



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA
AMBIENTAL**

CAMILLA SOARES OLIVEIRA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO USO DE MATERIAIS FOTOTÉRMICOS NA
EFICÊNCIA DE UM DESSALINIZADORES SOLAR TIPO PIRÂMIDE
ASSIMÉTRICA**

CAMPINA GRANDE - PB

2022

CAMILLA SOARES OLIVEIRA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO USO DE MATERIAIS FOTOTÉRMICOS NA
EFICÊNCIA DE UM DESSALINIZADORES SOLAR TIPO PIRÂMIDE
ASSIMÉTRICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental (PPGCTA), da Universidade Estadual da Paraíba, 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

2022

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.

O48a Oliveira, Camilla Soares.
Análise da influência do uso de materiais fototérmicos na eficiência de um dessalinizadores solar tipo pirâmide assimétrica [manuscrito] / Camilla Soares Oliveira. - 2022.
88 p. : il. colorido.

Digitado.
Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2022.
"Orientação : Prof. Dr. Carlos Antônio Pereira de Lima ,
Coordenação do Curso de Computação - CCT."
"Coorientação: Profa. Dra. Keila Machado de Medeiros ,
UFRB - Universidade Federal do Recôncavo da Bahia"

1. Dessalinização solar. 2. Semiárido brasileiro. 3. Água dessalinizada. I. Título

21. ed. CDD 333.792 3

CAMILLA SOARES OLIVEIRA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO USO DE MATERIAIS FOTOTÉRMICOS NA
EFICÊNCIA DE UM DESSALINIZADORES SOLAR TIPO PIRÂMIDE
ASSIMÉTRICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental (PPGCTA), da Universidade Estadual da Paraíba, em cumprimento às exigências necessárias para obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental.

Data: 30 de agosto de 2022

Banca Examinadora:



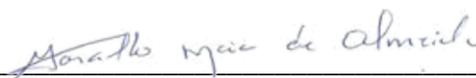
Prof. Dr. Carlos Antônio Pereira de Lima - Orientador (UEPB)



Prof.^a Dr.^a. Keila Machado de Medeiros - Coorientador (UFRB)



Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira - Examinador Interno (UEPB)



Prof. Dr. Marcelo Maia de Almeida - Examinador Externo (UEPB)



Prof. Dr. Márcio de Andrade Batista – Examinador Externo (UFMT)

CAMPINA GRANDE - PB

2022

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, por todo conhecimento adquirido através dos professores.

À CAPES pelo apoio financeiro na realização deste trabalho.

Aos meus orientadores Prof. Dr. Carlos e Profa Dra Keila, pela excelente orientação durante todo o trabalho, transmitindo seus ensinamentos e experiência acerca do assunto.

Aos colegas do grupo GRUTAA e à técnica do LAPECA, Aline Pacheco, que me auxiliaram quando surgiram dúvidas e foram peças fundamentais para realização dos experimentos.

À minha família, meu pai Aristóflem e aos meus irmãos Karinna e Aristófanes, por sempre me apoiarem e me acompanharem durante a caminhada. E em especial a minha mãe, Maria do Carmo, por todo amor, incentivo, paciência e dedicação.

Aos meus amigos e companheiros de vida, por toda a ajuda e apoio durante este período tão importante da minha formação acadêmica. Em especial aos meus amigos da graduação Josivaldo, Yuri, André, Renata e Andreia que compartilharam dos inúmeros desafios enfrentados.

Aos meus colegas de trabalho, Abel, Pamella, Camila, Érika, Felipe e Carlos, por me apoiarem durante a reta final do mestrado e sempre torcerem por mim.

À Ivânia (*in memoriam*) e Adriana, vocês foram fundamentais nessa caminhada, obrigada por nunca ter deixado eu desistir.

A todos que direta ou indiretamente, contribuíram para que eu chegasse até o final desta caminhada.

Por fim, à Deus por se fazer presente em minha vida, principalmente nos maiores desafios enfrentados até aqui. Sem Ele eu não teria conseguido chegar até aqui.

RESUMO

O Nordeste brasileiro tem um bom potencial de desenvolvimento para exploração de energia solar, dessa forma, a dessalinização solar se torna uma alternativa para potabilizar essas águas salobras. Nesta pesquisa foi realizado um estudo térmico de um dessalinizador solar do tipo pirâmide assimétrico modificado com o objetivo de obter água tratada com padrões de potabilidade para consumo humano. Foram projetados e construídos três dessalinizadores solar do tipo pirâmide de iguais dimensões, onde em dois dessalinizadores foram colocadas bandejas materiais de armazenamento de calor sensível, com o intuito de aumentar a produtividade de água dessalinizada. No primeiro dessalinizador (D1) foi colocado granito, no segundo (D2) telha cerâmica. O terceiro dessalinizador foi utilizado para fins de comparação. A água bruta foi coletada no Sítio Furnas, no município de Queimadas – PB, e caracterizada, antes e após o processo de dessalinização pelas seguintes análises físico-químicas: pH, condutividade elétrica, cloretos, dureza, alcalinidade, turbidez, sódio e cor. Para análise térmica, foram medidas as temperaturas na bandeja, no vidro interno e vidro externo dos dessalinizadores, temperatura ambiente e radiação solar. Conclui-se que os materiais SHS após pintados de preto que absorveram mais calor foram o granito e a telha. De modo geral, a produção de água dessalinizada e a eficiência térmica estão diretamente relacionadas com a incidência de radiação solar. A maior produção com o uso dos materiais fototérmicos foi com 1,0 cm de espessura de água e utilizando a telha, com valor de 2.500 mL.m⁻² para D2. Foi comprovado que a utilização de materiais fototérmicos aumenta a produção de água nos dessalinizadores. De forma que, o D3 apresentou uma produção de água 25% maior que o D1 para uma espessura de água de 3 cm. O uso de granito e telha no dessalinizador solar implicou em um aumento de eficiência de 126% e 63%. Após o processo de dessalinização, todos os parâmetros físico-químicos foram reduzidos, estando de acordo com os padrões de potabilidade da água para consumo humano, segundo a Portaria do Ministério da Saúde vigente no país. Portanto, foi comprovado que o protótipo desenvolvido foi viável e eficiente para utilização no semiárido brasileiro para obtenção de água potável.

Palavras-chave: Dessalinização solar. Semiárido brasileiro. Telha. Granito.

ABSTRACT

The Brazilian Northeast has a good development potential for the exploitation of solar energy, in this way, solar still becomes an alternative to potabilize these brackish waters. In this research, a thermal study of a modified asymmetric pyramid solar desalinator was carried out in order to obtain treated water with potability standards for human consumption. Three pyramid-type solar still of equal dimensions were designed and built, where sensible heat storage material trays were placed in two solar still, in order to increase the productivity of desalinated water. In the first desalinator (D1) granite was placed, in the second (D2) ceramic tile. The third desalinator was used for comparison purposes. Raw water was collected at Sítio Furnas, in the municipality of Queimadas - PB, and characterized, before and after the desalination process, by the following physicochemical analyses: pH, electrical conductivity, chlorides, hardness, alkalinity, turbidity, sodium and color. For thermal analysis, the temperatures in the tray, on the inner and outer glass of the solar still, ambient temperature and solar radiation were measured. It is concluded that the SHS materials after being painted black that absorbed more heat were granite and tile. In general, the production of desalinated water and the thermal efficiency are directly related to the incidence of solar radiation. The highest production with the use of photothermal materials was with 1,0 cm of water thickness and using the tile, with a value of 2,500 mL.m⁻² for D2. The use of photothermal materials has been proven to increase water production in desalination plants. So, D3 showed a water production 25% higher than D1 for a water thickness of 3 cm. The use of granite and tile in the solar still resulted in an efficiency increase of 126% and 63%. After the desalination process, all the physical-chemical parameters were reduced, in accordance with the standards of potability of water for human consumption, according to the Ordinance of the Ministry of Health in force in the country. Therefore, it was proven that the prototype developed was viable and efficient for use in the Brazilian semiarid region to obtain drinking water.

Keywords: Solar desalination. Brazilian semiarid. Brick. Granite.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa delimitação do semiárido brasileiro	15
Figura 2 – Constante Solar	17
Figura 3 – Espectro da radiação solar incluindo um detalhamento de faixa visível humana.....	18
Figura 4 – Processos de interação da radiação solar	18
Figura 5 – Potencial brasileiro anual médio de energia solar por regiões.....	19
Figura 6 – Modos de fotoavivação	20
Figura 7 – Fluxograma dos processos de dessalinização	21
Figura 8 – Diagrama simplificado de um processo de dessalinização por múltiplos estágios	23
Figura 9 – Diagrama do processo de dessalinização por múltiplo efeitos (MED)	24
Figura 10 – Diagrama do processo de dessalinização por compressão de vapor (VC)..	25
Figura 11 – Dessalinizador solar de bandeja única	27
Figura 12 – Dessalinizador solar do tipo multiestágio.	28
Figura 13 – Dessalinizador solar do tipo filme capilar.....	28
Figura 14 – Dessalinizador solar do tipo mecha.....	29
Figura 15 – Dessalinizador do tipo pirâmide.....	30
Figura 16 – Ciclo de armazenamento completo dos materiais fototérmicos.....	33
Figura 17– Diferentes tipos de armazenamento térmico de energia solar.....	34
Figura 18 – Classificação dos materiais de armazenamento de calor sensível	37
Figura 19 – Balanço Global de energia no dessalinizador	40
Figura 20 – Desenho esquemático do dessalinizador solar: (a) tipo pirâmide convencional e (b) tipo pirâmide com uso de materiais de armazenamento de calor sensível	46
Figura 21 – Protótipos construídos de dessalinizador solar tipo pirâmide assimétrico..	47

Figura 22 – Sistema Integrado de medição de parâmetros operacionais.....	51
Figura 23 – Perfil de temperatura dos materiais fototérmicos.....	53
Figura 24 – Perfil de temperatura dos materiais fototérmicos pintados de preto	54
Figura 25 – Perfis inicial de temperatura e radiação, com lâmina de 1 cm, para D1, D2 e D3	55
Figura 26– Produção de água dessalinizada inicial, com lâmina de 1 cm, para D1.....	56
Figura 27– Produção de água dessalinizada inicial, com lâmina de 1 cm, para D2.....	56
Figura 28 – Produção de água dessalinizada inicial, com lâmina de 1 cm, para D3.....	57
Figura 29 – Produção inicial de água dessalinizada e radiação para D1, D2 e D3, com lâmina de 1 cm.....	58
Figura 30 - Perfis de temperatura e radiação, com lâmina de 1 cm, para D1, D2 e D3, com uso dos materiais fototérmicos	59
Figura 31 – Perfis de temperatura e radiação, com lâmina de 2 cm, para D1, D2 e D3, com uso dos materiais fototérmicos	60
Figura 32 – Perfis de temperatura e radiação, com lâmina de 3 cm, para D1, D2 e D3, com uso dos materiais fototérmicos	61
Figura 33 – Produção de água dessalinizada, com lâmina de 1 cm, para D1, com uso dos materiais fototérmicos	62
Figura 34 – Produção de água dessalinizada, com lâmina de 1 cm, para D2, com uso dos materiais fototérmicos	62
Figura 35 – Produção de água dessalinizada, com lâmina de 1 cm, para D3, com uso dos materiais fototérmicos	63
Figura 36 – Produção de água dessalinizada, com lâmina de 2 cm, para D1, com uso dos materiais fototérmicos	64
Figura 37 – Produção de água dessalinizada, com lâmina de 2 cm, para D2, com uso dos materiais fototérmicos	64
Figura 38 – Produção de água dessalinizada, com lâmina de 2 cm, para D3, com uso dos materiais fototérmicos	65

Figura 39 – Produção de água dessalinizada, com lâmina de 3 cm, para D1, com uso dos materiais fototérmicos	66
Figura 40 – Produção de água dessalinizada, com lâmina de 3 cm, para D2, com uso dos materiais fototérmicos	66
Figura 41 – Produção de água dessalinizada, com lâmina de 3 cm, para D3, com uso dos materiais fototérmicos	67
Figura 42 – Produção de água dessalinizada e radiação para D1, D2 e D3, com lâmina de 1 cm, com uso dos materiais fototérmicos.....	68
Figura 43 – Produção de água dessalinizada e radiação para D1, D2 e D3, com lâmina de 2 cm, com uso dos materiais fototérmicos.....	69
Figura 44 – Produção de água dessalinizada e radiação para D1, D2 e D3, com lâmina de 3 cm, com uso dos materiais fototérmicos.....	69
Figura 45 – Variação da eficiência horária, com lâmina de 1 cm, para D1, D2 e D3, com uso dos materiais fototérmicos	71
Figura 46 – Variação da eficiência horária, com lâmina de 2 cm, para D1, D2 e D3, com uso dos materiais fototérmicos	71
Figura 47 – Variação da eficiência horária inicial, com lâmina de 3 cm, para D1, D2 e D3, com uso dos materiais fototérmicos	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características termofísicas importantes para materiais de armazenamento de energia	34
Tabela 2 – Uso de materiais de armazenamento de energia latente (PCM) em dessalinizador solar.....	36
Tabela 3 – Propriedades desejáveis nos materiais de armazenamento de calor sensível	38
Tabela 4 – Uso de material de armazenamento de calor sensível (SHS) em dessalinizador solar.....	39
Tabela 5 – Propriedades termofísicas dos materiais fototérmicos em estudo	48
Tabela 6 – Precisoões e erros para os instrumentos de medição	51
Tabela 7 – Parâmetros físico-químicos da água bruta e dessalinizada.....	73

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
2.1. Objetivo Geral	14
2.2. Objetivos Específicos	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1. Semiárido brasileiro	15
3.2. Energia e Radiação Solar	16
3.2.1. <i>Modos de conversão de energia solar</i>	20
3.3. Processos de dessalinização	21
3.3.1. <i>Processos por membranas</i>	21
3.3.2. <i>Processos térmicos</i>	22
3.4. Dessalinização solar	25
3.4.1. <i>Tipos de dessalinizadores solar</i>	27
3.4.2. <i>Parâmetros que influenciam a produtividade dos dessalinizadores solar</i>	30
3.5. Materiais fototérmicos	32
3.5.1. <i>Armazenamento de Calor Termoquímico</i>	35
3.5.2. <i>Armazenamento de Calor Latente</i>	35
3.5.3. <i>Armazenamento de Calor Sensível</i>	37
3.6. Balanço Global de Energia no dessalinizador	40
3.6.1. <i>Transferência de calor por convecção</i>	41
3.6.2. <i>Transferência de calor por radiação</i>	42
3.6.3. <i>Transferência de calor por evaporação</i>	42
3.7. Estado da arte	43
4. MATERIAL E MÉTODOS	46
4.1. Modelo do dessalinizador	46
4.2. PARTE A: Teste de absorção dos materiais fototérmicos	48
4.3. PARTE B: Perfil dos dessalinizadores	48
4.4. PARTE C: Ensaios dos dessalinizadores com o uso do material fototérmico	49
4.5. Sistema de medição dos parâmetros operacionais	50
4.6. Análise físico-químicas das águas	51
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
5.1. Parte A: Análise dos materiais fototérmicos	53
5.2. Parte B: Perfil dos dessalinizadores	54
5.2.1. <i>Perfis de temperatura em função da altura da lâmina de água</i>	54

5.2.2. <i>Produção de água dessalinizada</i>	55
5.2.3. <i>Produção de água dessalinizada em função da radiação solar</i>	57
5.3. Parte C: Ensaios dos dessalinizadores com o uso do material fototérmico	58
5.3.1. <i>Perfis de temperatura em função da altura da lâmina de água</i>	58
5.3.2. <i>Produção de água dessalinizada com uso de materiais fototérmicos</i>	61
5.3.3. <i>Produção de água dessalinizada em função da radiação solar</i>	67
5.3.4. <i>Eficiência térmica do dessalinizador</i>	70
5.3.5. <i>Monitoramento da qualidade da água dessalinizada</i>	72
6. CONCLUSÕES	75
REFERÊNCIAS	77

1. INTRODUÇÃO

Em 2015, durante a Cúpula das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Sustentável, foi adotado os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que são uma agenda mundial composta por 17 objetivos e 169 metas a serem atingidos até 2030. Nessa agenda estão previstas ações mundiais em diferentes áreas, como erradicação da pobreza, segurança alimentar, agricultura, saúde, educação, com o intuito de acabar com a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima. O sexto ODS tem como objetivo assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos. Portanto, até em 2030 o Brasil deve alcançar o acesso universal e equitativo a água potável e segura para todos (ONU, 2022).

Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), 2020, cerca de 35 milhões de brasileiros não tem acesso ao abastecimento de água tratada. O abastecimento de água acontece para 74,9% da população do Nordeste, entretanto o sistema de abastecimento de água sofre perdas em sua distribuição de 46,3%. Portanto, pode-se afirmar que mais de 14 milhões de pessoas no Nordeste não tem acesso à água potável.

Mocock *et al.* (2019) afirmam que no semiárido brasileiro, fatores naturais contribuem para falta de disponibilidade de água potável, como temperaturas médias elevadas e irregularidade espacial e temporal na distribuição das chuvas. Uma alternativa encontrada para suprir a carência hídrica é a perfuração de poços para exploração de águas subterrâneas. Entretanto, muitas vezes, a água encontrada é imprópria para consumo humano devido a seu elevado teor de sais.

O processo de dessalinização solar oferece uma opção viável para dessalinizar tais águas por utilizar como fonte a energia solar, que é considerada uma energia limpa e abundante (FARID *et al.*, 2020), além de apresentar uma vantagem econômica considerável sobre outros processos de dessalinização, redução de custos de operação e manutenção, bem como sua operação simples oferece uma oportunidade para as comunidades rurais produzirem sua própria água potável a baixos custos (ELANGO, GUNASEKARAN e SAMPATHKUMAR, 2015).

Uma desvantagem da dessalinização solar é a baixa produtividade, isso porque depende de muitos parâmetros, como intensidade da radiação solar, ângulo de inclinação e altura da lâmina de água (BEZERRA *et al.*, 2021). Várias pesquisas estão em

desenvolvimento para aumentar sua eficiência de forma econômica, sendo que uma das principais ideias para aumentar a produtividade é aumentar a taxa de transferência de calor (KUMAR; PRAKASH, 2019).

O uso de materiais fototérmicos na dessalinização solar tem atraído grande interesse por apresentar melhorias nos parâmetros de controle do gerenciamento térmico por apresentar uma eficiência ao sistema, em razão do aumento da absorção da luz e uma capacidade de conversão da luz solar em calor (THOAI *et al.*, 2021).

Os materiais fototérmicos são classificados em materiais de armazenamento de calor sensível, latente e termoquímico. Devido a estabilidade térmica, características de transferência de calor, como também seu baixo custo com relação aos materiais de armazenamento de calor termoquímico e latente, os materiais de armazenamento de calor sensível são amplamente utilizados para aplicações de alta e baixa temperatura; podendo ser de origem natural ou manufaturados (RAJAN; RAJA; MARIMUTHU, 2016).

Portanto, a presente pesquisa avalia o uso dos materiais fototérmicos de armazenamento de calor sensível no dessalinizador solar tipo pirâmide assimétrico com o intuito de aumentar sua produtividade e assim contribuir não só no âmbito acadêmico, como também englobar um caráter social e ambiental, visto que essa tecnologia tem o objetivo de suprir a demanda de água doce em comunidades isoladas do semiárido brasileiro.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Avaliar o desempenho do dessalinizador solar tipo pirâmide assimétrico com o uso materiais de armazenamento de calor sensível com o intuito aumentar a eficiência no dessalinizador solar.

2.2. Objetivos Específicos

- Realizar teste de absorção de calor dos materiais de armazenamento de calor sensível.
- Realizar a análise térmica no dessalinizador solar tipo pirâmide assimétrico com diferentes materiais fototérmicos.
- Verificar a influência da lâmina de água e da incidência da radiação solar no desempenho dos dessalinizadores solar.
- Verificar de forma comparativa, a produtividade do dessalinizador solar tipo pirâmide assimétrico com as modificações propostas.
- Analisar a influência dos materiais fototérmicos no dessalinizador através da produção de água potável.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Semiárido brasileiro

O Semiárido brasileiro ocupa cerca de 12% do território nacional (1,03 milhões de km²) e em torno de 89,5% da região Nordeste (IBGE, 2017), abrange 1.262 municípios, dos estados do Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e Minas Gerais como mostra a Figura 1. Os critérios de delimitação do Semiárido são a precipitação pluviométrica média anual igual ou inferior a 800 mm; índice de Aridez de Thornthwaite igual ou inferior a 0,50 e; o percentual diário de déficit hídrico igual ou superior a 60%, considerando todos os dias do ano. A competência para fixar critérios técnicos e científicos para delimitação do Semiárido foi dada ao Conselho Deliberativo - CONDEL da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste - SUDENE pela Lei Complementar nº 125, de 3 de janeiro de 2007 que o fez por meio das Resoluções do Conselho Deliberativo da Sudene de nº 107, de 27.07.2017 e de nº 115, de 23.11.2017.

Figura 1 – Mapa delimitação do semiárido brasileiro



Fonte: IBGE, 2017

Articulação no Semiárido Brasileiro (ASA) afirma que, o semiárido brasileiro é considerado o mais chuvoso do planeta, com uma média de precipitação pluviométrica anual de 200 a 800 mm, entretanto, esse volume de chuva ainda é menor que o índice de evaporação, que é de 3.000 mm por ano, provocando um déficit hídrico. Assim a convivência

com o semiárido consiste em adaptar-se ao ambiente de forma inteligente, que corresponde principalmente ao armazenamento de água com o impedimento de evaporação (SILVINO *et al.*, 2016).

O Nordeste brasileiro apresenta uma variabilidade acentuada interanual, particularmente no que diz respeito à precipitação, com alguns anos extremamente secos, e outros extremamente chuvosos. Devido a mudanças climáticas, várias regiões sofreram alterações. Tais características associadas às formações geológicas predominantemente cristalinas são fatores condicionantes do regime dos rios e das reservas subterrâneas, conseqüentemente, da disponibilidade dos recursos hídricos para o Nordeste (COSTA *et al.*, 2020; ZANELLA, 2014).

A Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil de 2021, aponta que a região Nordeste depende fortemente da água armazenada em seus reservatórios. Em períodos de secas a disponibilidade de água diminui comprometendo sua qualidade, fazendo com que as comunidades recorram a outros meios de fornecimento de água potável, a exemplo de carros-pipas e a utilização de água de poços, que muitas vezes são salobras, necessitando ser dessalinizadas para uso dessas.

Nas comunidades rurais do Nordeste brasileiro, a utilização de águas subterrâneas por meio de poços tubulares é uma alternativa ao abastecimento de água, sendo consumida na maioria das vezes indiscriminadamente pela população, sem levar em conta sua qualidade. Os poços perfurados apresentam, em geral, altos teores de sais (ZANELLA, 2014), devido à formação da rocha cristalina na maior parte do semiárido brasileiro, correspondendo cerca de 80% do território (SILVA e SHARQAWY 2020).

3.2. Energia e Radiação Solar

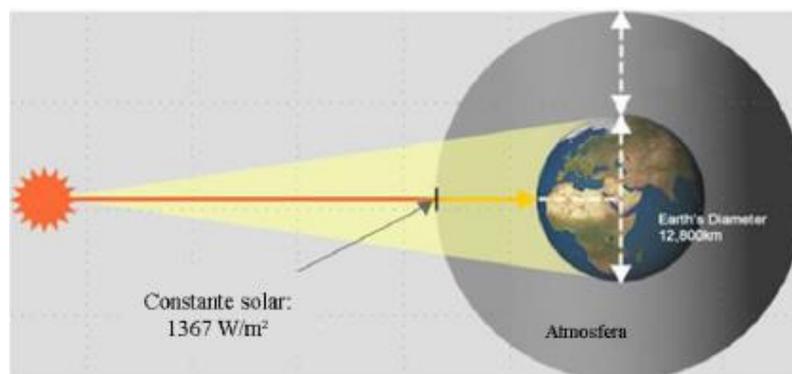
A energia solar tem seu potencial variando durante o dia e o ano (VESELI, 2019). A Terra recebe anualmente $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia solar, correspondendo a 10 mil vezes o consumo mundial de energia neste período. Este índice indica que, além de ser responsável pela manutenção da vida na Terra, a radiação solar constitui-se numa fonte energética inesgotável para a humanidade, com um enorme potencial de utilização por meio de sistemas de captação e conversão em outras formas de energia (SILVA; DO CARMO, 2017).

Quando se fala em energia, deve-se lembrar que o Sol é responsável pela origem de praticamente todas as outras fontes de energia na Terra. É a partir da energia solar que se dá a evaporação, origem do ciclo das águas, que possibilita o represamento e consequente geração de eletricidade. Além disso, a radiação solar também induz a circulação atmosférica em larga escala, causando os ventos (PINHO; GALDINO, 2014).

A superfície da Terra recebe anualmente uma quantidade de energia solar, nas formas de luz e calor. A ciência aponta que ainda poderemos aproveitar a luz e calor do Sol durante cerca de 8 bilhões de anos, tempo suficiente para considerarmos inesgotável. A energia do Sol é captada na forma de radiação eletromagnética. Essa radiação é constituída de ondas eletromagnéticas que possuem frequências e comprimentos de ondas diferentes. A energia que uma onda pode transmitir está associada à sua frequência, quanto maior a frequência, maior a energia transmitida (VILLALVA, 2015).

