



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

**LUZIRENE TEOTÔNIO ALVES**

**O USO DE DIÓXIDO DE TITÂNIO COMO MATERIAL FOTOTÉRMICO EM  
SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO SOLAR**

**CAMPINA GRANDE - PB**

**2024**

LUZIRENE TEOTÔNIO ALVES

**O USO DE DIÓXIDO DE TITÂNIO COMO MATERIAL FOTOTÉRMICO EM  
SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO SOLAR**

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

**Linha de pesquisa:** Tecnologias de Tratamento de Água e de Resíduos.

**Orientadora:** Profa. Dra. Keila Machado de Medeiros

**Coorientador:** Prof. Dr. Carlos Antônio Pereira de Lima

**CAMPINA GRANDE - PB**

**2024**

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

A474u Alves, Luzirene Teotonio.

O uso de dióxido de titânio como material fototérmico em sistemas de dessalinização solar [manuscrito] / Luzirene Teotonio Alves. - 2024.

96 p. : il. colorido.

Digitado. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2024. "Orientação : Profa. Dra. Keila Machado de Medeiros, UFRB - Universidade Federal do Recôncavo da Bahia." "Coorientação: Prof. Dr. Carlos Antônio Pereira de Lima, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT."

1. Energia solar. 2. Água dessalinizada. 3. Material fototérmico. 4. Dióxido de ti. 5. Dessalinização da água. I. Título

21. ed. CDD 628

LUZIRENE TEOTÔNIO ALVES

**O USO DE DIÓXIDO DE TITÂNIO COMO MATERIAL FOTOTÉRMICO EM  
SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO SOLAR**

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

**Linha de pesquisa:** Tecnologias de Tratamento de Águas e de Resíduos.

Aprovada em: 16/08/2024.



---

Profa. Dra. Keila Machado de Medeiros  
Orientadora - CETENS – UFRB



---

Prof. Dr. Carlos Antônio Pereira de Lima  
Coorientador - DESA – UEPB

---

Prof. Dr. Rui de Oliveira  
Examinador Interno - DESA – UEPB



---

Profa. Dra. Auristela Carla de Miranda  
Examinadora Externa - CETENS – UFRB

---

Profa. Dra. Imarally Vitor de Souza Ribeiro Nascimento  
Examinadora Externa - CETENS – UFRB

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por ter me guiado, cuidado e preservado em todos os momentos.

Aos meus pais, Hélio Teotonio Alves e Márcia de Lourdes Alves Teotonio, por sempre me incentivarem e motivarem a ser uma pessoa melhor e temente a Deus, sem nunca medirem esforços para realizar meus sonhos.

Ao meu esposo, Fernando Soares Bezerra, por sempre me apoiar, motivar e mover céus e terras, por mim. Sempre tornando a palavra “impossível” por “é possível”. Além de ser meu porto seguro e a pessoa que me leva para mais próximo de Deus.

Aos meus irmãos Marcélio Alves Teotonio e Hélio Teotonio Alves Filho, por serem sempre e para sempre, minhas maiores fontes de inspiração, sempre cuidando e zelando por mim.

À minha orientadora, Keila Machado de Medeiros, por ser sempre motivadora e nunca medir esforços para me ajudar, sempre tendo uma solução para tudo.

Ao meu coorientador, Carlos Antônio Pereira de Lima, por todo conhecimento e ajuda durante toda a pesquisa.

A Mayra Correia Martins Dantas, minha amiga, companheira, madrinha e comadre, por nunca ter me deixado sozinha, por me mostrar, sobretudo, o lado bom das coisas, tornando tudo mais leve e divertido, mesmo nas horas difíceis.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, por todo conhecimento através dos professores, técnicos e colegas mestrandos e doutorandos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

.

Essa conquista não seria possível sem vocês.

## RESUMO

A dessalinização por energia solar é uma alternativa que consiste em separar os sais da água salgada ou salobra, utilizando a evaporação, assim como ocorre no ciclo hidrológico natural. Para aperfeiçoar o desempenho do dessalinizador, os estudos direcionados aos materiais fototérmicos foram explorados com a finalidade de potencializar os processos de transferência de calor. Dentre os diversos materiais fototérmicos, o presente estudo, visa adicionar o dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ) em um sistema de dessalinização solar com o intuito de maximizar a produção de água tratada. Três dessalinizadores do tipo pirâmide foram utilizados, operando simultaneamente, de forma contínua, a bandeja de dois dos dessalinizadores foram revestidos com uma tinta fototérmica, adicionando um percentual de 2,5% e 5% de  $\text{TiO}_2$ , e o terceiro foi revestido apenas com a tinta, para fins comparativos. Água salobra foi coletada no Sítio Comprido- Queimadas- PB. Os indicadores físico-químicos das águas foram analisados antes e após o processo de dessalinização solar. O  $\text{TiO}_2$  foi caracterizado por fluorescência de raios-X (FRX), difração de raios-X (DRX), espectroscopia do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), distribuição granulométrica, área superficial, volume e diâmetro médio dos poros, microscopia eletrônica de varredura (MEV), calorimetria exploratória diferencial (DSC) e termogravimetria (TG) assim como, as tintas fototérmicas, sem e com o  $\text{TiO}_2$  foram caracterizadas por FTIR. Além disso, durante os experimentos, foram monitorados alguns parâmetros: temperatura ambiente, radiação solar, velocidade do vento, umidade relativa do ar, temperatura do vidro interno e temperatura da bandeja, assim como a produção da água dessalinizada. Conclui-se que o dessalinizador que continha a bandeja revestida com o percentual de 5% de  $\text{TiO}_2$  obteve uma maior produção de água dessalinizada em relação aos demais dessalinizadores. Ao que se refere a qualidade da água, após o processo de dessalinização, atenderam os padrões estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888. Portanto, a introdução do  $\text{TiO}_2$  na tinta fototérmica presente na bandeja dos dessalinizadores, resultou na sinergia das propriedades destes materiais, confirmando que o  $\text{TiO}_2$  possui características adequadas para atuar como material fototérmico na dessalinização via energia solar.

