa de transferência de calor na direção x (m) e é proporcional ao gradiente de temperatura dt/dx ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$), nesta mesma direção. O parâmetro k ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) é a condutividade térmica característica de cada material. A superfície que se dá a passagem de calor é A (m^2) e é perpendicular a direção do fluxo de calor. O sinal de menos representa que o calor é transferido na direção da temperatura decrescente.

Convecção de calor

A transferência de calor por convecção ocorre quando um fluido, como o ar ou a água por exemplo, está em contato com um objeto em que a temperatura é maior do que a de sua vizinhança. O fluido que está em contato com o objeto quente tem a sua temperatura aumentada e, na maioria dos casos, o fluido se expande. Por ser menos denso que o fluido mais frio que o envolve, ele sobe devido ao empuxo. O fluido que o circunda, mais frio, cai para tomar o lugar do mais quente que se elevou, assim estabelece-se uma circulação convectiva (HALLIDAY, RESNICK e WALKER, 2009).

A lei do resfriamento de Newton relata que a taxa de calor por convecção é proporcional à diferença de temperaturas entre o fluido e a superfície, representada pela Equação 5:

$$q = h A (T_s - T_\infty) \quad (5)$$

No qual, h ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$) é o coeficiente de transferência de calor por convecção, A (m^2) é a área que ocorre a passagem de calor e T_s e T_∞ ($^\circ\text{C}$) são as temperaturas da superfície e do fluido, respectivamente.

Radiação térmica

A radiação térmica é a energia emitida pela matéria que se encontra a uma temperatura não nula. A radiação que é emitida pela superfície tem sua origem na energia térmica da matéria delimitada pela superfície e a taxa na qual a energia é liberada por unidade de área (W) que é conhecida como poder emissivo E , da superfície (DEWITT e INCROPERA, 2003). A partir da Equação 6 podemos visualizar a lei de Stefan–Boltzmann:

$$E = \varepsilon \sigma A T_s^4 \quad (6)$$

A radiação é diretamente proporcional a constante de Stefan–Boltzmann ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$), a emissividade (ε) e a temperatura absoluta da superfície elevado a quarta potência.

Evaporação

A evaporação é um fenômeno que, através dele, átomos ou moléculas no estado líquido absorvem energia suficiente para passar para o estado gasoso. A absorção de energia faz com que as espécies químicas aumentem sua energia cinética tornando suficiente para vencer as forças de atração entre elas, e a tensão superficial e evapore. Neste caso, o aumento da temperatura eleva o estado de agitação das partículas, aumenta a pressão de vapor e, conseqüentemente, a evaporação torna-se mais rápida (COSTA, MELO e FERREIRA, 2006).

Condensação

O fenômeno da condensação ocorre quando a fase vapor de uma determinada substância se transforma em líquido. Para a formação desta nova fase, o sistema não pode estar em um estado de equilíbrio, ou seja, para que haja transformação de fase deve haver uma variação no equilíbrio térmico, mecânico ou de concentração de massa (KONDEPUDI e PRIGOGINE, 1998).

Quando vapor entra em contato com uma superfície cuja temperatura está abaixo da temperatura de saturação do vapor, há um desequilíbrio térmico, e o vapor se torna líquido, formando o condensado. Este processo é modelado com o uso das equações de transferência de calor e massa. A condensação pode ser dividida em dois tipos, a homogênea, na qual gotículas de condensados encontram-se suspensas no vapor, e heterogênea, na qual o vapor entra em contato com superfícies frias (POZZOBON, 2015).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O protótipo do dessalinizador solar foi construído no Laboratório de Pesquisa em Ciências Ambientais (LAPECA), do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA) do Centro de Ciências e Tecnologia (CCT) da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), na cidade de Campina Grande - Paraíba, a uma latitude $7^{\circ}13'11''$ sul e longitude $35^{\circ}52'31''$ oeste, com altitude média de 550 metros.

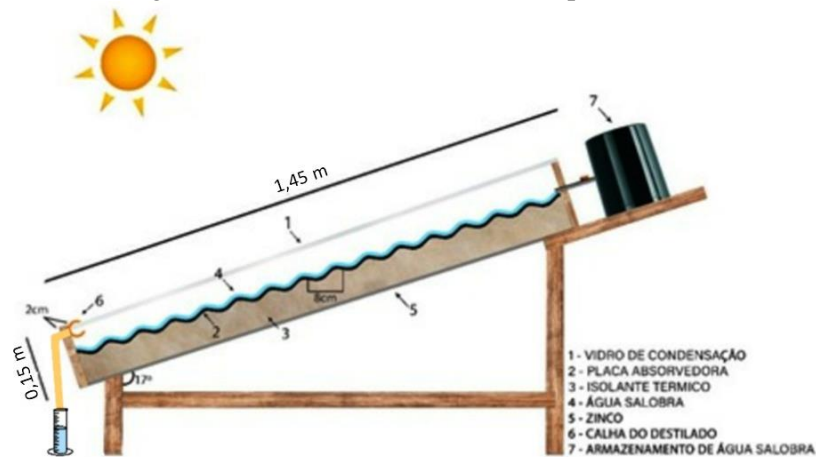
Para a realização da pesquisa, a metodologia utilizada constituiu no levantamento bibliográfico sobre dessalinização solar com identificação e comparação dos principais processos de dessalinização. Optou-se por um modelo inédito de dessalinizador passivo do tipo ondular. Posteriormente foi realizado a construção do dessalinizador e experimentos para a execução dos balanços energéticos e a construção dos gráficos dos perfis de temperatura e de radiação, da produção de água dessalinizada, eficiência térmica, os coeficientes de transferência de calor e as análises térmicas.

4.1 PRÓTOTIPO DO DESSALINIZADOR SOLAR DO TIPO ONDULAR

O novo sistema de dessalinização via energia solar do tipo ondular foi projetado e construído com seus componentes como é apresentado na Figura 10. O mesmo é composto por três partes principais: a placa absorvedora de calor, o vidro de condensação de água dessalinizada e o sistema de isolamento térmico. O dessalinizador possui comprimento de 1,45 m, largura de 0,55 m e 0,15 m de espessura, possuindo uma área de $0,78 \text{ m}^2$. O mesmo opera com uma inclinação de 17° orientado para o norte, fato que maximiza a absorção de calor, como Bouzaid et al, (2019), que utilizou a inclinação da placa de absorção igual a latitude do local, acrescentado a 10° para ajustes de erros. A placa absorvedora possui dimensões de 1,40 m de comprimento e 0,50 m de largura, tem formato de onda que favorece o tempo de permanência da água salobra no sistema, a mesma foi pintada em preto fosco para aumentar a absorção da radiação. Concluída essa etapa, foram feitas as instalações da tampa de vidro, que tem 3 mm de espessura e a distância entre o vidro e a placa absorvedora é de 4 cm, necessária para provocar o efeito estufa e possibilitar o processo de evaporação-condensação. A parte inferior da placa absorvedora é isolada com fibra de vidro para diminuir as perdas de calor para o ambiente.

Na confecção do protótipo do dessalinizador solar, foi priorizada a utilização de materiais de baixo custo, de fácil aquisição no mercado local, de boa resistência e durabilidade, que fossem adequados à sua construção e à proposta do estudo.

Figura 10 – Dessalinizador solar do tipo ondular.



Fonte: Própria, 2020.

4.2 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO

Para avaliar o desempenho inicial do dessalinizador, foram realizados testes, buscando as melhores condições de operação. Foram realizados experimentos, observando o desempenho do dessalinizador. O período de avaliação teve duração de 90 dias e permitiu a apresentação de dados com a estimativa da produção diária de destilado, temperatura na placa, temperatura da água e temperatura do vidro, para posterior avaliação da eficiência do equipamento.

4.3 MODO OPERACIONAL DO DESSALINIZADOR

O dessalinizador foi alimentado com água salobra coletada dos poços artesianos, do sítio Paulo de Sousa, na cidade de Caturité - PB e no sítio Escurinho de Cima na cidade de Juazeirinho - PB, denominados de P1 e P2, respectivamente, e operou com três vazões diferentes, que foram: $2300 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ (V1), $330 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ (V2) e $100 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ (V3), calculadas de acordo a realização do experimento, buscando aumentar o tempo de permanência da água

com a placa absorvedora. O sistema foi realizado em batelada com recirculação, a água salobra na alimentação percorreu a placa absorvedora e foi aquecida pela energia solar. Ao absorver o calor a água evaporou e condensou no lado interno do vidro, em virtude da temperatura do vapor de água ser superior a temperatura do vidro. Em seguida, a água condensada foi coletada por uma calha, sendo contabilizada por uma proveta graduada.

O sistema de dessalinização, foi monitorado no intervalo de 07 às 17 horas, por um período de um mês, posicionado em uma área estratégica sem sombreamento. Foi usado termopares da Alutal Pt-100 de ligas metálicas, para medir a temperatura em diferentes pontos do sistema, que incluiu a temperatura da água salobra, temperatura do vidro, temperatura da placa absorvedora e do isolante térmico. As medições foram executadas a cada 30 minutos. Durante todo o experimento, foi medido o índice de radiação global, através do radiômetro, solarímetro KIMO SL 200 17957, no qual, operou durante todo o funcionamento do dessalinizador. Para análise dos dados e realização dos balanços térmicos, foram utilizados os resultados experimentais e equações da literatura.

4.4 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DAS ÁGUAS

Para verificar o grau de potabilidade das águas antes e no final dos experimentos, as amostras de águas salobras e dessalinizadas foram submetidas a análises físico-químicas, conforme apresentadas no Quadro 01. As análises seguiram a metodologia descrita no *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (BAIRD, EATON e RICE, 2017).

Quadro 01 – Análises físico-químicas.

Parâmetro	Unidade	Metodologia
Alcalinidade	mg CaCO ₃ .L ⁻¹	Titulometria com indicador
Condutividade	µS.cm ⁻¹	Condutimetria
Cor	uH	Colorimetria
Cloreto	mg Cl ⁻¹ .L ⁻¹	Titulometria - Mohr
Dureza	mg CaCO ₃ .L ⁻¹	Titulometria - EDTA
pH	adimensional	pHmetria
Potássio	mg K ⁺ .L ⁻¹	Fotometria de chama
Sódio	mg Na ⁺ .L ⁻¹	Fotometria de chama
Temperatura	°C	Instrumental - Termopar
Turbidez	NTU	Nefelometria

4.5 BALANÇO DE ENERGIA NO DESSALINIZADOR.

Para realizar a modelagem de um sistema de dessalinização solar existem certas dificuldades por causa das características transientes, e também o fato da não homogeneidade da intensidade de radiação solar de região para região. O modelo que apresenta produtividade e eficiência em um determinado estado do país, poderá não ocorrer em outros estados do país ou em outros países (DUNKLE, 1961).

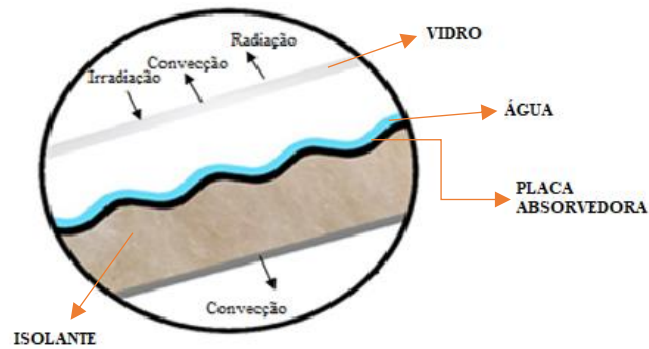
As temperaturas da tampa de vidro, da água, da placa absorvedora e do isolante podem ser avaliadas, calculando as equações do balanço de energia para cobertura de vidro, água salobra, placa absorvedora de calor e do isolante. A execução dos balanços são para realização dos gráficos dos coeficientes de transferência de calor no dessalinizador solar ondular. As seguintes considerações foram aplicadas no desenvolvimento dos modelos matemáticos:

- Não há vazamento do vapor de água no dessalinizador;
- A temperatura de cada componente é uniforme;
- As perdas de calor pelas laterais e pelo fundo são insignificantes;
- Presume-se que no início do processo as temperaturas de todas as superfícies são iguais à temperatura ambiente;

4.5.1 Balanço global de energia

O balanço global de energia é obtido, entre as diferenças da transferência de calor que entram e saem do dessalinizador, e que ocorre conforme apresentado na Figura 11. A variação de energia, é calculada pela diferença entre a energia que está entrando no sistema (irradiação) e a energia que está saindo do sistema (radiação e convecção entre o vidro e o ambiente, a convecção entre o isolante e o ambiente).

Figura 11 – Balanço global de energia no dessalinizador ondular.



Fonte: Própria, 2020.

A irradiação solar chega no vidro, parte dela é refletida ao ambiente outra é absorvida. Através das transferências de calor por convecção e radiação do vidro com o ambiente e do isolante com o ambiente, o sistema sofre perdas. Deste modo o balanço global é definido na Equação 7:

$$\frac{dE_n}{dt} = \alpha_v I(t) A_v - [h_{r.va} A_v (T_v - T_{viz}) + h_{c.va} A_v (T_v - T_{amb}) + h_{c.ia} A_{iso} (T_{iso} - T_{amb})] \quad (7)$$

Na Equação 7, $\frac{dE_n}{dt}$ ($\text{W}\cdot\text{s}^{-1}$) é a variação da energia total em relação ao tempo, α_v é a absorvidade do vidro, $I(t)$ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) é a irradiação solar, $h_{r.va}$ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$) é o coeficiente de transferência de calor por radiação entre o vidro e o ambiente, $h_{c.va}$ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$) é o coeficiente de transferência de calor por convecção entre o vidro e o ambiente, $h_{c.ia}$ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$) é o coeficiente de transferência de calor por convecção entre o isolante e o ambiente, A_v (m^2) a área do vidro, A_{iso} (m^2) a área do isolante, T_v ($^{\circ}\text{C}$) a temperatura do vidro, T_{viz} ($^{\circ}\text{C}$) a temperatura das vizinhanças, T_{amb} ($^{\circ}\text{C}$) a temperatura do ambiente e T_{iso} ($^{\circ}\text{C}$) a temperatura do isolante. A irradiação solar, é representada de acordo com Sarhaddi et al. (2017), pela Equação 8.

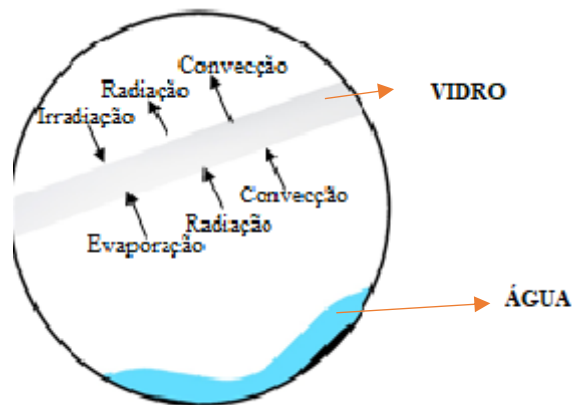
$$I(t) = I_{ou} [\tau b \cos\theta + \tau d \cos\theta_z \left(\frac{1+\cos\beta}{2} \right) + 0,2 (\tau b + d) \cos\theta_z \left(\frac{1-\cos\beta}{2} \right)] \quad (8)$$

No qual, I_{ou} ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) é a irradiação solar perpendicular a placa irradiada, τb e τd são as transmissividades por difusão, o θ e θ_z são os ângulos zenital e o da irradiação do vidro respectivamente. A distância da água com o vidro representado por d (m), e β (K^{-1}) é o coeficiente térmico de expansão.