A intensidade da radiação solar que chega à Terra é em torno de $1,3 \text{ kW/m}^2$ acima da atmosfera. A quantidade de radiação que chega ao chão, no plano horizontal depende da localização geográfica, mas também das condições atmosféricas, assim como do período (estação) do ano, como mostra a Figura 2. A atmosfera terrestre age como um filtro, que bloqueia uma parte dessa energia (SOUZA *et al.*, 2020).

Figura 2 – Constante Solar

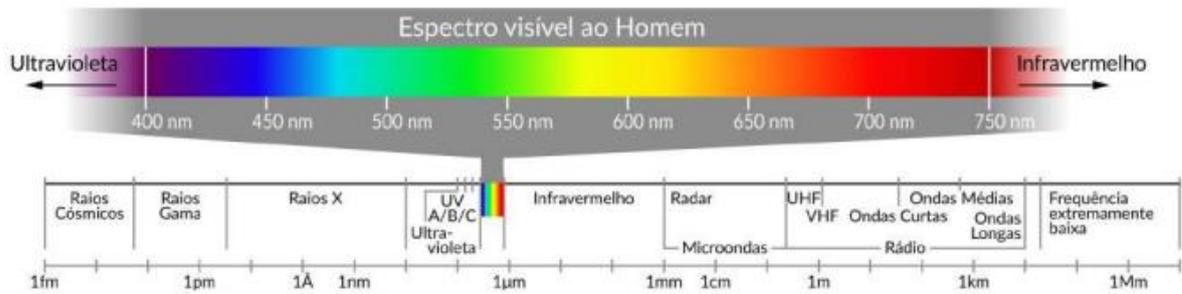


Fonte: Gunther, 2011

Segundo Villalva (2015), as ondas eletromagnéticas vindas do Sol podem produzir efeitos diversos sobre os objetos e os seres vivos. Uma pequena parte das ondas pode ser captada pelo olho humano e representa o que chamamos de luz visível. Outra parte da radiação solar não pode ser vista pelo olho humano e sua presença pode ser percebida de outras formas. O conjunto dessas radiações solares visíveis ao olho nu e não visíveis é chamado de espectro da radiação solar, como mostra a Figura 3. Todo o espectro de radiação

transporta energia que pode ser captada na forma de calor ou energia elétrica. Cerca de 81% da energia que chega ao Sistema Terra/Atmosfera está em uma faixa de comprimento de onda que vai do visível ao infravermelho próximo.

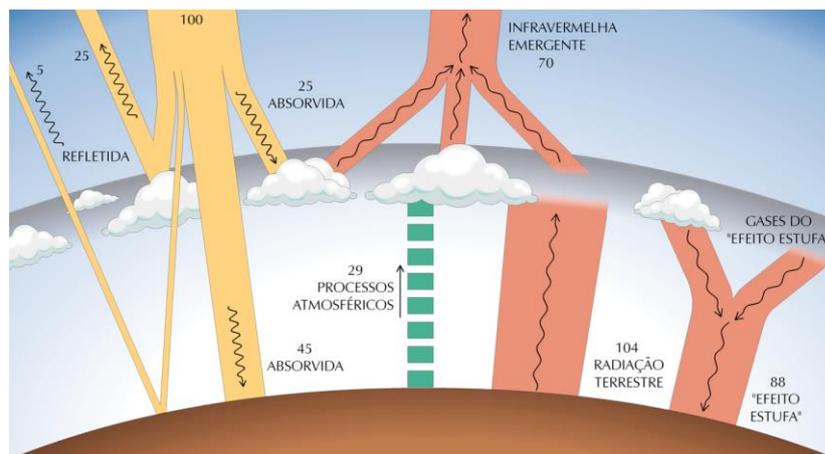
Figura 3 – Espectro da radiação solar incluindo um detalhamento de faixa visível humana



Fonte: Pereira *et al.*, 2017

De toda energia fornecida pelo Sol, o que chega na superfície terrestre é uma pequena parcela devido à distância que existe entre o Sol e a Terra, sendo a radiação constituída por duas componentes: a radiação direta, que chega à superfície sem sofrer desvios ou espalhamentos e a radiação difusa, que provém de todas as direções devido ao espalhamento ocorrido na atmosfera para fora do feixe direto por moléculas, aerossóis e nuvens (SOUZA *et al.*, 2020). A Figura 4 representa de forma simplificada os principais processos radiativos que acontecem na atmosfera terrestre. Os processos físicos de espalhamento da radiação solar são produzidos por moléculas de gases atmosféricos e particulados em suspensão. Os processos físicos de absorção ocorrem com moléculas de ozônio, vapor de água, oxigênio e dióxido de carbono. A principal radiação incidente em uma área estudada para o aproveitamento da energia solar é a radiação direta, quanto maior melhor para o processo de dessalinização.

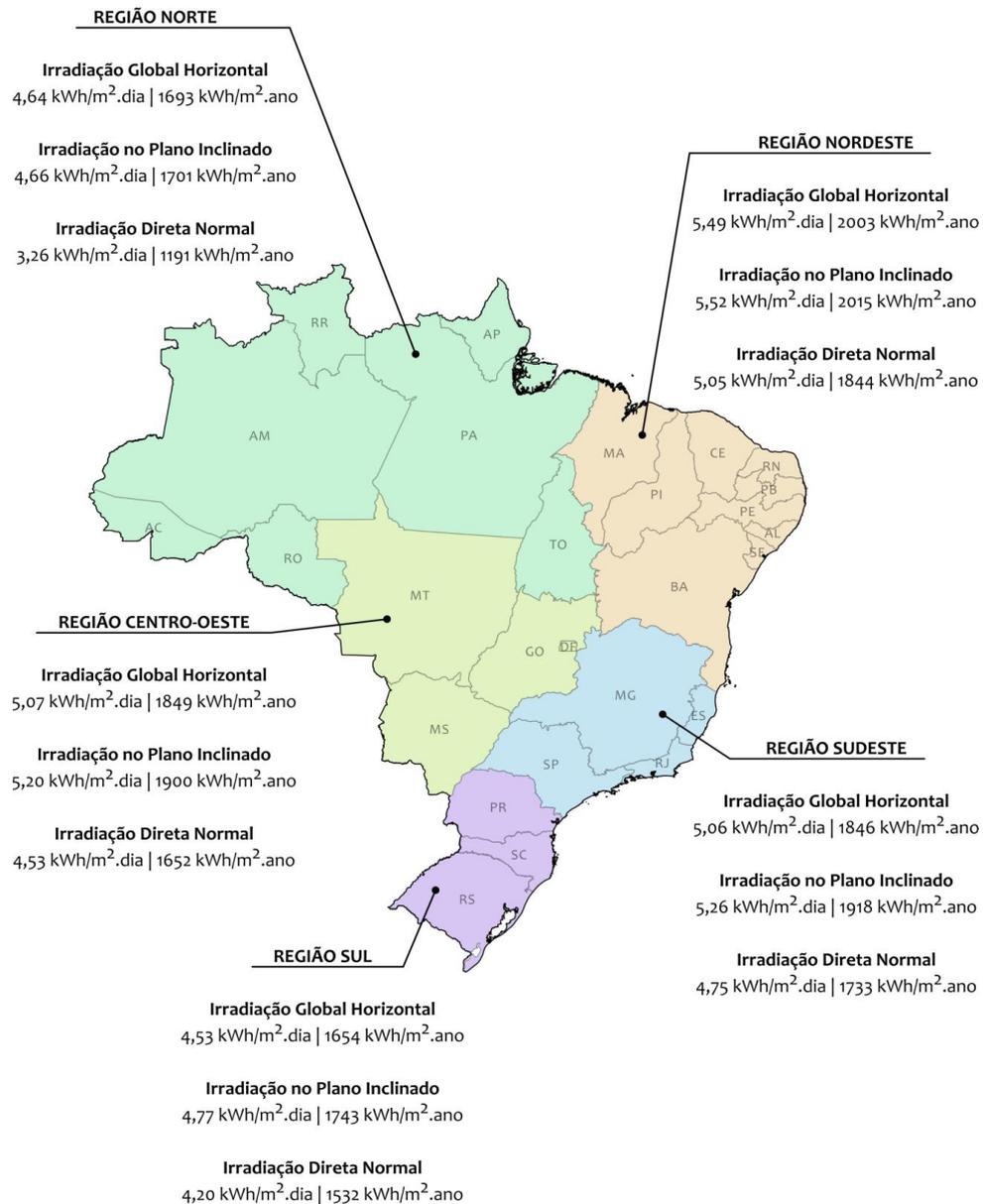
Figura 4 – Processos de interação da radiação solar



Fonte: Pereira *et al.*, 2017

A partir dos dados obtidos pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017) a Figura 5 apresenta o valor médio anual do total diário de irradiação solar para as cinco regiões do Brasil. A região Nordeste apresenta o maior potencial solar, com o valor médio total diário de irradiação direta normal de $5,05 \text{ kWh/m}^2$, superando assim os países ibéricos em termos de irradiação solar média mensal, com a característica de possuir uma variabilidade mensal bem inferior. Dessa forma, pode-se inferir que a região Nordeste apresenta um bom potencial de desenvolvimento para exploração da energia solar.

Figura 5 – Potencial brasileiro anual médio de energia solar por regiões



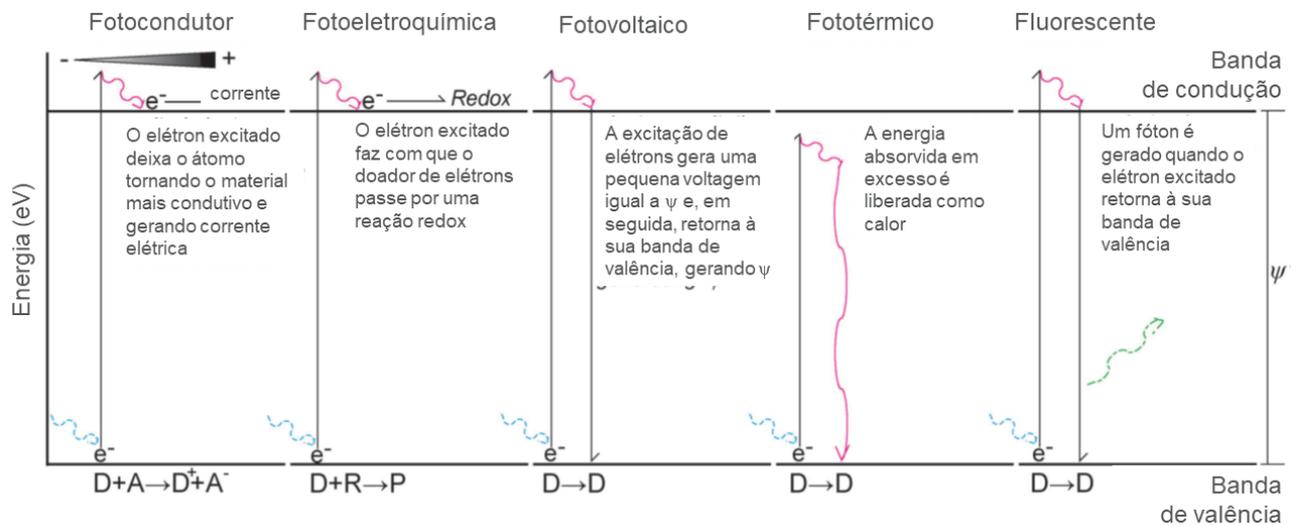
Fonte: Pereira *et al.*, 2017

3.2.1. Modos de conversão de energia solar

A luz solar existe como ondas eletromagnéticas que compreendem em fótons com diferentes frequências de vibração. Quando os fótons colidem com os elétrons, a energia pode ser absorvida, refletiva, transmitida/refratada ou espalhada, dependendo das propriedades intrínsecas do objeto. De acordo com a teoria quântica, a energia absorvida é liberada por vários processos de transformação de energia, como eletricidade, química (combustíveis) e energia térmica através de diferentes modos. Um breve diagrama é apresentado na Figura 6 para ilustrar os diferentes modos de fotoativação (WU *et al.*, 2019).

O modo fototérmico geralmente ocorre quando um fóton transfere energia para o elétron do objeto e a energia absorvida ou o excesso de energia é liberado como energia cinética ou calor (KOZAI; VAZQUEZ, 2015).

Figura 6 – Modos de fotoativação



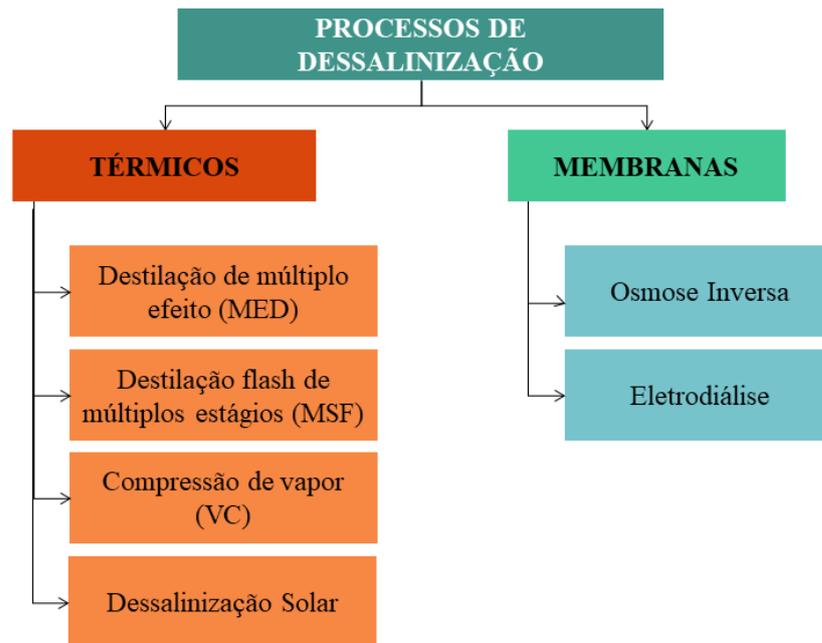
Fonte: Adaptado de Kozai e Vazquez, 2015

Para o modo fototérmico, a ativação ocorre quando um fóton transfere energia para um elétron. A energia absorvida é liberada como calor ou energia cinética. Portanto, pode aumentar a temperatura do objeto. Dentre esses modos de fotoativação, o modo fototérmico tem a maior eficiência de conversão possível. Esse efeito fototérmico geralmente pode ser observado em materiais inorgânicos ou orgânicos, ou em ambos (FUZIL *et al.*, 2021).

3.3. Processos de dessalinização

A dessalinização é um processo químico que tem como objetivo separar o excesso de sais dissolvidos na água a fim de coletar água com baixo teor de sal para qualquer uso adequado. (ABDULLAH *et al.*, 2021). Os processos de dessalinização podem ocorrer de duas formas: térmicos ou por membranas (Figura 7).

Figura 7 – Fluxograma dos processos de dessalinização



Fonte: Autor, 2022

3.3.1. Processos por membranas

O processo de separação por membranas consiste na separação de sais presentes na água por meio de uma membrana semipermeável, produzindo uma solução com baixa salinidade e um concentrado com elevada salinidade. Para a ocorrência do processo é preciso um gradiente de pressão hidráulica ou campo elétrico. Esse tipo de processo pode acontecer de duas formas diferentes, por Osmose Inversa (OI) ou Eletrodialise (ED).

A Osmose Inversa consiste em separar a água dos sais aplicando energia mecânica, na forma de pressão, utilizando membranas semipermeáveis (BELESSIOTIS, KALOGIROU e DELYANNIS, 2016). Já a Eletrodialise é um processo eletroquímico que se baseia no transporte de íons através de uma membrana semipermeável sob a força propulsora da

diferença de potencial que pode ser iniciado por uma fonte de energia externa (LOUTATIDOU *et al.*, 2017).

Segundo Kochkodan e Hilal (2015), as tecnologias por membranas além de ser utilizadas para dessalinizar a água, podem também auxiliar no processo de tratamento de águas residuais buscando sua reutilização, visto que as membranas também possuem a capacidade de remover contaminantes orgânicos, bactérias e vírus.

3.3.2. *Processos térmicos*

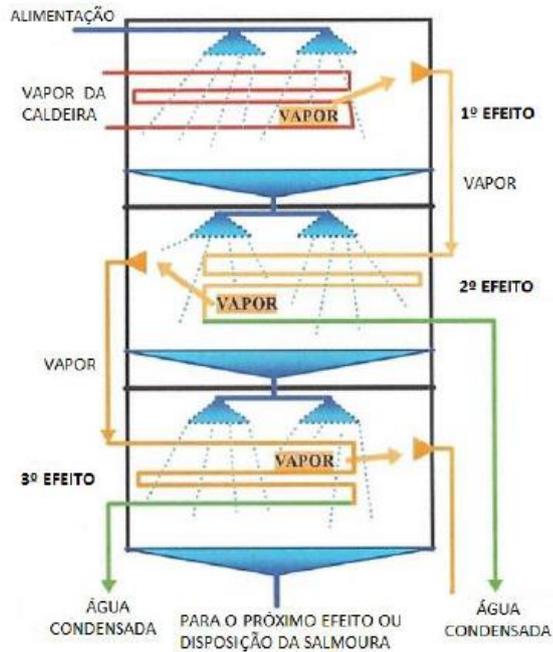
Os processos térmicos baseiam-se no processo que ocorre no ciclo natural da água, no qual através da energia solar a água em estado líquido é aquecida e ocorre o processo de evaporação, transformando o estado da água de líquido para gasoso, ficando retidas as partículas sólidas, enquanto o vapor de água é captado pelo sistema de resfriamento e ao ser submetidos a temperaturas mais baixas o vapor condensa e retorna para o estado líquido. Diferentes arranjos caracterizam o processo térmico de dessalinização, sendo os principais: Múltiplo Efeito (MED), Flash de Múltiplo Estágio (MSF) e Compressão de Vapor (VC).

- ***Flash de Múltiplos Estágios (MSF)***

O princípio básico da destilação *Flash* de Múltiplos Estágios é a evaporação instantânea. O processo consiste na captação da água de bruta, a qual será bombeada à determinada pressão, conduzida através de tubos, que estão emersos em vapor de água a temperatura mais elevada, ocasionando a troca de calor da água com o vapor, promovendo um pré-aquecimento na água de alimentação. A água bruta, pré-aquecida nos tubos, flui para o primeiro estágio. Como cada estágio está a uma pressão mais baixa que a anterior, a entrada dessa água aquecida favorece que ferva rapidamente, provocando uma quase transformação rapidamente em vapor e ocorrendo o efeito *flash*; fazendo com que parte dessa água evapore instantaneamente. A água bruta que não evaporou, também passa para o próximo estágio, seguindo todo o processo. O vapor gerado pelo “*flashing*” fornece calor para pré aquecer a água bruta que passa pela tubulação, provocando a condensação do vapor, que é captado por calhas. A cada estágio que passa, a temperatura necessária para que ocorra a evaporação é

em todos os estágios (Figura 9). O processo MED aproveita o próprio calor gerado no seguinte estágio, não necessitando assim oferecer uma fonte de calor extra; consequentemente, esse processo tem um consumo de energia menor comparado ao MSF. Além disso, no MSF não são necessários vários efeitos, como é no processo MED (ALI *et al.*, 2021).

Figura 9 – Diagrama do processo de dessalinização por múltiplo efeitos (MED)

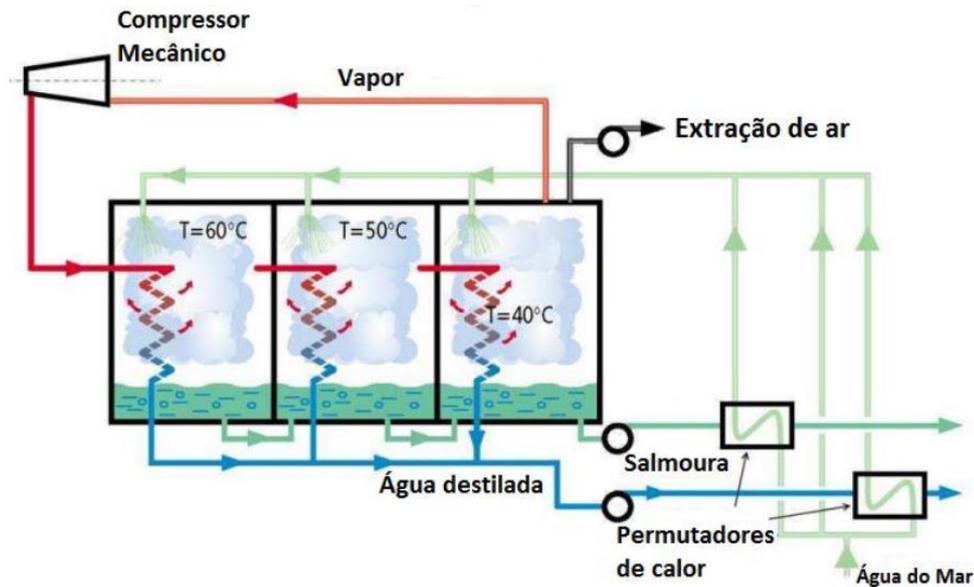


Fonte: Adaptado de Foundation For Water Research, 2011

- ***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 usado principalmente para uso de pequena e média escala. Geralmente, o calor para evaporação é fornecido por compressão, baseado no aumento da pressão 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, como mostra a Figura 10 (RAHIMI; CHUA, 2017).

Figura 10 – Diagrama do processo de dessalinização por compressão de vapor (VC)



Fonte: Adaptado de El-Ghonemy, 2018

3.4. Dessalinização solar

A dessalinização solar é uma técnica antiga, estudos apontam que há mais de 2.000 anos que essa técnica é usada para produzir água potável por meio de águas com alto nível de salinidade. Um dos primeiros dessalinizadores solares de grande escala foi construído em 1874 para fornecer água potável à comunidade do Chile (LAL *et al.*, 2017).

Segundo Panchal *et al.* (2020), o dessalinizador solar é um dispositivo usado para converter a água salina ou salobra em água potável por meio do uso de energia solar. O processo térmico de dessalinização imita o ciclo natural da água no planeta. Caracterizado por tanques cobertos com vidros ou outro material transparente. A luz solar que atravessa o vidro provoca aquecimento da água, gerando vapores que, ao se condensarem na parte interna do vidro, retornam ao estado líquido, escorrendo para um sistema de coleta e armazenamento. Ao fim do processo, tem-se como produtos a água doce, também chamada de destilado, e o rejeito com alto teor de salinidade.

A Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 357 de 17 de março de 2005 dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, como também estabelece as condições e padrões de lançamentos de efluentes. Nessa resolução é definido que águas doces são águas com salinidade igual ou

inferior a 0,5%. Águas salobras são águas com salinidade superior a 0,5% e inferior a 30%. E águas salinas são as águas com salinidade igual ou superior a 30% (CONAMA, 2005).

Asadi *et al.* (2013) afirmam que a dessalinização utilizando a energia solar como fonte de aquecimento é um processo ecologicamente correto, além da energia ser gratuita, ecológica, renovável e disponível em quase todos os locais. Um dos locais consideráveis para instalação de sistemas de dessalinização solar é o Nordeste brasileiro, por se destacar em razão de seu elevado potencial solar, dispor de níveis de irradiação mais favoráveis e menor variabilidade durante o ano (BEZERRA, 2018).

Os sistemas de destilação solar podem ser classificados de acordo com o tipo de energia aplicada à bandeja de água, dividindo-se em sistemas passivos e sistemas ativos. Nos sistemas ativos, uma parcela extra de energia é introduzida ao sistema, promovendo uma evaporação mais rápida. Essa energia extra pode ser introduzida por um coletor solar, por exemplo. Se nenhum modo extra de energia for usado, o sistema é passivo (KUMAR *et al.*, 2015).

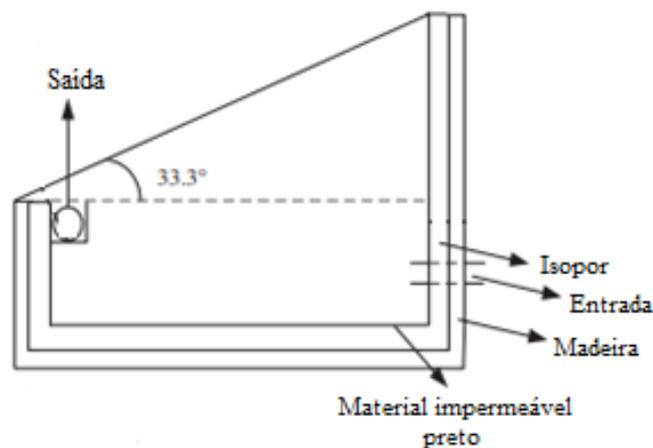
Devido aos recursos gratuitos e redução de custos de operação e manutenção, essa alternativa evidencia uma vantagem econômica considerável sobre outros processos de dessalinização. Os sistemas de dessalinização solar são usados com uma grande variedade de designs, configurações, geometria e materiais de fabricação. Sua operação simples e independente oferece uma oportunidade para as comunidades rurais prepararem sua própria água potável a preços consideravelmente mais baixos, comparado às outras formas de dessalinização (ELANGO; KANNAN; MURUGAVEL, 2015). Entretanto, a produtividade do dessalinizador solar e seu consumo de energia são baixos, Kathod, Katekar e Deshmukh (2022) afirmam que 38,4% da energia solar é utilizada para evaporar a água salobra; 35,8% da energia solar são refletidos na cobertura do vidro e cerca de 25,7% do calor é perdido através da bandeja e paredes laterais.