**Palavras-chave:** energia solar; água dessalinizada; material fototérmico; dióxido de titânio.

## ABSTRACT

Solar desalination is an alternative that consists of separating salts from salty or brackish water using evaporation, as occurs in the natural hydrological cycle. To improve the performance of the desalination plant, studies focused on photothermal materials were explored in order to enhance the heat transfer processes. Among the various photothermal materials, the present study aims to add titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) to a solar desalination system in order to maximize the production of treated water. Three pyramid-type desalination plants were used, operating simultaneously and continuously. The trays of two of the desalination plants were coated with a photothermal paint, adding a percentage of 2.5% and 5% of TiO<sub>2</sub>, and the third was coated only with the paint, for comparative purposes. Brackish water was collected at Sítio Comprido- Queimadas-PB. The physicochemical indicators of the water were analyzed before and after the solar desalination process. TiO<sub>2</sub> was characterized by X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), particle size distribution, surface area, pore volume and mean pore diameter, scanning electron microscopy (SEM), differential scanning calorimetry (DSC) and thermogravimetry (TG). The photothermal paints, with and without TiO<sub>2</sub>, were characterized by FTIR. In addition, during the experiments, some parameters were monitored: room temperature, solar radiation, wind speed, relative humidity, internal glass temperature and tray temperature, as well as the production of desalinated water. It was concluded that the desalinator that contained the tray coated with 5% TiO<sub>2</sub> obtained a higher production of desalinated water compared to the other desalinators. Regarding the quality of the water, after the desalination process, it met the standards established by Ordinance GM/MS nº 888. Therefore, the introduction of TiO<sub>2</sub> in the photothermal paint present in the desalination tray resulted in the synergy of the properties of these materials, confirming that TiO<sub>2</sub> has adequate characteristics to act as a photothermal material in desalination via solar energy.

**Keywords:** solar energy; desalinated water; photothermal material; titanium dioxide.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Digrama simplificado de um processo de Destilação Solar. ....	18
Figura 2 - Dessalinização solar por umidificação e desumidificação acoplada à osmose inversa. ....	19
Figura 3 - Esquema de sistema eletrodialise.....	20
Figura 4 - Desenho esquemático de células piramidais de bases quadrada e triangular. ....	22
Figura 5 - Estruturas cristalinas do $TiO_2$ : a) Rutilo, b) Brookita e c) Anatase, representadas por cadeias de octaedros. ....	30
Figura 6 – Mapa com a localização dos experimentos.....	38
Figura 7 - Dessalinizador solar do tipo pirâmide assimétrico. ....	39
Figura 8 – Dessalinizadores D1, D2 e D3. ....	42
Figura 9 - Dessalinizador solar do tipo pirâmide com o $TiO_2$ na água salobra. ....	43
Figura 10 - Esquema do dessalinizador solar piramidal com alimentação contínua por gravidade. ....	44
Figura 11 - Sistema de medição dos parâmetros físico-químicos operacionais.....	46
Figura 12 - Difratoograma DRX do $TiO_2$ .....	48
Figura 13 - Espectro de FTIR do $TiO_2$ . ....	49
Figura 14 - Distribuição granulométrica do $TiO_2$ .....	50
Figura 15 - Fotomicrografias obtidas por MEV do $TiO_2$ com aumentos de: (a) 5.000x, (b) 10.000x, (c) 15.000x, e (d) 20.000x. ....	53
Figura 16 - Curva de DSC do $TiO_2$ .....	54
Figura 17 - Curva de TG do $TiO_2$ . ....	55
Figura 18 - Espectros de FTIR dos Revestimentos Fototérmicos. ....	58
Figura 19 - Parâmetros meteorológicos do dia 24/01/2024.....	59
Figura 20 - Parâmetros meteorológicos do dia 17/04/2024.....	60
Figura 21 - Parâmetros meteorológicos do dia 18/04/2024.....	60
Figura 22 - Parâmetros meteorológicos do dia 05/02/2024.....	61
Figura 23 - Parâmetros meteorológicos 08/04/2024. ....	62
Figura 24 - Perfis de temperatura D1, D2 e D3, lâmina 1 cm, dia - 24/01/2024.....	62
Figura 25 - Perfis de temperatura D1, D2 e D3, lâmina de 1 cm, dia- 17/02/2024. ...	63
Figura 26 - Perfis de temperatura de D1, D2 e D3, lâmina de 1 cm, dia- 18/04/2024. ....	64
Figura 27 - Perfis de temperatura D1, D2 e D3, lâmina de 2 cm, dia - 05/02/2024. ...	65
Figura 28 - Perfis de temperatura D1, D2 e D3, lâmina de 2 cm, dia - 08/04/2024. ...	66
Figura 29 - Produção de água dessalinizador D1, D2 e D3, lâmina de 1 cm, dia- 24/01/2024. ....	67
Figura 30 - Produção de água dessalinizador D1, D2 e D3, lâmina de 1 cm, dia- 17/04/2024. ....	68
Figura 31 - Produção de água dessalinizador D1, D2 e D3, lâmina de 1 cm, dia- 18/04/2024. ....	69
Figura 32 - Produção de água dessalinizada D1, D2 e D2, lâmina de 2 cm, dia 05/02/2024. ....	70
Figura 33 - Produção de água dessalinizada D1, D2 e D3, lâmina de 2 cm, dia- 08/04/2024. ....	71
Figura 34 - Eficiência térmica horária D1, D2 e D3, lâmina de 1 cm, dia - 17/04/2024. ....	72
Figura 35 - Eficiência térmica horária D1, D2 e D3, lâmina de 1 cm, dia- 18/04/2024. ....	73