4.5.2 Balanço energético na cobertura de vidro

No vidro ocorre a condensação da água, que após ser evaporada encontra-o com uma temperatura menor, ocorrendo assim a condensação do destilado, desta forma, a variação de energia no vidro de condensação é calculada pela diferença entre a energia que está chegando na cobertura de vidro e a energia que está saindo do vidro para o ambiente conforme apresentado na Figura 12. O termo do lado esquerdo na Equação 9 representa o acúmulo de energia no vidro, já no lado direito temos os termos de entrada (irradiação solar, convecção, radiação e a evaporação da água para o vidro) e os termos de saída (radiação e convecção entre o vidro e o ambiente).

Figura 12 – Balanço de energia térmica para a cobertura de vidro



Fonte: Própria, 2020.

$$m_v C_v \frac{dT_v}{dt} = \alpha_v I(t) A_v + (h_{e.av} + h_{c.av} + h_{r.av}) A_a (T_a - T_v) - [h_{r.va} A_v (T_v - T_{viz}) + h_{c.va} A_v (T_v - T_{amb})] \quad (9)$$

Em que, $\frac{dT_v}{dt}$ ($\text{W} \cdot \text{s}^{-1}$) é a variação da temperatura do vidro em relação ao tempo, m_v (kg) representa a massa do vidro, C_v ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) é a capacidade calorífica específica do vidro, $h_{e.av}$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) o coeficiente de transferência de calor por evaporação entre a água e o vidro, $h_{c.av}$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) o coeficiente de transferência de calor por convecção entre a água e o vidro, $h_{r.av}$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) o coeficiente de transferência de calor por radiação entre a água e o vidro, A_a (m^2) é a área da lâmina água e T_a ($^{\circ}\text{C}$) é a temperatura da água. Os

coeficientes $h_{e.av}$, $h_{r.av}$, são calculados de acordo com Dashtban e Tabrizi, (2011), pelas Equações 10 e 11 respectivamente.

$$h_{e.av} = 0,01623 h_{c.av} \left[\frac{P_a - P_v}{T_a - T_v} \right] \quad (10)$$

$$h_{r.av} = \mathcal{E}_{eff} \sigma + [(T_a + 273)^2 + (T_v + 273)^2] [T_a + T_v + 546] \quad (11)$$

A emissividade efetiva (\mathcal{E}_{eff}) é expressa de acordo com Dashtban e Tabrizi (2011), pela Equação 12, σ é a constante de Stefan–Boltzmann. As emissividades da água e do vidro são representadas respectivamente, por \mathcal{E}_a e \mathcal{E}_v .

$$\mathcal{E}_{eff} = \frac{1}{\left[\frac{1}{\mathcal{E}_a} + \frac{1}{\mathcal{E}_v} - 1 \right]} \quad (12)$$

E o coeficiente de convecção entre a água e o vidro $h_{c.av}$, é calculado segundo Tabrizi (2010) pela Equação 13.

$$h_{c.av} = 1.22 \left(\frac{k_v}{d} \right) \left(\frac{Gr'}{Pr} \right)^{0.22} \quad (13)$$

De acordo com Tiwari et al. (2006), os parâmetros P_a e P_v são as pressões parciais da água e do vidro e que são calculadas pelas Equações 14 e 15.

$$P_a = \exp \left[25,317 - \frac{5144}{T_a - 273} \right] \quad (14)$$

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

A condutividade térmica do vidro (k_v), o número de Grashof modificado (Gr') e o número Prandtl (Pr), conforme as equações 16, 17 e 18 descritas por Sarhaddi et al. (2017).

$$k_v = 0,0244 + 0,7673 \times 10^{-4} T_i \quad (16)$$

$$Gr' = \frac{\beta' g d^3 \rho_v^2 \Delta T'}{\mu^2} \quad (17)$$

$$Pr = \frac{\mu_v C_v}{K_v} \quad (18)$$

Onde, T_i (°C) é a média entre as temperaturas da água e do vidro, g ($m.s^{-2}$) é a aceleração da gravidade, β' (K^{-1}) é o coeficiente de expansão térmica, $\Delta T'$ é a diferença da temperatura efetiva, μ ($Ns.m^{-2}$) é a viscosidade do fluido, e ρ_v ($kg.m^{-3}$) é a massa específica do vidro, e são determinados pelas equações 19, 20, 21 e 22, descrita por Sarhaddi et al. (2017).

$$\beta' = \frac{1}{T_i + 273} \quad (19)$$

$$\Delta T' = \frac{(T_a - T_v) + (P_a - P_v)(T_a - 273)}{2,689 \times 10^3 - P_a} \quad (20)$$

$$\mu = 1,718 \times 10^{-5} + 4,62 \times 10^{-8} T_i \quad (21)$$

$$\rho_v = \frac{353,44}{T_i + 273} \quad (22)$$

Os coeficientes externos de transferência de calor no dessalinizador entre o vidro e o ambiente são calculados de acordo com Madhuri e Tiwari (1985), o coeficiente convectivo $h_{c.va}$ é calculado conforme a Equação (23),

$$h_{c.va} = 2,8 + (3,0 \times v) \quad (23)$$

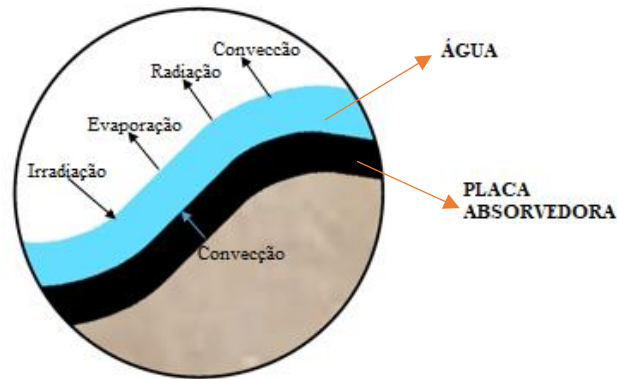
Onde v ($m.s^{-1}$) é usado para expressar a velocidade do vento. Já o coeficiente radiativo é calculado pela Equação (24).

$$h_{r.va} = \varepsilon_g \sigma \left[\frac{(T_v + 273)^4 - (T_{viz} + 273)^4}{(T_v - T_{amb})} \right] \quad (24)$$

4.5.3 Balanço energético na água salobra

A variação da energia da água salobra em relação ao tempo é a diferença entre a transferência de calor que entra e sai da lâmina de água, esquematizada pela Figura 13.

Figura 13 - Balanço de energia térmica para a água salobra



Fonte: Própria, 2020.

De acordo com a Equação 25, o termo esquerdo representa a variação de energia água, e o lado direito a entrada (irradiação e convecção) e saída (evaporação, convecção e radiação) de energia da água.

$$m_a C_a \frac{dT_a}{dt} = \tau_v \alpha_a I_{(t)} A_a + h_{c.pa} A_p (T_p - T_a) - [(h_{e.av} + h_{c.av} + h_{r.av}) A_a (T_a - T_v)] \quad (25)$$

Em que, m_a (kg) é a massa da água, C_a ($J.kg^{-1}.K^{-1}$) a capacidade calorífica da água, $\frac{dT_a}{dt}$ ($W.s^{-1}$) a variação da temperatura da água em relação ao tempo, τ_v a transmissividade do vidro, α_a a absorvidade da água, T_p ($^{\circ}C$) a temperatura da placa. Sendo que $h_{c.pa}$ ($W.m^{-2}.K^{-1}$) é o coeficiente de convecção entre a superfície da placa absorvedora e a água, reportado por Sarhaddi et al. (2017), e expresso pela Equação 26, e A_p (m^2) é a área da placa absorvedora.

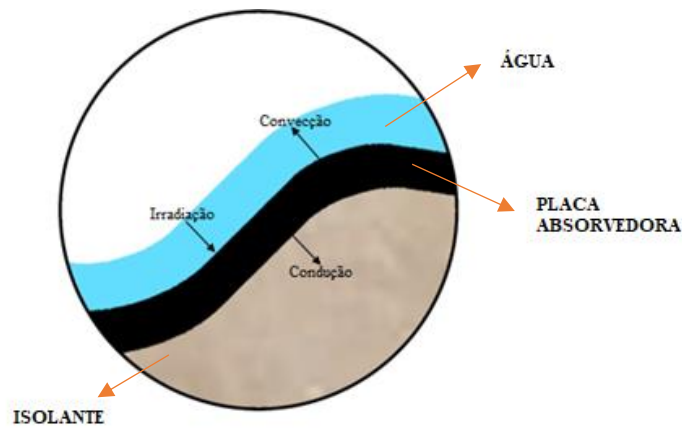
$$h_{c.pa} = 0,54 \frac{k_a}{x_a} (Gr Pr_a)^{0,25} \quad (26)$$

Onde k_a ($W.m^{-1}.K^{-1}$) é a condutividade térmica da água e x_a (m) é a espessura da lâmina de água.

4.5.4 Balanço energético na placa absorvedora ondular

A placa absorvedora de calor ondular é de suma importância, pois é o local em que a água fica armazenada para que ocorra a dessalinização solar, deste modo a transferência de calor é demonstrado na Figura 14.

Figura 14 - Balanço de energia térmica para a placa absorvedora ondular.



Fonte: Própria, 2020.

A variação de energia na placa absorvedora ondular é calculada pela diferença entre a energia que entra e a energia que sai da placa. De acordo com a Equação 27, o termo esquerdo representa a variação de energia da placa com o tempo, e o termo do lado direito representa a irradiação solar que atravessa o vidro e a água salobra, chegando na placa, em contrapartida ocorre a saída por convecção e por condução entre a placa e o isolante térmico.

$$m_p C_p \frac{dT_p}{dt} = \tau_v \tau_a \alpha_p I_{(t)} A_p - \left[\frac{A_p k_{iso}}{x_{iso}} (T_p - T_{iso}) + h_{c.pa} A_p (T_p - T_a) \right] \quad (27)$$

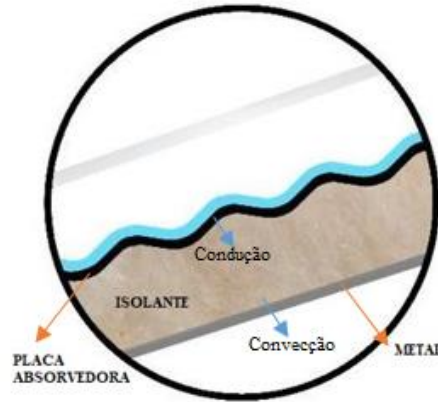
Onde, m_p (kg) é a massa da placa absorvedora, C_p ($J.kg^{-1}.K^{-1}$) a capacidade calorífica da placa absorvedora, $\frac{dT_p}{dt}$ ($W.s^{-1}$) a variação da temperatura da placa absorvedora em relação ao tempo, α_p a absorvidade da placa, τ_a a transmissividade da água, τ_v a transmissividade do vidro, a k_{iso} ($W.m^{-1}.K^{-1}$) a condutividade térmica do isolante, x_{iso} (m) é a espessura do isolante.

4.5.5 Balanço energético no isolante térmico

Com o objetivo de minimizar as perdas térmicas do dessalinizador para o ambiente, é necessário colocar um isolante térmico que possua uma condutividade térmica baixa, deste modo, o balanço de energia térmica é representado na Figura 15. O balanço de energia que acontece no isolante, é representado pela diferença entre a energia que está entrando e saindo no sistema. Desta forma de acordo com a Equação 28, o termo esquerdo representa a variação

da energia acumulada no isolante e o termo direito representa a diferença entre o calor que chega por condução realizada pela placa e a saída por convecção do dessalinizador com o ambiente.

Figura 15 - Balanço de energia térmica para o isolante térmico.



Fonte: Própria, 2020.

$$m_{iso} C_{iso} \frac{dT_{iso}}{dt} = \frac{A_p k_{iso}}{x_{iso}} (T_p - T_{iso}) - [h_{c,ia} A_{iso} (T_{iso} - T_{amb})] \quad (28)$$

Em que, m_{iso} é a massa do isolante e C_{iso} ($J.kg^{-1}.K^{-1}$) a capacidade calorífica do isolante, $\frac{dT_{iso}}{dt}$ ($W.s^{-1}$) a variação da temperatura em relação ao tempo, A_p (m^2) a área da placa, k_{iso} ($W.m^{-1}.K^{-1}$) a condutividade térmica do isolante, x_{iso} (m) a espessura do isolante, e $h_{c,ia}$ ($W.m^{-2}.K^{-1}$) é o coeficiente de convecção entre a superfície do isolante térmico e o ambiente e A_{iso} (m^2) é a área do isolante.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

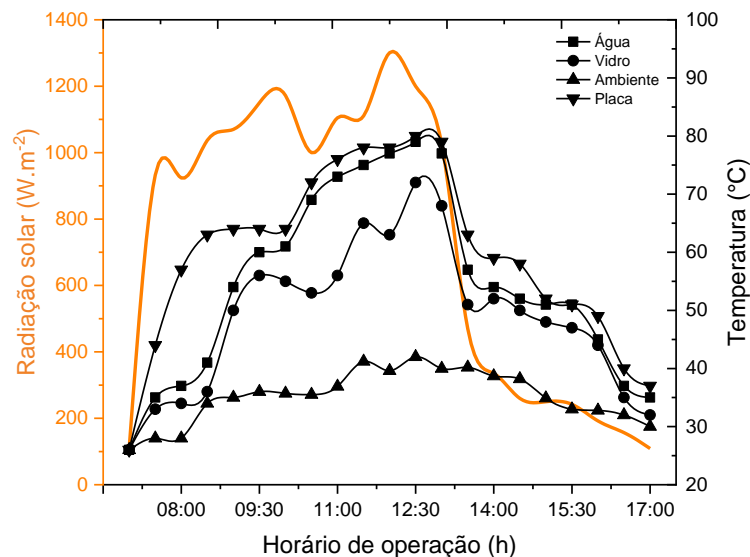
Os resultados obtidos estão divididos em: apresentação dos perfis de temperatura e de radiação, a produção de água dessalinizada em função da temperatura, eficiência térmica do dessalinizador, coeficientes de transferência de calor no dessalinizador, análise térmica do dessalinizador e o monitoramento da qualidade de água.

5.1 PERFIS DE TEMPERATURA E DE RADIAÇÃO

O comportamento do desempenho do dessalinizador é caracterizado pelas diferentes temperaturas que ocorre no seu interior. Desta forma, a diferença de temperatura entre a lâmina de água e a cobertura de vidro são fundamentais para o aumento da eficiência do dessalinizador.