3.4.1. Tipos de dessalinizadores solar

- **Dessalinizador solar de bandeja única**

O dessalinizador solar de bandeja única consiste em uma bandeja profunda, forrada com um material impermeável preto, retendo a água a uma profundidade de 5 a 20 cm e uma cobertura transparente para as radiações solares, como mostra a Figura 11. A radiação solar transmitida pela tampa é absorvida pelo revestimento da bandeja, aumentando a temperatura da água e a pressão de vapor. A água vaporizada é condensada e coletada no canal de água para uso (PANCHAL; PATEL, 2017).

Figura 11 – Dessalinizador solar de bandeja única

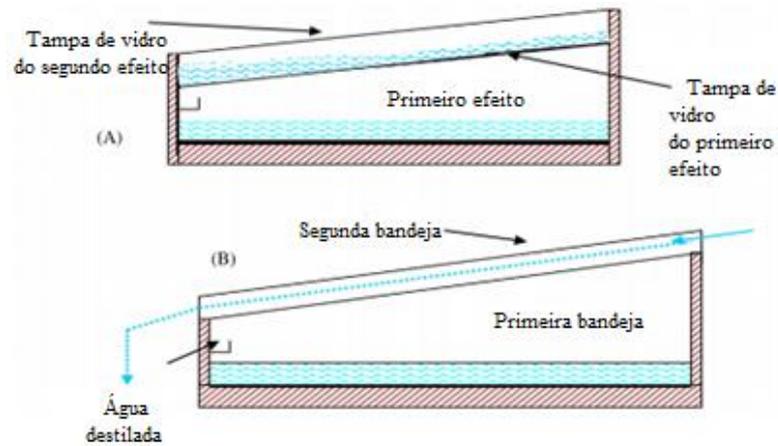


Fonte: Samee *et al.*, 2007

- **Dessalinizador solar tipo multiestágio**

O dessalinizador tipo multiestágio solar tem sua configuração convencional, utilizando câmaras internas de dois ou mais estágios para utilizar o máximo de calor dissipado, assim o calor latente de condensação é utilizado para aumentar a eficiência térmica da energia solar. Podem ser de inclinação simples ou dupla, vários pavimentos, de cobertura de vidro ou plástico, na posição horizontal, inclinado ou vertical, como mostra a Figura 12 (BELESSIOTIS; KALOGIROU; DELYANNIS, 2016).

Figura 12 – Dessalinizador solar do tipo multiestágio.



Fonte: Belessiotis; Kalogirou; Delyannis, 2016

- ***Dessalinizador solar do tipo filme capilar***

O dessalinizador solar do tipo filme capilar há o aproveitamento do calor latente, se assemelhando ao do tipo multiestágio. Sua principal característica é a utilização da propriedade de capilaridade da água, como mostra a Figura 13. Com a utilização desse material na energia solar nota-se que o tempo de permanência da água na placa absorvedora aumenta, assim, aumentando a taxa de evaporação. Sua vantagem em destaque é manter a salmoura o mais superficial, evitando os pontos secos (KAVITI; YADAV; SHUKLA, 2016).

Figura 13 – Dessalinizador solar do tipo filme capilar

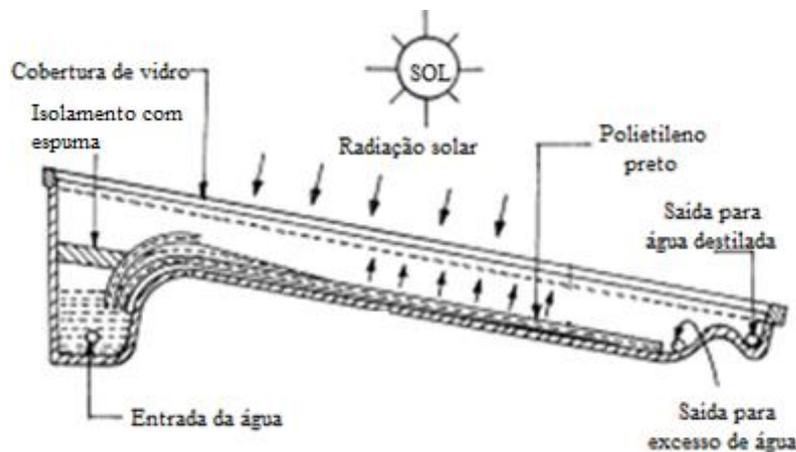


Fonte: Bouchekima, 2002

- ***Dessalinizador solar do tipo mecha (multiwick)***

O dessalinizador solar do tipo mecha ou multiwick possui uma espécie de tecido na superfície de evaporação que fica ensopado com água salobra. A água flui lentamente pelo tecido poroso (mecha) que absorve a radiação. A superfície do pano molhada e escuro do dessalinizador em questão provou ser uma ótima técnica para aumentar a produtividade do dessalinizador a custos baixos. 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, menor reflexão e melhor aproveitamento da radiação. Como também a mecha proporciona uma camada de água muito fina que pode ser aquecida mais rapidamente, como mostra a Figura 14 (KAVITI, YADAV e SHUKLA, 2016).

Figura 14 – Dessalinizador solar do tipo mecha

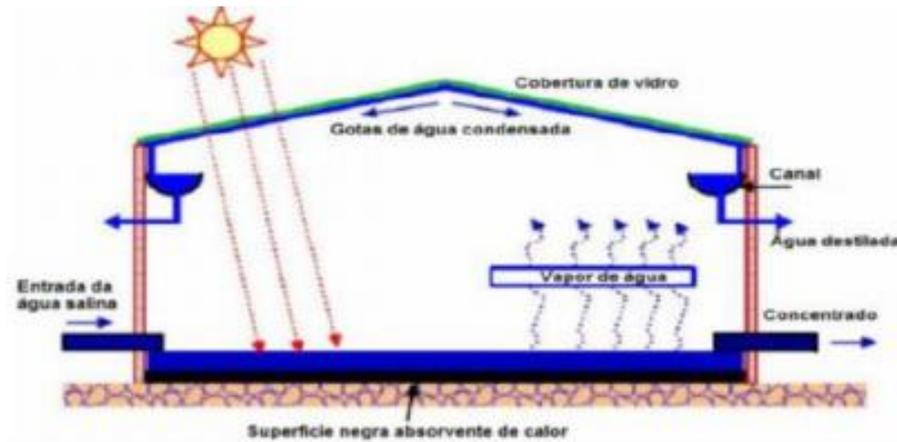


Fonte: Tiwari; Singh; Tripathi, 2003

- ***Dessalinizador Solar Tipo Pirâmide***

O dessalinizador solar tipo pirâmide possui ampla área evaporativa para mesma área de bandeja de dessalinizadores convencionais, o tornando mais produtivo (SINGH *et al.*, 2019). Devido a sua configuração o efeito de sombreamento da parede lateral é reduzido, podendo ter uma eficiência média diária de até 50,25%, comparado o dessalinizador do tipo pirâmide com o tipo bandeja única, e com as áreas das bandejas iguais, a condensação no tipo pirâmide é maior, por ter uma área de condensação mais extensa (NAYI; MODI, 2018). A Figura 15 demonstra como o dessalinizador solar tipo pirâmide.

Figura 15 – Dessalinizador do tipo pirâmide



Fonte: Clayton, 2006

3.4.2. Parâmetros que influenciam a produtividade dos dessalinizadores solar

Vários fatores influenciam na produtividade da água no processo de dessalinização solar, destacando a área da superfície da bandeja, ângulo de cobertura do vidro e espessura da lâmina de água. Fazendo os estudos desses parâmetros determinantes para melhorar o desempenho térmico e produtividade da água do dessalinizador solar (BEZERRA *et al.*, 2021).

- **Radiação Solar**

Muitos pesquisadores investigam o efeito da radiação solar na produção do dessalinizador solar, experimentalmente e teoricamente. Os autores indicam que a produtividade aumenta com o aumento da radiação solar (PANCHAL; PATEL, 2017).

Gnanadason *et al.* (2015), compararam a eficiência de um dessalinizador solar modificado com a bandeja pintada de preto, adição de seixos, aletas e acopladas externamente com uma bomba de vácuo, com um dessalinizador solar passivo sem as modificações. Analisando o efeito da intensidade solar na produtividade, os autores observaram que o rendimento do dessalinizador solar é diretamente proporcional à radiação solar diária.

- ***Diferença de temperatura da cobertura de vidro e da água***

Prakash e Velmurugan (2015) constaram que a diferença de temperatura da cobertura do vidro e da água deve ser elevada para aumentar a eficiência do dessalinizador solar. Podendo resfriar a tampa de vidro por água corrente e com fluxo de água constante. 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 destilador solar. Além disso, aumenta a taxa de transferência de calor por evaporação e convecção da água da bandeja para a cobertura de vidro.

- ***Área Superficial da Bandeja***

A taxa de evaporação da água do dessalinizador solar é proporcional à área da superfície de absorção de água. A produtividade aumenta com o aumento da área de exposição da água (RABADIA, 2015). As bandejas podem ser revestidas com tintas pretas para maior absorção da radiação solar.

- ***Espessura da lâmina de água***

Vários pesquisadores inferiram que a profundidade da água é inversamente proporcional à produtividade do dessalinizador solar (SELVARAJ; NATARAJAN, 2018). A profundidade mínima da água possui uma taxa de transferência de calor mais alto e, portanto, fornece maior produtividade. Segundo Panchal e Patel (2017), o coeficiente de transferência de calor por convecção entre a tampa interna de vidro e a água depende significativamente da profundidade da água na bandeja.

- ***Inclinação da placa de cobertura***

O dessalinizador solar é coberto de materiais altamente transmissivos, como placa de vidro transparente na parte superior, onde ocorre a condensação (SELVARAJ; NATARAJAN, 2018). Sebaili e Khallaf (2020) desenvolveram um modelo matemático para examinar a influência da variação do ângulo de inclinação da placa de cobertura de vidro. Os

autores concluíram que a produção diária do dessalinizador diminui com o aumento do ângulo de inclinação da tampa de vidro.

- ***Velocidade do vento***

A variação da velocidade do vento tem um efeito significativo na produtividade do dessalinizador solar. Conforme a velocidade do vento aumenta, o coeficiente de transferência de calor por convecção entre a cobertura do vidro e atmosfera aumenta. Dessa forma, este efeito aumenta as taxas de condensação e evaporação (PANCHAL; PATEL, 2017).

Segundo Sathyamurthy *et al.* (2014) verificaram que o aumento da velocidade do vento de 1,5 m.s⁻¹ para 3m.s⁻¹ e 4,5 m.s⁻¹, melhorou a produtividade entre 8 e 15,5%, respectivamente. À medida que a velocidade do vento aumenta o desempenho do dessalinizador solar também aumenta (KUMAR; DWIVEDI, 2015).

- ***Isolamento térmico***

Avaliando o estudo de Manokar *et al.* (2020) com relação ao isolamento térmico do dessalinizador solar, os autores afirmam que o dessalinizador com isolamento tem seu rendimento diário melhorado em 12 a 16% em comparação ao dessalinizador sem o isolamento.

O efeito da espessura do isolamento foi investigado no estudo de Altarawneh *et al.* (2017), adicionando uma camada de isolamento de 1 cm na bacia do dessalinizador solar. Comparado com um sistema não isolado semelhante, os autores observaram um aumento na produtividade de 28% no dessalinizador solar com isolamento.

3.5. Materiais fototérmicos

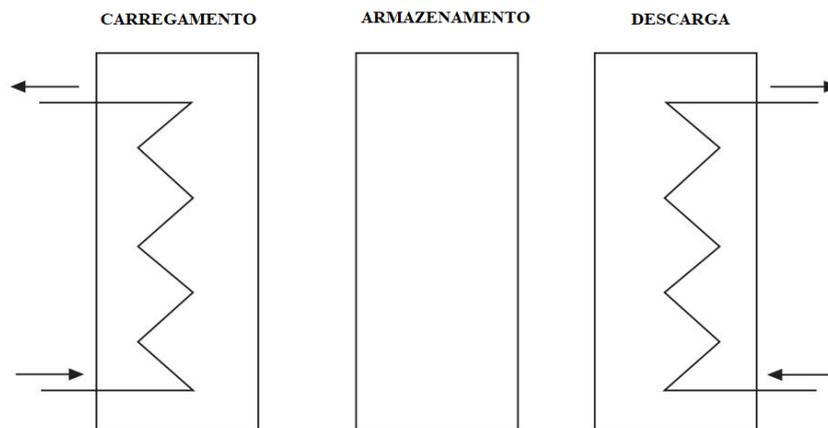
O armazenamento de energia é uma questão-chave a ser abordada para permitir que fontes de energia intermitentes, geralmente fontes renováveis, combinem o fornecimento e demanda de energia, superando a incompatibilidade entre sua geração e uso. Existem várias

tecnologias para armazenar energia em diferentes formas, incluindo energia mecânica, elétrica e térmica.

A energia térmica pode ser armazenada em fluidos ou sólidos bem isolados. Os materiais que possuem a capacidade de armazenamento térmico (TES) são conhecidos como, materiais fototérmicos. Os materiais fototérmicos podem armazenar calor para serem usados posteriormente sob condições variadas, envolvendo três etapas: carga, armazenamento e descarga, resultando em um ciclo de armazenamento completo, como mostra a Figura 16 (CABEZA, 2021).

A utilização de materiais fototérmicos para conversão de luz para calor tem sido amplamente defendida como uma técnica ambientalmente promissora para produção de água limpa a partir de água salina. Nos últimos anos, muitos esforços foram dedicados a melhorar a eficiência de conversão da energia solar para obter uma melhor eficiência nos dessalinizadores solares (WU *et al.*, 2019).

Figura 16 – Ciclo de armazenamento completo dos materiais fototérmicos



Fonte: Adaptado de Cabeza, 2021

O uso de materiais fototérmicos na dessalinização solar tem atraído grande interesse por apresentar melhorias nos parâmetros de controle do gerenciamento térmico, conferindo uma alta eficácia ao sistema, em razão do aumento da absorção da luz e uma eficiência de conversão da luz solar em calor (THOAI *et al.*, 2021). A Tabela 1 inclui dentre inúmeras, as mais importantes características que um bom material fototérmico deve ter.

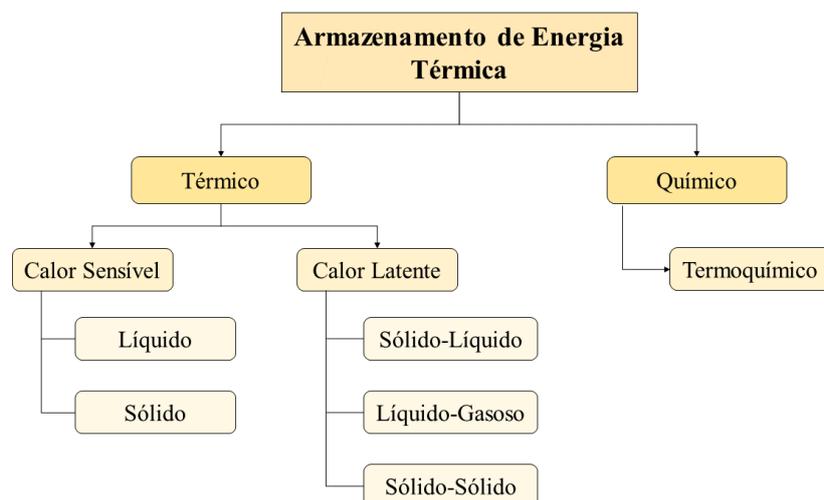
Tabela 1 – Características termofísicas importantes para materiais de armazenamento de energia

CARACTERÍSTICAS	RAZÃO / DESCRIÇÃO
Alta absorção solar	O material fototérmico pode absorver a luz em toda a faixa do espectro solar de forma eficaz, a fim de explorar a maior parte da irradiação da energia solar.
Alta conversão luz-calor	O material de armazenamento de energia pode absorver a energia luminosa e converter em energia calorífica de forma eficiente sem transformar em outras formas de energia.
Alta condutividade térmica	A alta condutividade térmica no material pode aumentar sua taxa de carga e descarga.
Estabilidade térmica	Os materiais fototérmicos não devem se decompor, mesmo em aplicações com temperaturas mais altas. As propriedades termofísicas dos materiais devem ser estáveis mesmo após o uso repetido de aplicações de resfriamento e aquecimento.
Disponibilidade	O material deve estar disponível abundantemente e facilmente no mercado local.

Fonte: Adaptado de Fuzil *et al.*, 2021 e Mogi, 2022

A quantidade de energia armazenada nos materiais fototérmicos depende da capacidade calorífica, diferença de temperatura e qualidade dos materiais utilizados. Os materiais fototérmicos são classificados quanto ao seu armazenamento como materiais de armazenamento de calor sensível, calor latente e calor termoquímico, como mostra a Figura 17 (MUGI *et al.*, 2022). Mesmo que os materiais de armazenamento de calor sensível possam atingir menor densidade de energia em comparação aos outros tipos, eles são os mais desenvolvidos e utilizados devido à sua baixa complexidade e baixo custo, comparado aos materiais de armazenamento de calor latente e termoquímico (JEMMAL *et al.*, 2020).

Figura 17– Diferentes tipos de armazenamento térmico de energia solar



Fonte: Adaptado de Bal, 2010

3.5.1. Armazenamento de Calor Termoquímico

Quando certos compostos se quebram ou formam ligações durante processos endotérmicos/exotérmicos, eles podem absorver ou liberar uma quantidade substancial de energia térmica. Com base nessas propriedades, foi desenvolvida uma técnica de armazenamento baseada em calor termoquímico. O armazenamento de calor termoquímico pode ser feito usando materiais orgânicos ou inorgânicos. Quando o material termoquímico é desidratado (recebendo calor), a energia térmica é armazenada dentro das ligações químicas, que pode ser mantido por um longo tempo desde que os produtos da reação sejam armazenados separadamente, até ser hidratado e liberar o calor armazenado (sendo descarregado) (YAN *et al.*, 2015).

Três requisitos essenciais devem ser atendidos durante a construção de um sistema de armazenamento de calor termoquímico: boa adaptação química, forte variação de entalpia e situações de reação curta. O armazenamento de calor termoquímico não foi amplamente estudado, seu uso é restrito devido a questões como a necessidade de reatores complexos para processos químicos específicos, durabilidade limitada e estabilidade química; e o desafio mais importante é encontrar a reação química reversível apropriada para a fonte de energia utilizada (PACHORI; CHOUDHARY; SHEOREY, 2022).

3.5.2. Armazenamento de Calor Latente

O armazenamento de calor latente é a absorção de calor na transição de fase de um material, geralmente sólido-líquido. Ao ficar no estado líquido, o calor é transferido para o material, armazenando grandes quantidades de calor a temperatura constante; quando o material solidifica o calor é liberado. Dessa forma, os sistemas LHS funcionam com base na carga e descarga do material empregado como uma forma eficiente de armazenar energia durante o processo de fusão e liberar esse calor dentro do processo de solidificação (CABEZA, 2021).

O armazenamento térmico latente tem uma densidade de armazenamento significativamente maior que do que o armazenamento de calor sensível, porque a entalpia de transição de fase do PCMs é geralmente muito maior do que o calor sensível. O armazenamento de calor latente pode funcionar de forma isotérmica devido ao processo de mudança de fase, que tem uma temperatura substancial aumentar ou diminuir enquanto

mantém ou emite energia térmica. Como um resultado, o armazenamento de calor latente é ideal para aplicações que precisam de temperaturas de operação. A principal desvantagem do armazenamento de calor latente é sua baixa condutividade térmica (PACHORI; CHOUDHARY; SHEOREY, 2022).

Os materiais utilizados nesse tipo de armazenamento são chamados de materiais de mudança de fase (PCM), que podem ser divididos em orgânicos e inorgânicos. No entanto, na prática, os PCMs sofrem de vários inconvenientes de acordo com seu tipo. A parafina e os hidrocarbonetos são os PCMs orgânicos mais utilizados e apresentam baixa capacidade de armazenamento de calor, baixa condutividade, inflamabilidade. Já os PCMs inorgânicos (hidratos de sal) têm como desvantagens a segregação de fases, devido ao material ter uma diferença de densidade dos componentes; um alto grau de super resfriamento, permanecendo na forma líquida mesmo após cruzar a temperatura de solidificação, perdendo calor; falta de estabilidade térmica e corrosão (SADEGI, 2022), a Tabela 2 contém trabalhos que estudaram o uso de PCM.

Tabela 2 – Uso de materiais de armazenamento de energia latente (PCM) em dessalinizador solar

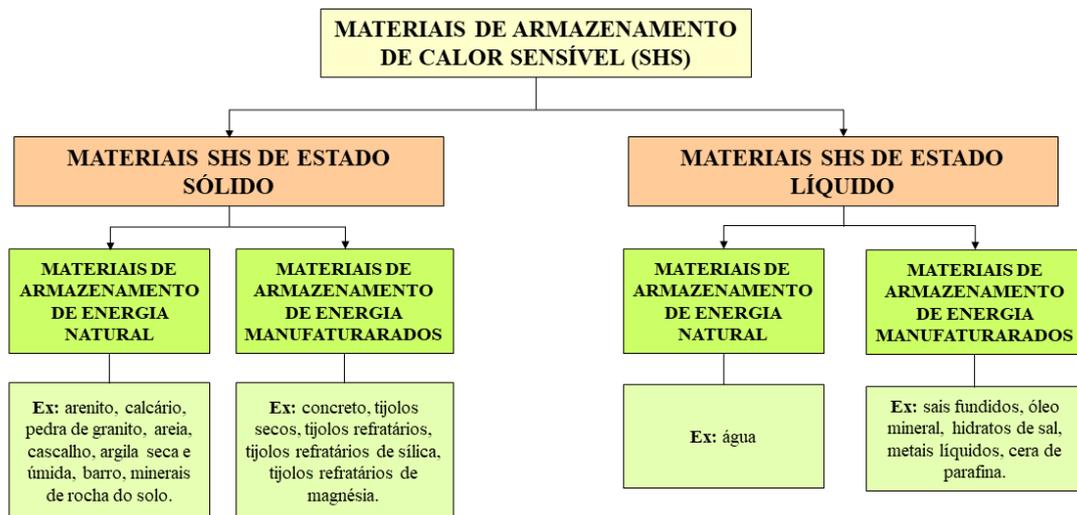
Autor	Materiais PCM	Progresso do estudo
Shalaby, El-Bialy e El-Sebaili (2016)	Parafina	O uso do PCM melhorou a produtividade em 12%.
Kabeel e Abdelgaied (2016)	Cera de parafina	A produtividade de água é maior no dessalinizador solar com PCM do que o dessalinizador convencional, atingindo 7,54 L.m ⁻² e 4,51 L.m ⁻² , respectivamente.
Kabeel, Abdelgaied e Mahgoub (2016)	Cera de parafina e injeção de ar quente	A produtividade diária aumentou 109% comparado ao dessalinizador convencional.
Al-harshshah <i>et al.</i> (2018)	Penta-hidrato de Tiosulfato de Sódio	Triplicou a produtividade da água do dessalinizador solar, sendo 40% é produzido no período após pôr do sol.
Vigneswaran <i>et al.</i> (2019)	Parafinas com duas temperaturas diferentes	A eficiência do dessalinizador solar com os PCM foi maior do que o dessalinizador solar convencional, atingindo um aumento de 46,29%.
Elashmawym Alhadri e Ahmed (2021)	Tubos de parafina	Os tubos com PCM aumentaram a produtividade e a eficiência do dessalinizador solar em 41% e 38%, respectivamente.
Ajdari e Ameri (2022)	Nanocompósitos de óxido de grafeno (GO) e de cobre (CuO), e parafina	Os resultados mostraram que teve um aumento de produção de água em 48,12%, 81,59% e 32,8%, para o GO, CuO e parafina, respectivamente.
Hansen <i>et al.</i> (2022)	Parafina e aletas	Com o uso da parafina a produção de água teve um aumento de 87,96%, e para as aletas 74,5%.

3.5.3. Armazenamento de Calor Sensível

No armazenamento de calor sensível, a energia térmica é armazenada aumentando a temperatura de um sólido ou líquido, utilizando a capacidade de calor e a mudança de temperatura do material durante o processo de carga e descarga. A quantidade de calor armazenada depende do calor específico do meio, mudança de temperatura, quantidade de material armazenado; e é proporcional a diferença entre as temperaturas de entrada e saída do meio de armazenamento, massa e capacidade de calor (KHATOD *et al.*, 2022).

Devido à estabilidade térmica excelente e às características de transferência de calor, os materiais de armazenamento de calor sensível são amplamente utilizados como materiais fototérmicos para aplicações de alta e baixa temperatura. Os materiais SHS são categorizados principalmente em materiais de armazenamento de calor em estado sólido e estado líquido, que ainda são subclassificados em armazenamento de energia natural e materiais de armazenamento de energia manufaturados (MUGI *et al.*, 2022) (Figura 18).

Figura 18 – Classificação dos materiais de armazenamento de calor sensível



Fonte: Autor, 2022

Apesar de possuírem uma baixa densidade energética, os sistemas SHS foram desenvolvidos, comercializados, simples de construir, mais baratos e mais confiáveis em comparação com ao TCM e LHS que ainda estão sob investigações fundamentais (SADEGI, 2022). A Tabela 3 lista requisitos ideais, além das propriedades citadas na Tabela 1.