Figura 36 - Eficiência térmica horária D1, D2 e D3, lâmina de 2 cm, dia - 05/02/2024. .....	74
Figura 37 - Eficiência térmica horária D1, D2 e D3, lâmina de 2 cm, dia- 08/04/2024. .....	75
Figura 38 - Coeficientes de transferência de calor dos dessalinizadores, lâmina de 1 cm, dia- 17/04/2024.....	76
Figura 39 - Coeficientes de transferência de calor dos dessalinizadores, lâmina de 1 cm, dia - 18/04/2024.....	77
Figura 40 - Coeficientes de transferência de calor dos dessalinizadores, lâmina de 2 cm, dia - 05/02/2024.....	78
Figura 41 - Coeficientes de transferência de calor dos dessalinizadores, lâmina de 2 cm, dia- 08/04/2024.....	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades do Dióxido de Titânio. ....	31
Tabela 2 - Parâmetros construtivos e operacionais do dessalinizador.....	39
Tabela 3 - Indicadores físico-químicos e os equipamentos utilizados.....	45
Tabela 4 – Dias selecionados para efeito de estudo e lâminas utilizadas.....	47
Tabela 5 - Pureza do TiO <sub>2</sub> e quantidade de impurezas semiquantificadas. ....	47
Tabela 6 - Análise textural do TiO <sub>2</sub> .....	51
Tabela 7 - Compostos químicos, composição, fórmula molecular e estrutura química da tinta fototérmica. ....	57
Tabela 8 - Parâmetros físico-químicos dos dessalinizadores para o dia 17/04/2024. ....	80
Tabela 9 - Parâmetros físico-químicos dos dessalinizadores para o dia 18/04/2024. ....	80
Tabela 10 - Resultado dos parâmetros físico-químicos dos dessalinizadores para o dia 05/02/2024.....	81
Tabela 11 - Resultado dos parâmetros físico-químicos dos dessalinizadores para o dia 08/04/2024.....	81

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Ag	Prata
A <sub>a</sub>	Área da água
A <sub>b</sub>	Área da bandeja
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alumina
Cu	Cobre
DRX	Difração de Raio-X
ED	Eletrodíálise
Fe	Ferro
FRX	Fluorescência de Raios-X
FTIR	Espectroscopia na Região Infravermelho com Transformada de Fourier
<i>h<sub>c v-amb</sub></i>	Transferência de calor por convecção entre vidro e ambiente
<i>h<sub>c</sub></i>	Transferência de calor por convecção
<i>h<sub>ev</sub></i>	Transferência de calor por evaporação
<i>h<sub>rad</sub></i>	Transferência de calor por radiação
<i>h<sub>c a-v</sub></i>	Transferência de calor por convecção entre a água e o vidro
<i>h<sub>rad a-v</sub></i>	Transferência de calor de radiação entre a água e o vidro
<i>h<sub>v-amb</sub></i>	Coeficiente de transferência de calor do vidro e ambiente
<i>h<sub>b-amb</sub></i>	Transferência de calor entre a bandeja e o ambiente
<i>h<sub>ev a-v</sub></i>	Transferência de calor por evaporação de água e vidro
<i>h<sub>ev a-v</sub></i>	Transferência de calor por evaporação de água e vidro
<i>I</i>	Irradiação solar
<i>L</i>	Calor latente
<i>m</i>	Produtividade de água diária
<i>m<sub>b</sub></i>	Massa da bandeja
MED	Destilação de Múltiplos Efeitos
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MSF	Destilação de Múltiplos Estágios
OI	Osmose Inversa
<i>q</i>	Taxa de transferência de calor
<i>qr</i>	Fluxo de calor por radiação
SD	Destilação Solar
Si	Silício
SiO <sub>2</sub>	Dióxido de Silício
<i>t</i>	Tempo
T <sub>b</sub>	Temperatura bandeja
TG	Termogravimetria
TiO <sub>2</sub>	Dióxido de Titânio
<i>v</i>	Velocidade do vento
VC	Destilação Compressão de Vapor
Zn	Zinco
$\sigma$	Constante Boltzman
$\epsilon$	Emissividade

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	12
2	OBJETIVOS .....	14
2.1	Objetivo geral.....	14
2.2	Objetivos específicos.....	14
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	15
3.1	Recursos hídricos globais.....	15
3.2	Dessalinização de água .....	16
3.2.1	<i>Processos de dessalinização</i> .....	17
3.3	Dessalinização solar .....	20
3.3.1	<i>Dessalinizador solar do tipo pirâmide</i> .....	21
3.3.2	<i>Fatores que afetam os processos de dessalinização solar</i> .....	22
3.4	Balanço térmico no processo de dessalinização .....	23
3.4.1	<i>Transferência de calor por condução</i> .....	24
3.4.2	<i>Transferência de calor por convecção</i> .....	25
3.4.3	<i>Transferência de calor por radiação</i> .....	26
3.4.4	<i>Transferência de calor por evaporação</i> .....	27
3.4.5	<i>Condensação</i> .....	28
3.5	Eficiência dos dessalinizadores.....	28
3.6	Nanofluidos.....	29
3.6.1	<i>Dióxido de titânio</i> .....	30
3.7	Estado da arte.....	31
4	MATERIAIS E MÉTODOS .....	38
4.1	Protótipo do dessalinizador solar .....	38
4.2	Material fototérmico .....	40
4.3	Caracterização do material fototérmico .....	40
4.3.1	<i>Fluorescência de Raios-X (FRX)</i> .....	40
4.3.2	<i>Difração de Raios X (DRX)</i> .....	40
4.3.3	<i>Espectroscopia do Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)</i> 40	
4.3.4	<i>Distribuição Granulométrica</i> .....	41
4.3.5	<i>Área Superficial, Volume e Diâmetro Médio de Poros</i> .....	41
4.3.6	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</i> .....	41
4.3.7	<i>Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)</i> .....	41

4.3.8	<i>Termogravimetria (TG)</i> .....	42
4.4	Procedimento experimental.....	42
4.5	Teste hidrodinâmico.....	44
4.6	Parâmetros Físico-químicos das águas .....	45
4.7	Monitoramento dos parâmetros operacionais do dessalinizador .....	45
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	47
5.1	Caracterização do material fototérmico TiO <sub>2</sub> .....	47
5.1.1	<i>Fluorescência de Raios-X (FRX)</i> .....	47
5.1.2	<i>Difração de Raios-X (DRX)</i> .....	48
5.1.3	<i>Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)</i> .....	49
5.1.4	<i>Análise Granulométrica</i> .....	50
5.1.5	<i>Área Superficial, Volume e Diâmetro Médio dos Poros</i> .....	51
5.1.6	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</i> .....	52
5.1.7	<i>Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)</i> .....	54
5.1.8	<i>Termogravimetria (TG)</i> .....	55
5.1.9	<i>FTIR dos Revestimentos Fototérmicos</i> .....	56
5.2	Avaliação dos parâmetros meteorológicos .....	58
5.3	Perfis de temperatura e incidência de radiação .....	62
5.4	Produtividade de água dessalinizada .....	67
5.5	Eficiência.....	72
5.6	Coeficientes transferência de calor .....	75
5.7	Qualidade físico-química da água.....	79
6	<b>CONCLUSÕES</b> .....	84
7	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	85
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	86