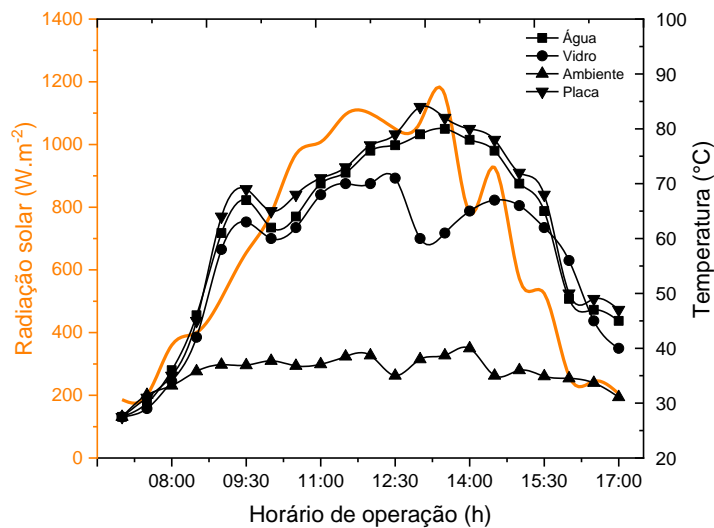
Na Figura 16 pode ser observado a comparação entre a variação horária das temperaturas da água, do vidro, do ambiente, da placa e a radiação solar utilizada no experimento, utilizando uma vazão de $2300 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ (V1) e a água do poço P1. Podemos observar que ocorreram variações nas temperaturas ao logo do experimento. A partir das 07 horas todas as temperatura iniciaram com o valor de $26 \text{ }^\circ\text{C}$, atingindo os valores máximos as 12:30 horas, para a placa ($79,83 \text{ }^\circ\text{C}$), para a água ($78,85 \text{ }^\circ\text{C}$) e para o vidro ($71,93 \text{ }^\circ\text{C}$), o que mostra uma concordância nos valores obtidos das temperaturas, pois ficou constatado que a temperatura da placa foi maior que a da água e, esta por sua vez, foi maior que a temperatura interna do vidro. Além disso esses valores foram alcançados logo após o índice de radiação solar de $1301 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Figura 16 – Perfis de temperatura e radiação do dessalinizador para a vazão V1 e água do poço P1



A Figura 17 apresenta a variação horária das temperaturas placa, da água, do vidro, do ambiente e a radiação solar utilizada no experimento, para a vazão V1 e a água do poço P2. O perfil da temperatura da água salobra inicia às 7 horas com 27,5 °C e atinge o valor máximo de 80 °C às 14:00 horas, 30 minutos após a incidência de radiação solar máxima de 1178 W.m⁻² ser alcançada. Depois das 14:00 as temperaturas do dessalinizador começam a diminuir gradativamente com a diminuição da radiação solar. Estes resultados também foram constatados por Hansen, Narayanan e Murugavel (2015), que possui uma radiação de 1040 W.m⁻². Pois os mesmos observaram que as temperaturas no dessalinizador aumentam gradativamente pela manhã e após às 14:00 horas as mesmas diminuíram gradualmente, conforme a diminuição na intensidade de energia solar.

Figura 17 – Perfis de temperatura e radiação do dessalinizador para a vazão V1 e água do poço P2.



A partir das Figuras 16 e 17, as variações de radiação foram atribuídas as oscilações climáticas, no qual fez com que a temperatura da placa fosse maior que a da água. De maneira geral, nas primeiras horas, as temperaturas da placa e da água foram próximas, pelo fato do sistema está iniciando o processo de dessalinização solar e a incidência de radiação solar ser baixa. Além disso, a intensidade de radiação aumentou até as 12:00 horas e diminuiu com o passar do tempo.

A Figura 18 representa a variação horária das temperaturas da placa, da água, do vidro, do ambiente, e a radiação solar utilizada no experimento, para a vazão de 330 mL.min⁻¹ (V2) e a água do poço P1. O perfil de temperatura da água salobra iniciou às 07:00 horas com 26,2 °C e atingiu o valor máximo de 87,3 °C às 13:00 horas, do mesmo modo que para a placa e para o

vidro de 85°C e 84°C respectivamente, uma hora após da incidência de radiação solar máxima, de 1203 W.m⁻². A Figura 19 ilustra a variação horária das temperaturas da água, do vidro, do ambiente, da placa e a radiação solar utilizada no experimento, para a vazão V2 e a água do poço P2. O valor máximo de radiação solar foi às 13:00 horas com 1162 W.m⁻² e o mínimo às 17:00 horas com 95 W.m⁻². As temperaturas da placa, da água permaneceram próximas, com valores máximos de 79°C e 76°C, respectivamente às 13:00 horas mesma hora do valor máximo de radiação. De acordo com Dashtban e Tabrizi (2011), a maior diferença entre a temperatura da superfície da água e a cobertura de vidro é um fator importante que afeta a produtividade diária de um dessalinizador solar, portanto uma maior diferença de temperatura entre essas superfícies gera uma maior produtividade.

Figura 18 – Perfis de temperatura e radiação do dessalinizador para a vazão V2 e água do poço P1.

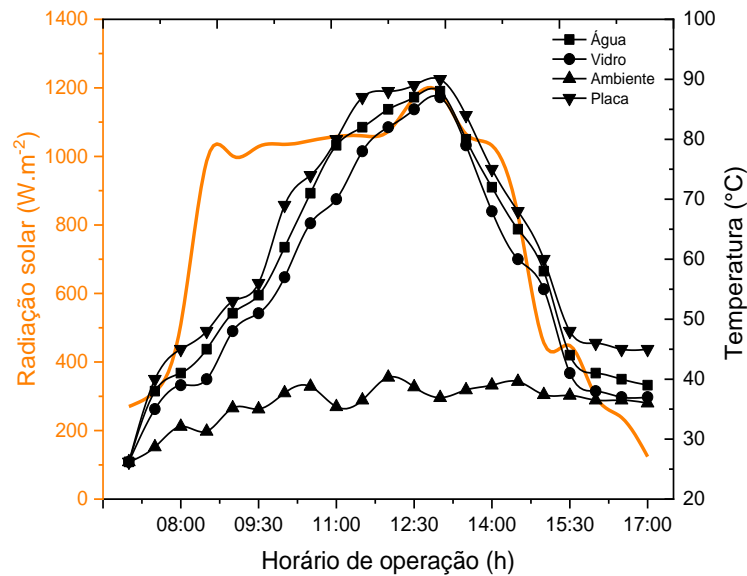
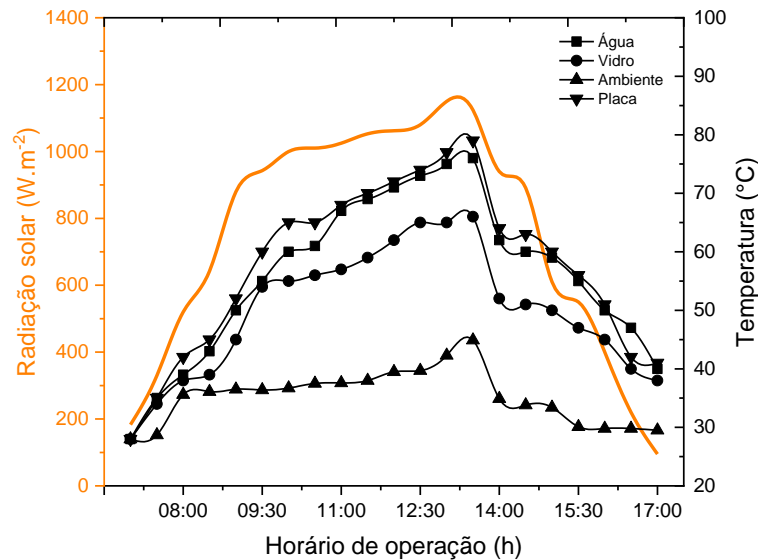


Figura 19 – Perfis de temperatura e radiação do dessalinizador para a vazão V2 e água do poço P2.



A Figura 20 apresenta os dados da vazão $100 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ (V3) e a água do poço P1, observamos a variação da temperatura em função do horário de operação e a radiação. O valor máximo de radiação solar encontrado foi às 14:00 horas com $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ e o mínimo às 17 horas com $110 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. As temperaturas da placa, da água permaneceram próximas, com valores máximos de $72 \text{ }^\circ\text{C}$ e $69 \text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente às 14:00 horas mesma hora do valor máximo de radiação, comportamento similar obtido na V2. Na Figura 21 abaixo apresenta a variação horária em relação a radiação e as temperaturas da água do vidro, do ambiente e da placa para a vazão $100 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ (V3) e a água do poço P2. Podemos observar na Figura 21, o valor máximo de radiação solar foi às 14:00 horas com $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ e o mínimo às 17:00 horas com $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, por outro lado, as temperaturas da placa e da água permaneceram próximas em 49°C e 45°C . O perfil da temperatura da água salobra inicia às 07:00 horas com $26 \text{ }^\circ\text{C}$ e atinge o valor máximo de 45°C às 14:00 horas, no mesmo horário da maior incidência da radiação solar.

Figura 20 – Perfis de temperatura e radiação do dessalinizador para a vazão V3 e água do poço P1.

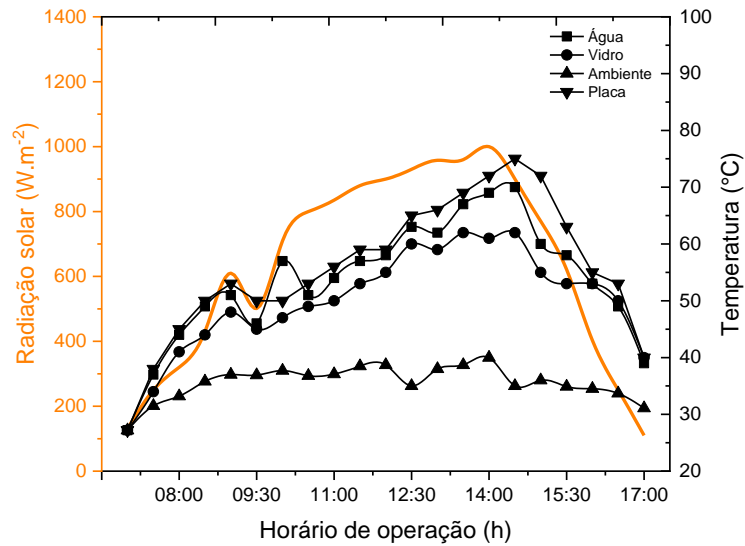
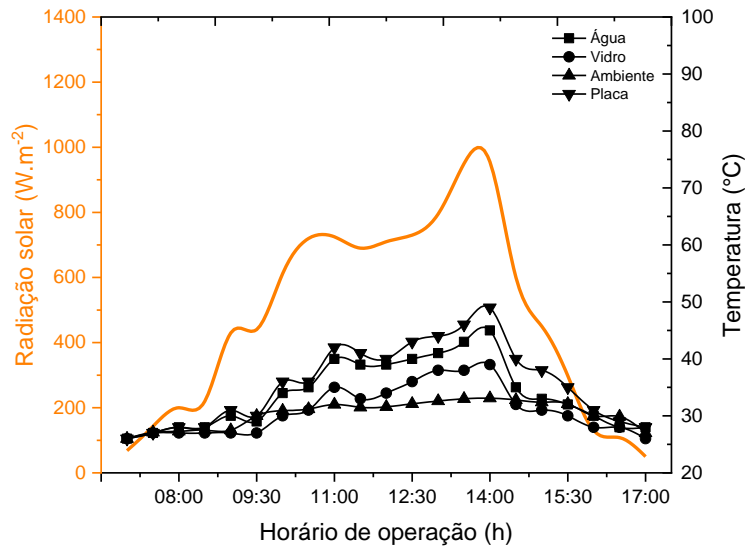


Figura 21 – Perfis de temperatura e radiação do dessalinizador para a vazão V3 e água do poço P2.



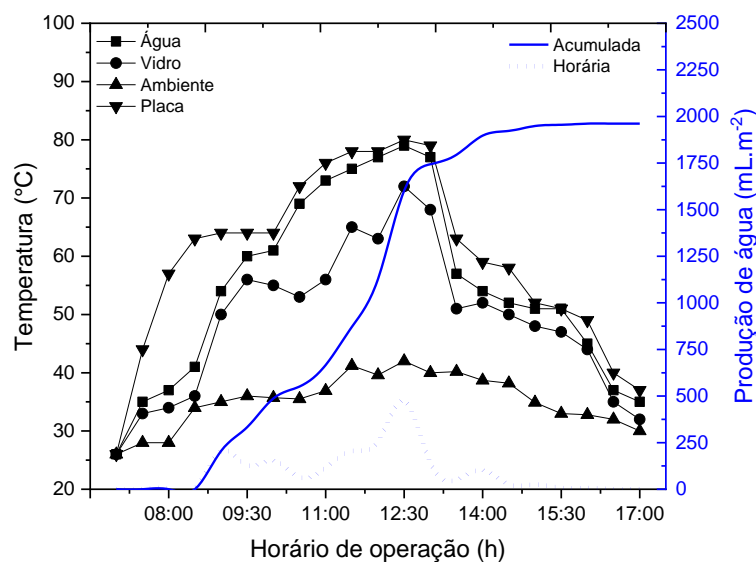
A partir das Figuras 16 a 21, foi possível perceber que os perfis de temperaturas obtidos para a placa absorvedora, a lâmina da água e a cobertura de vidro no dessalinizador, são influenciadas pela intensidade de radiação, uma vez que a medida que a radiação aumentou logo em seguida ocorreram o aumento destas temperaturas. E, além disso os valores obtidos para a temperatura da placa foi maior do que a temperatura da água e que por sua vez foi maior do que a temperatura do vidro. Esse comportamento crescente na variação das temperaturas de forma gradativa do interior para a parte o exterior do dessalinizador, acontece com os resultados de Gawande e Bhuyar (2013) e Bouzaid et al. (2019).

5.2 PRODUÇÃO DE ÁGUA DESSALINIZADA

Diversos fatores podem influenciar na produção de água dessalinizada. Os parâmetros de projeto como, a área da superfície livre da água, a área da placa absorvedora de calor, a temperatura de entrada da água, o ângulo do vidro de condensação e a profundidade da lâmina de água podem ser modificados no intuito de aumentar a produtividade dos dessalinizadores. Enquanto, que a temperatura ambiente, velocidade do vento e intensidade de radiação solar, por se tratar de parâmetros meteorológicos não podem ser controlados.

A Figura 22 apresenta a evolução da produção de água dessalinizada de acordo com a variação horária e as temperaturas da placa, da água, do vidro e do ambiente, para a vazão V1 e água do poço P1. A maior produção horária de água dessalinizada foi de 474,3 mL.m⁻² no horário da coleta dos dados de 12:30 horas, momento em que foi verificada a maior temperatura da água. A produção acumulada de água chegou a 1.961,5 mL.m⁻².dia⁻¹, no final do experimento. Como o protótipo é um dessalinizador solar inédito, não possui referências bibliográfica para comparar, desta forma, será comparado com dessalinizadores semelhantes ao do experimento. Este resultado corrobora com o resultado obtido por Mazraeh et al. (2018) que alcançaram uma produção máxima diária de 2.300 mL.m².dia⁻¹, salientando que os mesmos utilizaram um dessalinizador híbrido integrado de alta performance com tubos coletores evacuados.