Tabela 3 – Propriedades desejáveis nos materiais de armazenamento de calor sensível

PROPRIEDADES	RAZÃO / DESCRIÇÃO
Químicas	Estabilidade química a longo prazo, sem decomposição química; excelente capacidade de carga e descarga sem diferenças significativas de temperatura; não tóxico e não explosivo; baixo potencial de corrosão.
Mecânicas	Boa estabilidade mecânica; baixo coeficiente de expansão térmica; alta resistência à compressão.
Ambientais	Baixa necessidade de energia de fabricação.
Econômicas	Baixo custo e alta disponibilidade.

Fonte: Adaptado de Khatod *et al.*, 2022

Os materiais SHS de estado sólido incluem rocha, metal, concreto, areia, tijolos, seixos, e são utilizados em muitas aplicações de armazenamento de energia por suportar temperaturas muito elevadas, não tem problema de vazamento, sua consistência, baixo custo de investimento, fácil execução e adequação em diferentes aplicações práticas. Além disso, esses materiais não enfrentam problemas como alta pressão de vapor da água, não congelam ou fervem, nem desvantagem de outros líquidos (LI, 2016).

Os materiais de armazenamento de energia natural podem atender consideravelmente as necessidades da sociedade, pois fornecem energia eficiente e inofensiva ao meio ambiente durante as aplicações de aquecimento solar. Em comparação com os sistemas de armazenamento de energia termoquímica, os materiais de energia natural apresentam alguns benefícios importantes, como a diminuição das emissões de dióxido de carbono, redução das emissões de clorofluorcarbono (CFC), diminuição dos preços de aquecimento ou refrigeração, melhor temperatura ambiente, baixa carga elétrica devido ao fator de carga de energia aprimorado, a chance de uso ininterrupto, demanda de energia minimizada. Os materiais de armazenamento de energia natural possuem boa confiabilidade térmica (sem variação nas características térmicas) e estabilidade química (sem alteração na composição química e sem deterioração) mesmo após um grande número de ciclos de trabalho/térmicos. Possuem excelente estabilidade térmica devido à ausência de degradação durante temperaturas mais altas, o que causa uma longa vida útil (MUGI, 2022).

Os SHS sólidos têm a vantagem de permitir sua utilização em temperaturas mais significativas, sendo assim seu grande benefício com relação aos SHS líquidos. Ressaltando que no SHS, o material armazenado, seja líquido ou sólido, não sofre alteração de fase

(HAILU; FEKADU; NAUSS, 2018), algumas pesquisas utilizando os SHS estão listadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Uso de material de armazenamento de calor sensível (SHS) em dessalinizador solar

Autor	Materiais SHS	Progresso do estudo
Patel e Kumar (2016)	Óleo térmico (HP-500)	Aumentou a produção do dessalinizador solar em 11,24%.
Samuel <i>et al.</i> (2016)	Espunja	Seus resultados indicaram uma melhora de 22,73% na produção de água.
Kabeel <i>et al.</i> (2018)	Tecido e areia	Resultou em um aumento de 18% na produtividade da água.
Nasri <i>et al.</i> (2018)	Brita, areia e polietileno	A brita produziu mais água (5 L.m ⁻² .dia ⁻¹), em seguida o polietileno preto (4,48 L.m ⁻² .dia ⁻¹) e por fim a areia (3,84 L.m ⁻² .dia ⁻¹)
Kabeel, Abdelgaied, Eisa (2018)	Grafite	Melhorou a eficiência do dessalinizador de bandeja única em uma faixa de 25 a 27%.
Balaji Udhayakumar e Vijay (2019)	Seixos, pedras, tijolos, granito e mármore	Os dessalinizadores constituídos com materiais de armazenamento de calor têm maior eficiência.
Panchal, Patel e Patel (2019)	Arenito e mármore	Resultaram em um aumento na eficiência do dessalinizador solar em 30% e 14% para o arenito e mármore, respectivamente.
Arunkumar <i>et al.</i> (2020)	Espunjas de Álcool Polivinílico (PVA), seixos, bolas esféricas de argila e placa absorvedora nanorevestidas de óxido de cobre	A esponja, seixo, bolas esféricas de argila e a placa absorvedora tiveram um aumento na eficiência de 32%, 44%, 39% e 53%, respectivamente.

A brita e o granito são diferentes tipos de rochas. As rochas tem certas vantagens, como serem baratos, facilmente disponíveis, não tóxicos e não inflamáveis (JEMMAL *et al.*, 2020). Além de apresentarem um excelente desempenho térmico por aproximadamente 20 anos.

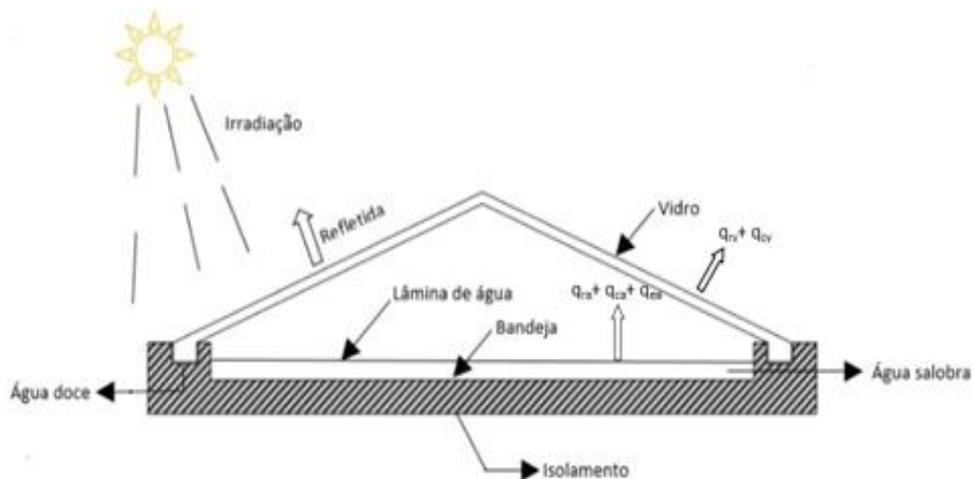
As telhas de cerâmica vermelha são fabricadas com argilas comuns e têm suas propriedades dependentes da matéria prima e do processo de fabricação. Normalmente essas telhas apresentam afinidade com a água, o que lhes confere absorção elevada quando comparados com as rochas naturais (DIAS; TOFFOLI; AGOPYA, 2004). Segundo Francklin (2009), o ferro apresenta boas características de resistência mecânica, resistência a choques térmicos e condutividade térmica.

Os vidros são superfícies transparentes que geralmente permitem um alto fluxo de calor, devido à sua característica de transmitir diretamente a radiação solar incidente para o seu interior, elevando a temperatura interna e assim, causando o efeito estufa. Os vidros por serem transparentes absorvem à radiação de onda curta, tendo assim um alto valor de transmitância (CASTRO, 2006).

3.6. Balanço Global de Energia no dessalinizador

Para entendimento maior dos processos de dessalinização solar é necessário o conhecimento dos mecanismos responsáveis pela transferência de calor. As principais formas de transferência de calor são a condução, convecção e radiação. Nos processos de dessalinização solar os três modos de transferências de energia estão fortemente envolvidos, além desses, existem outros fenômenos importantes neste processo, como a evaporação e a condensação, como mostra a Figura 19 (BIRD *et al.*, 2004).

Figura 19 – Balanço Global de energia no dessalinizador



Fonte: Adaptado de Kalogirou (2014).

A variação de energia é obtida pelo diferencial entre a energia que está entrando no sistema (irradiação) e a energia que está saindo no sistema (convecção e radiação) do vidro para o ambiente, a convecção e a radiação entre o isolante e o ambiente, como mostra a Equação (1).

$$m_a \cdot C_a \cdot \frac{dT}{dt} = I(t) \cdot \alpha_v \cdot A_v - \{h_{cov.v-amb} \cdot A_v \cdot (T_v - T_{amb}) + h_{rad.v-amb} \cdot A_v \cdot (T_v - T_{amb}) + h_{conv.is-amb} \cdot A_{is} \cdot (T_{is} - T_{amb}) + h_{rad.is-amb} \cdot A_{is} \cdot (T_{is} - T_{amb})\} \quad (1)$$

Na qual, m_a é a massa de água (kg), C_a é o calor específico da água ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$), $\frac{dT}{dt}$ é a variação da temperatura em relação ao tempo (W.s^{-1}), $I(t)$ a intensidade de radiação (W.m^{-2}), α_v absorvidade do vidro, A_v a área do vidro (m^2), $h_{conv.v-amb}$ coeficiente convectivo entre o vidro e o ambiente ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$), h_{is-amb} coeficiente convectivo entre o isolante e o ambiente ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$), A_{is} a área do isolante (m^2), h_{rad} coeficiente radiativo ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$), T_v temperatura do vidro (K), T_{amb} temperatura ambiente (K) e T_{PS} temperatura do isolante (K).

3.6.1. Transferência de calor por convecção

O modo de transferência de calor no dessalinizador solar ocorre por convecção livre, e seu coeficiente é influenciado pela força de flutuação devido a diferenças de densidade do ar aquecido. A principal equação que rege os fenômenos de transferência de calor por convecção estabelece que o fluxo de calor é diretamente proporcional ao gradiente de temperatura, e é regida pela Lei de Resfriamento de Newton. A taxa de transferência de calor por convecção entre a bandeja e a superfície da água é calculada pela Equação (2) (PANCHAL *et al.*, 2011).

$$q_{c-ba} = h_{c-ba} \cdot A_b \cdot (T_b - T_a) \quad (2)$$

No qual, q_{c-ba} é a taxa de transferência de calor entre a bandeja e a superfície da água (W), h_{c-ba} é o coeficiente convectivo de transferência de calor ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$), A_b é área de transferência de calor da bandeja (m^2), T_b e T_a são as temperaturas da bandeja e da água respectivamente (K).

A taxa de transferência de calor por convecção entre a superfície da água para a tampa de vidro de condensação é calculada pela equação (3) (Velmurugan *et al.*, 2008).

$$q_{c-av} = h_{c-av} A_a (T_a - T_v) \quad (3)$$

Onde q_{c-av} representa a taxa de transferência de calor convectiva da água para a cobertura de vidro (W), h_{c-av} é o coeficiente de transferência de calor convectiva da água para a cobertura ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}$), A_a é a área da água (m^2), e T_v é a temperatura do vidro (K).

3.6.2. Transferência de calor por radiação

O principal fenômeno para que o dessalinizador receba/absorva energia é a radiação. A radiação é transportada sem obstáculos através do vácuo, sendo processada sem a necessidade de um meio intermediário, sendo o modo de transferência de calor mais rápida (FORSBERG, 2020). Além disso, a transferência de calor por radiação ocorre tanto em sólidos quanto em líquidos e gases. A transferência de calor radiativo ocorre no interior do destilador solar entre a massa de água e a superfície interna da cobertura de vidro (ELANGO, GUNASEKARAN; SAMPATHKUMAR, 2015).

O fator de visualização desempenha um papel importante na determinação da taxa de transferência de calor por radiação. Na dessalinização solar, o fator de visão é assumido como unitário, uma vez que a inclinação da cobertura de vidro com a horizontal é pequena. A taxa de transferência de calor radiativo entre a água e a cobertura de vidro na superfície interna pode ser obtida pela Equação 4:

$$q_{r-av} = h_{r-av}A_a(T_a - T_v) \quad (4)$$

Onde q_{r-av} representa a taxa de transferência de calor radiativa da água para a cobertura de vidro (W), h_{r-av} é o coeficiente de transferência de calor radiativo da água para a cobertura ($W.m^{-2}K$), A_a é a área da água (m^2), e T_v é a temperatura do vidro (K).

3.6.3. Transferência de calor por evaporação

Segundo Forsberg (2020), a evaporação ocorre quando as moléculas do líquido próxima a superfície sofrem colisões que aumentam sua energia para um valor acima do necessário para superar a energia de ligação da superfície. Esses autores afirmam também, que a energia necessária para sustentar a evaporação vem da energia interna do líquido, que sofre uma redução na sua temperatura. Matematicamente pode-se dizer que o fluxo de calor por evaporação é a soma dos fluxos de convecção e advecção.

A transferência de calor por evaporação é o principal mecanismo de transferência de calor em um dessalinizador solar, devendo ser maximizada. Essa transferência é baseada no efeito de pressões parciais do vapor na cobertura e no condensado na parte interna do

dessalinizador. A taxa de transferência de calor evaporativo entre a massa de água e superfície de cobertura de vidro é dada pela Equação (5) (FUENTES; ROTH, 1997).

$$q_{e-av} = h_{e-av}A_a(T_a - T_v) \quad (5)$$

De forma que, q_{e-av} representa a taxa de transferência de calor evaporativa da água para a cobertura de vidro (W), h_{e-av} é o coeficiente de transferência de calor radiativo da água para a cobertura ($W.m^{-2}.^{\circ}C$).

3.7. Estado da arte

Mevada *et al.* (2022), produziu um estudo comparativo em dessalinizador solar tipo bandeja única com diferentes materiais fototérmicos, com o objetivo de aumentar o rendimento e a eficiência do dessalinizador solar. Os materiais utilizados foram esfera de vidro preta, granito preto e pedra de mármore branco. De forma que, constataram que a utilização dos materiais fototérmicos implica em um aumento nas temperaturas do vidro e bandeja, como também que o rendimento diário do dessalinizador solar com as modificações propostas é 76% superior com relação ao dessalinizador convencional.

Hammad e colaboradores (2022), realizaram um estudo experimental comparativo com o objetivo de aumentar a produtividade de água doce de um dessalinizador solar de inclinação única. Para isso, utilizaram diferentes configurações de bandejas (onduladas e planas) com e sem utilização de PCM e aletas. Todos os dessalinizadores foram projetados com a mesma área projetada e a mesma estrutura de corpo externo, com apenas o design interno diferente. Dessa forma, concluíram que o dessalinizador com a bandeja ondulada com adição do PCM maximizou tanto o desempenho energético-econômico quanto a produção de água doce entre as modificações investigadas. Obtendo sua produção de água acumulada e a eficiência energética diárias melhoradas em 63,57% e 72,70%, respectivamente, em relação ao dessalinizador de bandeja plana sem adição do PCM.

Saravanan, Rajakumar e Moshi (2021), investigaram o efeito de esfera de vidro preta como material de armazenamento de energia em dessalinizador solar de bandeja única com inclinação dupla. O estudo foi comparativo, de modo que foram construídos dois dessalinizadores, um convencional e o outro adicionado as esferas em sua bandeja, operados com as mesmas condições ambientais e com altura de lâmina de 1 cm. Como resultados,

inferiram que com o uso das esferas a produção de água e eficiência do dessalinizador foi aumentada, tendo uma melhoria de 16,32% em sua produção.

Attia *et al.* (2021), usaram brita preta com diferentes tamanhos para aumentar a taxa de transferência de calor em um dessalinizador solar, com o intuito de alcançar um maior rendimento. O estudo utilizou quatro tamanhos de brita (4, 8, 11 e 16 mm) no desalinizador solar e comparou com um dessalinizador solar nas mesmas condições climáticas. Os resultados mostram que a adição de britas melhorou a eficiência diária do dessalinizador em 16,2%, 31,2%, 40,1% e 56%, para os tamanhos 4, 8, 11 e 16 mm, respectivamente, em comparação ao dessalinizador referência. Os autores concluíram que a maior produtividade acumulada do dessalinizador solar foi com a adição da brita no tamanho de 16 mm.

Khechekhouche *et al.* (2021), afirmam que uma das maneiras para melhorar a produtividade da água doce a partir da dessalinização solar é introduzir materiais de armazenamento de energia. Dessa forma, foram expostos ao sol dois dessalinizadores solar semelhantes nas mesmas condições meteorológicas. Entretanto, na badeja de um dessalinizador contém uma placa de zinco com tamanho 48 por 48 cm e com espessura de 0,2 cm. Os resultados dessa técnica melhoraram a produtividade do dessalinizador em 1,54 vezes em comparação ao dessalinizador convencional. Dessa forma, a placa de zinco aumenta a produtividade do dessalinizador.

Li *et al.* (2021), utilizaram nos dessalinizadores solar melamina modificador com polidimetilsiloxano/nanotubos de carbono (PDMS/CNTs) para uma maior eficiência. Os dessalinizadores apresentaram uma alta absorvância solar (99%) e excelente desempenho fototérmico, baixa condutividade térmica ($0,032 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). Conseqüentemente, os dessalinizadores tem uma taxa de evaporação de $1,44 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ e uma eficiência de 84%.

Com o intuito de aumentar a eficiência do dessalinizador, Zhang *et al.* (2020) fabricaram uma membrana fototérmica de fluoreto de plovinilideno revestida com tanato férrico e encapsulada com dióxido de titânio. Tal sistema atingiu uma eficiência de 63,9% para o processo geral. Demonstrando assim que a utilização da membrana é altamente eficaz no dessalinizador solar.

Attia *et al.* (2020), O experimento consiste na mesma área de dois dessalinizadores solares, expostas à luz solar no mesmo lugar, mesma posição, mesma natureza da água e mesma quantidade de água. O primeiro dessalinizador é considerado como referência e o

segundo dessalinizador compreende em sua bandeja esferas de alumínio como um dessalinizador solar modificado. Utilizaram 30 bolas de alumínio idênticas e uniformemente espaçadas com um diâmetro de 2 cm cada. O estudo tem como objetivo analisar o efeito das bolas de alumínio no dessalinizador solar. As esferas de alumínio elevaram a temperatura da água cerca de 5°C e a energia térmica armazenada foi utilizada para aumentar a temperatura da água salina durante o horário do pôr do sol. O dessalinizador modificado teve um aumento de 27% no rendimento, com uma melhora de 31,6% na eficiência térmica por hora.

Cai e Guo (2019) como proposta de economizar energia em edifícios, estudaram uma persiana de vidro prismática cheia de água, devido ao fato desses persianas inovadoras poderem coletar energia solar, como também melhorar a qualidade da iluminação natural. Para habilitar essa tecnologia foram estudadas a eficácia da captação de energia ultravioleta (UV) e infravermelha (IR), como também a transmissão de luz visível (VIS), bem como a absorção e transmitância em diferentes regimes de bandas. Em todos os três locais testados, o dispositivo absorve cerca de 81% de IR e 87% de UV e transmite cerca de 76% de VIS. Dessa forma, comprovando que o vidro auxilia para uma maior eficácia para coleta da energia solar.

Rajan, Raja e Marimuthu (2016) estudaram um método para aumentar a produtividade do dessalinizador solar do tipo pirâmide utilizando materiais de armazenamento de calor sensível (peças de metal, pedras e conchas) e tarugos de materiais de armazenamento de calor latente (água e cera) e materiais de superfície evaporativos (pavio e esponja). O estudo foi comparativo, de forma que utilizaram dessalinizadores do tipo pirâmide com as modificações propostas, e um dessalinizador do tipo pirâmide sem as modificações. Os autores concluíram que a produtividade do dessalinizador melhorou em 84% com os materiais de armazenamento de calor sensível, 69% com o material de armazenamento latente e 61% com material de superfície evaporativa em comparação ao dessalinizador do tipo pirâmide convencional.

4. MATERIAL E MÉTODOS

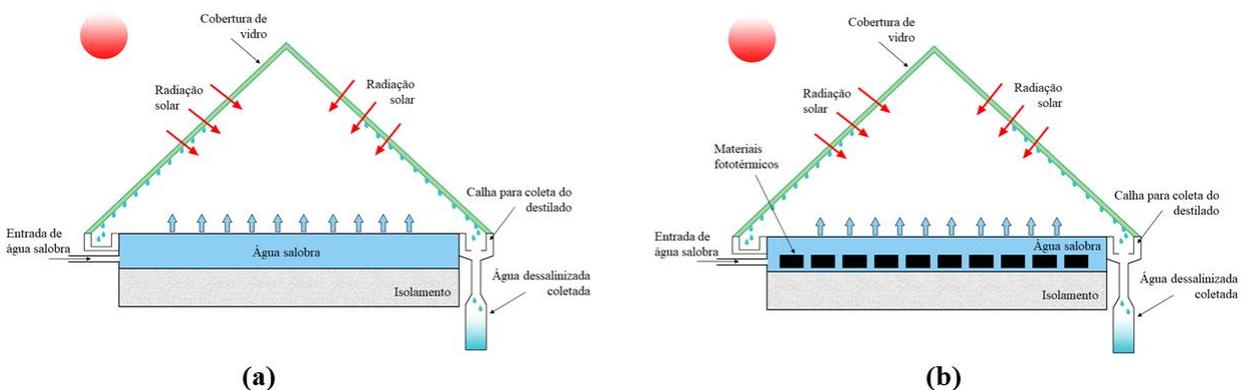
O projeto foi desenvolvido no Laboratório de Pesquisa em Ciências Ambientais (LAPECA), do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual da Paraíba, na cidade de Campina Grande – PB, a uma latitude 7°13'11" sul e longitude 35°52'31" oeste, com altitude média de 550 metros.

Para realização da pesquisa, a metodologia utilizada constitui no levantamento bibliográfico sobre dessalinização solar e materiais fototérmicos, identificação e pesquisa dos materiais a serem utilizados no projeto, análise físico-químico do destilado, tratamento de dados.

4.1. Modelo do dessalinizador

A partir do estudo bibliográfico com identificação e comparação dos principais processos de dessalinização, optou-se por um modelo de dessalinizador do tipo pirâmide assimétrico por apresentar a maior produção de água em comparação aos outros tipos de dessalinizadores, conforme mostra a Figura 20.

Figura 20 – Desenho esquemático do dessalinizador solar: (a) tipo pirâmide convencional e (b) tipo pirâmide com uso de materiais de armazenamento de calor sensível



Fonte: Autor, 2022

Foram construídos protótipos de três dessalinizadores iguais visando atender as condições necessárias para a tecnologia proposta, de maneira a ter fácil operação, menor perda de calor, resistência a corrosão e boa durabilidade. Os dessalinizadores foram denominados de D1, D2 e D3, como mostra a Figura 21. Cada um é composto por três partes

principais: sistema de isolamento térmico, vidro de condensação da água dessalinizada e a bandeja. Os dessalinizadores possuem comprimento de 0,50 m e largura de 0,40 m, possuindo uma área de 0,20 m². Suas bandejas são de alumínio de forma retangular com dimensões de 0,44 m de comprimento e 0,30 m de largura, 3 mm de espessura, e pintadas de preto para aumentar a absorção da radiação. Nessas bandejas foram dispostos os materiais fototérmicos, como mostra a Figura 20b. Em seguida, foram realizadas as instalações das tampas de vidro, que tem 4 mm de espessura e 48° de inclinação em relação à horizontal. A cobertura de vidro foi vedada para evitar vazamento de vapor, provocando, assim, o efeito estufa.

Figura 21 – Protótipos construídos de dessalinizador solar tipo pirâmide assimétrico.



Fonte: Autor, 2022

Foram inseridas também calhas nas laterais internas para o recolhimento da água dessalinizada no vidro. Os destilados foram recolhidos pela calha e contabilizados em uma proveta, ao sair do dessalinizador. As laterais externas e a base dos dessalinizadores foram isoladas utilizando madeira e fibra de vidro com o tampo do fundo de zinco, para evitar perdas de calor para o ambiente.

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

O estudo foi dividido em três partes:

- A. Teste de absorção de calor dos materiais fototérmicos
- B. Calibração dos dessalinizadores.
- C. Ensaios dos dessalinizadores com o uso do material fototérmico, analisando os perfis de temperatura, produtividade de água e eficiência horária.

4.2. PARTE A: Teste de absorção dos materiais fototérmicos

O tipo de armazenamento de calor escolhido para ser estudado a partir do estudo bibliográfico dos materiais fototérmicos foi o material de armazenamento de calor sensível (SHS), pois esse tipo de material é de fácil acesso, baixo custo e de operação simples, comparado aos outros tipos de armazenamento de calor. Considerando os critérios de propriedades termofísicas, disponibilidade e custo do material, foram escolhidos para estudo a brita, granito, telha, ferro e esfera de vidro (Tabela 5).

Tabela 5 – Propriedades termofísicas dos materiais fototérmicos em estudo

Material	Densidade (kg.m ⁻³)	Calor específico (kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	Condutividade térmica (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Difusividade térmica (m ² .s ⁻¹)	Capacidade térmica - ρC_p (mJ.m ⁻³ .K ⁻¹)
Brita	2040	1,84	0,6	0,2	3,8
Granito	2530 - 2700	0,6 – 0,9	2,6 – 3,1	0,8 – 1,8	1,5 – 2,5
Telha	1400 – 1900	0,8	0,9 – 1,2	0,52 x 10 ⁻⁶	1,2 – 1,6
Ferro	7900	0,4	52	22,8 x 10 ⁻⁶	3,6
Vidro	2710	0,8	0,7 – 0,9	0,3 x 10 ⁻⁶	2,3

Fonte: Adaptado de Mugi *et al.* (2022); Alami, Asbik e Agalit (2020); Khatod, Katekar, Deshmukh (2022)

Foi realizado um teste de absorção dos materiais fototérmicos com intuito de auxiliar na escolha de dois materiais com melhor eficiência térmica.

A brita, o granito, a telha, o ferro e a esfera de vidro foram colocados em bandejas diferentes com o mesmo volume de água e volume de material, e em seguida expostas a radiação solar no intervalo das 09:00 às 14:00 horas, visto que é nesse período de tempo que ocorre maior incidência da radiação solar. O experimento foi realizado duas vezes, na primeira vez as bandejas e os materiais estavam sem nenhuma modificação. Já na segunda vez as bandejas e os materiais foram pintados com tinta preta, com o intuito de aumentar a absorção de calor dos materiais.