## 1 INTRODUÇÃO

O elemento mais importante e vital para o sustento da vida na Terra, é a água. Sua deficiência deve ser tratada como a mais importante preocupação para a humanidade, especialmente nas regiões onde a escassez já está presente, sendo elas as regiões áridas, semiáridas, regiões costeiras e ilhas. Nestes locais, não há água doce disponível no solo ou em rios que seja suficiente para a população.

O uso não sustentável de água em diversas atividades e o desmatamento, são fatores que contribuem para o surgimento dessa escassez, assim como a demanda crescente de água pelo aumento populacional, desperdício e poluição da água. Neste cenário, há uma redução significativa da disponibilidade de água doce por habitante.

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

Além da escassez, a qualidade da água continua sendo uma grande ameaça à saúde e ao bem-estar humano (Isenmann, 2018). A água destinada ao consumo humano necessita ser potável e estar em conformidade com os padrões microbiológico, físico, químico e radioativo, a fim de não oferecer riscos à saúde. Para isso, o Ministério da Saúde, por meio da Portaria GM/MS nº 888/2021, dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade (Brasil, 2021).

A dessalinização solar é uma técnica baseada na evaporação e condensação da água e é análogo ao ciclo hidrológico natural, através da radiação natural livre para purificar a água contaminada em água dessalinizada, empregando o processo de transferência de energia. Essa radiação solar incidente é considerada o principal fator ambiental que afeta a taxa de produtividade de um sistema de dessalinização solar (Prakash; Velmurugan, 2015).

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

Os materiais fototérmicos são aplicados para otimizar o armazenamento de energia, melhorando a condutividade térmica do fluido-base e aumentando sua capacidade de armazenamento. Na energia solar, os nanofluidos e microfluidos são amplamente usados para aumentar a eficiência dos coletores solares (Leong *et al.*, 2019). A suspensão de partículas sólidas em líquidos provoca um incremento na condutividade térmica da solução em relação à do fluido-base (Farhana *et al.*, 2019). Neste sentido, os materiais fototérmicos são a próxima geração de fluidos de transferência de calor, pois oferecem novas possibilidades de aumento do desempenho de troca de calor se comparados a líquidos puros.

Em muitos sistemas de troca de calor, há uma demanda para melhorar a condutividade térmica dos fluidos de trabalho para tornar esses fluidos mais eficientes, e isso pode ser feito pela dispersão de nanomateriais sólidos em líquidos convencionais. Masuda *et al.* (1993) propuseram a adição e dissolução de partículas sólidas ultrafinas em fluidos-base comumente utilizados em processos de troca de calor, isto aumentou a condutividade térmica do fluido, pois as partículas sólidas possuem condutividade térmica superior à dos fluidos convencionais.

A dessalinização de águas via energia solar apresenta certa limitação na quantidade de água dessalinizada e, como alternativa, temos à introdução de materiais na forma de nanopartículas e micropartículas para a formação de nanofluidos e microfluidos na água antes do processo de dessalinização.

A introdução de partículas inorgânicas para atuarem como materiais fototérmicos ao fluido-base tem sido bastante utilizada, como micropartículas de negro de fumo (Struchalin *et al.*, 2021), nanotubos de haloisita (Xia *et al.*, 2020), nanopartículas de ouro (Wang *et al.*, 2017), dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ) (Yao, *et al.*, 2020), nanopartículas de cobre (Cu), prata (Ag), zinco (Zn), silício (Si), ferro (Fe) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) (Amjad *et al.*, 2018), dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) (Mallah *et al.*, 2019), entre outros, com o intuito de maximizar a geração de vapor solar, bem como a eficiência de conversão fototérmica desse fluido, aumentando o rendimento da água tratada produzida. Portanto, a adição de materiais fototérmicos nos processos de dessalinização solar resulta em uma condutividade térmica superior à da água.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Aplicar o dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ), como material fototérmico, no processo de dessalinização solar com o intuito de maximizar a produção de água tratada.

### **2.2 Objetivos específicos**

No intuito de se atingir o objetivo geral, é necessário estipular alguns objetivos específicos, que serão os seguintes:

- Analisar as características físicas, químicas e morfológicas do  $\text{TiO}_2$ ;
- Adicionar 2,5% e 5% do material inorgânico no revestimento da bandeja;
- Testar a eficiência térmica do dessalinizador solar sem e com o material fototérmico;
- Analisar a qualidade físico-química da água antes e após o processo de dessalinização.



### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 Recursos hídricos globais

A água é um recurso fundamental à vida e renovável como podemos ver através do ciclo hidrológico, é utilizada principalmente em seu estado líquido para as condições do desenvolvimento de processos. O planeta Terra possui cerca de 70% de sua superfície cobertos por água. Porém essa quantidade não é de água doce. Estudos afirmam que cerca de 97% constituem água salgada, e os 3% restantes representam a quantidade de água doce da terra distribuídas nos polos, águas subterrâneas, rios e lagos (Manokar, 2014), sendo que apenas 0,25% se encontram em rios e lagos.

A água desempenha um papel extraordinário na economia mundial, visto que está em todos os produtos comercializados. A escassez da água gera consequências e impactos na economia de um país. Podemos citar entre tantos outros, o setor de alimentos, o fornecimento de energia elétrica e setor agrícola, os principais setores prejudicados com a escassez de água.

O Brasil apresenta cerca de um quinto das reservas hídricas do planeta Terra. Entretanto, vários estudos indicam a escassez de recursos hídricos em várias regiões do país. Podemos observar as desigualdades da distribuição de água em todo o globo terrestre, mostrando uma grande diferença da água disponível para consumo, por continente.