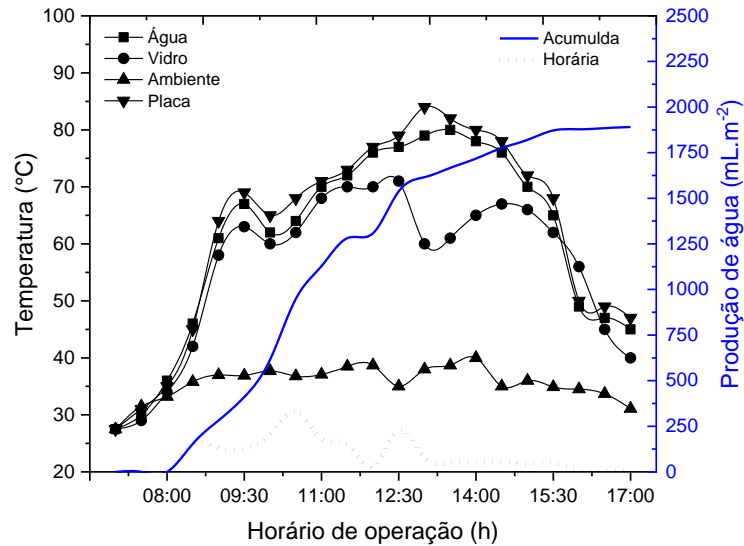
Figura 22 – Produção de água dessalinizada do dessalinizador para a vazão V1 e água do poço P1.



A Figura 23 ilustra o experimento para a vazão V1 e água do poço P2, a maior produção horária atingiu 333,3 mL.m⁻² e a produção acumulada de água foi de 1.891 mL.m⁻².dia⁻¹.

Segundo Velmurugan e Srithar (2007), ao investigar dessalinizadores, observou-se que a produtividade diária foi aumentada de 1880 para 2800 mL.m⁻², quando utilizaram dessalinizador do tipo cascata.

Figura 23 – Produção de água dessalinizada do dessalinizador para a vazão V1 e água do poço P2.



Nas Figuras 22 e 23, o comparativo entre o horário de operação com as temperaturas da água, do vidro, do ambiente e da placa absorvedora com a produção de água, demonstrou que à medida que as temperaturas aumentam o volume de água dessalinizada horária aumenta em seguida. Estes resultados estão de acordo com o obtido por Tabrizi, Khosravi e Sani (2016), pois observaram que a produtividade do dessalinizador do tipo cascata teve uma relação proporcional com o aumento de temperatura da água no sistema.

A Figura 24 apresenta os perfis de temperatura da água, do vidro, do ambiente com a produção horária e acumulada de água dessalinizada, para a vazão V2 e a água do poço P1. Neste caso, foi possível observar que a maior produção horária de água dessalinizada foi de 243,59 mL.m⁻² às 12:30 horas e a produção acumulada de água chegou à 2564,1 mL.m⁻².dia⁻¹. Bouzaid et al. (2019), estudaram um dessalinizador do tipo cascata e obtiveram uma produtividade média de 4.000 mL.m⁻².dia⁻¹, eles afirmam que a produção é dependente das condições climáticas e da área do dessalinizador. A partir de uma análise comparativa realizada entre as Figuras 22 e 24, foi possível constatar que com a diminuição das vazões resultou um aumento na produtividade do dessalinizador. Segundo Zoori et al. (2013) a maior produtividade do dessalinizador do tipo cascata é com menor fluxo de água, pois a evaporação da água é mais rápida.

A Figura 25 apresenta os perfis de temperatura da água, do vidro, do ambiente com a produção horária e acumulada de água dessalinizada, para a vazão V2 e a água do poço P2. Foi constatado que a maior produção de água horária foi de 384,61 mL.m⁻² às 11:30 horas, acompanhando os perfis de temperatura do dessalinizador no dia, e a produção acumulada de água foi de 1423 mL.m⁻².dia⁻¹.

Figura 24 – Produção de água dessalinizada do dessalinizador para a vazão V2 e água do poço P1.

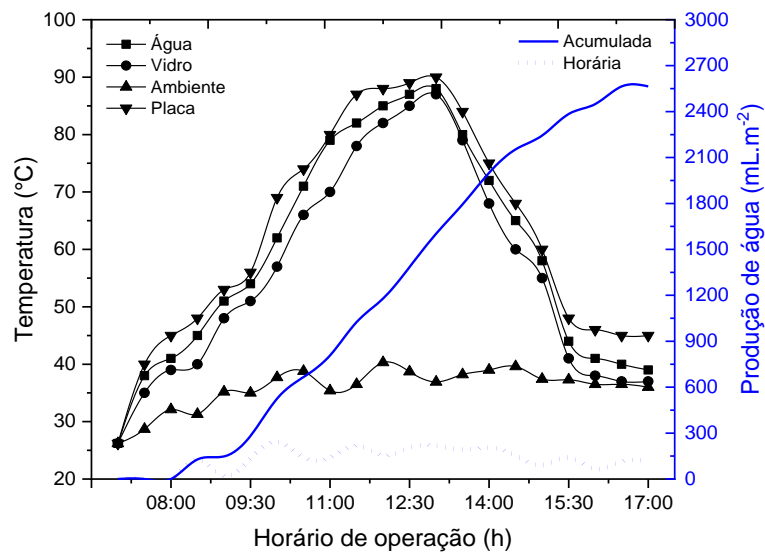
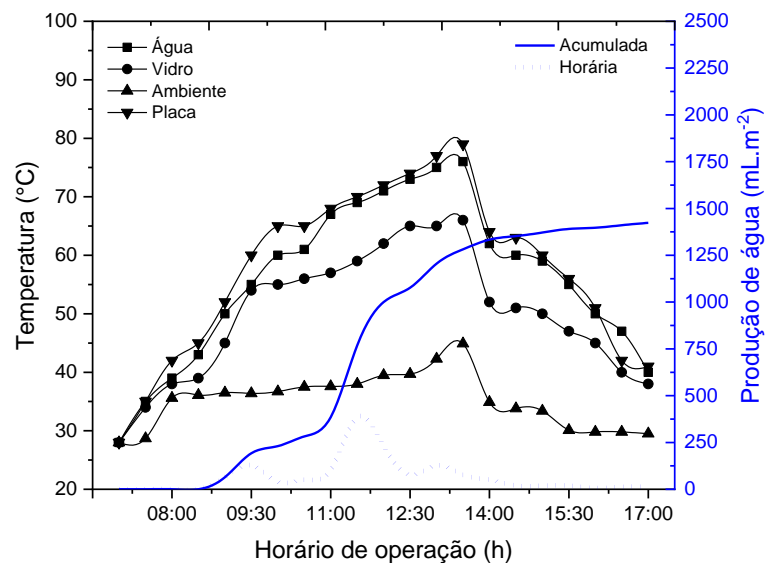


Figura 25 – Produção de água dessalinizada do dessalinizador para a vazão V2 e água do poço P2



As Figuras 26 e Figura 27 apresentam os perfis de temperatura da placa, da água, do vidro e do ambiente, com a produção horária e a produção acumulada de água, a vazão V3 e os poços P1 e P2. De acordo com a Figuras 26, foi visto em dois momentos que ocorreu a maior

produção de água horária, às 11:30 horas e às 13:00 horas, obtendo uma produção acumulada de água $205 \text{ mL.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ e de $207 \text{ mL.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, respectivamente. Além disso, foi alcançada uma produção acumulada de $1.615 \text{ mL.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$.

A partir da Figuras 27, foi constatado que a maior produção de água horária ocorreu às 15:30 horas, obtendo uma produção acumulada de água $141 \text{ mL.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. Além disso, foi alcançada uma produção acumulada de $1.153 \text{ mL.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, devido a influência direta das condições climáticas, pois o experimento foi realizado em um dia parcialmente nublado, acarretando baixas temperaturas de operação no dessalinizador.

Tabrizi et al. (2010), constataram que o o aumento na vazão da água causa uma diminuição na produtividade do dessalinizador, devido ao fato de que quando a vazão é baixa, a água tem um maior tempo de permanência na placa absorvedora, adquirindo uma maior temperatura. Tabrizi et al. (2016) relatam que quando a água flui em baixas velocidades através da superfície de evaporação, faz com que aumente do tempo de permanência da água no dessalinizador, assim aumentando a condensação. Nas Figuras 22 a 27, devido a diferença entre as condições climáticas de cada experimento, ocasionou diferentes índices de radiação, acarretando variações de temperatura da placa absorvedora, da lâmina de água e do vidro de cobertura no dessalinizador, afetando desta forma, a sua produtividade do dessalinizador.

Figura 26 – Produção de água dessalinizada do dessalinizador para a vazão V3 e água do poço P1.

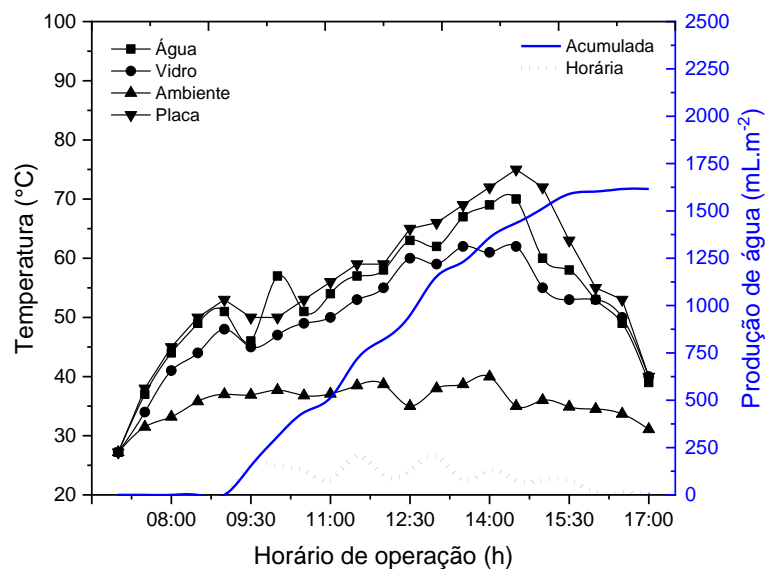
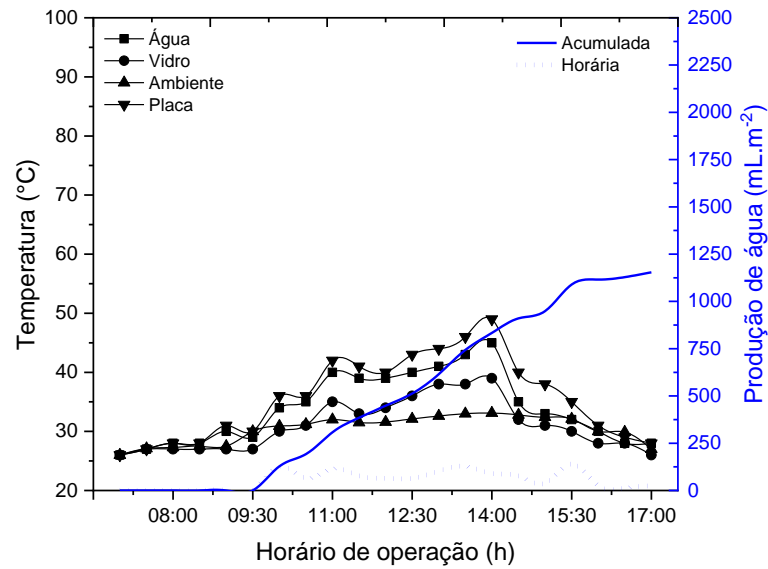


Figura 27 – Produção de água dessalinizada do dessalinizador para a vazão V3 e água do poço P2.



5.3 EFICIÊNCIA TÉRMICA DO DESSALINIZADOR

A eficiência térmica do dessalinizador é a fração de calor convertida em trabalho, e está relacionada com as condições climáticas e com os aspectos construtivos do equipamento. A cobertura deve possuir alta transparência para a radiação solar. A placa absorvedora deve ser preta para garantir maior absorção de energia e possuir alta condutividade térmica para transferir esta energia ao fluido. A caixa do dessalinizador solar deve ter um excelente isolamento térmico na parte lateral e na parte inferior, que minimize as perdas de calor para o ambiente, e possuir uma eficiente vedação para impedir a saída do vapor de água.

Nas Figuras 28 e 29, temos a variação da eficiência horária no dessalinizador em relação ao horário de operação e a radiação solar para a vazão V1 e os poços P1 e P2, respectivamente, calculada segundo a equação aborxada na secção 3.5.2.

Figura 28 – Variação da eficiência horária do dessalinizador para a vazão V1 e água do poço P1.

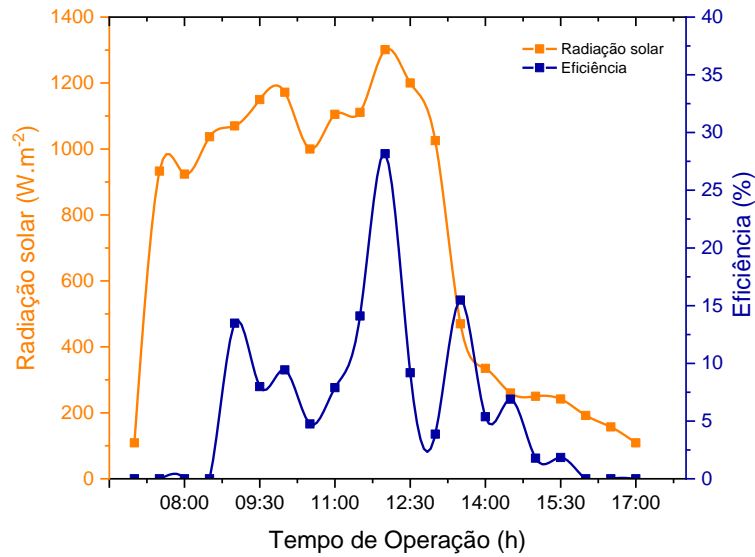
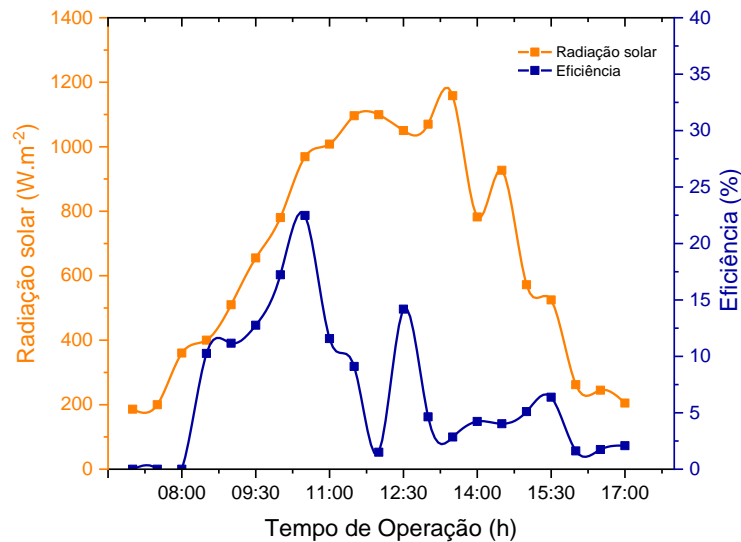


Figura 29 – Variação da eficiência horária do dessalinizador para a vazão V1 e água do poço P2.