4.3. PARTE B: Perfil dos dessalinizadores

Inicialmente foram realizados teste de desempenho nos três dessalinizadores para identificar o mais produtivo e esse ser utilizado como referência no estudo comparativo, nessa etapa não foram utilizados materiais fototérmicos, apenas os dessalinizadores. A altura da lâmina usada nesse experimento foi de 1,0 cm.

Os dessalinizadores foram alimentados na forma de batelada com água salobra coletada em um poço artesiano localizado no Sítio Furnas, no município de Queimadas – PB, com coordenadas 7°25'03.4"S 35°51'51.7"W.

O sistema foi operado no intervalo das 07:00 às 17:00 horas, posicionado em uma área estratégica para ter um mínimo de sombreamento. De acordo com as dimensões da bandeja o volume de água utilizado foi 1,32 L. Todos dessalinizadores foram operados na mesma hora e nas mesmas condições ambientais.

Após a identificação do protótipo foram colocados na bandeja dos outros dois dessalinizadores os materiais fototérmicos e realizados novos os experimentos.

4.4. PARTE C: Ensaios dos dessalinizadores com o uso do material fototérmico

Os dessalinizadores foram alimentados na forma de batelada com água salobra coletada em um poço artesiano localizado no Sítio Furnas, no município de Queimadas – PB, com coordenadas 7°25'03.4"S 35°51'51.7"W.

O sistema foi operado no intervalo das 07:00 às 17:00 horas, posicionado em uma área estratégica para ter um mínimo de sombreamento. Foram realizados três experimentos com alturas de lâmina de água diferentes, o experimento 1 (EXP 1) com 1 cm de altura de lâmina, o experimento (EXP 2) com 2 cm de altura de lâmina e o experimento 3 (EXP 3) com 3 cm de altura de lâmina, para cada altura de lâmina de água foi repetido o experimento duas vezes, em dias diferentes. De acordo com as dimensões da bandeja o volume de água utilizado foi 1,32 L para 1 cm de altura de lâmina, 2,64 L para 2 cm de altura de lâmina e 3,96 L para 3 cm de altura de lâmina. Todos dessalinizadores foram operados na mesma hora e nas mesmas condições ambientais.

Durante os testes, D1, D2 e D3 foram operados na mesma hora e sob as mesmas condições ambientais. O período de avaliação permitiu a apresentação de dados com estimativa da produção diária de destilado, temperatura da água e temperatura interna e externa do vidro, para posterior avaliação da eficiência das modificações propostas no presente estudo.

A eficiência dos dessalinizadores solar pode ser horária ou diária. A eficiência horária reflete a relação entre o calor latente médio gerado pela água produzida de hora em hora e a

quantidade de energia solar absorvida. Consequentemente, a variação da irradiação solar durante o dia gera uma variação da eficiência horária da energia solar RABHI, et al., 2017). A eficiência horária e diária foi calculada pela Equação 6 e 7, respectivamente (EL-AGOUZ, 2014):

$$\eta_h = \frac{(M_a \times \lambda_a) / 3600}{(A_b \times I)} \quad (6)$$

$$\eta_D = \frac{1}{n} \sum_n \eta_h \quad (7)$$

Onde, M_a é a produção de água horária (kg), A_b é a área da bandeja (m^2), n é quantidade de horas do experimento, I é irradiação solar ($W \cdot m^{-2}$) e λ_a o calor latente da água ($J \cdot kg^{-1}$), que é calculado de acordo com a Equação 8, com referência a temperatura da água ($^{\circ}C$) (ELDESSOUKY e ETTOUNEY, 2002):

$$\lambda_a = (2501,9 - 2,40706T_a + 1,192217 \cdot 10^{-3} \cdot T_a^2 - 1,5863 \cdot 10^{-5} \cdot T_a^3) \cdot 10^3 \quad (8)$$

4.5. Sistema de medição dos parâmetros operacionais

O Sistema Integrado Multianálise com Conectividade Wi-Fi e Função Datalogger para Monitoramento de Estações de Dessalinização Solar e Outros Sistemas de Tratamento de Águas e Efluentes (Figura 3), desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Tratamento Avançados de Águas (GRUTAA) em parceria com a *Stand-up* ALCALITECH – Fabricação de Aparelhos e Equipamentos de Medida e Controle Ltda (RAMOS *et al.*, 2021) foi utilizado para medir os dados meteorológicos (radiação solar e temperatura ambiente), bem como a temperatura em diferentes pontos do sistema de dessalinização, que inclui a temperatura da água, temperatura interna e externa do vidro.

Figura 22 – Sistema Integrado de medição de parâmetros operacionais.



Fonte: Autor, 2022

A radiação solar foi medida na faixa entre (1,0 a 1300,0 W.m⁻²) com precisão de $\pm 1,0$ W.m⁻². As temperaturas em diferentes pontos do sistema foram medidas usando termopares do tipo K com faixa (-50 a 300 °C) e precisão de $\pm 1,0$ °C. Todas as leituras são armazenadas no sistema de aquisição de dados. A água produzida foi medida usando um recipiente de laboratório graduado (0 a 1000 mL) com precisão de $\pm 10,0$ mL. Os erros ocorridos nos instrumentos de medição são mostrados na Tabela 6. Os erros foram calculados para termopares, medidor solar, e vaso coletor. O erro mínimo que ocorreu em qualquer instrumento é igual à razão entre sua contagem mínima e valor mínimo da saída medida.

Tabela 6 – Precisões e erros para os instrumentos de medição

Instrumento	Faixa	Precisão	% Erro
Radiômetro	1 a 1300 W.m ⁻²	± 10 W.m ⁻²	5,0 %
Termopar digital	-50 a 300 °C	$\pm 0,1$ °C	0,25 %
Proveta graduada	0 a 1000 mL	± 10 mL	5,0 %

4.6. Análise físico-químicas das águas

Para verificar o grau de potabilidade da água antes e depois dos experimentos, foram realizadas análises físico-químicas nas amostras de água salobra e dessalinizadas, seguindo as

especificações descritas no *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (BAIRD, EATON e RICE, 2017), conforme mostra o Quadro 1.

Quadro 1 – Metodologia das análises físico-químicas das águas

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

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

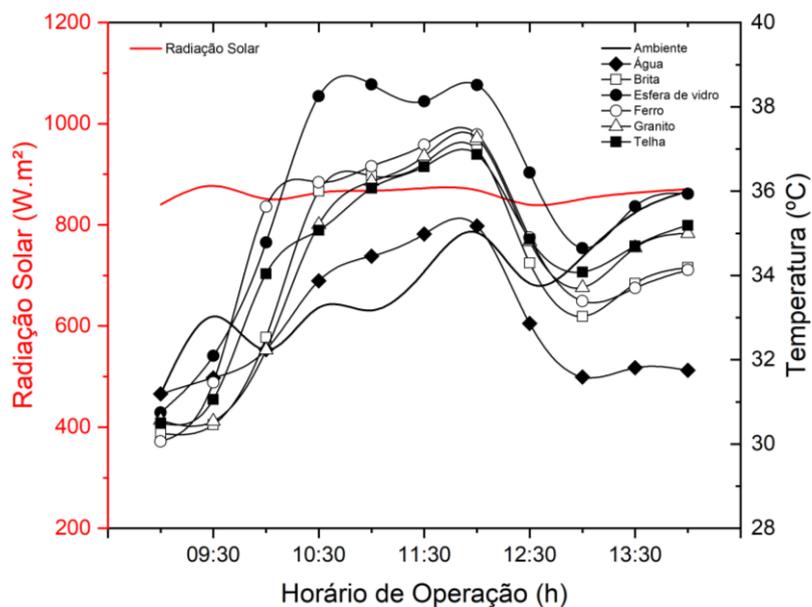
Os resultados obtidos estão divididos em: análise dos materiais fototérmicos, análise do desempenho inicial dos dessalinizadores, perfis de temperatura em função da altura da lâmina de água, produção de água dessalinizada, produção de água dessalinizada em função da radiação solar, eficiência térmica dos dessalinizadores, monitoramento da qualidade da água dessalinizada.

5.1. Parte A: Análise dos materiais fototérmicos

Na Figura 23 pode ser observado a comparação entre a variação horária das temperaturas da brita, esfera de vidro, ferro, granito, telha e radiação solar. Observamos ocorreram variações de temperatura ao longo do experimento. As temperaturas atingem os valores máximos às 12:00 horas para a água (35,2 °C), brita (37,0 °C), esfera de vidro (38,5 °C), ferro (37,3 °C), granito (37,3 °C) e a telha (36,9 °C), ficando constatado que as temperaturas da brita, esfera de vidro, ferro, granito e telha foi maior que a da água, conferindo um aumento de 7 °C, 8,5 °C, 7,3 °C, 7,3 °C e 6,9 °C, respectivamente. Além disso, esses valores foram alcançados após o maior índice de radiação de 877,1 W.m⁻².

De acordo com a Figura 23, todos os materiais aumentaram a temperatura da água, com destaque para a esfera de vidro e o ferro.

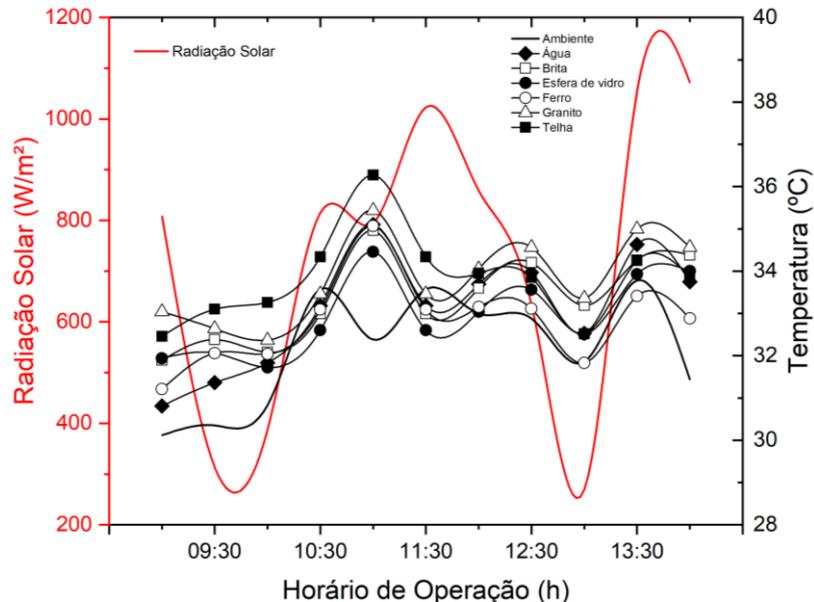
Figura 23 – Perfil de temperatura dos materiais fototérmicos



Na Figura 24 pode ser observado a comparação entre a variação horária das temperaturas dos materiais fototérmicos pintados de preto e radiação solar. As temperaturas atingem seus valores máximos às 11:00 horas para a água (35,1 °C), brita (35,0 °C), esfera de vidro (34,5 °C), ferro (35,1 °C), granito (35,4 °C) e a telha (36,3 °C).

Comparando a Figura 23 e 24 pode ser observado que a tinta preta aumentou as temperaturas de todos os materiais, destacando a telha e o granito. Mahadi (2013) examinou o impacto da tinta preta na produção de água em dessalinizadores solar e concluiu que a produção teve uma melhora de 35% quando a tinta preta foi utilizada; confirmando assim que a utilização da tinta preta implica em um aumento de absorção de energia. Portanto, os materiais fototérmicos escolhidos para o estudo foram o granito e a telha.

Figura 24 – Perfil de temperatura dos materiais fototérmicos pintados de preto



5.2. Parte B: Perfil dos dessalinizadores

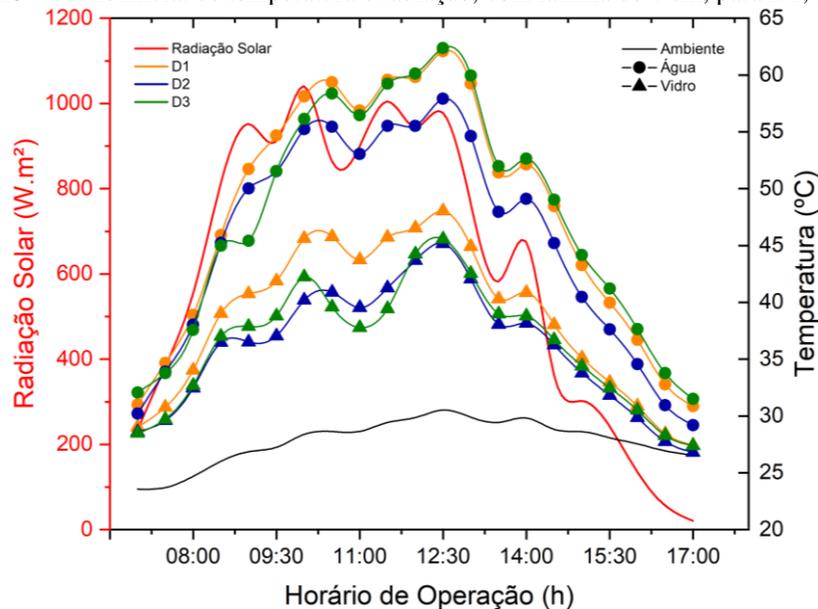
5.2.1. Perfis de temperatura em função da altura da lâmina de água

O comportamento do desempenho do dessalinizador é caracterizado pelas diferentes temperaturas que ocorrem no seu interior. Dessa forma, as variações de temperatura da água, do vidro e do ambiente em função da radiação solar para o D1, D2 e D3, para profundidade da água 1,0 cm foram apresentadas a seguir. Os perfis de temperatura e radiação com altura de lâmina de água de 1,0 cm para D1, D2 e D3 estão apresentados na Figura 25.

Na Figura 25, constata-se que ocorreram variações nas temperaturas ao longo do experimento. A temperatura inicial às 07:00 horas da água é de 31,0°C (D1), 30,2°C (D2), 32,1°C (D3); do vidro é de 29,3°C (D1), 28,6°C (D2) e 28,5°C (D3); e do ambiente 24,0°C. Todas as temperaturas atingiram seu valor máximo às 12:30 horas, alcançando a água, o vidro e o ambiente as respectivas temperaturas 62,1°C (D1), 58,0°C (D2), 62,4°C (D3); 48,1°C (D1), 45,2°C (D2) e 45,6°C (D3) e 30,5 °C. Esses valores foram alcançados uma hora após do momento de maior incidência de radiação solar, compreendido entre o horário entre 10:00 (1039,9 W.m⁻²) e 11:30 (1004,2 W.m⁻²). Cardoso *et al.* (2022) obteve resultado próximo ao obtido, com uma radiação de 1201 W.m⁻². Os mesmos observaram que os índices de radiação foram atribuídos às oscilações climáticas, onde aumentou até as 12 horas e diminuiu ao longo do tempo.

Na Figura 25 observamos que as temperaturas da água e do vidro de D1, D2 e D3 são próximas, e as temperaturas da água são maiores que as temperaturas do vidro.

Figura 25 – Perfis inicial de temperatura e radiação, com lâmina de 1 cm, para D1, D2 e D3



5.2.2. Produção de água dessalinizada

A produção de água dessalinizada com lâminas de 1,0 cm para D1, D2 e D3 estão nas Figuras, 26, 27 e 28, respectivamente, as Figuras mostram que o volume de água dessalinizada acompanha a variação de temperatura da água.

Na Figura 26, referente ao D1, a maior produção horária de água foi de $250,0 \text{ mL.m}^{-2}$, às 11:00 horas. Observa-se também a produção acumulada de água nesse dia chegou à $2.121,0 \text{ mL.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. Na Figura 27, no D2, a maior produção horária atingiu 303 mL.m^{-2} , às 11:00 horas e a produção acumulada de água diária foi de $2.424,0 \text{ mL.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. Na Figura 28, o D3, apresentou a maior produção horária às 13:30 horas, com o valor de $341,0 \text{ mL.m}^{-2}$, e a produção acumulada diária foi de $2.992,0 \text{ mL.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. Comparando as Figuras 26 a 28, pode-se constatar que o dessalinizador que teve a maior produção acumulada do dia, para uma altura de lâmina de 1,0 cm, foi o D3.

Figura 26– Produção de água dessalinizada inicial, com lâmina de 1 cm, para D1.

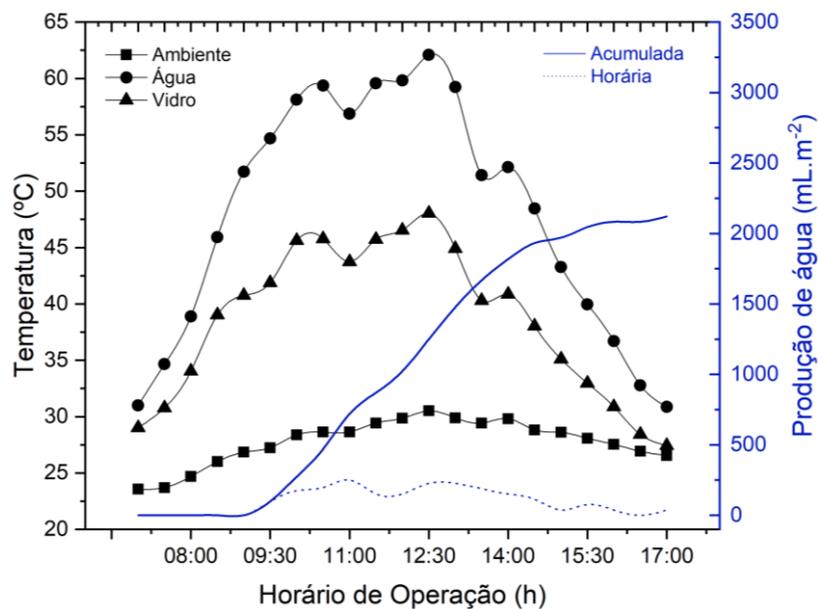


Figura 27– Produção de água dessalinizada inicial, com lâmina de 1 cm, para D2

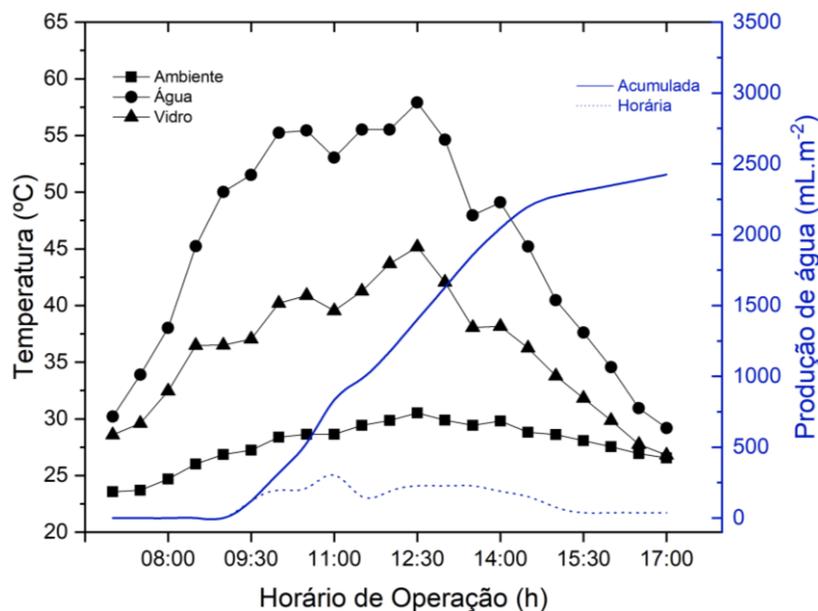
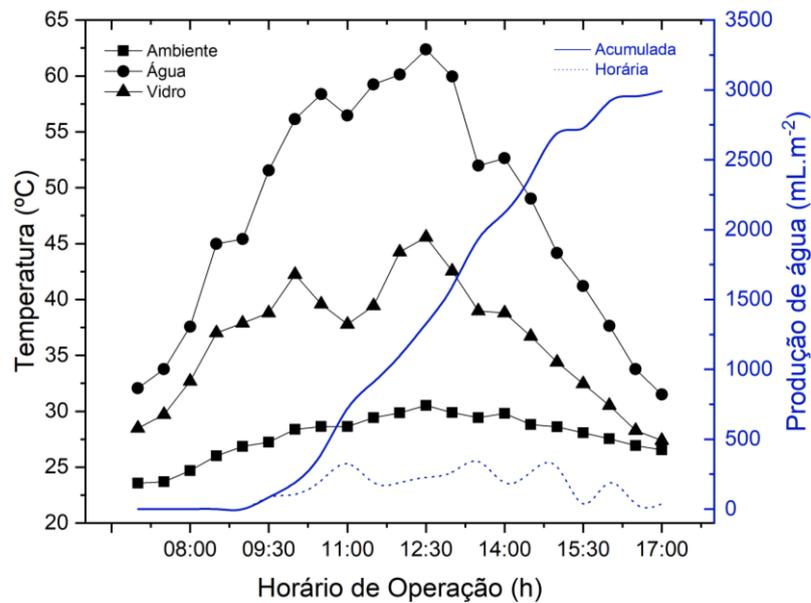


Figura 28 – Produção de água dessalinizada inicial, com lâmina de 1 cm, para D3

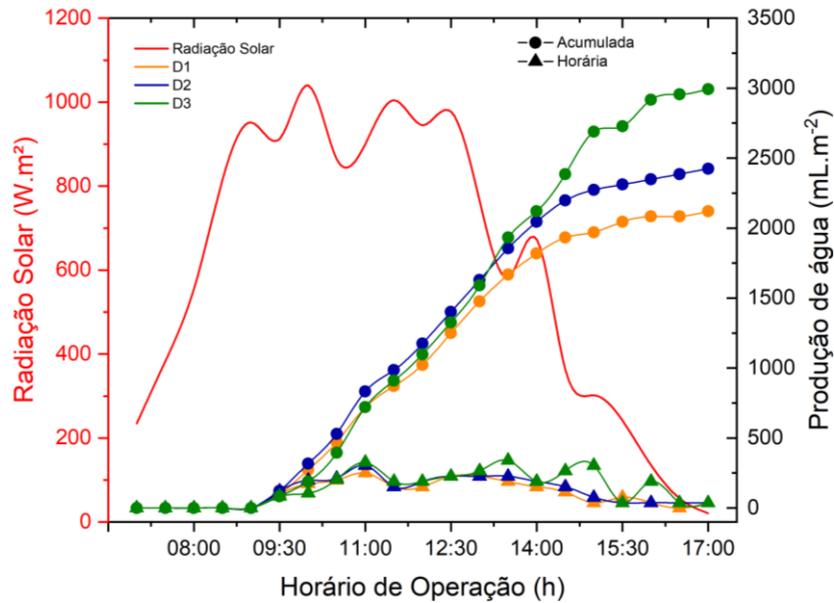


5.2.3. Produção de água dessalinizada em função da radiação solar

Na Figura 29 é apresentada a produção de água em função da hora e da radiação solar para D1, D2 e D3, para a altura de lâmina de água 1,0 cm.

Por meio da Figura 29, percebe-se que o dessalinizador que teve a maior produção de água foi o D3, comparado à D1 e D2, visto que o D3 teve uma produção de água 29% maior com relação ao D1 e 18% maior comparado ao D2. Observa-se que a produção de destilado nos três dessalinizadores começa às 09:00 horas. Portanto, os dessalinizadores escolhidos para colocar os materiais fototérmicos foram o D1 e o D2, de acordo com o tópico 5.2.1 os materiais fototérmicos escolhidos foram o granito e a telha. Desse modo, foi colocado no D1 o granito e no D2 a telha.

Figura 29 – Produção inicial de água dessalinizada e radiação para D1, D2 e D3, com lâmina de 1 cm



5.3. Parte C: Ensaios dos dessalinizadores com o uso do material fototérmico

5.3.1. Perfis de temperatura em função da altura da lâmina de água

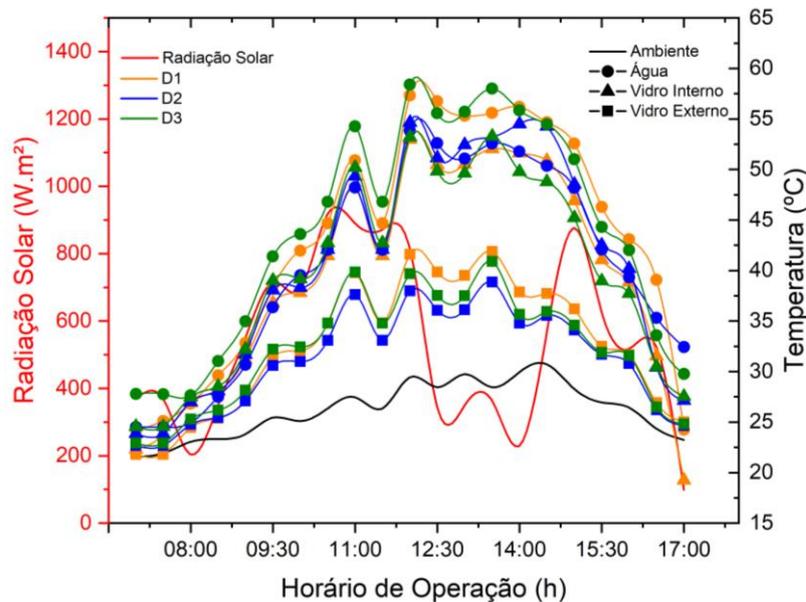
O comportamento do desempenho do dessalinizador é influenciado pelas diferentes temperaturas em seu interior. De forma que, a diferença de temperatura entre a lâmina de água e a cobertura de vidro são primordiais para o aumento da eficiência do dessalinizador.