No Brasil, desde 2014, a situação hídrica vem se agravando, sendo a região sudeste a principal afetada. A atual crise hídrica do Brasil é considerada a pior da história. Avaliações e estudos indicam que a crise hídrica tende a continuar nos próximos anos. Isso porque a água não é bem distribuída no território brasileiro, podemos analisar que a região Norte concentra a maior parte de reservas hídricas do país e que também possui a menor densidade demográfica. Já o Sudeste e Nordeste, onde se encontra a maior parte das atividades industriais e população, existem poucas reservas hídricas.

No planeta Terra, há mais de 750 milhões de pessoas sem acesso à água potável. Países do Oriente Médio e África apresentam escassez hídrica considerável onde, acabam utilizando recursos hídricos contaminados. Segundo a UNESCO (2017), 80% da água residual no mundo são despejados sem tratamento. Ainda

segundo a Unesco, 56% de toda água doce captada no planeta se tornam água residual, ou seja, esgoto ou efluente industrial ou agrícola.

A geração de novas tecnologias e a gestão de recursos naturais devem evitar desperdícios, visto que, na maior parte no mundo, ela se encontra na forma salina, e a transformação em água doce pode ser uma saída cada vez mais aceita e pesquisada pelas técnicas de dessalinização (Villes, 2019).

Autoridades mundiais preveem um futuro incerto para a humanidade em razão do aumento da demanda por água doce e à escassez dos recursos hídricos, com os conflitos sendo intensificados pela poluição e pelas mudanças climáticas. Atualmente, a Organização das Nações Unidas (ONU) estima que mais de 2 bilhões de pessoas convivem com o iminente risco de reduzirem o acesso à água potável e, em 2050, a previsão é de que pelo menos 25% das pessoas viverão em algum país afetado pela escassez crônica ou recorrente de água doce (ONU, 2020).

### **3.2 Dessalinização de água**

A dessalinização, para obtenção de água potável, aumentou significativamente nos últimos 20 anos, países como a Arábia Saudita, EUA, Emirados Árabes, Kuwait e Japão possuem centrais de dessalinização em operação, produzindo mais de 80 milhões m<sup>3</sup>/dia de água doce, conseguindo abastecer mais de 300 milhões de pessoas com água potável. A Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA) publicou, em seu relatório sobre dessalinização e energias renováveis, que a dessalinização é a maior fonte de água para saciar a sede humana e irrigação no Oriente Médio, Norte da África e em algumas ilhas do Caribe (Gaiant, 2021).

No Brasil, estão sendo instaladas usinas de dessalinização de águas de mar, algumas incluídas no Programa Água Doce (PAD), criado em 2004, coordenado pelo Ministério do Meio Ambiente, do Governo Federal. Já foram construídas 65 delas para pequenas comunidades com baixa renda do Semiárido, a maioria em Pernambuco, na Paraíba e no Rio Grande do Norte, utilizando a técnica de dessalinização por osmose inversa. Porém, dentre as dificuldades na implantação dos equipamentos no Nordeste, destaca-se a falta de operações e manutenções adequadas, estimando-se que cerca de 30% dos equipamentos espalhados em pequenas comunidades do estado do Ceará, encontram-se inativos ou operando precariamente, pois os usuários

são carentes e dependem de investimento público para restaurar os dessalinizadores (Dubon; Pinheiro, 2001).

A dessalinização da água do mar em larga escala é uma alternativa antiga, que remonta à década de 1970 (Souza e Ferreira, 2016), em que navegadores tomaram a natureza como modelo, usando a evaporação solar para separar o sal da água do mar, e esse processo hoje vem se expandindo de forma grandiosa, por estudos para aperfeiçoar o desempenho, segurança, viabilidade econômica das técnicas existentes (Souza, 2006; Amorim *et al.*, 2004), principalmente nas regiões semiáridas e em países onde a água potável é escassa.

A dessalinização consiste em obter água para consumo através da remoção ou redução da concentração de sais e sólidos dissolvidos totais (SDT) na água salina. Neste processo, devem-se eliminar também outros componentes químicos, orgânicos e biológicos, a fim de se obter uma concentração de SDT que possa ser considerada aceitável (Gaio, 2016).

### **3.2.1 Processos de dessalinização**

Existem certos procedimentos comuns em todas as estações de dessalinização, independentemente da origem da água e da tecnologia utilizada no processo. Todo o processo de dessalinização compreende, de uma forma geral, cinco procedimentos que começam pela captação da água até o fornecimento da água já tratada e em condições de ser distribuída para o consumidor (Gaio, 2016).

Na primeira fase do processo de dessalinização, a água salina ou salobra é extraída da fonte e introduzida no sistema. Em sua maioria, se faz necessário um pré-tratamento da água: nesta fase há a remoção de impurezas como as algas e bactérias. Na fase 2, ocorre o processo de dessalinização, durante o qual é feito a remoção dos sólidos dissolvidos, incluindo sais e outras impurezas da água. Por fim, é necessário um pós-tratamento, pois, com o processo de dessalinização o nível de alcalinidade da água diminui, o que pode causar corrosões. Assim, para prevenir a corrosão das tubulações, deve-se ajustar a alcalinidade e o pH, repondo também as propriedades da água, necessárias ao consumo humano, retiradas pelo processo de dessalinização (Gaio, 2016).