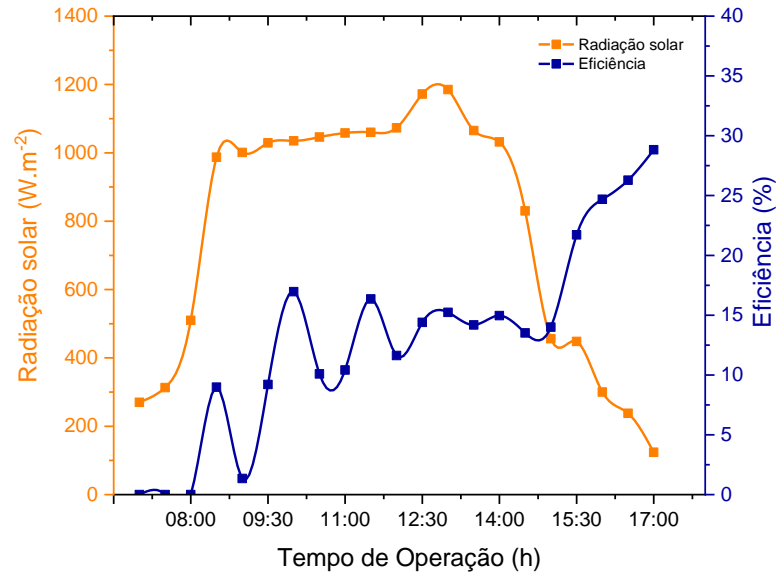


De acordo com as Figuras 28 e 29, foi possível constatar que as eficiências do dessalinizador acompanha o fluxo do índice de radiação solar, deste modo a eficiência é diretamente proporcional a radiação, justificada pelo aumento das temperaturas da placa e da água, assim ocorrendo maior evaporação.

Na Figura 29 foi possível visualizar a maior eficiência obtida para V1 que foi de 27,7%. Dashtban e Tabrizi (2011) observaram uma relação direta com a produtividade com a eficiência, ou seja, diminuindo a produtividade tem-se uma eficiência baixa.

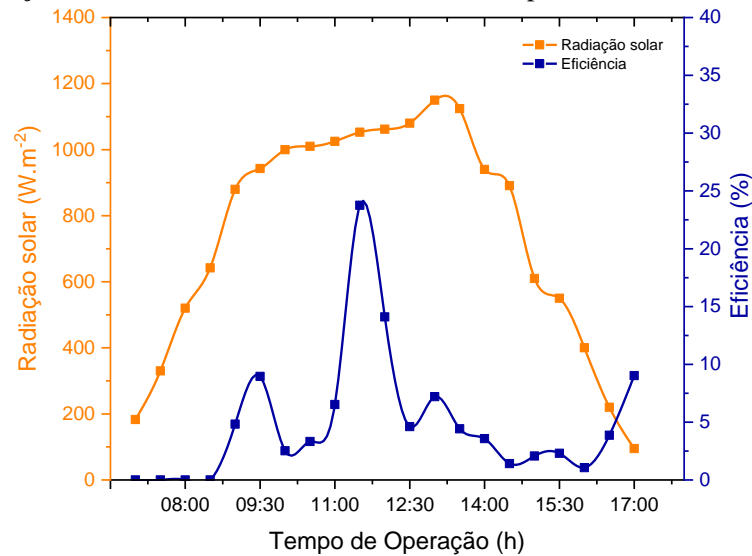
Nas Figuras 30 e 31, temos a variação da eficiência horária no dessalinizador em relação ao horário de operação e a radiação solar para a vazão V2 e as águas dos poços P1 e P2, respectivamente.

Figura 30 – Variação da eficiência horária do dessalinizador para a vazão V2 e água do poço P1.



A partir das Figuras 30 e 31, foi verificado que a variação horária em relação a radiação solar e a eficiência, conforme foi visto anteriormente por meio das Figuras 28 e 29. No entanto, a partir das 15:00 e 16:00 horas para os poços P1 e P2, respectivamente, com a diminuição na intensidade solar, ocorreu um aumento repentino nas eficiências, provavelmente por causa da capacidade térmica da água resultar em uma taxa constante de evaporação. Esse fato corrobora com Esfahani, Rahbar e Lavvaf (2011), que estudaram um dessalinizador solar do tipo ativo portátil e perceberam que mesmo quando ocorreu uma diminuição na radiação solar, a eficiência continuou aumentando, isto, devido a capacidade térmica da água, que continuo o processo de dessalinização solar.

Figura 31 – Variação da eficiência horária do dessalinizador para a vazão V2 e água do poço P2.



Nas Figuras 32 e 33, temos a variação da eficiência horária no dessalinizador em relação ao horário de operação e a radiação solar para a vazão V3 das águas dos poços P1 e P2, respectivamente. Na Figura 32, foi possível constatar que as eficiências do dessalinizador acompanha o fluxo do índice de radiação solar, conforme foi visto anteriormente por meio das Figuras 28 e 29. A partir da Figura 33, foi visto que quando ocorreu uma diminuição na radiação solar, a eficiência aumentou rapidamente, devido ao aumento da produtividade, conforme também visualizado nas Figuras 30 e 31. A maior eficiência obtida no experimento foi 32% para a vazão V3 e o poço P2, conforme ilustrado na Figura 33. Tabrizi et al. (2010) também obtiveram uma eficiência 36,7%, relatando que um aumento na vazão leva a uma diminuição da eficiência térmica do dessalinizador, devido à diminuição da produtividade horária. A eficiência de dessalinizadores é bastante estudada, Abujazar et al. (2016), afirmaram que a produtividade está diretamente correlacionada com a quantidade de radiação solar, a temperatura ambiente, a umidade relativa, e a velocidade do vento.

Figura 32 – Variação da eficiência horária do dessalinizador para a vazão V3 e água do poço P1.

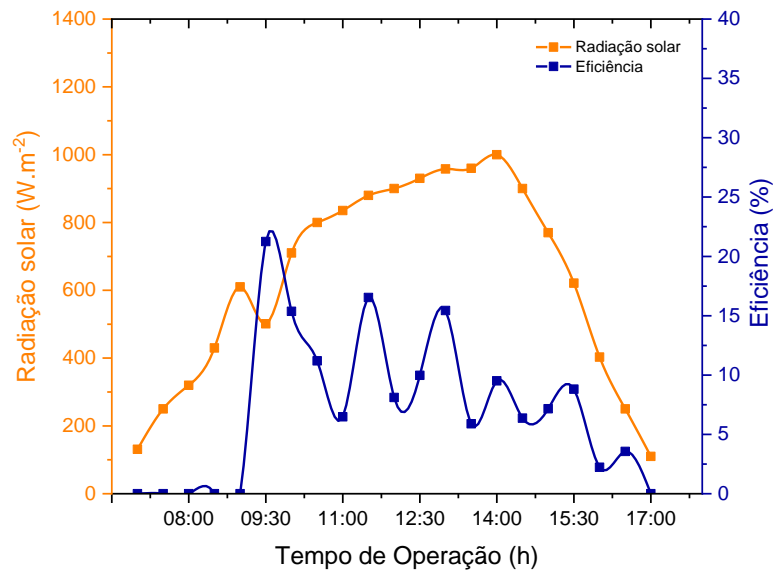
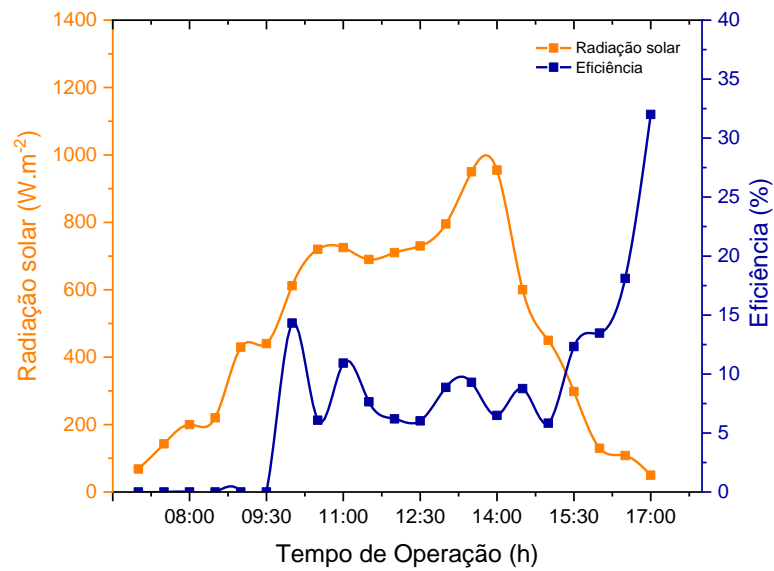


Figura 33 – Variação da eficiência horária do dessalinizador para a vazão V3 e água do poço P2.



5.4 COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO DESSALINIZADOR.

O estudo dos coeficientes de transferência de calor de convecção, radiação e evaporação no dessalinizador solar ondular, para as vazões V1, V2 e V3 e das águas dos poços P1 e P2 foram abordados nesse tópico. As equações utilizadas para a realização dos gráficos, foram calculadas com os balanço global de energia do dessalinizador que estão no tópico 4.5.2. Tiwari e Sahota (2017) afirmaram que as curvas de convecção estão relacionadas com o movimento do fluido. As curvas de radiação estão relacionadas diretamente com a temperatura da água salobra, da cobertura de vidro e da emissividade do vidro e da água. As curvas de evaporação, tem valores maiores que os anteriores e geralmente é mais sensível a variação de temperatura.

Nas Figuras 34 e 35 são representadas as curvas dos coeficientes de convecção, radiação e evaporação para o dessalinizador solar ondular a vazão V1 e os poços P1 e P2, respectivamente. De acordo com a Figura 34, foi constatado que para P1, as curvas dos coeficientes de convecção e radiação variaram em média de 1,02 a 3,10 $\text{W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ e 5,37 a 8,50 $\text{W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$, respectivamente. O coeficiente de evaporação atingiu seu ápice às 12:00 horas no valor de 66,22 $\text{W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$. Na Figura 35, foi visto que para P2, as curvas dos coeficientes de convecção e radiação atingiram os valores de 3,44 e 8,39 $\text{W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$, respectivamente. A curva do coeficiente de evaporação cresceu bastante, maior que o do P1, com 74,91 $\text{W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ às 13:30 horas. Resultados semelhantes foram constatados por Tsilingiris (2009), os valores encontrados para os coeficientes convectivos variaram entre 2,00 e 3,00 $\text{W m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$, para temperaturas de 70°C.

Figura 34 - Coeficientes de transferência de calor do dessalinizador para vazão V1 e água do poço P1.

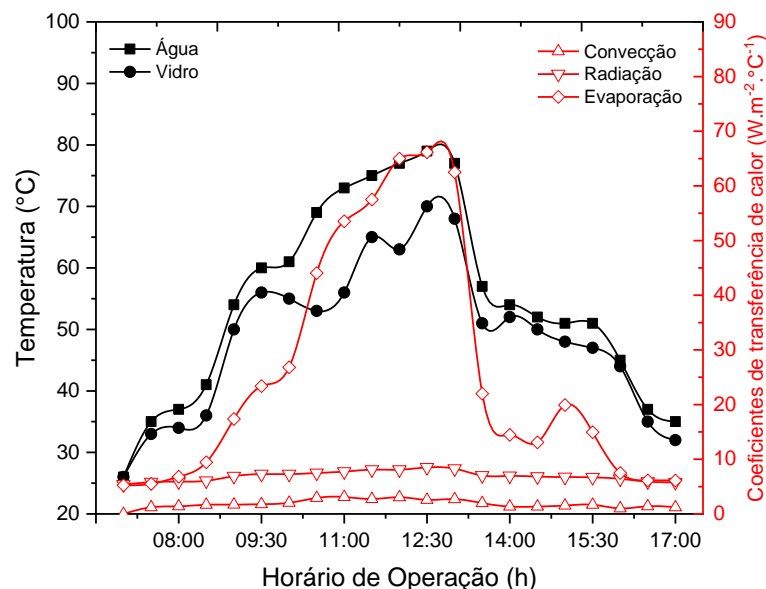
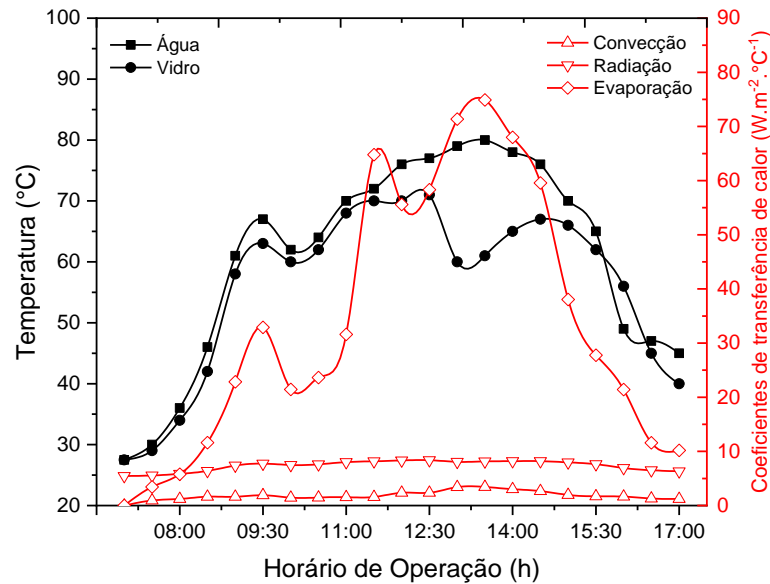


Figura 35 - Coeficientes de transferência de calor do dessalinizador para vazão V1 e água do poço P2.



Na Figura 36 e 37 estão apresentados os valores dos coeficientes de convecção, radiação e evaporação para o dessalinizador solar ondular a vazão V2 e os poços P1 e P2, respectivamente. A partir da Figura 36, o coeficiente de transferência de calor por evaporação para P1, alcançou o valor máximo de $74,91 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ às 13:30 horas, já o de convecção foi de $3,44 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$, e o coeficiente de radiação foi de $8,21 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ às 14:00 horas. Na Figura 37, o coeficiente de transferência de calor por evaporação para P2, atingiu o seu valor máximo de $72,39 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ às 12:00 horas, já o coeficiente de radiação foi $9,41 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ às 13:00 horas e o coeficiente de convecção foi $2,76 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ às 11:00 horas. Mazraeh et al. (2018) constataram que os valores do coeficiente de transferência de calor por convecção obtiveram uma pequena variação durante o dia, devido a baixa diferença de temperatura entre as superfícies da água e do vidro.

Figura 36 - Coeficientes de transferência de calor do dessalinizador para vazão V2 e água do poço P1.