Na Figura 30 pode ser observado uma variação horária entre a temperatura da água, vidro interno, vidro externo, ambiente e a radiação solar utilizada, ao longo do experimento, com uma altura da lâmina de água 1,0 cm, para D1, D2 e D3. De forma que todas as temperaturas alcançam seus valores máximos às 12:00 horas, uma hora e trinta minutos após o maior valor de radiação solar ($919,0 \text{ W.m}^{-2}$), para a água $57,3 \text{ °C}$ (D1), $53,8 \text{ °C}$ (D2) e $58,4 \text{ °C}$ (D3). Pode ser observado que as temperaturas variam conforme com a radiação solar. As variações da radiação foram atribuídas as oscilações climáticas, enfatizando o período das 12:30 às 14:00 horas, onde normalmente obtemos valores mais altos de radiação, nesse experimento apresentou seus menores valores. Esses resultados também foram encontrados por Cardoso *et al.* (2022).

O índice de irradiação solar é mais baixo na Fig. 30 comparado ao da Fig. 25, entretanto, as temperaturas das águas salobras se assemelham. Constatando assim, que o uso dos materiais fototérmicos no dessalinizador resulta no aumento da temperatura. Percebe-se também que durante o período das 15:30 às 17:00 horas os resultados das temperaturas da

água em D1 e D2 confirmam um maior armazenamento de calor dentro da bandeja, levando a uma diminuição de temperatura menor do que no em D3.

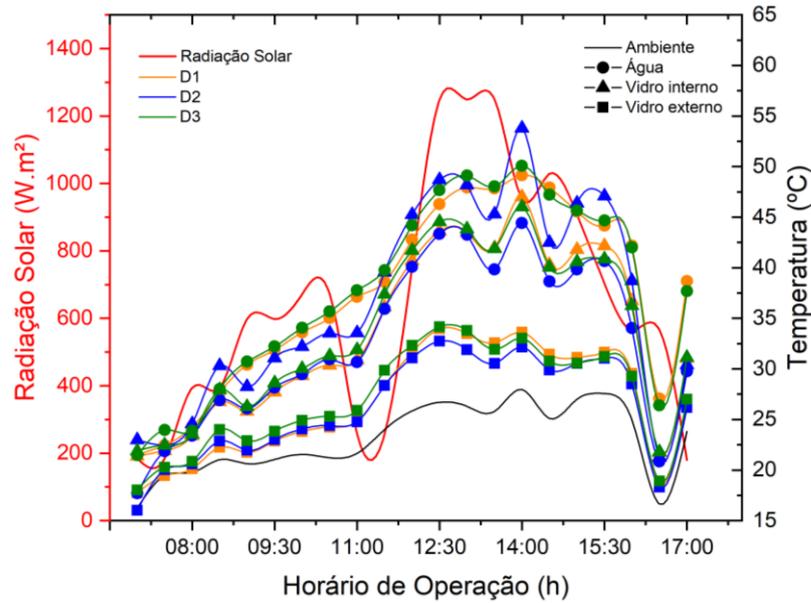
Figura 30 - Perfis de temperatura e radiação, com lâmina de 1 cm, para D1, D2 e D3, com uso dos materiais fototérmicos



As variações horárias da radiação solar, temperatura ambiente, da água, vidro interno e vidro externo, para uma altura de lâmina de água de 2,0 cm, para D1, D2, e D3, são exibidas na Figura 31. Durante o experimento observa-se que a temperatura do vidro interno sofre variações, inicia às 07:00 com temperatura de 21,3 °C (D1), 23,0 °C (D2), 22,0 °C (D3), atingindo seu valor máximo uma hora após o valor diário máximo da radiação solar (1.249,0 W.m⁻²). Na Figura 31 nota-se que D1 e D2 apresentaram a temperatura interna do vidro mais alta do que D3, tendo uma diferença de 8,0 °C (D2) e 1°C (D1) às 14:00 horas.

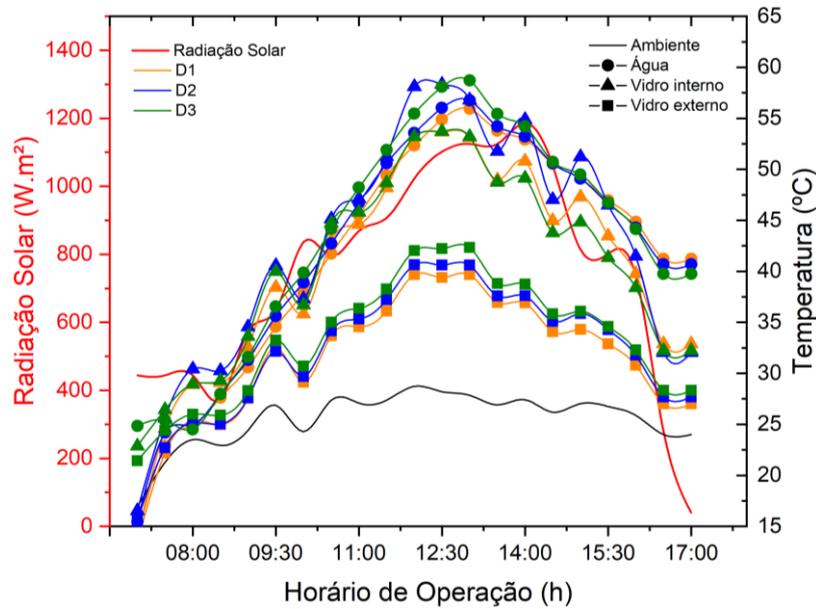
O aumento das temperaturas internas do vidro é atribuído ao aumento das taxas de transferências de calor a partir do uso dos materiais fototérmicos. Hammad *et al.* (2022) obteve resultados próximos em seu estudo, obtendo um aumento na temperatura interna do vidro entre 0 – 5 °C com uso de materiais fototérmicos em dessalinizador solar. Selvaraj e Natarajan (2018) afirmam que diferença entre a temperatura da água e a cobertura do vidro é um fator importante que afeta a produtividade do dessalinizador, de modo que, o aumento da diferença de temperatura entre essas superfícies resulta em uma maior produtividade.

Figura 31 – Perfis de temperatura e radiação, com lâmina de 2 cm, para D1, D2 e D3, com uso dos materiais fototérmicos



Os perfis de temperatura da água, vidro interno, vidro externo e radiação solar, para altura de lâmina de água 3,0 cm para D1, D2 e D3 podem ser visualizados na Figura 32. É evidente que a tendência da radiação solar e das temperaturas é a mesma, de forma que aumentam progressivamente até atingirem os valores mais altos por volta do 13:00 horas; reduzindo moderadamente até as 17:00 horas. Os resultados que indicaram os valores máximos da temperatura da água, vidro interno e vidro externo são, respectivamente, 55,9 °C, 53,1 °C, 39,7 °C para D1, 56,8 °C, 56,8 °C, 40,6 °C para D2, 58,7 °C, 53,2 °C, 42,3 °C para D3 e para radiação solar foi 1.125,0 W.m⁻². De acordo com a Figura 32 observamos que as temperaturas do vidro externo são próximas às temperaturas do vidro interno, entretanto, as temperaturas do vidro externo são menores que as do vidro interno.

Figura 32 – Perfis de temperatura e radiação, com lâmina de 3 cm, para D1, D2 e D3, com uso dos materiais fototérmicos



5.3.2. Produção de água dessalinizada com uso de materiais fototérmicos

Diversos fatores podem influenciar na produção de água dessalinizada. Os parâmetros de projeto como, ângulo do vidro de condensação, profundidade da lâmina de água, área superficial da bandeja, isolamento, podem ser modificados com o objetivo de aumentar a produtividade dos dessalinizadores. Entretanto, parâmetros meteorológicos a exemplo da intensidade da radiação solar, velocidade do vento, temperatura ambiente, não podem ser controlados.

A Figura 33 ilustra a produção de água dessalinizada de acordo com a variação horária da temperatura da água, vidro interno, vidro externo e ambiente, para uma altura de lâmina de 1,0 cm para o D1. A maior produção horária de água dessalinizada foi de 250,0 mL.m⁻², às 13:30 horas, após o momento que a intensidade da radiação solar aumenta consideravelmente. A produção de água acumulada foi de 1.893,9 mL.m⁻².dia⁻¹, ao final do experimento. Na Figura 34, referente ao D2, observa-se que a produção de destilado acompanha a variação da temperatura da água, sendo evidenciado às 12:00 horas em que a temperatura chegou à 57,3 °C, e quantidade de água dessalinizada na medição seguinte também apresentou a maior produção, no valor de 340,9 mL.m⁻². O D2 apresenta como produção diária de água dessalinizada de 2.500,0 mL.m⁻².dia⁻¹. A Figura 35, apresenta os resultados do D3, a maior produção horária atingiu 333,3 mL.m⁻² às 12:30 horas e uma produção acumulada diária de

2.234,8 mL.m⁻².dia⁻¹; apesar o D3 apresentar a maior produção horária, o D2 apresentou a maior produção diária acumulada ao final do experimento. Esses resultados corroboram com Attia *et al.* (2022) que estudou o efeito do uso de brita no dessalinizador solar e alcançou uma produção máxima diária de 4.900,0 mL.m⁻².dia⁻¹.

Figura 33 – Produção de água dessalinizada, com lâmina de 1 cm, para D1, com uso dos materiais fototérmicos

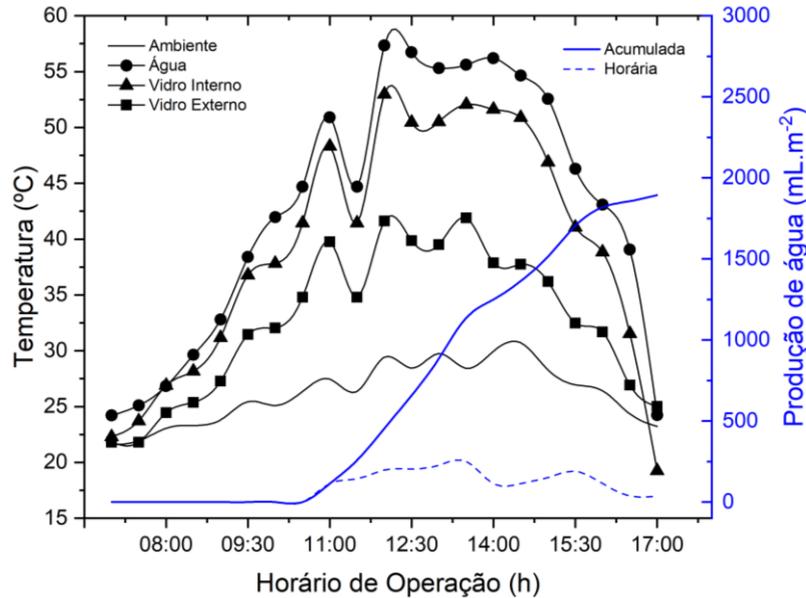


Figura 34 – Produção de água dessalinizada, com lâmina de 1 cm, para D2, com uso dos materiais fototérmicos

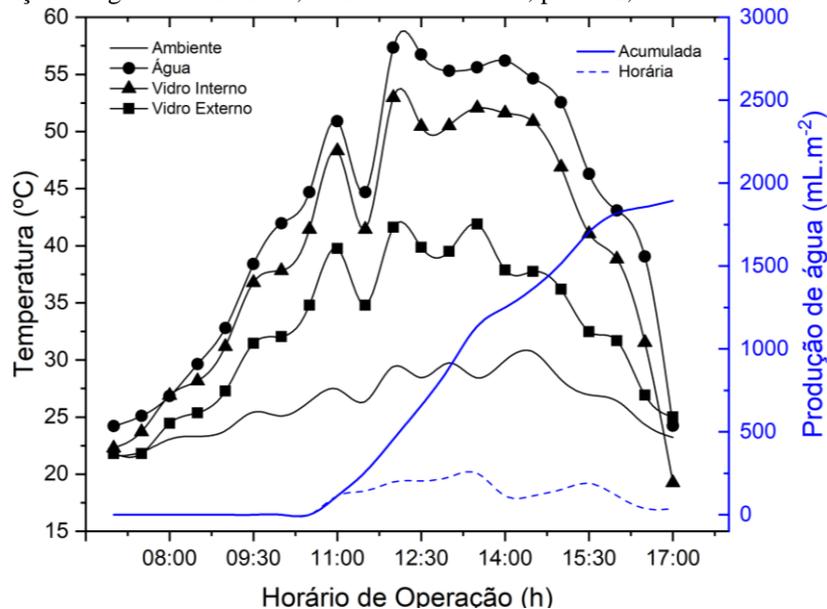
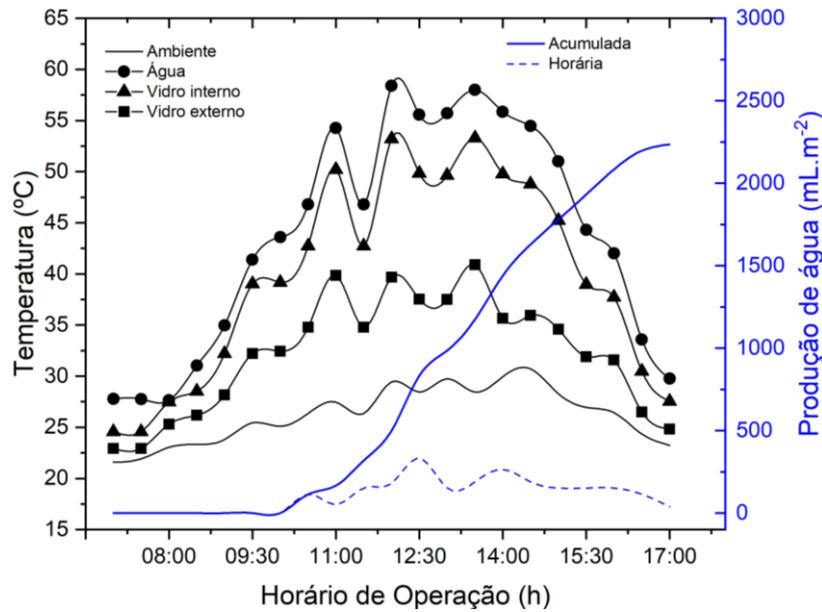


Figura 35 – Produção de água dessalinizada, com lâmina de 1 cm, para D3, com uso dos materiais fototérmicos



Nas figuras 36, 37 e 38 estão apresentados os perfis de temperatura da água, do vidro interno, vidro externo, ambiente, com a produção instantânea e a produção acumulada da água para lâmina de 2,0 cm, para D1, D2, e D3, respectivamente. Na Figura 36 a maior produção horária de destilado foi de $151,5 \text{ mL.m}^{-2}$, às 12:30, e a produção acumulada diária atingiu $1.288,0 \text{ mL.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. Na Figura 37 a maior produção horária de água dessalinizada, também foi às 12:30, chegando à $303,0 \text{ mL.m}^{-2}$ e sua produção acumulada de água dessalinizada atingiu $1.667 \text{ mL.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. Para o D3 (Figura 38) a produção instantânea ocorreu às 13:00 horas, com o valor de $189,4 \text{ mL.m}^{-2}$; de forma que os dessalinizadores com os materiais fototérmicos alcançaram sua produção horária de água dessalinizada mais rápido que o D3. A produção acumulada diária alcançou o valor de $1.477,0 \text{ mL.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$.

Figura 36 – Produção de água dessalinizada, com lâmina de 2 cm, para D1, com uso dos materiais fototérmicos

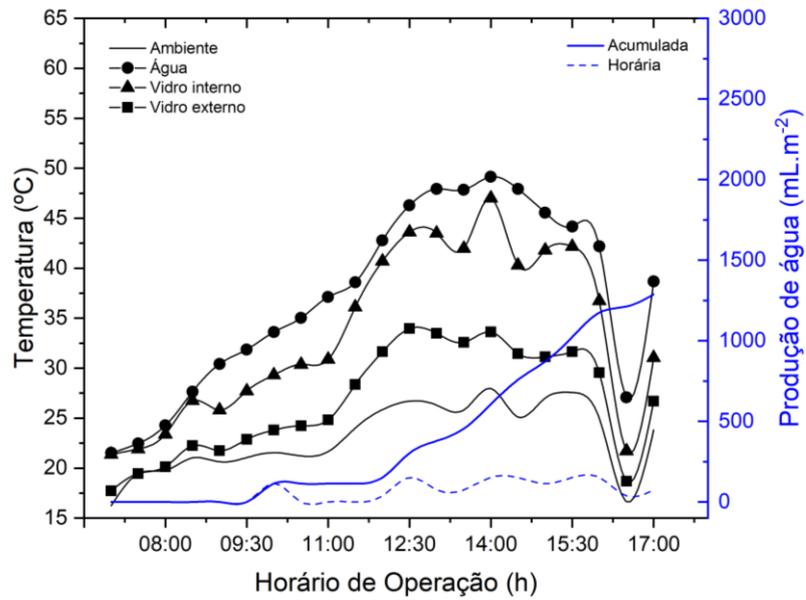


Figura 37 – Produção de água dessalinizada, com lâmina de 2 cm, para D2, com uso dos materiais fototérmicos

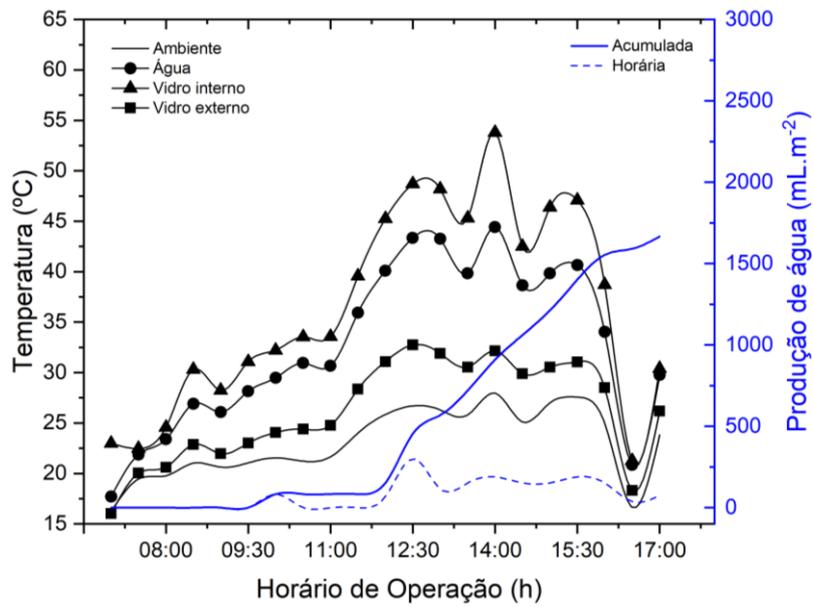
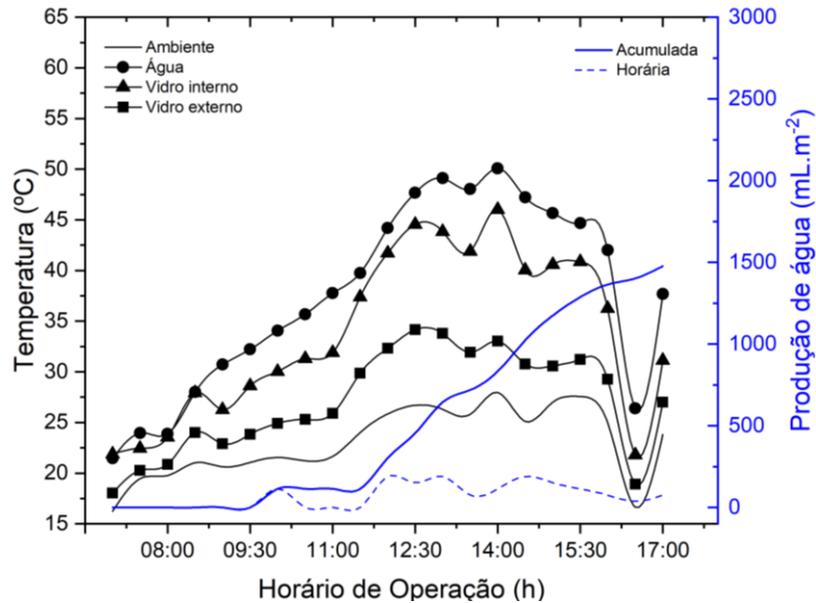


Figura 38 – Produção de água dessalinizada, com lâmina de 2 cm, para D3, com uso dos materiais fototérmicos



As Figuras 39, 40 e 41 representam, para a lâmina de 3,0 cm, os perfis de temperatura da água, vidro interno, vidro externo e a produção da água para D1, D2 e D3, respectivamente. Na Figura 39 pode-se observar que a produção horária de destilado atingiu seu máximo às 14:00, no valor de 227,0 mL.m⁻², e sua produção acumulada diária 1.742 mL.m⁻².dia⁻¹. A partir da Figura 40 constata-se que a maior produção instantânea foi de 303,0 mL.m⁻², uma hora após da maior incidência da radiação solar do dia, e a produção de água acumulada foi de 2.273,0 mL.m⁻².dia⁻¹. Na Figura 41 observa-se que produção de água dessalinizada acompanha os perfis de temperatura do dessalinizador no dia. Obtendo como valores máximos para a produção horária 303,0 mL.m⁻² e para a produção acumulada diária 1.818,0 mL.m⁻².dia⁻¹. Gnanaraj e Velmurugan (2019) alcançaram uma produção acumulada diária de 1.880 mL.m⁻².dia⁻¹.

Figura 39 – Produção de água dessalinizada, com lâmina de 3 cm, para D1, com uso dos materiais fototérmicos

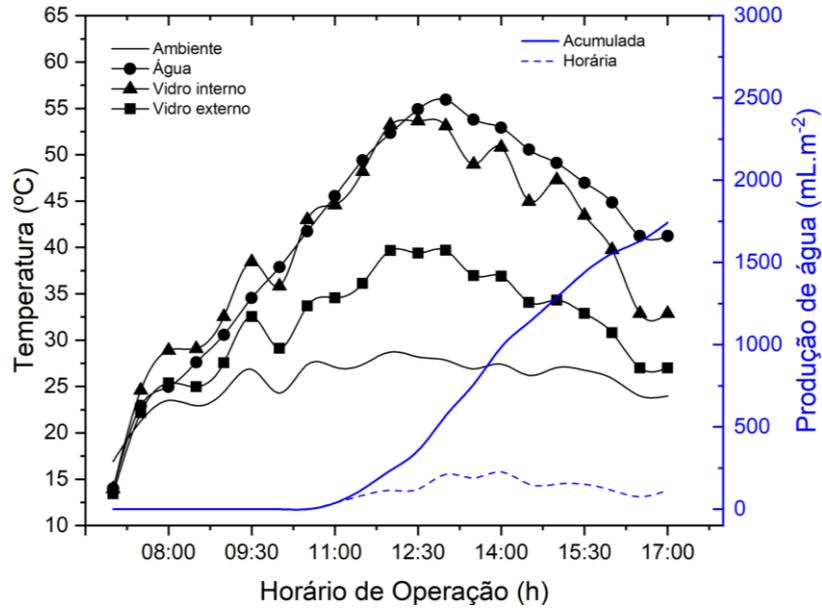


Figura 40 – Produção de água dessalinizada, com lâmina de 3 cm, para D2, com uso dos materiais fototérmicos

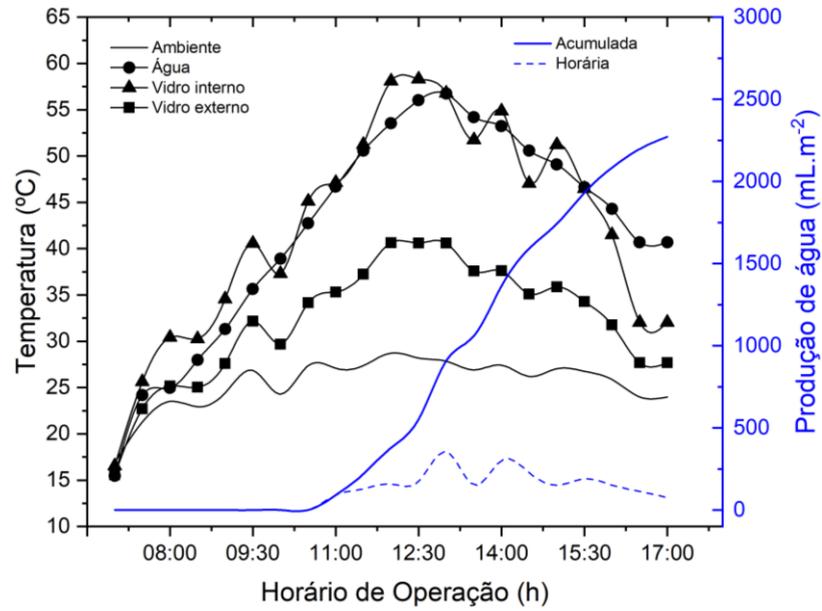
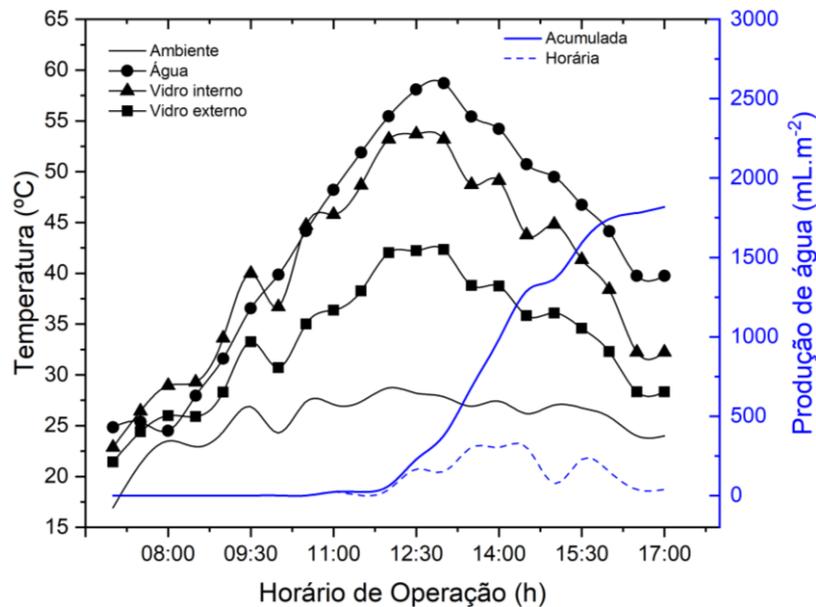


Figura 41 – Produção de água dessalinizada, com lâmina de 3 cm, para D3, com uso dos materiais fototérmicos



5.3.3. Produção de água dessalinizada em função da radiação solar

As Figuras 42, 43 e 44 ilustram a produção da água em função da hora e da radiação solar nos dessalinizadores D1, D2 e D3, para a altura da lâmina de água 1,0 cm, 2,0 cm e 3,0 cm, respectivamente, com o uso dos materiais fototérmicos. A partir das Figura 42 a 44 percebe-se que a produção de água no D2 foi melhor se comparado a D1 e D3, tanto para altura de lâmina de água de 1,0 cm, como para a altura de 2,0 cm e 3,0 cm. A melhor produtividade, em D2, deu pelo fato da utilização de material fototérmico na bandeja do dessalinizador, conferindo a telha uma melhor capacidade de armazenamento e liberação de calor do que o granito. Desse modo, observa-se também que o uso da tinta preta melhorou as propriedades termofísicas da telha, visto que, de acordo com a Tabela 5, o granito possui características termofísicas melhores que a telha. Ravichanran *et al.* (2017) estudaram o granito como material de armazenamento de calor em um dessalinizador solar e concluiu que seu uso infere em um aumento de 29% na produção do dessalinizador solar.