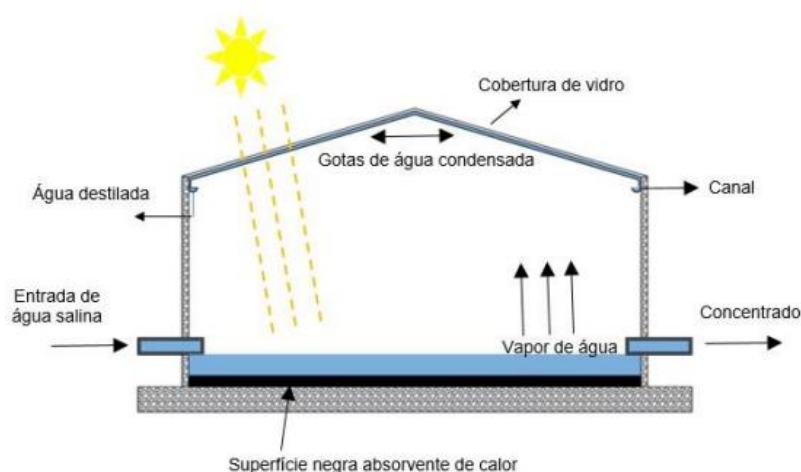
Os métodos de dessalinização podem ser divididos em processos de dessalinização térmica e em processos de dessalinização por membrana. A escolha

da tecnologia é guiada pela qualidade da fonte de água a ser tratada, custos, energia disponível, volume de água a ser produzido, entre outros fatores. Dentre esses, o fator mais crítico a ser considerado para determinar o tipo da tecnologia é a qualidade da água a ser dessalinizada, a concentração de seus sais decidirá qual é o processo que será mais adequado, já que as incrustações (*fouling*) e dimensionamento são levados em consideração (Burn, 2015). Assim, não existe um método melhor, existe um que se enquadra melhor para cada caso em particular.

Na dessalinização térmica, a água é evaporada e, em seguida, sofre condensação, imitando o ciclo natural da água. Essa técnica pode ser usada em conjunto com diversos tipos de destiladores solares, estes, com diferentes formatos. Entre alguns dos processos de dessalinização térmica estão a destilação de múltiplos estágios (MSF), a destilação de múltiplos efeitos (MED), a destilação compressão de vapor (VC) e a Destilação Solar (SD).

Na destilação solar, a água é inserida no sistema, onde é armazenada na bandeja de fundo preto. A radiação solar atravessa o vidro, aquecendo a água, assim, a evaporando. Ao condensar-se na parte interna do vidro, a água escorre e é recolhida em um compartimento, conforme visualizado na Figura 1.

**Figura 1** - Diagrama simplificado de um processo de Destilação Solar.



Fonte: Adaptado de Clayton (2006)

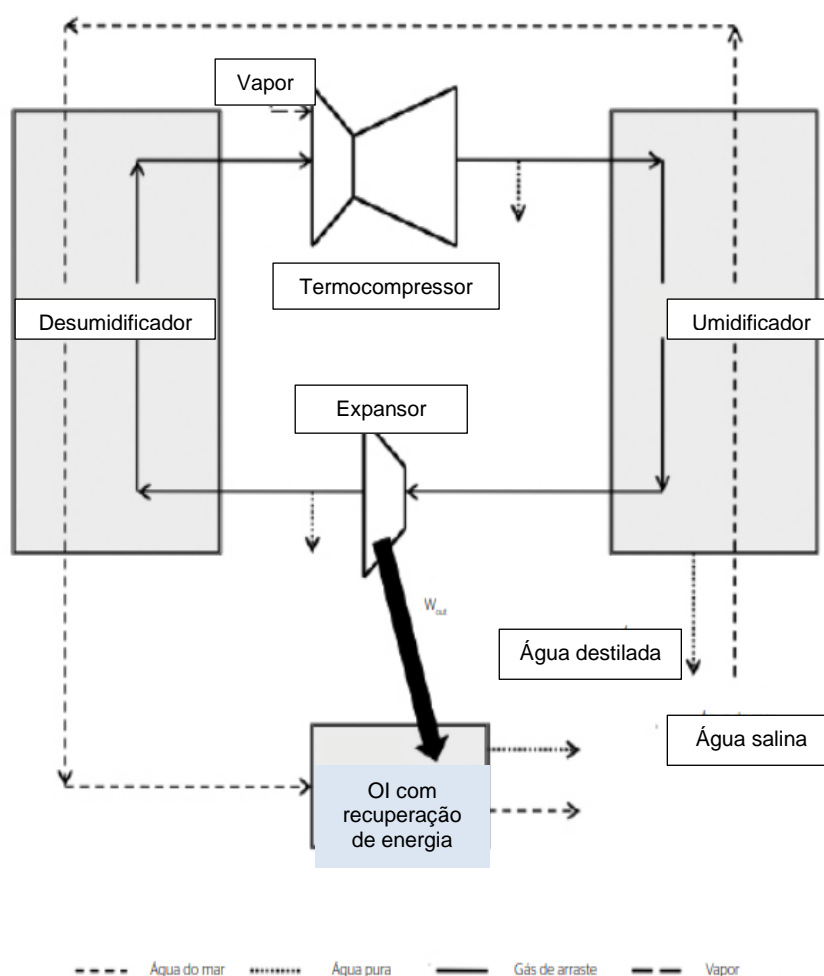
O processo MSF envolve o aquecimento da salmoura seguido de destilação em flash de múltiplos estágios e posterior recuperação de calor. Assim, essa técnica tem três seções importantes: aquecedor de salmoura, seções de rejeição de calor e recuperação de calor. Esse método tem sido usado por muitos anos e agora é o maior

setor da indústria de dessalinização sendo responsável por mais de 56% do total de água doce produzida pelas tecnologias de dessalinização (Tayyebi; Alishiri, 2014).

Analisando os métodos de dessalinização térmica podemos observar que, utilizando o MSF a água final do processo apresenta mais pureza em relação aos outros métodos, entretanto o custo do processo é mais alto. O método (MED) necessita utilizar altas temperaturas e área de transferência de calor adicional, o método (VC) utiliza o princípio de redução da temperatura do ponto de ebulição através da redução de pressão, e é operado com energia elétrica (Sampaio, 2016).

Os processos de dessalinização por membranas são por osmose inversa e eletrodialise. A osmose inversa (OI) é um processo por membrana semipermeável onde um fluxo de alimentação flui sob pressão, separando duas correntes aquosas com concentrações diferentes, uma rica em sal e a outra pobre em sal, podendo ser visto na Figura 2.