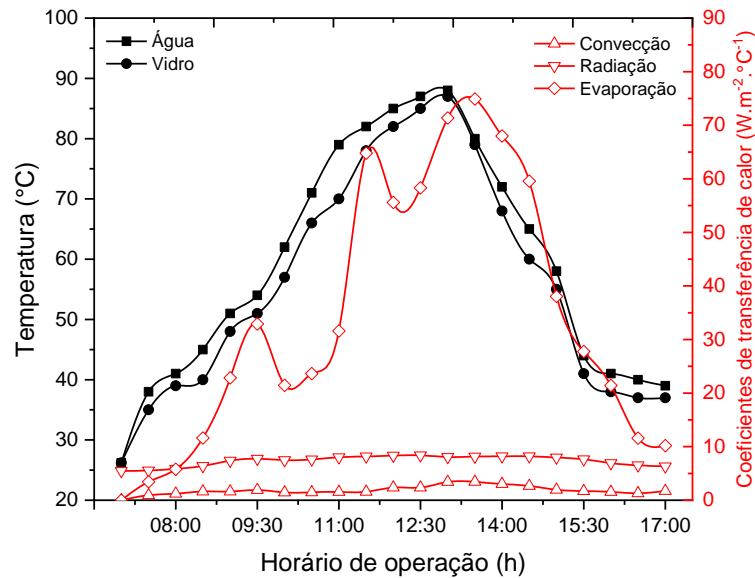
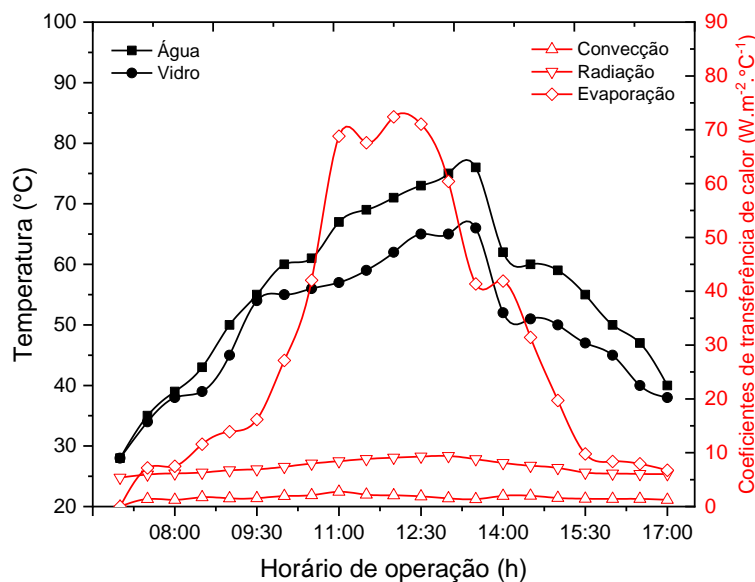


Figura 37 - Coeficientes de transferência de calor do dessalinizador para vazão V2 e água do poço P2.



Na Figura 38 e 39 estão apresentados os valores dos coeficientes de convecção, radiação e evaporação para o dessalinizador solar ondular a vazão V3 e os poços P1 e P2, respectivamente. De acordo com a Figura 38, o coeficiente de transferência de calor por evaporação para P1, alcançou o valor máximo de $43,79 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ às 14:30 horas, já o de convecção foi de $2,42 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ e o coeficiente de radiação foi de $7,82 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$. Na Figura 39, o coeficiente de transferência de calor por evaporação atingiu um valor máximo de $42,13 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ às 14:30 horas, já o coeficiente de radiação alcançou um valor máximo de $6,78 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ às 14:30 horas e o maior coeficiente de convecção foi de $1,83 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ às 14:00 horas. Segundo Tabrizi et al. (2010), a baixa distância entre a superfície da cobertura de vidro

e a água, resulta em baixos valores entre essas temperaturas, o que leva a baixos valores de coeficientes de transferência de calor por convecção e radiação.

Figura 38 - Coeficientes de transferência de calor do dessalinizador para vazão V3 e água do poço P1.

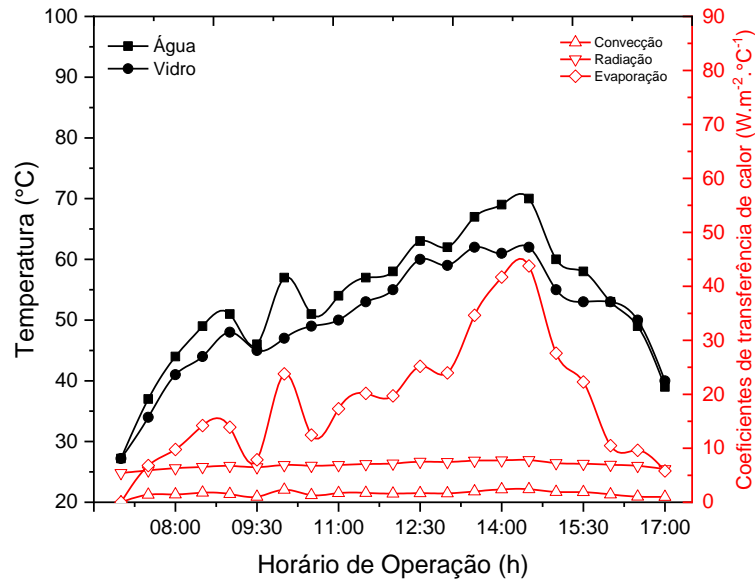
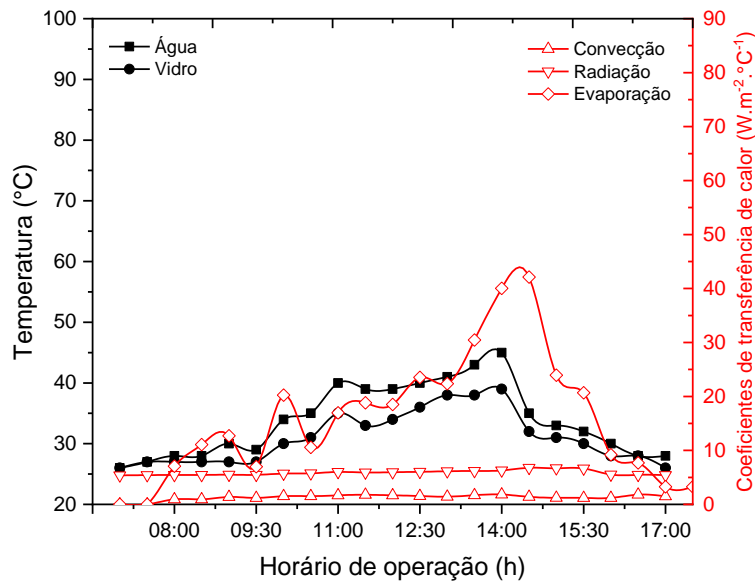


Figura 39 - Coeficientes de transferência de calor do dessalinizador para vazão V3 e água do poço P2.



5.5 ANÁLISE TÉRMICA DO DESSALINIZADOR SOLAR

Os equilíbrios energéticos do vidro, da placa e da água do dessalinizador foram calculados, segundo as Equações de Elango, Gunasekatan e Sampathkumar (2015). As Figuras 40 e 41 apresentam as curvas de temperaturas teóricas e experimentais do dessalinizador solar, para cada vazão e os respectivos poços P1 e P2.

A partir da Figuras 40, para os perfis de temperatura da água, foi visto uma discrepância entre as vazões para P1. Esta diferença obtida entre os valores teóricos e experimentais, provavelmente ocorreu devido a influência do movimento da água ao longo do dessalinizador, pois a temperatura de água é diferente em alguns pontos no decorrer do dessalinizador. Resultados semelhantes foram obtidos para P2 na Figura 41, com exceção da vazão 3, que alcançou uma concordância entre os valores teóricos e experimentais com um valor máximo de 45 °C às 14:00 horas.

Figura 40 - Perfis de temperatura da água do dessalinizador para água do poço P1: (—) teórico e (o) experimental

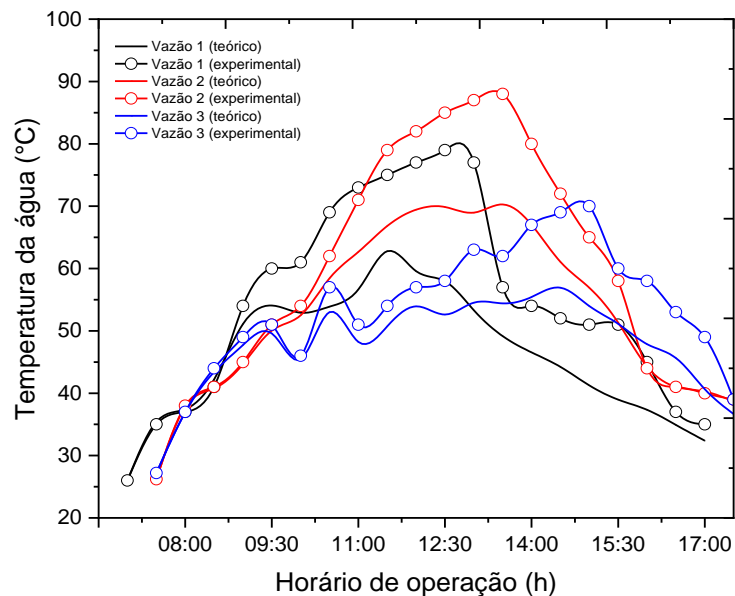
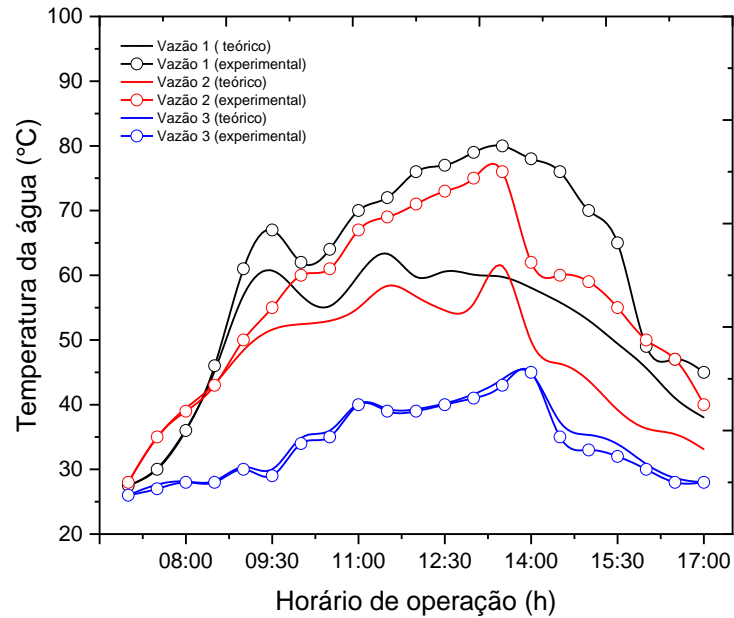


Figura 41 - Perfis de temperatura da água do dessalinizador para água do poço P2: (—) teórico e (o) experimental



As Figuras 42 e 43 apresentam os perfis de temperaturas teóricos e experimentais do da placa no dessalinizador solar, para cada vazão e para os poços P1 e P2, respectivamente.

De acordo com as Figuras 42 e 43, foi visto uma similaridade entre os valores teóricos e experimentais obtidos para os perfis de temperatura da placa, para todas as vazões e para os poços P1 e P2. Para a vazão 1, foi alcançado os valores máximos de 80 °C às 12:30 horas e 84 °C às 13:00 horas, para os poços P1 e P2, respectivamente. Já para a vazão 2, foi obtidos os valores máximos de 90 °C às 13:00 horas e 80 °C às 13:30 horas, para os poços P1 e P2, respectivamente. Enquanto que, para a vazão 3, foi obtidos os valores máximos de 75 °C às 14:30 horas e 49 °C às 14:00 horas, para os poços P1 e P2, respectivamente. Este resultados foram semelhantes aos obtidos por Brito (2020).

Figura 42 - Perfis de temperatura da placa do dessalinizador para água do poço P1: (—) teórico e (o) experimental

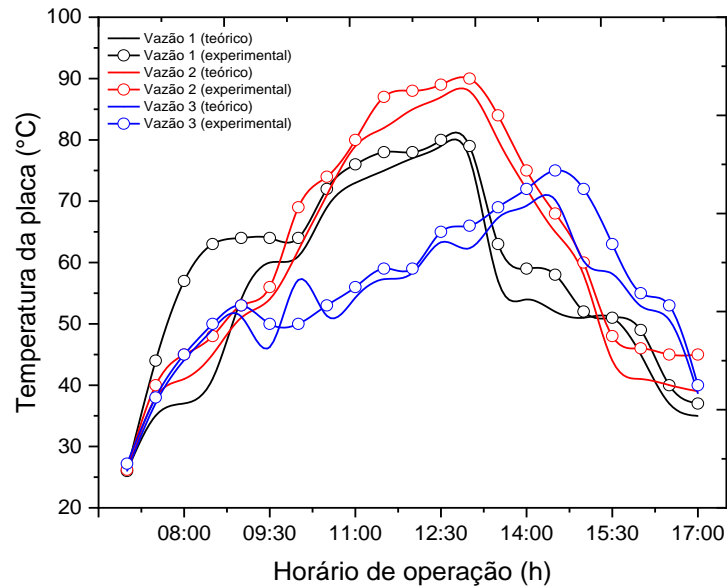
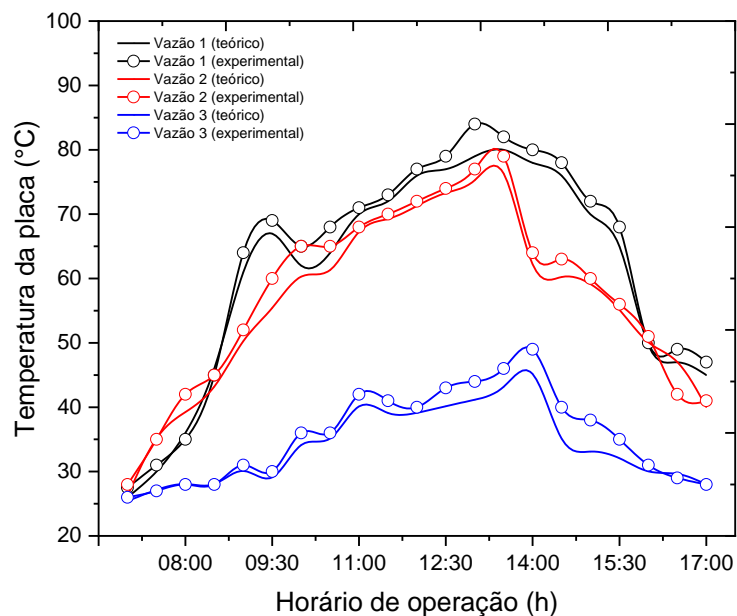


Figura 43 - Perfis de temperatura da placa do dessalinizador para água do poço P2: (—) teórico e (o) experimental



Nas Figuras 44 e 45 podemos observar os perfis de temperaturas teóricos e experimentais do vidro no dessalinizador solar, para cada vazão e para os poços P1 e P2, respectivamente.

Nas Figuras 44 e 45 foi visto uma conformidade entre os valores teóricos e experimentais obtidos para os perfis de temperatura do vidro, para todas as vazões e para os poços P1 e P2, conforme também foi visto anteriormente por meio da Figura 43. Para a vazão

1, foi alcançado os valores máximos de 72 °C às 12:30 horas e 71 °C às 12:30 horas, para os poços P1 e P2, respectivamente. Já para a vazão 2, foi obtidos os valores máximos de 87 °C às 13:00 horas e 66 °C às 13:30 horas, para os poços P1 e P2, respectivamente. Enquanto que, para a vazão 3, foi obtidos os valores máximos de 62 °C às 14:30 horas e 39 °C às 14:00 horas, para os poços P1 e P2, respectivamente.