O baixo índice de radiação solar apresentado pela Figura 42, foi devido a influência direta das condições climáticas, pois o experimento foi realizado em um dia parcialmente nublado.

Na Figura 44, observa-se também que a produção de água no experimento com altura de lâmina de 3,0 cm começa mais tarde, comparado as lâminas de 1,0 cm (Figura 42) e 2,0 cm

(Figura 43). Isto porque o aumento da temperatura da água é mais lento, na lâmina com a maior altura no estudo, e como a produção de água está ligada diretamente com a temperatura da água, conseqüentemente o processo de dessalinização é inicialmente mais lento comparado as demais lâminas estudadas. Panchal e Patel (2017), afirmam que o coeficiente de transferência de calor por convecção entre a cobertura de vidro interna e a água depende significativamente da profundidade da água na bacia.

Nas Figuras 42 a 44, diferentes índices de radiação solar foram apresentados devido a diferença entre as condições climáticas de cada experimento, ocasionando variações de temperatura da água, vidro interno, vidro externo, afetando assim, a produtividade dos dessalinizadores.

Figura 42 – Produção de água dessalinizada e radiação para D1, D2 e D3, com lâmina de 1 cm, com uso dos materiais fototérmicos

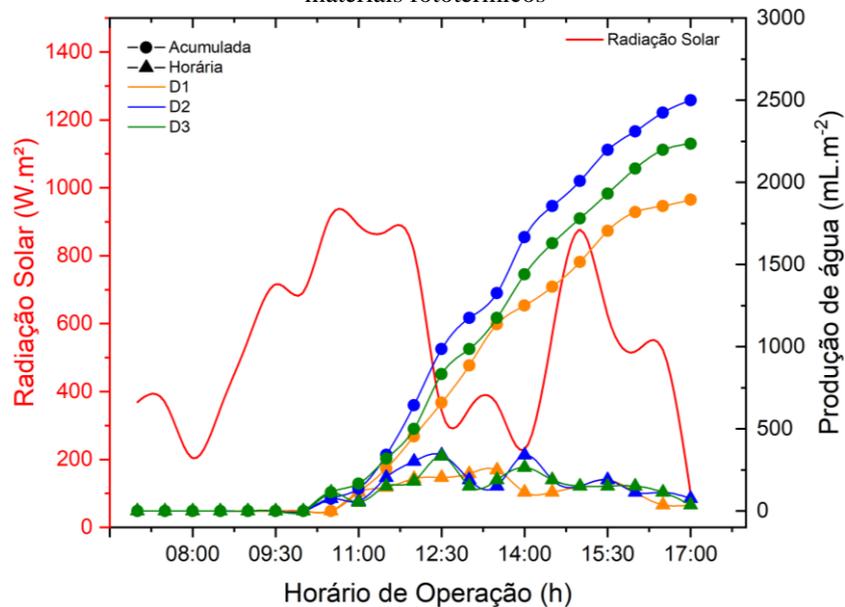


Figura 43 – Produção de água dessalinizada e radiação para D1, D2 e D3, com lâmina de 2 cm, com uso dos materiais fototérmicos

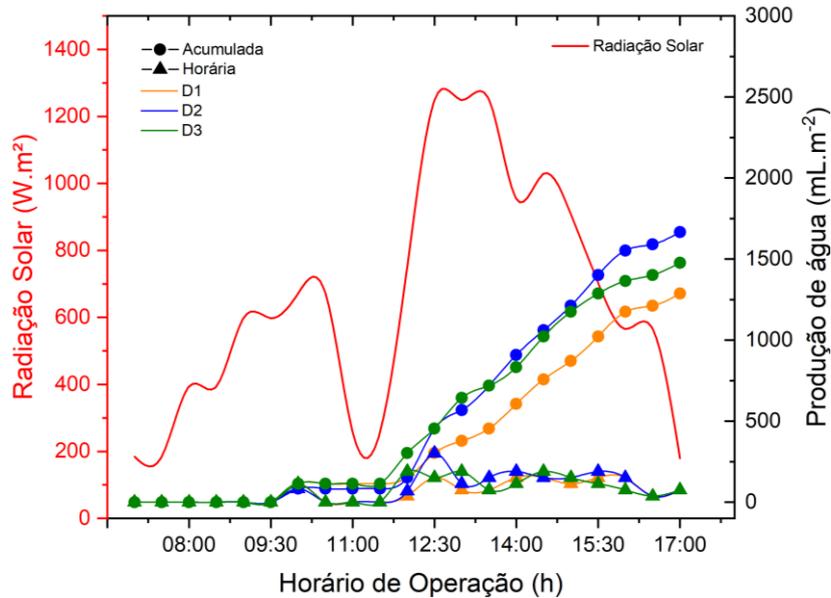
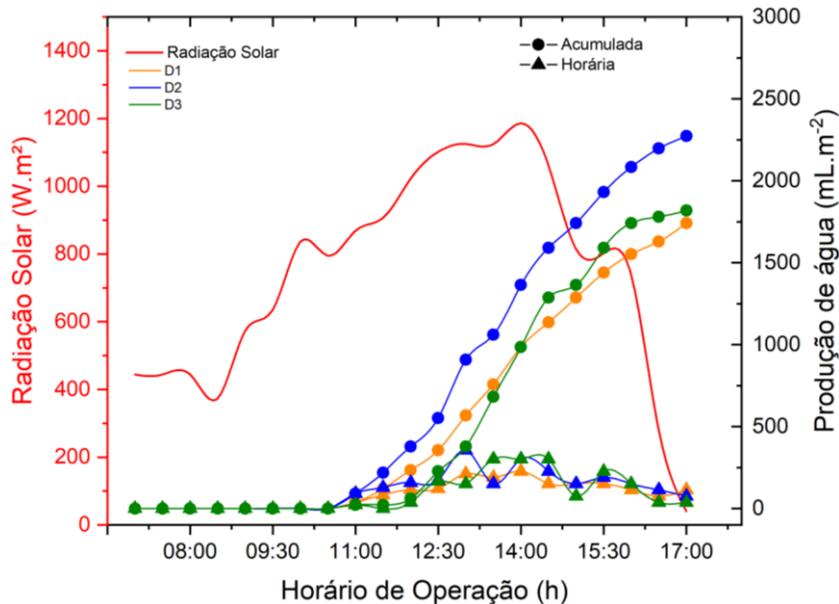


Figura 44 – Produção de água dessalinizada e radiação para D1, D2 e D3, com lâmina de 3 cm, com uso dos materiais fototérmicos



Sabendo que a produção de água inicial no D3 era maior 29% e 18% para D1 e D2, respectivamente (Figura 29), observamos que após adicionarmos os materiais fototérmicos essa diferença de produtividade diminuiu. Comparando D3 e D1, constatamos que para a espessura de água de 1 cm, a diferença de produtividade reduziu 14%, ou seja, D3 produziu 15% a mais que D1. Para 2 cm, a diferença de produção reduziu 16%, D3 produziu 13% a mais que D1. E para 3 cm, reduziu 25%, de modo que a produção de D3 foi apenas 4% maior que a produção de D1. Agora comparando D3 e D1, para todas as espessuras o D1 teve uma

produção de água maior que D3, de forma que para 1 cm a produção de D1 foi 11% maior que D3, para 2 cm foi 13% maior que D3, e para 3 cm foi maior 25%.

5.3.4. *Eficiência térmica do dessalinizador*

Nas Figuras 45, 46 e 47, temos a variação da eficiência horária de D1, D2 e D3, em relação ao horário de operação e radiação solar para altura da lâmina de água 1,0 cm, 2,0 cm, e 3,0 cm, respectivamente, calculada segundo a seção 4.2.

A partir das Figura 45 e 47, observa-se que as eficiências horárias ultrapassam 100%, isso acontece porque a água não é coletada diretamente na proveta, conseqüentemente fica há um acúmulo na mangueira que interliga a calha de coleta e a proveta.

De acordo com as Figuras 45, 46 e 47 constata-se que as eficiências horárias obtidas acompanham o índice de radiação solar, desse modo a eficiência dos dessalinizadores é diretamente proporcional à radiação. Entretanto, nota-se que a partir das 14:30 horas, para D1, D2 e D3, com a diminuição da intensidade solar ocorreu um aumento inesperado nas eficiências, isso aconteceu provavelmente devido a capacidade térmica da água, que devido à essa propriedade continuou o processo de dessalinização solar. Tabrizi, Dashtban e Moghaddam (2010), concluíram que a capacidade térmica da água fez com que o processo de dessalinização solar continuasse, de forma que, a eficiência continuou aumentando, mesmo com a diminuição da radiação solar.

Observa-se também que o D2 teve a maior eficiência diária para a altura de lâmina de água 1,0 cm (Figura 45) e 2,0 cm (Figura 46), chegando à valores máximos de eficiência horária de 98% e 29%, respectivamente. Enquanto que D1 obteve 45% e 28%, e D3 76% e 28%. E para altura de lâmina de 3,0 cm (Figura 47) o dessalinizador que obteve a maior eficiência diária foi o D1 com 190%, já o D2 atingiu 127% e o D3 alcançou 64%. De forma que o uso de materiais de armazenamento de calor, granito e telha, obtiveram um aumento na eficiência de 126% e 63% nos dessalinizadores, respectivamente.

Figura 45 – Variação da eficiência horária, com lâmina de 1 cm, para D1, D2 e D3, com uso dos materiais fototérmicos

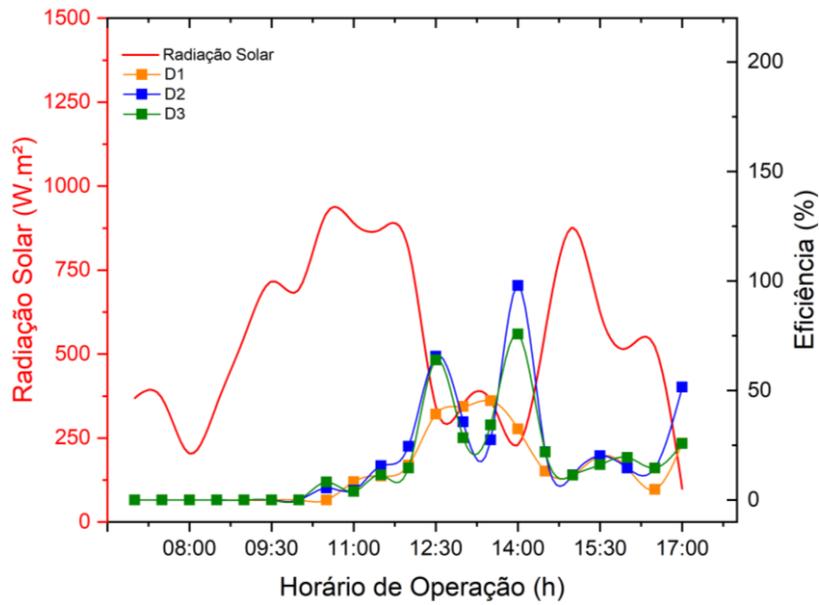


Figura 46 – Variação da eficiência horária, com lâmina de 2 cm, para D1, D2 e D3, com uso dos materiais fototérmicos

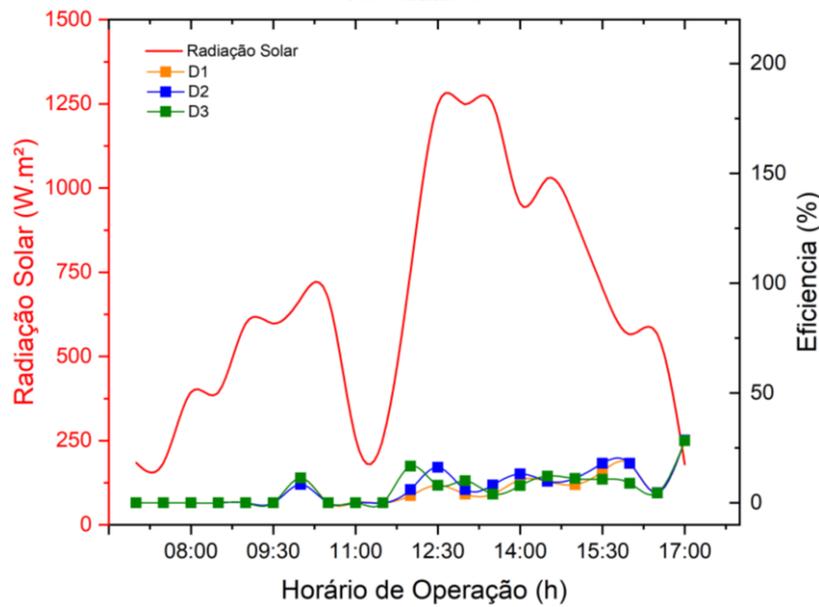
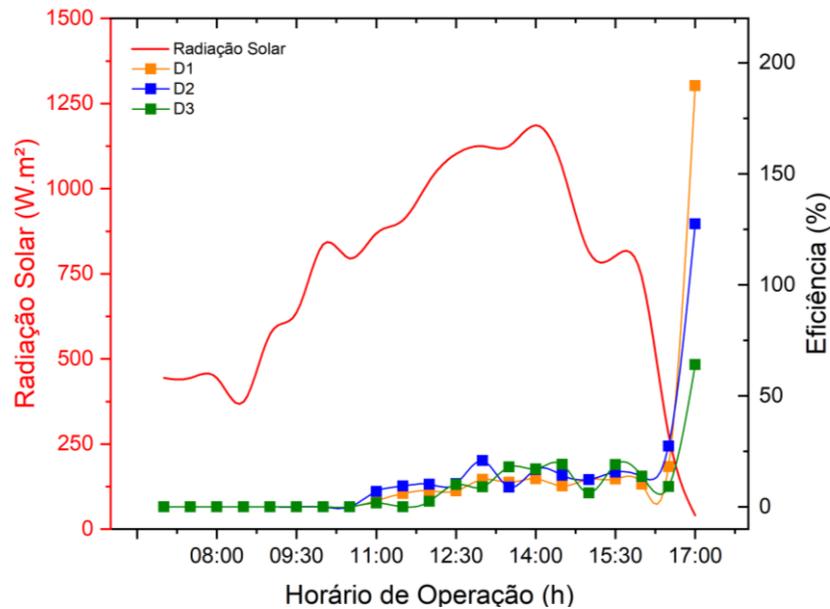


Figura 47 – Variação da eficiência horária inicial, com lâmina de 3 cm, para D1, D2 e D3, com uso dos materiais fototérmicos



5.3.5. Monitoramento da qualidade da água dessalinizada

Foram realizadas análises físico-químicas de alguns parâmetros de potabilidade das amostras, a fim de conhecer a capacidade do dessalinizador solar. Os resultados obtidos foram apresentados na Tabela 1. De acordo com os parâmetros físico-químicos, constatou-se que a dessalinização da água salobra pelo processo de dessalinização solar foi eficaz, visto que, a condutividade elétrica, cloretos, dureza, sólidos dissolvidos totais, turbidez, sódio não ultrapassaram os padrões de potabilidade, segundo a Portaria GM/MS nº 888, 4 de maio de 2021. Na Tabela 7 estão expostos a média dos parâmetros físico-químicos da água bruta e dessalinizada.

Tabela 7 – Parâmetros físico-químicos da água bruta e dessalinizada

PARÂMETRO	A.B*	A.D.1*	A.D.2*	A.D.3*	V.M.P**
pH	8,1	5,9	6,0	5,8	-
Condutividade elétrica ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	6.809,7	89,7	86,4	107,2	-
Cloretos ($\text{mg.Cl}^{-1}.\text{L}^{-1}$)	7.036,0	70,7	69,9	69,8	250,0
Dureza ($\text{mg CaCO}_3.\text{L}^{-1}$)	446,4	50,5	38,3	32,2	300,0
Alcalinidade ($\text{mg CaCO}_3.\text{L}^{-1}$)	432,9	33,9	31,6	17,2	-
Sólidos dissolvidos Totais (mg.L^{-1})	3.439,0	46,7	44,9	54,6	500,0
Turbidez (uT)	2,6	0,5	0,4	0,4	5,0
Sódio ($\text{mg Na}^{+}.\text{L}^{-1}$)	200	6,8	8,2	7,6	200,0
Cor (uH)	8,4	12,4	13,1	13,3	15,0

*A.B. = Água Bruta do Sítio Furnas; A.D.1 = Água Dessalinizada D1; A.D.2 = Água Dessalinizada D2; A.D.3 = Água Dessalinizada D3;

**V.M.P. = Valor Máximo Permitido segundo a Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021

O pH da amostra em sua forma bruta era de 8,1 e, após serem realizadas as análises das amostras dessalinizadas foi observado que o pH reduziu, para 5,9 (D1), 6,0 (D2) e 5,8 (D3). O pH representa a concentração dos íons hidrogênio, dando uma indicação sobre a condição de acidez, neutralidade e alcalinidade da água. Condições semelhantes foi encontrada no estudo de Mattos *et al.* (2017), onde analisaram as águas subterrâneas do município de Lençóis – BA, e encontraram valores de pH na faixa de 4,2 – 5,2, considerado um perfil de neutro a ácido.

A condutividade elétrica está relacionada com a capacidade da água em conduzir corrente elétrica, em consequência da quantidade de sais dissolvidos nela. Foi possível observar redução de 99%, em D1 e D2 e 98% em D3 na condutividade elétrica nas águas após o processo de dessalinização. Outro parâmetro importante que teve uma redução expressiva foi o sódio, pois o experimento foi executado com uma água com um teor de salinidade de $200 \text{ mg Na}^{+}.\text{L}^{-1}$, e após o processo o teor de sódio foi reduzido em 97%, 96% e 96%, em D1, D2 e D3, respectivamente. Cardoso *et al.* (2020) obteve uma redução significativa de 99,48% e 99,76% para a condutividade elétrica, e de 100% para o sódio, em poços localizados em Caturité – PB e Juazeirinho – PB.

Todas as águas naturais, em maior ou menor escala, contêm íons cloretos resultantes da dissolução de minerais ou de sais (BAUMGARTEN; POZZA, 2021). De acordo com a Tabela 1, a água bruta tem uma elevada concentração de íons cloretos, apresentando teores de

Cl⁻ acima do limite máximo permissível pela legislação, que é de 250 mg.L⁻¹, a redução desse parâmetro foi significativa, atingindo uma redução de 97% no D1, 97% no D2 e 98% no D3.

Nas análises de Dureza, onde a legislação vigente exige o valor máximo permitido de 500 mg CaCO₃.L⁻¹, os valores alcançados após a dessalinização também se enquadram dentro dos valores máximos da Portaria, esse parâmetro, muitas vezes, é um reflexo do intemperismo das rochas e dos solos, pela dissolução lenta do calcário e de outros minerais, além de poder causar sabor desagradável na água (BRASIL, 2008). Esse resultado corrobora com os estudos relatados por Brito *et al.* (2020).

A alcalinidade mede a capacidade da água em neutralizar os ácidos. Pode-se observar que após o processo de dessalinização houve uma redução acima de 90% em todos os dessalinizadores, destacando o D3 com 96%. No parâmetro turbidez as amostras mesmo antes de serem dessalinizadas já apresentavam valores permitidos de acordo com a legislação, ou seja, menos que 5 uT. Conforme Corcóvia e Celligoi (2012), as águas subterrâneas comumente não apresentam problemas referentes à alta turbidez.

O valor de sólidos dissolvidos totais (STD) na água bruta é quase 7 vezes maior que o valor máximo exigido pela legislação de potabilidade da água brasileira, que delimita um valor de 500 mg.L⁻¹. A concentração em excesso de STD pode oferecer riscos, além de tornar a água desagradável ao paladar, o seu consumo pode causar o acúmulo de sais na corrente sanguínea (SANTOS; MOHR, 2013). As amostras de águas dessalinizadas tiveram uma redução acima de 98% em todas as amostras, desse modo, o parâmetro atendeu as exigências da Portaria. Silva *et al.* (2020) obteve uma redução de 99,73% de STD, em estudo similar, na cidade de Juazeirinho – PB.

A cor da água é devido à presença de sólidos dissolvidos. Sua origem pode ser pela decomposição da matéria orgânica (principalmente vegetais, ácidos húmicos e fúlvicos) e pela presença de ferro e manganês. Além disso, a cloração da água que contém a matéria orgânica dissolvida responsável pela cor, pode gerar produtos potencialmente cancerígenos. Sua origem industrial pode ou não apresentar toxicidade (FILHO *et al.*, 2019). De acordo com a Tabela 1, todas as amostras estão dentro do valor máximo permitido pela Portaria GS/MS nº 888, de 4 de setembro de 2021, que tem como VMP 15 uH. Tosic *et al.* (2019) e Oliveira *et al.* (2019), afirmam que existem parâmetros físico-químicos da água que são mais sensíveis, de forma que em períodos chuvosos estão em maior concentração.

6. CONCLUSÕES

Com base nas discussões e resultados obtidos, é possível concluir que:

- Os materiais de armazenamento de calor sensível pintados de preto que absorveram mais calor foram o granito e a telha.
- Os perfis de temperaturas obtidos para a lâmina da água, vidro interno e vidro externo, acompanharam a intensidade de radiação, ocorrendo o aumento destas temperaturas com o aumento da intensidade de radiação.
- De modo geral, a produção de água dessalinizada e a eficiência térmica estão diretamente relacionadas com a incidência de radiação solar.
- A produção de água com a utilização dos materiais fototérmicos foi maior com a menor espessura de água. Os dessalinizadores alcançaram uma produção de 1.893,9 mL.m⁻² (D1), 2.500,0 mL.m⁻² (D2) e 2.234,8 mL.m⁻² (D3).
- A intensidade da radiação solar e a altura de lâmina de água afetam o desempenho do dessalinizador solar tipo pirâmide.
- Foi comprovado que a utilização de materiais fototérmicos aumenta a produção de água nos dessalinizadores. De forma que, o D3 apresentou uma produção de água 25% maior que o D1 para uma espessura de água de 3 cm.
- O dessalinizador solar que teve a maior produção de água foi o D3, com uma produção de 2.500,0 mL.m⁻² (1,0 cm), 1.667 mL.m⁻² (2,0 cm) e 2.273 mL.m⁻² (3,0 cm).
- A telha resultou em uma melhoria na produção de água em uma faixa de 11% para 1 cm de espessura de água, 13% para 2 cm de espessura de água e 25% para 3 cm de espessura de água.
- O granito e a telha, obtiveram um aumento na eficiência de 126% e 63% no dessalinizador, respectivamente.

- O uso de materiais fototérmicos em dessalinizador solar implica em melhoria da eficiência térmica.
- Referindo-se aos parâmetros de potabilidade pode-se afirmar a eficiência do dessalinizador solar do tipo pirâmide utilizado na pesquisa, visto que os resultados encontrados se enquadram na portaria vigente, podendo assim, ser aplicado para fins de pesquisa, como também em uma alternativa inovadora e viável para adquirir água de qualidade no semiárido brasileiro.