**Figura 2** - Dessalinização solar por umidificação e desumidificação acoplada à osmose inversa.

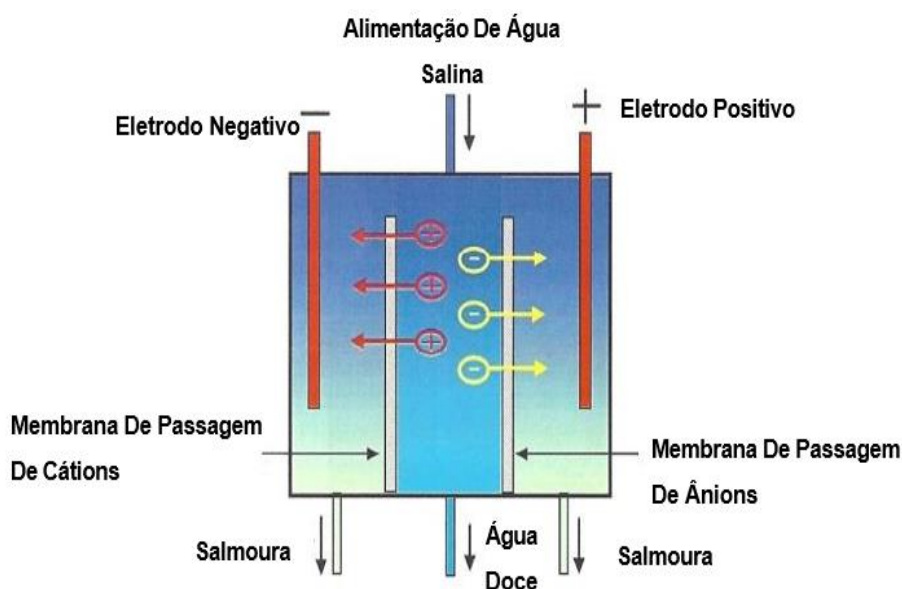


Fonte: Adaptado Campos *et al*, 2019.

A OI tem como elemento principal em seus sistemas de dessalinização as membranas. Segundo Mulder (1991), uma membrana é uma barreira que separa duas fases e que restringe total ou parcialmente o transporte de uma ou várias espécies químicas presentes nas fases.

O método eletrodialise (ED) utiliza energia elétrica e membranas semipermeáveis seletivas de íons, Figura 3, podendo o sistema ser composto por membranas catiônicas ou aniônicas. O processo de eletrodialise tem uma taxa alta de recuperação e consegue remover de 75% a 98% dos sólidos totais dissolvidos na água salobra, a uma pressão que varia de 5 a 7 bar (Younos; Tulou, 2005).

**Figura 3** - Esquema de sistema eletrodialise.



Fonte: Adaptado Cleyton (2006).

### 3.3 Dessalinização solar

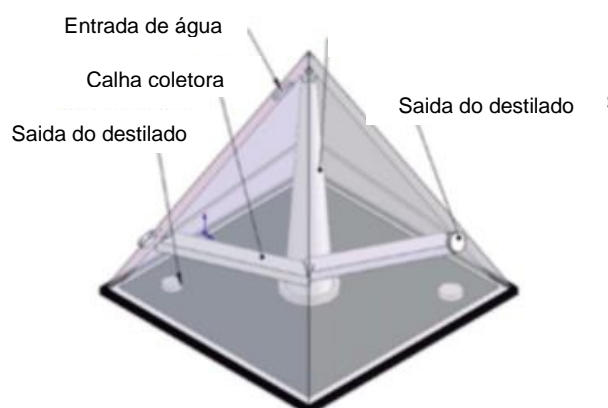
A escassez de água potável foi resultado do aumento da população mundial, assim como os resíduos gerados pela indústria. Os resíduos industriais estão a cada dia causando mais danos ao mundo, a deposição destes resíduos, de forma incorreta, acarreta o aumento da poluição de água, resultando em diferentes doenças, como insuficiência renal, danos no fígado, etc. Uma solução para esse cenário é utilizar a energia solar para tornar a água do mar, rios e lagos disponível para consumo, o sistema, quando utilizado para este fim, é chamado de dessalinização solar.

Os métodos de dessalinização movidos a energia solar são usualmente divididos em duas categorias: sistemas passivos e ativos. Os sistemas passivos são aqueles em que o processo de dessalinização e o ganho de calor ocorrem naturalmente no mesmo dispositivo, tal como acontece na destilação solar. Os sistemas ativos estão divididos em dois subsistemas: a unidade de dessalinização e a unidade de produção de energia. Esta energia é produzida recorrendo a tecnologias como coletores solares em placa, tubo em vácuo ou central de energia solar concentrada (Gaio, 2016). O sistema de dessalinização passivo deste trabalho será o dessalinizador do tipo pirâmide.

### ***3.3.1 Dessalinizador solar do tipo pirâmide***

Vários formatos de dessalinizadores têm sido testados com a finalidade de melhorar seu desempenho, o tipo pirâmide é considerado uma tecnologia simples, sua principal característica é possuir a possibilidade de captar a energia solar através de quatro faces, cada vidro possibilita absorção da radiação, assim, não sofrerá perda de rendimento decorrente do posicionamento solar. Esses dessalinizadores, reproduzem o ciclo natural da água: a radiação solar aquece a lâmina d'água contida em um recipiente raso de material condutor que é revestido por uma superfície negra; quando absorvida, a radiação e a elevação da temperatura, a água transforma-se em vapor; condensando ao entrar em contato com as faces da superfície da cobertura de vidro, com temperatura mais baixa. Logo após, a lâmina de água destilada é então coletada na parte lateral do dessalinizador. Ao evaporar, ficam contidos na bandeja os sais e as impurezas que havia na água (Carvalho, 2015). Na Figura 4, pode-se observar a estrutura de um dessalinizador piramidal.

**Figura 4** - Desenho esquemático de células piramidais de bases quadrada e triangular.



Fonte: Campos *et al.*, 2018

### **3.3.2 Fatores que afetam os processos de dessalinização solar**

Há fatores que exercem influência sobre a produtividade dos dessalinizadores solares, sendo eles: radiação solar, diferença de temperatura entre água e o vidro, intensidade do vento, temperatura ambiente, ângulo e área de cobertura do vidro da placa absorvedora, entre outros. Segundo Velmurugan e Srithar (2011), alguns fatores, como a intensidade do vento e da radiação solar, não podem ser controlados por serem fatores metrológicos. A variação dos demais, pode aumentar a produtividade da energia gerada pelo sol.