Figura 44 - Perfis de temperatura do vidro do dessalinizador para água do poço P1: (—) teórico e (o) experimental

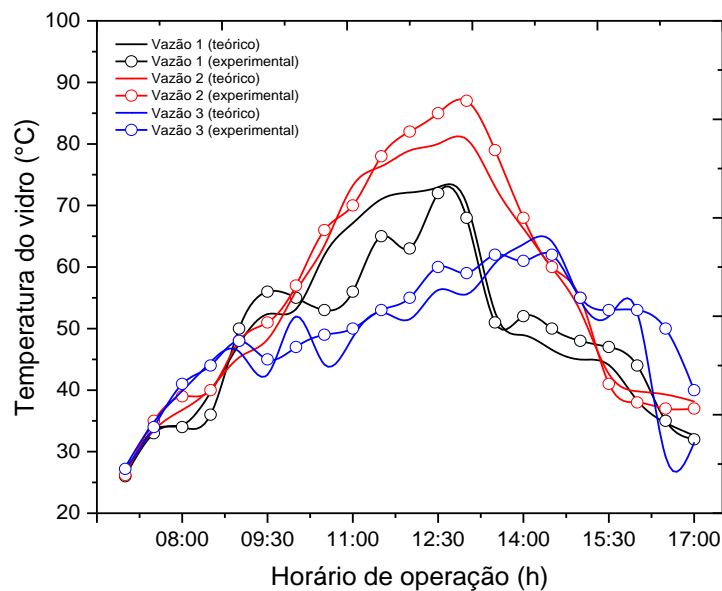
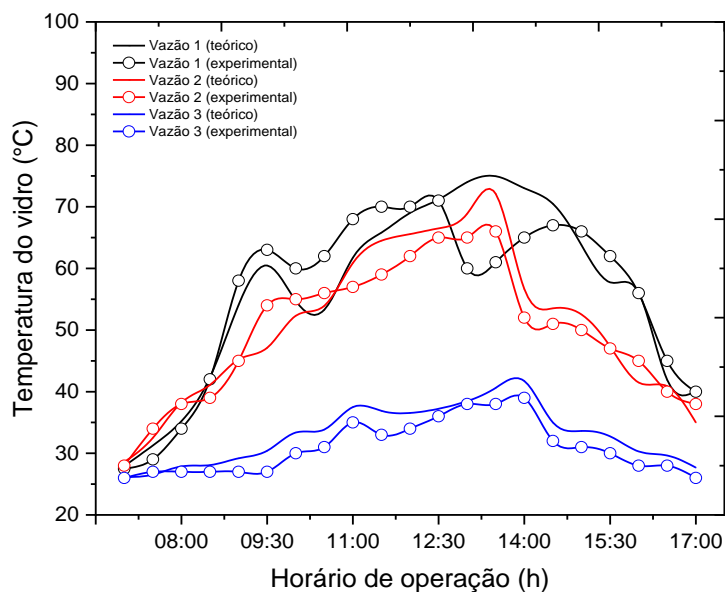


Figura 45 - Perfis de temperatura do vidro do dessalinizador para água do poço P2: (—) teórico e (o) experimental



De maneira geral, para as Figuras de 42, 43, 44 e 45, foram medidas as temperaturas teóricas e experimentais na água, na placa e no vidro. Para P1, foi obtido uma consonância

entre os valores teóricos e experimentais, independente da vazão estudada. Enquanto que, para o poço P2, foram obtidos para os perfis de temperatura, valores superiores para as vazões 1 e 2, provavelmente devido a ocorrência de maiores incidências de radiação solar. Diferentemente, do que ocorreu no poço P2 para a vazão 3, obtendo menores valores de temperaturas teóricos e experimentais, possivelmente devido a ocorrência de uma baixa incidência de radiação solar.

5.6 MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA

Os resultados dos parâmetros físico-químicos da água salobra e dessalinizada utilizando a vazão V1 estão apresentados na Tabela 2.

De acordo com os parâmetros físico-químicos, foi constatado que o tratamento da água salobra pelo processo de dessalinização solar foi eficaz, visto que, a condutividade elétrica, alcalinidade, cloretos, dureza total, turbidez, pH e sódio permaneceram de acordo com os padrões de potabilidade da água após a dessalinização, regidos pela portaria N° 05/2017 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017).

Tabela 2 – Parâmetros físico-químicos da água salobra e dessalinizada para vazão V1.

PARÂMETRO	AS1.*	AD1.*	AS2.*	AD2.*	VMP.**
pH	7,40	6,50	7,20	6,40	6,0 - 9,5
Condutividade elétrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	3.190,0	29,62	1.000,0	21,88	-
Cloretos ($\text{mg Cl}\cdot\text{L}^{-1}$)	5.538,0	60,9	1.349,0	36,0	250,0
Dureza ($\text{mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$)	310,0	40,0	400,0	45,0	500,0
Alcalinidade ($\text{mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$)	658,0	39,0	553,0	25,0	100,0
Turbidez (uT)	2,0	2,0	3,0	2,0	5,0
Sódio ($\text{mg Na}^+\cdot\text{L}^{-1}$)	1.200,0	1,0	420,0	0,0	200,0
Cor (uH)	7,6	4,5	6,3	4,2	15,0

AS. = Água Salobra; AD1= Água Dessalinizada P1, AD2= Água Dessalinizada P2;

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

A Portaria N° 05/2017 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017) estabelece para dureza o teor de $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ em termos de (CaCO_3) como o valor máximo permitido para água potável sendo considerados os níveis de $0 - 75 \text{ mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ como água branda ou mole; de $75 - 150$ como moderadamente dura; e de $150 - 300$ como dura. Portanto, de acordo com a Tabela 2, a

dureza obtida para P1 e P2 foram de 40 e 45 mg de $\text{CaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ respectivamente, desta forma a água foi classificada como branda.

Os valores de sódio, cloreto e potássio estão de acordo com o máximo permissível pela portaria nº 005/2017 do Ministério da Saúde. Para os cloretos, foram encontrados valores abaixo do VMP que é de $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Após passar o processo de dessalinização, para P1 foi obtido um valor de $5.538,0 \text{ mg Cl}^- \cdot \text{L}^{-1}$ e para P2 um valor de $1.349,0 \text{ Cl}^- \cdot \text{L}^{-1}$, resultando em uma redução significativa de 99% e 97%, respectivamente. Estes resultados estão de acordo com os valores relatados por Silva et al. (2020).

A turbidez refere-se a presença de sólidos em suspensão na água, que são os sólidos não dissolvidos. Os valores encontrados, após o processo de dessalinização, estão dentro dos valores permissíveis pela Portaria de consolidação que é de 5 uT. A alcalinidade mede a capacidade da água em neutralizar os ácidos. Desta forma, observou que após o processo de dessalinização todas as amostras atenderam aos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria de Consolidação nº 05/2017 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017), que é de $100 \text{ mg CaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$, para a alcalinidade.

Os resultados dos parâmetros físico-químicos da água salobra e dessalinizada utilizando vazão V2 estão apresentados na Tabela 3.

Analisando as amostras de água salobra retiradas do poço artesiano P1, observou-se elevado nível de salinidade, não estando de acordo com os valores permissíveis pela Portaria de consolidação nº 005/2017 (BRASIL, 2017). Entretanto, ao analisar a água após o processo de dessalinização, foi obtido resultados compatíveis com os parâmetros de potabilidade, o que confirma a eficiência do dessalinizador.

O pH também está relacionado aos valores de alcalinidade, visto que, a concentração de íons CO_3^{2-} e HCO_3^- interferem na atividade do íon H^+ (VON SPERLING, 2005), desta forma os valores de pH ficaram na faixa determinada pela portaria de consolidação nº 005/2017 (BRASIL, 2017). Segundo Chaves et al. (2019), o consumo de uma água muito ácida, pode causar doenças como gastrite e câncer gástrico. Os valores de pH obtidos para a água dessalinizada foram de 6,5 e 6,4 para os poços P1 e P2 respectivamente, estando dentro do VMP que é entre 6,0 e 9,5.

Tabela 3 – Parâmetros físico-químicos da água salobra e dessalinizada para vazão V2.

PARÂMETRO	AS1.*	AD1.*	AS2.*	AD2.*	VMP.**
pH	7,40	6,50	7,20	6,40	6,0 - 9,5
Condutividade elétrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	3.190,0	29,62	1.000,0	21,88	-
Cloreto ($\text{mg Cl}^{-1}\cdot\text{L}^{-1}$)	5.538,0	45,7	1.349,0	37,2	250,0
Dureza ($\text{mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$)	310,0	40,0	400,0	45,0	500,0
Alcalinidade ($\text{mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$)	658,0	39,0	553,0	25,0	100,0
Turbidez (uT)	2,0	2,0	3,0	2,0	5,0
Sódio ($\text{mg Na}^{+}\cdot\text{L}^{-1}$)	1.200,0	0,0	420,0	0,0	200,0
Cor (uH)	7,6	5,8	6,3	5,2	15,0

*AS. = Água Salobra; AD1= Água Dessalinizada P1, AD2= Água Dessalinizada P2;

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

Outro parâmetro que aparece no padrão de potabilidade é a dureza total, que pode ser definida como a soma da concentração de cátions multivalentes na amostra (CANADÁ, 1979). Foi verificado que todos os poços se enquadram dentro do limite estabelecido pela portaria de consolidação n° 005/2017 (BRASIL, 2017), que é de no máximo, $500 \text{ mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ para dureza. Este resultado corrobora com os estudos relatados por Gomes et al. (2018).

Ainda na Tabela 3, foi visto uma elevada concentração de íons cloretos nos poços, apresentando teores de Cl^{-} acima do limite máximo permissível pela legislação, que é de $250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, logo, após o processo de dessalinização, ocorreu uma remoção de 99,2% para P1 e 97,2% para P2. Outro parâmetro que apresentou uma redução significativa, foi o sódio, pois o experimento foi executado com uma água de alto teor de salinidade, no valor de $1200 \text{ mg Na}^{+}\cdot\text{L}^{-1}$ para o poço P1 e $420 \text{ mg Na}^{+}\cdot\text{L}^{-1}$ para o poço P2, havendo uma redução de 100% para ambos os poços analisados. Estes resultados foram compatíveis com os estudos realizados por Brito et al. (2020) e Cardoso et al. (2020).

Os resultados dos parâmetros físico-químicos utilizando a vazão V3, da análise da água dessalinizada obtida são apresentados na Tabela 4.

A Tabela 4 aprestou resultados semelhantes aos obtidos nas pelas Tabelas 2 e 3, constatando que as águas dos poços P1 e P2 são salobras, e não estão de acordo com padrões exigidos pelo Ministério da Saúde. Após o processo de dessalinização solar todos os parâmetros físico-químicos analisados obedeceram às recomendações da portaria de consolidação n° 005/2017 (BRASIL, 2017) desta forma, ficando de acordo com os padrões para o consumo humano.

Tabela 4 – Parâmetros físico-químicos da água salobra e dessalinizada para vazão V3.

PARÂMETRO	AS1.*	AD1.*	AS2.*	AD2.*	VMP.**
pH	7,40	6,45	7,20	6,47	6,0 - 9,5
Condutividade elétrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	3.190,0	30,39	1.000,0	25,14	-
Cloreto ($\text{mg Cl}^{-1}\cdot\text{L}^{-1}$)	5.538,0	63,9	1.349,0	28,40	250,0
Dureza ($\text{mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$)	310,0	35,0	400,0	25,0	500,0
Alcalinidade ($\text{mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$)	658,0	34,0	553,0	31,0	100,0
Turbidez (uT)	2,0	2,0	3,0	2,0	5,0
Sódio ($\text{mg Na}^{+}\cdot\text{L}^{-1}$)	1.200,0	1,0	420,0	0,0	200,0
Cor (uH)	7,6	5,2	6,3	5,0	15,0

*AS. = Água Salobra; AD1.= Água Dessalinizada P1, AD2.= Água Dessalinizada P2;

**VMP = Valor Máximo Permitido segundo a RDC n° 5, de 28 de setembro de 2017, Anexo XX

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e na discussão, têm-se as seguintes conclusões:

- Os parâmetros operacionais significativos do sistema afetam o desempenho das vazões, as diferentes qualidades de água e a incidência de radiação solar.
- Os perfis de temperaturas obtidos para a placa absorvedora, a lâmina da água e a cobertura de vidro, acompanharam a intensidade de radiação, ocorrendo o aumento destas temperaturas de forma gradativa do interior para a parte exterior do dessalinizador. Foi obtido as temperaturas máximas de 90°C e 87,3°C para a placa e para a água, respectivamente, influenciando diretamente na produção do dessalinizador.
- De maneira geral, a produção de água dessalinizada está diretamente relacionada com a incidência de radiação solar. Obtendo uma produtividade média no dessalinizador de 1.767,0 mL.m⁻². Além disso, foi constatado que a eficiência térmica do dessalinizador acompanhou o fluxo de radiação solar e que teve relação direta com a produtividade. Foi obtido uma eficiência térmica diária máxima em torno de 15,0%, devido a variações ocorridas na radiação solar.
- A partir das análises físico-químicas, foi verificado um alto teor de salinidade para as águas dos poços com valores de 5.538,0 mg Cl⁻.L⁻¹ e 1.200 mg Na⁺.L⁻¹ para cloretos e sódio respectivamente, obtendo uma redução de 100% para os dois parâmetros, após o processo de dessalinização. Além disso foi verificado que todos os parâmetros estavam de acordo com os padrões de potabilidade para o consumo humano, exigidos pela Portaria do Ministério da Saúde vigente no país.
- Desta forma, foi comprovada a eficiência do novo dessalinizador solar tipo ondular, para a obtenção de água doce, podendo ser aplicado não apenas para fins de pesquisa, mas também como uma alternativa de adquirir água de qualidade para comunidades isoladas do semiárido paraibano, onde ocorre grande escassez de água potável.

- O dessalinizador solar do tipo ondular é importante, pois configura-se em um cenário bastante favorável, com amplo desenvolvimento e atuação da ciência principalmente por ser um protótipo de baixo custo e possuir um alto potencial sócio-ambiental.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Fazer o uso em paralelo de dois dessalinizadores do mesmo modelo para poder comparar a influência dos parâmetros que não podem ser controlados;
- Aplicar um planejamento experimental dos parâmetros construtivos e de operação que podem ser controlados para adequar e aperfeiçoar o desenvolvimento do trabalho;
- Operar os dessalinizadores com experimentos que durem 24 horas para ver o real desempenho dos mesmos, qual a funcionalidade dele no período noturno;
- Realizar o estudo hidrodinâmico do dessalinizador;
- Usar o Datalogger, para obter uma melhor coleta de dados do experimento;
- Fazer o estudo técnico-econômico do dessalinizador.

REFERÊNCIAS

ABUJAZAR, M. S.; FATIHAH, S.; RAKMU, A. R.; SHAHROM, M. Z. The effects of design parameters on productivity performance of a solar still for seawater desalination: A review. *Desalination*, p.178-193, 2016.

ADAMS, E. A.; ZULU, L. C. Participants or customers in water governance? Community-public partnerships for peri-urban water supply. *Geoforum*, n°65, p. 112-124, 2015.

AHMED, F. E.; HASHAIKEH, R.; HILAL, N. Solar powered desalination – Technology, energy and future outlook. *Desalination*, n° 453, p. 54-76, 2019.

AL-OTHAMAN, A.; DARWISH, N. N.; QASIM, M.; TAWALBEH, M.; DARWISH, N. A.; HILAL, N. Nuclear desalination: a state-of-the-art review. *Desalination*, n° 457, p. 39-61, 2019.