REFERÊNCIAS

- ABDALLAH, S.; BADRAN, O., ABU-KHADER, M. M. Performance evaluation of a modified design of a single slope solar still, **Desalination**, v. 219, p. 222-230, 2018.
- ABDELAL, N.; TAAMNEH, Y. Enhancement of pyramid solar still productivity using absorber plates made of carbon fiber/CNT-modified epoxy composites, **Desalination**, v. 419, p. 117-124, 2017.
- ABDULLAH, N.; YUSOF, N.; ISMAIL, A. F.; LAU, W. J. Insights into metal-organic frameworks-integrated membranes for desalination process: A review, **Desalination**, v. 500, p. 114867, 2021.
- AJDARI, H.; AMERI, A. Performance assessment of an inclined stepped solar still integrated with PCM and CuO/GO nanocomposite as a nanofluid, **Journal of Building Engineering**, v. 49, p. 104090, 2022.
- AL-HARAHSEH M.; ABU-ARABI, M.; MOUSA, H.; ALZGHOUL, Z.. Solar desalination using solar still enhanced by external solar collector and PCM, **Applied Thermal Engineering**, v. 128, p. 1030–1040, 2018.
- ALI, E.; ORFI, J.; ALSANRY, H.; SOUKANE, S.; ELCIK, H.; ALPATOVA, A.; GHAFFOUR, N. Cost analysis of multiple effect evaporation and membrane distillation hybrid desalination system, **Desalination**, v. 517, p. 115258, 2021.
- AL-OTHAMAN, A.; DARWISH, N. N.; QASIM, M.; TAWALBEH, M.; DARWISH, N. A.; ALTARAWNEH, I.; RAWADIEH, S.; BATIHA, M.; MAKHADMEH, L.; ALROWWAD, S.; TARAWNEH, M. Experimental and numerical performance analysis and optimization of single slope, double slope and pyramidal shaped solar stills. **Desalination**, v. 423, p. 124–134, 2017.
- ARUNKUMAR, T.; WANG, J.; WINFRED, D. D.; DENKENBERGER, D.; KABEEL, A. E. Sensible desalting: investigation of sensible thermal storage materials in solar stills, **Journal Energy Storage**, v. 32, p. 101824, 2020.
- ASADI, R. Z.; SUJA, F.; RUSLAN, M. H.; JALIL, M. A. The application of a solar still in domestic and industrial wastewater treatment, **Solar Energy**, v. 93, p. 63-71, 2013.

- ATTIA, M. E. H.; DRISS, Z.; MANOKAR, A. M.; SATHYAMURTHY, R. Effect of aluminum balls on the productivity of solar distillate, **Journal of Energy Storage**, v. 30, p. 101466, 2020.
- ATTIA, M. E. H.; KABEEL, A. E.; ABDELGAIED, M.; ABDEL-AZIZ, M. M.; BELLILA, A.; ABDUKKAH, A. Optimal size of black gravel as energy storage materials for performance improvement of hemispherical distillers, **Journal of Energy Storage**, v. 43, p. 103196, 2021.
- 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.
- BALAJI, R.; UDHAYAKUMAR, C.S.K.; VIJAY, D.A. Performance analysis of solar still using sensible heat storage, **Internation Journal of Innovative Research in Advanced Engineering**, v. 6, p. 1-11, 2019.
- BAUMGARTEN, M. G. Z.; POZZA, S. A. **Qualidade de águas: descrição de parâmetros químicos referidos na Legislação Ambiental**. Rio Grande: Editora da FURG, 166p, 2021.
- BELESSIOTIS, V.; KALOGIROU, S.; DELYANNIS, E. **Thermal solar desalination: Methods and systems**. Elsevier, p. 375, 2016.
- BEZERRA, F. D. Nordeste: “Futuro Promissor para a Energia Solar”, **Caderno Setorial, ETENE-BNB**, n. 31, 2018.
- BEZERRA, V. R.; BRITO, Y. J. V.; SARMENTO, K. K. F.; OLIVEIRA, C. S.; MEDEIROS, K. M.; LIMA, C. A. P. Análise dos parâmetros construtivos no desempenho térmico de dessalinizador solar: Uma revisão, **Research, Society and Development**, v. 10, n.6, p. 1-14, 2021.
- BALAJI, C.; SRINIVASAN, B.; GEDUPUDI, S. **Heat Transfer Engineering**. Academic Press, 2020.
- BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Fenômenos de Transporte**. 2a. Edição. Rio de Janeiro. LTC. 2004.
- BOUCHEKIMA, B. A solar desalination plant for domestic water needs in arid areas of South Algeria, **Dessalination**, v. 153, p. 65-69, 2003.

- BRITO, Y. J. V. ; CARDOSO, M. K. B. ; SILVA, K. S. ; SILVA, C. B. ; MEDEIROS, K. M.; DE LIMA, C. A. P. Estudo experimental de um dessalinizador solar do tipo bandeja com dupla inclinação para potabilização de água no semiárido Paraibano. **Águas Subterrâneas**, v. 34, p. 156-156, 2020.
- CABEZA, L. F.; FERNÁNDEZ, A. I.; BARRENECHE, C. Introduction to thermal energy storage systems, **Advances in Thermal Energy Storage Systems**, p. 1-33, 2021.
- CAI, Y.; GUO, Z. Spectral investigation of solar energy absorption and light transmittance in a water-filled prismatic glass louver, **Solar Energy**, v. 179, p. 164-173, 2019.
- 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, **Águas Subterrâneas**, v. 34, n. 2, p. 135-142, 2020.
- CARDOSO, M. K. B.; SILVA, K. S.; SILVA, C. B.; LIMA, G. G. C.; MEDEIROS, K. M.; LIMA, C. A. P. Low-cost solar still with corrugated absorber basin for water desalination, **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 44, p. 1-12, 2022.
- CASTRO, A. P. A. S. Desempenho térmico de vidros utilizados na construção civil: estudo em células-teste. **Campinas: Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, UNICAMP**, 2006.
- CLAYTON, R. **Desalination for Water Supply FR/R0013** (35p). Review of Current Knowledge, Foundation for Water Research, UK, 35p, Feb. 2006.
- CONAMA, Resolução nº 357, de 17 de março de 2005 que 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. Publicada no DOU em 18 de março, 2005.
- CORCÓVIA, J. A.; CELLIGOI, A. Avaliação preliminar da qualidade da água subterrânea no município de Ibitiporã, PR, **Revista de Estudos Ambientais**, v. 14, p. 39-48, 2012.
- COSTA, R. L.; BAPTISTA, G. M. M.; GOMES, H. B.; SILVA, F. D. S.; JÚNIOR, R. L. R.; SALVADOR, M. A.; HERDIES, D. L. Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014, **Weather and Climate Extremes**, v. 28, p. 100254, 2020.
- DE BRITO, C. S.; DA SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; NETO, R. M. B.; COELHO, V. H. R. Monitoring meteorological drought in a semiarid region using two long-term satellite-

estimated rainfall datasets: A case study of the Piranhas River basin, northeastern Brazil, **Atmospheric Research**, v. 250, p. 105380, 2021.

DIAS, J. F.; TOFFOLI, S. M.; AGOPYAN, V. Absorção de telhas cerâmicas vermelha. **Anais do 48º Congresso brasileiro de cerâmica**, 2004.

DONGARE, P. D.; ALABASTRI, A.; PEDERSEN, S.; ZODROW, K. R.; HOGAN, N. J.; NEUMANN, O.; WU, J.; WANG, T.; DESHMUKH, A.; ELIMELECH, M.; LI, Q.; NORDLANDER, P.; HALAS, N. J. Nanophotonics-enabled solar membrane distillation for off-grid water purification, **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 114, n. 27, p. 6936-6941, 2017.

DU, J. R.; ZHANG, X.; FENG, X.; WU, Y.; CHENG, F.; ALI, M. Desalination of high salinity brackish water by an NF-RO hybrid system, **Desalination**, v. 491, p. 114445, 2020.

DUBEY, M.; MISHRA, D. R. Experimental and theoretical evaluation of double slope single basin solar stills: Study of heat and mass transfer, **FME Transactions**, v. 47, n. 1, p. 101-110, 2019.

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

ELANGO, T.; KANNAN, A.; MURUGAVEL, K. K. Performance study on single basin single slope solar still with different water nanofluids, **Desalination**, v. 360, p. 45-51, 2015.

ELASHMAWYM, M.; ALHADRI, M.; AHMED, M. M. Z. Enhancing tubular solar still performance using novel PCM-tubes, **Desalination**, v. 500, p. 114880, 2021.

EL-GHONEMY, A. M. K. Performance test of a sea water multi-stage flash distillation plant: Case study, **Alexandria Engineering Journal**, v. 57, p. 5401-2413, 2018.

FARID, M. U.; JEHAD, A. K.; WANG, P.; AN, A. K. High-efficiency solar-driven water desalination using a thermally isolated plasmonic membrane, **Journal of Cleaner Production**, v. 271, p. 122684, 2020.

FILHO, E. D. S.; SILVA, A. B.; GONZAGA, F. A. S.; MENEZES, W. M. S.; DANTAS, G. M.; SANTOS, J. S. I.; MADUREIRA, I. A. Estudo da qualidade físico-química e microbiológica da água de poço tubular situado no sitio alegre no município de Lagoa Seca-PB, **Águas Subterrâneas**, v. 33, 2019.

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

FRANCKLIN, Alexandre Reis. Um breve estudo sobre ferro fundido nodular. **Centro universitário Estadual da Zona Oeste. RJ**, p. 17, 2009.

FUZIL, N. S., OTHMAN, N. H., ALIAS, N. H., MARPANI, F., OTHMAN, M. H. D., ISMAIL, A. F., SHIRAZI, M. M. A. A review on photothermal material and its usage in the development of photothermal membrane for sustainable clean water production, **Desalination**, v. 517, p. 115259, 2021.

GNANADASON, M. K.; KUMAR, P. S.; WILSON, V. H.; KUMARAVEL, A. Productivity enhancement of a-single basin solar still, **Dessalination and Water Treatment**, v. 55, p. 1998-2008, 2015.

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

GUNTHER, M.; JOEMANN, M.; CSAMBOR, S. Parabolic Trough Technology. In: ENERMENA (Jordânia). **Advanced CSP Teaching Materials**. Amman: Enermena, 2011. p. 245-317.

HAILU, B. T.; FEKADU, M; NAUSS, T. Availability of global and national scale land cover products and their accuracy in mountainous areas of Ethiopia: a review, **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 12, p. 41502, 2018.

HAMMAD, F. A.; SHALABY, S. M.; KABEEL, A. E.; ZAYED, M. E. Experimental investigation and thermo-economic performance analysis of a modified solar distiller design with thermal storage material and v-corrugated absorber basin, **Journal of Energy Storage**, v. 52, p. 105020, 2022.

HANSEN, R. S.; MARY, M. B. Q.; SUBRAMANIAN, S. S.; RAJ, J. A.; GNANARAJ, J. P.; APPADURAI, M. Utilization of PCM in inclined and single basin solar stills to improve the daily productivity, **Materials today proceedings**, v. 62, p. 967-972, 2022.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Semiárido brasileiro. Disponível em < <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/mapas-regionais/15974-semiarido-brasileiro.html?=&t=acesso-ao-produto>>. Acesso 2022.

JEMMAL, Y.; ZARI, N.; ASBIK, M.; MAAROUFI, M. Experimental characterization and thermal performance comparison of six Moroccan rocks used as filler materials in a packed bed storage system, **Journal of Energy Storage**, v. 30, p. 101513, 2020.

KABEEL, A. E.; ABDELGAIED, M.; ALMULLA, N. Performances of pyramid-shaped solar still with different glass cover angles: Experimental study, **7th International Renewable Energy Congress (IREC)**, 2016.

KABEEL, A. E.; EL-AGOUZ, S.A.; SATHYAMURTHY, R.; ARUNKUMAR, T. Augmenting the productivity of solar still using jute cloth knitted with sand heat energy storage, **Desalination**, v. 443, p. 122-129, 2018.

KABEEL, A.; ABDELGAIED, M.; EISA, A. Enhancing the performance of single basin solar still using high thermal conductivity sensible storage materials, **Journal of Cleaner Production**, v. 182, p. 20-25, 2018.

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

KABEEL, A.E.; ABDELGAIED, M.; MAHGOUB, M. The performance of a modified solar still using hot air injection and PCM, **Desalination**, v. 379 p. 102-107, 2016.

KALOGIROU, S. A. **Solar Energy Engineering Processes and Systems**. 815p. Second Edition, Academic Press, 2014.

KATHOD, K. J.; KATEKAR, V. P.; DESHMUKH, S. S. An evaluation for the optimal sensible heat storage material for maximizing solar still productivity: A state-of-the-art review, **Journal of Energy Storage**, v. 50, p. 104622, 2022.

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

KHALIFA, A. J. N.; ALI, M. A. Indoor tests on the effect of wind speed on still performance, **International Journal of Energy and Environment**, v. 6, p. 299, 2015.

KHECHEKHOUCHE, A.; HAOUA, B.; KABEEL, A.; ATTIA, M. E.-H.; EL-MAGHLANY, W. Improvement of solar distiller productivity by a black metallic plate of zinc as a thermal storage material, **Journal of Testing and Evaluation**, v. 49, p. 967-976, 2021.

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

KOZAI, T. D. Y.; VAZQUEZ, A. L. Photoelectric artefact from optogenetics and imaging on microelectrodes and bioelectronics: new challenges and opportunities, **Journal of Materials Chemistry B**, v. 3, p. 4965-4978, 2015.

KUMAR, A.; PRAKASH, O. **Solar Desalination Technology**. Springer International Publishing, p. 368, 2019.

KUMAR, P. V.; KUMAR, A.; PRAKASH, O.; KAVITI, A. K. Solar stills system design: A review, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 51, p. 153-181, 2015.

KUMAR, S.; DWIVEDI, V. K. Experimental study on modified single slope single basin active solar still, **Desalination**, v. 367, p. 69-75, 2015.

LAL, R. K; MISHARA, S.; DWIVEDI, J. P.; DWIVEDI, H. A Comprehensive Study of the Different Parameters of Solar Still, **Materials Today: Proceedings**, v. 4, ed. 2, p. 3572-3580, 2017.

LI, G. Sensible heat thermal storage energy and exergy performance evaluations, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 56, p. 897-923, 2016.

LI, Q.; ZHAO, X.; LI, L.; HU, T.; YANG, Y.; ZHANG, J. Facile preparation of polydimethylsiloxane/carbon nanotubes modified melamine solar evaporators for efficient steam generation and desalination, **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 584, p. 602-609, 2021.

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

MAHADI, U. I. Effect of different absorbing materials on solar Manipal, **International Journal of Application or Innovation in Engineering e Management**, v. 2, p. 301-304, 2013.

MANOKAR, A. M.; TAAMNEH, Y.; KABEEL, A. E; WINSTON, D. P.; VIJAYABALAN, P.; BALAJI, D.; SATHAYAMURTHY, R.; SUNDAR, S. P; MAGESHBABU, D. Effect of water depth and insulation on the productivity of an acrylic pyramid solar still – An experimental study, **Groundwater for Sustainable Development**, v. 10, p. 100319, 2020.

MARINHO, F. J. L.; ROCHA, E. N.; SOUTO, E. A.; CRUZ, M. P.; TAVARES, A. C.; SANTOS, S. A.; MARCOVICZ, F. Destilador solar destinado a fornecer água potável para as

famílias de agricultores de base familiar, **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 7, n. 3, p. 53-60, 2012.

MATTOS, J. B.; CRUZ, M. J. M. C; DE PAULA, F. C. F; SALES, E. F. Tipologia hidrogeoquímica e qualidade das águas subterrâneas na área urbana do município de Lençóis, Bahia, Nordeste do Brasil, **Águas Subterrâneas**, v. 31, p. 281-295, 2017.

MEVADA, D.; PANCHAL, H.; AHMADEIN, M.; ZAYED, M. E.; ALSALEH, N. A.; DJUANSJAH, J.; MOUSTAFA, E. B.; ELSHEIKH, A. H.; SADASIVUNI, K. K. Investigation and performance analysis of solar still with energy storage materials: An energy- exergy efficiency analysis, **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 29, p. 101687, 2022.

MOCOCK, J. F.; PESSÔA, C. N.; MONTEIRO, A. T. D. S.; TORRES, A. S. C. G.; RABBANI, E. R. K. Estudo comparativo entre os principais métodos de dessalinização de águas subterrâneas: revisão de literatura, **Águas Subterrâneas**, 2019.

MUGI, V. R.; DAS, P.; BALIJEPALLI, R.; CHANDRAMOHAN, V. P. A review of natural energy storage materials used in solar dryers for food drying applications, **Journal of Energy Storage**, v. 49, p. 1041698, 2022.

NASRI, B.; BENATIALLAH, A.; KALLOUM, S.; BENATIALLAH, D. Experimental study of solar still using local material in south of Algeria, **AIP Conference Proceedings**, v. 1968, p. 030024, 2018.

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

OLIVEIRA, T. W. dos S. de; SILVA, S. H. P. da; SILVA, D. F.; VIANA, J. F. C.; FIRMO, W. da C. A.; SILVA, M. R. C. Aspecto da sazonalidade nos parâmetros físico – químicos da água dos poços, Raposa - Maranhão, Brasil, **Águas Subterrâneas**, v. 33, 2019.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Disponível em: <
<https://brasil.un.org/pt-br>>. Acesso em: 15 de setembro de 2022.

PACHORI, H.; CHOUDHARY, T.; SHEOREY, T. Significance of thermal energy storage material in solar air heaters, **Materials Today: Proceedings**, v. 56, p. 126-134, 2022.

PANCHAL, H. N.; DOSHI, M.; CHAVDA, P.; GOSWAMI, R. Effect of Cow dung cakes inside basinon heat transfer coefficients and productivity of single basin single

slope solar still, **International Journal of Applied Engineering Research, Dindigul**, v.1, no 4, p. 675-690, 2011.

PANCHAL, H.; PATEL, D.K.; PATEL, P. Theoretical and experimental performance analysis of sandstones and marble pieces as thermal energy storage materials inside solar still, **International Journal Ambient Energy**, v. 39, p. 221-229, 2017.

PANCHAL, H.; SADASIVUNI, K. K.; PRAJAPATI, C.; KHALID, M.; ESSA, F. A.; SHANMUGAN, S.; PANDYA, N.; SURESH, M.; ISRAR, M.; DHARASKAR, S.; KHECHEKOUICHE, A. Productivity enhancement of solar still with thermoelectric modules from groundwater to produce potable water: A review, **Groundwater for Sustainable Development**, v. 11, p. 100429, 2020.

PATEL, P.; KUMAR, R. Comparative performance evaluation of modified passive solar still using sensible heat storage material and increased frontal height, **Procedia Technology**, v. 23, p. 431–438, 2016.

PEREIRA. E. B.; MARTINS. F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F.J.L.; RÜTHER. R.; ABREU. S.L.; TIEPOLO, G.M.; PEREIRA, S.V.; SOUZA, J.G. **Atlas brasileiro de energia solar** – 2. ed - São José dos Campos: INPE, 2017. 88p.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. (Org.). **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPTEL - CRESESB, 2014.

PRAKASH, P.; VELMURUGAN, V. Parameters influencing the productivity of solar stills—A review, **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 49, p. 585-609, 2015.

RABADIA, C. Factors Influencing the Productivity of Solar Still, **International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)**, v. 3, p. 2321-9653, 2015.

RAHIMI, B.; CHUA, H. T. **Low Grade Heat Driven Multi-Effect Distillation and Desalination**. Elsevier, p. 1-15, 2017.

RAJAN, A.S.; RAJA, K.; MARIMUTHU, P. Increasing the productivity of pyramid solar still augmented with biomass heat source and analytical validation using RSM, **Desalination and Water Treatment**, v. 57, p. 4406-4419, 2016.

RAMOS, R. O.; LIMA, C.A.P.; CAVALCANTE, G.G.; MEDEIROS, K.M. Patente: Privilégio de Inovação. Número do registro: BR1020210075996, título: "Sistema Integrado Multianálise com Conectividade e Função Datalogger para Monitoramento de Estações de

Dessalinização Solar e Outros Sistemas de Tratamento de Águas e Efluentes", Instituição de registro: **INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial**. Depósito: 21/04/2021. 2021.

RAVICHANDRAN, L.; RUSOV, D.; ARJUNAN, T. V.; VIJAYAN, S.;

MATHESWARAN, M. Experimental study of brackish water distillation in single slope solar still using sensible heat storage materials. **International scientific conference RURAL DEVELOPMENT 2017**, p. 391-396, 2017.

SADEGHI, G. Energy storage on demand: Thermal energy storage development, materials, design, and integration challenges, **Energy Storage Materials**, v. 46, p. 192-222, 2022.

SAMEE, M. A.; MIRZA, U. K.; MAJEED, T.; AHMAD, N. Design and performance of a simple single basin solar still. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 11, n. 3, p. 543-549, 2007.

SAMUEL, D.G.H.; NAGARAJAN, P.K.; SATHYAMURTHY, R.; EL-AGOUZ, S.A.; KANNAN, E. Improving the yield of fresh water in conventional solar still using low cost energy storage material, **Energy Conversion and Management**, v. 112, p. 125–134, 2016.

SANTOS, R. S.; MOHR, T. Saúde e qualidade da água: análises microbiológicas e físico-químicas em águas subterrâneas, **Revista Contexto & Saúde**, v. 13, p. 24-25: 46-53, 2013.

SATHYAMURTHY, R.; KENNADY, H. J.; NAGARAJAN, P. K.; AHSAN, A. Factors affecting the performance of triangular pyramid solar still, **Desalination**, v. 344, p. 383-390, 2014.

SELVARAJ, K.; NASTARAJAN, A. Factors influencing the performance and productivity of solar stills – A review, **Desalination**, v. 435, p. 181-187, 2018.

SHALABY, S.M.; EL-BIALY, E.; EL-SEBAILI, A. A. An experimental investigation of a corrugated absorber single-basin solar still using PCM, **Desalination**, v. 398, p. 247-255, 2016.

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, **Águas Subterrâneas**, v. 34, n. 3, p. 285-295, 2020.

SILVA, G. D. P.; SHARQAWY, M. H. Techno-economic analysis of low impact solar brackish water desalination system in the Brazilian Semiarid region, **Journal of Cleaner Production**, v. 248, p. 119255, 2020.

- SILVA, R. G.; DO CARMO, M. J. Energia Solar Fotovoltaica: uma proposta para melhoria da gestão energética, **InterSciencePlace**, v. 12, n. 2, 2017.
- SILVINO, A. S.; VIGLIO, J. E.; FERREIRA, L. C. A conservação da Caatinga em diferentes arenas do Semiárido brasileiro, **Sustentabilidade em Debate**, v. 7, p. 182-194, 2016.
- SINGH, A. K. SINGH, D. B.; MALLICK, A.; HARENDER; SHARMA, S. K.; KUMAR, N.; DWIVEDI, V.K. Performance analysis of specially designed single basin passive solar distillers incorporated with novel solar desalting stills: A review, **Solar Energy**, v. 185, p. 146-164, 2019.
- SOUZA, M. B.; TIEPOLO, G. M.; JUNIOR, J. U; FREITAS, D. V; YANG, R. L. Modelos para estimativa da radiação difusa a partir da radiação global horizontal para a cidade de Curitiba/PR. **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**, 2020.
- 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**, v. 260, p. 248-53, 2010.
- THOAI, D. N.; TA, Q. T. H.; TROUNG, T. T.; NAM, H. V.; VO, G. V. Review on the recent development and applications of three dimensional (3D) photothermal materials for solar evaporators, **Journal of Cleaner Production**, v. 293, p. 126122, 2021.
- TIWARI, G. N.; SINGH, H. N.; TRIPATHI, R. Present status of solar distillation, **Solar energy**, v. 75, n. 5, p. 367-373, 2003.
- TOSIC, M.; RESTREPO, J. D.; LONIN, S.; IZQUIERDO, A.; MARTINS, F. Water and sediment quality in Cartagena Bay, Colombia: Seasonal variability and potential impacts of pollution. Estuarine, **Coastal and Shelf Science**, v. 216, p. 187-203, 2019.
- VESELI, B.; SOFIU, V. Renewable Energy Sources - Solar Energy Study Case Eco Park Gjakova, **IFAC-PapersOnLine**, v. 52, ed. 25, p. 119–124, 2019.
- VIGNESWARAN, V. S.; KUMARESAN, G.; DINAKAR, B. V.; KAMAL, K. K.; VELRAJ, R. Augmenting the productivity of solar still using multiple PCMs as heat energy storage, **Journal of Energy Storage**, v. 26, p. 101019, 2019.
- VILLALVA, M.G. *Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações*. 2. ed. São Paulo: Érica, 2015.

WU, X.; CHEN, G. Y.; OWENS, G.; CHU, D.; XU, H. Photothermal materials: A key platform enabling highly eficiente water evaporation by solar energy, **Materials Today Energy**, v. 12, p. 277-296, 2019.

YAN, T.; WANG, R. Z.; LI, T. X.; WANG, L. W.; ISHYGAH, T. F. A review of promising candidate reactions for chemical heat storage, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 43, p. 13-31, 2015.

ZANELLA, M. E. Considerações sobre o clima e os recursos hídricos do semiárido nordestino, **Caderno Prudentino de Geografia**, v. 1, n. 36, p. 126-142, 2014.

ZHANG, C.; CHEN, Z.; XIA, Z.; WLADMAN, R. Z; WU, S.; YANG, H.; DARLING, S.B. Ferric tannate photothermal material for efficient water distillation, **Environmental Science: Water Research & Technology**, v.6, n.4, p. 911-915, 2020.

ZOBY, José Luiz Gomes. Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil. **Águas Subterrâneas**, 2008.