ALSAGRI A. S.; CHIASSON A.; GADALLA M. Viability assessment of a concentrated solar power tower with a supercritical CO₂ brayton cycle power plant. *Journal of Solar Energy Engineering*, n°051006, p.141, 2019.

AL-SHAMMIRI, M.; SAFAR, M. Multi-effect desalination plants: state of the art. *Desalination*, n° 126, p. 45-59, 1999.

ANA. Agência Nacional das Águas (Brasil). Panorama da qualidade das águas superficiais no Brasil: 2012/ Agência Nacional de águas. Brasília, 2012.

ANIS, S. F.; HASHAIKEH, R.; HILAL, N. Functional materials in desalination: a review. *Desalination*. n°468, p. 114077, 2019.

ARUNKUMAR, T; RAJ, K; RUFUSS, D. W; DENKENBERGER, D; TINGTING, G; XUAN, L.; VEIRAJ, R. **A review of efficient high productivity solar stills**. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 101 (2019) 197-230.

ATLAS. Atlas Brasileiro da Energia Solar no Brasil, 2006.

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

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. Fenômenos de Transportes - 2ª ed. – Impresso, LTC editora, 2004.

BOUZAID, M; ANSARI, O; TAHA-JANAN, M; MOUHSIN, N; OUBREK, M. Numerical analysis of thermal performances for a novel cascade solar desalination design. *Energy (Procedia)* 157 (2019) 1071-1082.

BRITO, Y. J. V.; CARDOSO, M. K. B.; SILVA, K. S.; SILVA, C. B.; MEDEIROS, K. M.; LIMA, C. A. P. Estudo experimental de um dessalinizador solar do tipo bandeja com dupla inclinação para potabilização de água no semiárido paraibano. *Revista Águas Subterrâneas*, v. 34, n. 2, p. 156-165, 2020.

BRITO, Y.J.V. Análise de desempenho de um dessalinizador solar tipo parabólico modificado para potabilização de água. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual da Paraíba, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental. Campina Grande, 2020.

CANADÁ. Guidelines for canadian drinking water quality: Guideline Technical Document – Hardness, 1979.

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

CARVALHO, E. K. F. Potabilização de água eutrofizada utilizando destilação solar. 2015. 84f. Dissertação de Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da UEPB, Campina Grande, 2015.

CHAVES, L. C. G.; LOPES, F. B.; MAIA, A. R. S.; MEIRELES, A. C. M., ANDRADE, E. M. Qualidade da água e impactos antrópicos em bacias hidrográficas de açudes no semiárido brasileiro. *Revista Ciência Agronômica*, p.223-233, 2019.

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

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília: Diário Oficial da União, nº53, p.58-63, 2005.

COSTA, D. M. A.; MELO, H. N. A.; FERREIRA, S. F. Influência da salinidade na taxa de evaporação da água. *Holos*, nº 22, p. 4-10, 2006.

COSTA, E. C. D. Física aplicada à construção: conforto térmico. São Paulo: Blücher, nº 2, p. 259, 1974.

DEWITT, D. P.; INCROPERA, F. P. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. 5ª Edição. Rio de Janeiro: Editora LTC – Livros Técnicos e Científicos, p. 698, 2003.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. Solar Engineering of Thermal Processes. Fourth Edition, Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2013.

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

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

ELANGO, C.; GUNASEKATAN, N.; SAMPATHKUMAR, K. Thermal models of solar still – A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, nº47, p.856-911, 2015.

EL-DESSOUKY, H. T.; ETTOUNEY, H. M. *Fundamentals of Salt Water Desalination*. Elsevier Science BV; 2002.

ESFAHANI, J. A.; RAHBAR, N.; LAVVAF, M. Utilization of thermoelectric cooling in a portable active solar still — An experimental study on winter days, *Desalination*, v. 269, p. 198–205, 2011.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. *The state of food and agriculture*, 2003.

FREITAS, D. L. A. Caracterização numérica e experimental de um coletor solar de placa plana. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal da Paraíba, 2017.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. *Manual de conforto térmico*. 5ª Edição. São Paulo: Studio Nobel, p. 243, 2001.

GAWANDE, J. S.; BHUYAR, L. B. Effect of Shape of the absorber surface on the performance of stepped type solar still. *Energy and Power Engineering*, v. 5, p. 489-497, 2013.

GHAFFOUR, N.; MUJTABA, I. Q. Desalination using renewable energy. *Desalination*, nº 435, p. 1-2, 2018.

GOMES, A. C. C. O.; CARVALHO, L. A.; SÚAREZ, Y. R.; NOVAK, E.; MOREIRA, R. M. Análise de parâmetros físicos, químicos e microbiológicos de poços de monitoramento em área aplicada com vinhaça. *Revista Águas Subterrâneas*, v. 32, nº 2, p. 237-247, 2018.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentos da física – Gravitação, Ondas e Termodinâmica*. 8ª. Edição. Rio de Janeiro. Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda. LTC, v.2, p. 201, 2009.

HANSEN, R. S.; NARAYANAN, C. S.; MURUGAVEL, K. K. Performance analysis on inclined solar still with different new wick materials and wire mesh. *Desalination*. p. 358, 2015.

HANSHIK, C.; JEONG, H.; JEONG, K. W.; CHOI, S. H. Improved productivity of the MSF (multi-stage flashing) desalination plant by increasing the TBT (top brine temperature). *Energy*. n. 107, p. 683-692, 2016.

HUANG, L.; JIANG, H.; WANG, Y.; OUYANG, Z.; WANG, W.; YANG, B.; LIU, H.; HU, X. Enhanced water yield of solar desalination by thermal concentrated multistage distiller. *Desalination*, nº 477, p. 114260, 2020.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e estatística. Estimativas Populacionais os Municípios Brasileiros. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa2013/>>. Acesso 2017.

IKEMATSU, P. Estudo da refletância e sua influência no comportamento térmico de tintas refletivas e convencionais de cores correspondentes. Dissertação de mestrado. Engenharia de Construção Civil e Urbana, 2007.

INMAN, D.; JEFFREY, P. A review of residential water conservation tool performance and influences on implementation effectiveness. *Urban Water Journal*, n° 3, p. 127-143, 2006.

KALOGIROU, S. Seawater Desalination Using Renewable Energy Sources. *Progress in Energy and Combustion Science*, n° 31, p. 242-281, 2005.

KANADE, P; BHATTACHARYA, S. S. A Guide to Filtration with String Wound Cartridges, n° 1, p. 1-10, 2016.

KAVITI, A. K.; YADAV A.; SHUKLA A. Inclined solar still designs: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 54, p. 429-451, 2016.

KHEDUN, C. P.; FLORES, R. S.; RUGHOONUDUN, H. World water supply and use: challenges for the future. 5. vol. *Encyclopedia of agriculture and food systems*. Elsevier, 2014.

KOCHKODAN, V.; HILAL, N. A comprehensive review on surface modified polymer membranes for biofouling mitigation. *Desalination*, n° 356, p. 187-207, 2015.

KONDEPUDI, D.; PRIGOGINE, I. *Modern thermodynamics: from heat engines to dissipative structures*. 1. ed. Baffins Lane: John Wiley & Sons Ltd, 1998.

KUNDZEWICZ, Z. W. *Water cycle*. 2. ed. *Encyclopedia of Ecology*. Elsevier, 2018.

LAKSHMI, V.; FAYNE, J.; BOLTEN, J. A comparative study of available water in the major river basins of the world. *Journal of Hydrology*, n° 2, p. 510-532, 2018.

LOUTATIDOU, S.; LIOSIS, N.; POHL, R.; OUARDA, T. B. M. J.; ARAFAT, H. A. Wind-powered desalinations for strategic water storage: Techno-economic assessment of concept. *Desalination*, n° 408, p. 36-51, 2017.

MADHURI, H. P.; TIWARI, G. N. Performance of solar still with intermittent flow of waste hot water in the basin. *Desalination*, v. 52, p. 345-357, 1985.

MALIK, M. A. S.; TIWARI, G. N.; KUMAR, A.; SODHA, M. S. *A Practical Study of a Wide Range of Stills and Their Optimum Design, Construction and Performance*, First edition. *Solar Distillation*, n° 1, p. 100-109, 1996.

MALVEZZI, R. *Semi-árido: uma visão holística*. – Brasília: Confea, 2007.

- MAPUNDA, D.W.; CHEN, S. S.; YU, C. The role of informal small-scale water supply system in resolving drinking water shortages in peri-urban Dar Es Salaam, Tanzania. *Applied Geography*, n° 92, p. 112-122, 2018.
- MITRICĂ, B.; MITRICĂ, E.; ENCIU, P.; MOCANU, I. An approach for forecasting of public water scarcity at the end of the 21 st century, in the Timis Plain of Romania. *Technological Forecasting & Social Change*, 2017.
- NAFEY, A. S.; ABDELKADER, M.; ABDELMOTALIP, A.; MABROUK, A. A. Parameters affecting solar still productivity. *Energy Conversion & Management*, p. 1797-1809, 2000.
- NEVES, A. L. R.; MAILSON, P. A.; LACERDA, C. F.; CHEYL, H. R. Aspectos socioambientais e qualidade da água de dessalinizadores nas comunidades rurais de Pentecostes. *Revista Ambiente e Água*, v. 12, n° 1, p. 124-135, 2017.
- PEREIRA, S. T.; SANTOS, W. C. P.; AMORIM, J. S.; ROCHA, F. A.; SILVA, J. O. Estimativa da radiação solar global para a região de pedra azul, norte de minas gerais. *enciclopédia biosfera. Centro Científico Conhecer*. n° 6, 2010.
- PINTO, E. Geopolítica da água. *Revista de Geopolítica*, v. 8, n° 1, p. 19-32, 2017.
- POZZOBON, J. C. Recuperação de água em torres de resfriamento por meio de estruturas de condensação porosas. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Florianópolis, 2015.
- PUGSLEY, A.; ZACHAROPOULOS, A.; MONDOL, J. D.; SMYTH, M. Global applicability of solar desalination. *Renewable Energy*, n° 88, p. 200-219, 2016.
- RABHI, K.; NCIRI, R.; NASRI, F.; ALI, C.; BACHA, H. B. Experimental performance analysis of a modified single-basin single-slope solar still with pin fins absorber and condenser. *Desalination*, v. 416, p. 86-93, 2017.
- REBOUÇAS, A. C. Água na região Nordeste: desperdício e escassez. *Estudos Avançados*, v. 11, n° 29, p. 127-154, 1997.
- ROCHA, R.; SOARES, R. R. Water scarcity and birth outcomes in the Brazilian semiarid. *Journal of Development Economics*. n° 112, p. 72-91, 2015.
- SANTOS, S. M.; FARIAS, M. M. M. W. E. C. Potential for Rainwater harvesting in a dry climate: Assessments in a semiarid region in northeast Brazil. *Journal of Cleaner Production*, n° 164, p. 1007-1015, 2017.
- SANTOSH, R.; ARUNKUMAR, T.; VELRAJ, R.; KUMARESAN, G. Technological advancements in solar energy driven humidification-dehumidification desalination systems – A review. *Journal of Cleaner Production*, n° 207, p. 826-845, 2019.
- SARHADDI, F.; TABRIZI, F. F.; ZOORI, H. A.; MOUSAVI, S. A. H. S. Comparative study os two Weir type cascade solar stills with and without PCM storage using energy and exergy analysis. *Energy Conversion and Management*, n° 133, p. 97-109, 2017.

SETTI, A. A.; LIMA, J. E. F.; CHAVES, A. G. M.; PEREIRA, I. C. Introdução ao gerenciamento de Recursos Hídricos no Brasil. 2ª ed. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, 2000.

SHARON, H.; REDDY, K. S. A review of solar energy driven desalination Technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 41, p. 1080-1118, 2015.

SHARSHIR, S. W.; YANG, N.; PENG, G.; KABEEL, A. E. Factors affecting solar stills productivity and improvement techniques: A detailed review. *Applied Thermal Engineering* v. 100, p. 267-284, 2016.

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

SEN, Z. Solar energy in progress and future research trends. In: *Progress in energy and combustion science* 30. p.367-415, 2004.

SILVA, A. O.; BRITO, Y. J. V.; BEZERRA, V. R.; LIMA, G. G. C.; MEDEIROS, K. M.; LIMA, C. A. P. Potabilização de água salobra por meio de um dessalinizador solar portátil com refletores de radiação integrados. *Revista Águas Subterrâneas*, v. 34, n. 2, p. 274-284, 2020.

SILVA, P. F.; LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; SOUZA, R.; SOUZA, E. S.; SILVA, J. R. I.; ALVES, E. M. Seasonal patterns of carbon dioxide, water and energy fluxes over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil. *Journal of Arid Environments*, n° 147, p. 71-82, 2017.

SINGH, S. K.; BHATNAGAR, V. P.; TIWARI, G. N. Design parameters for concentrator assisted solar distillation system. *Energy Conversion and Management*, v. 37 p. 247-252, 1996.

SOUSA, F. L. Dessalinização como fonte alternativa de água potável. *Norte Científico*, v. 1, n° 1, 2006.

STRATHMANN, H. Electrodialysis, a mature technology with a multitude of new applications. *Desalination*, n° 264, p. 268-288, 2010.

TABRIZI, F. F.; DASHTBAN, M.; MOGHADDAM, H. Experimental investigation of a weirtype cascade solar still with built-in latent heat thermal energy storage system. *Desalination*, n° 260, p. 248-53, 2010.

TABRIZI, F. F.; KHOSRAVI, M.; SANI, I. S. Experimental study of a cascade solar still coupled with a humidification-dehumidification system. *Energy Conversion and Management*, n° 115, p. 80-88, 2016.

THANGAVEL, P.; SRIDEVI, G. *Environmental Sustainability: Role of green Technologies*, Springer, Berlin, 2014.

TIWARI, G. N.; SAHOTA, L. Review on the energy and economic efficiencies of passive and active solar distillation systems, *Desalination* v. 401, p. 151–179, 2017.

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, p.184-204, 2007.

TIWARI, G.; TRIPATHI, R. Study of heat and mass transfer in indoor conditions for distillation. *Desalination*, n° 154, p. 161-169, 2003.

TSILINGIRIS, P. T. Analysis of heat and mass transfer process in solar still – The validation of model. *Solar Energy*, v. 83, p. 420-431, 2009.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos : princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Belo Horizonte: DESA-UFMG, v. 1, p. 452, 2005.

WANG, Z.; TU, Q.; ZHENG, S.; URBAN, J. J.; LI, S.; MI, B. Understanding the aqueous stability and filtration capability of MoS₂ membranes. *American Chemical Society*, n° 17 , p. 7289-7298, 2017.

WWAP: Lançamento do Relatório de Desenvolvimento Mundial da Água da ONU 2018.

YADAV, C. M, A. Water desalination system using solar heat: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 67, p. 1308–1330, 2017.

ZIABARI, F.B; SHARAK, A,Z; MOGHADAM, H; TABRIZI, F.F. Theoretical and experimental study of cascade solar stills. *Solar Energy*. v. 90, p. 205–211, 2013.

ZOORI, H. A.; TABRIZI, F. F.; SARHADDI, F.; HESHMATNEZHAD, F. Comparison between energy and exergy efficiencies in a weir type cascade solar still. *Desalination*, v. 325, p. 113-21, 2013.