Um fator que pode se tornar um grande obstáculo é a variabilidade intrínseca da intensidade solar. Sua incidência sobre a superfície da terra é variável ao longo do dia, começando com pouca radiação e vai aumentando ao longo do dia, até atingir seu ponto máximo e depois vai diminuindo progressivamente até chegar a zero, no período noturno (Silva *et al.*, 2014).

Diante disso, aumento da radiação solar resulta no aumento da produtividade da energia solar, logo, intensidades de radiação solar mais altas resultam em aumento da temperatura da massa de água e facilitam o processo de evaporação (Nafey *et al.*, 2001). O material utilizado na cobertura de condensação é de grande importância, influenciando diretamente no processo de absorção de radiação solar. O aumento da radiação solar gera aumento do rendimento solar, isto está associado ao aumento das diferenças entre a temperatura da água a ser tratada e a da cobertura de vidro.



Com o aumento da diferença de temperatura entre a cobertura de vidro e a água da bandeja, haverá um aumento na sua circulação natural da massa de ar dentro do dessalinizador. Logo, considera-se como força motriz a diferença de temperatura entre a cobertura de vidro e a água (Sharshir, 2016).

Outro fator a ser considerado, são os fatores climáticos, dias em que o tempo está nublado ou chuvoso, a produção do destilado irá reduzir drasticamente. Há ainda variações por fatores sazonais, que aumentam a exposição e a intensidade solar no verão, e as diminuem no inverno. Em regiões mais próximas aos polos do globo terrestre, estes fatores, são mais intensificados, tornando os dias mais instáveis.

Com as eficiências térmicas solares limitadas, decorrentes das perdas de calor convectivo e emissivo, as alternativas para melhorias são restritas (Lee *et al.*, 2012), pois, há altas perdas de calor convectivo e emissivo de suas superfícies absorventes (Bhalla; Tyagi, 2018).

Além disso, as más propriedades ópticas e termofísicas dos fluidos de trabalho limitam a possibilidade de melhoria na eficiência térmica (Lee *et al.*, 2012). Dessa forma, com os recentes avanços na nanotecnologia, os pesquisadores fizeram muitas tentativas para melhorar a eficiência térmica desses sistemas, trazendo dispersões coloidais de nanopartículas, também chamadas de nanofluidos (NFs) (Gorji; Ranjbar, 2017).

Os nanofluidos são geralmente feitos de um fluido-base e nanopartículas de metais, óxidos, carbonetos ou nanotubos de carbono (CNTs) com diferentes morfologias complexas. Devido às propriedades termofísicas, reológicas e de absorção aprimoradas desses nanofluidos em relação aos fluidos de trabalho convencionais, como água ou etileno glicol, eles são meios de trabalho mais adequados para aplicações térmicas solares de alto desempenho (Gupta *et al.*, 2015).

### **3.4 Balanço térmico no processo de dessalinização**

Para um entendimento mais profundo dos processos de dessalinização solar, é essencial o conhecimento dos mecanismos responsáveis pela transferência de calor. As principais formas de transferência de calor incluem condução, convecção e radiação, não havendo mudanças de fases nestes processos. Outros dois fenômenos indispensáveis são os processos conhecidos como evaporação e condensação, são

processos em que há mudança de fase. Nos processos de dessalinização solar, esses modos de transferência de energia desempenham papéis significativos.

### **3.4.1 Transferência de calor por condução**

A condução de calor é um processo fundamental que pode ser descrito como a transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas dentro de um meio, resultante das interações entre elas. Essa interação pode ser expressa pela Equação 1 (Elango; Gunasekaran; Sampathkumar, 2015):

$$q_k = \frac{k}{L} \cdot A(T_{si} - T_{se}) \quad (1)$$

Onde,  $q$  (W) é a taxa de transferência de calor,  $k$  (W/m·K) é a condutividade térmica do material (W/m·K),  $L$  é a cobertura do vidro,  $A$  (m<sup>2</sup>) é a área através da qual o calor é transferido,  $T_{si}$  e  $T_{se}$  (°C) são as temperaturas da superfície interna da tampa do vidro e superfície externa do vidro, respectivamente.

Eltawil *et al.* (2019) investigaram a influência da condutividade térmica dos materiais utilizados em destiladores solares e concluíram que materiais com alta condutividade térmica aumentam significativamente a eficiência do sistema, promovendo uma transferência de calor mais eficaz e, conseqüentemente, uma maior taxa de evaporação da água.

Segundo Kabeel *et al.* (2020), ao analisar o impacto do gradiente de temperatura na eficiência de sistemas de dessalinização solar, concluíram que os resultados encontrados, mostraram que um maior gradiente de temperatura, resulta em uma diferença significativa entre a temperatura da superfície de aquecimento e a temperatura ambiente, melhora a taxa de transferência de calor e a eficiência do sistema.

Compreender os princípios da condução de calor e a aplicação da Lei de Fourier é essencial para a análise e otimização dos processos térmicos em sistemas de dessalinização solar. A eficiência desses sistemas depende diretamente da eficácia da transferência de calor, impactando significativamente o desempenho geral do processo.

### 3.4.2 Transferência de calor por convecção

A transferência de calor em dessalinizadores solares ocorre predominantemente por convecção, um processo fortemente influenciado por diversos fatores, dentre eles, as propriedades do fluido, do escoamento e da geometria do dessalinizador (Fath *et al.*, 2020).

É um processo essencial nos sistemas térmicos, ocorrendo quando um fluido, como ar ou água, entra em contato com uma superfície cuja temperatura é maior do que a de sua vizinhança.

Neste contexto, o fluido em contato com a superfície quente tem sua temperatura aumentada, resultando em expansão térmica. Devido à redução de densidade, esse fluido aquecido sobe, enquanto o fluido circundante, mais frio e mais denso, desce para ocupar o espaço deixado pelo fluido quente, estabelecendo assim uma circulação convectiva (Kalogirou, 2019).

A principal equação que descreve os fenômenos de transferência de calor por convecção pode ser expressa pela Equação (2) (Almajali *et al.*, 2024):

$$q_{c,a-vi} = h_{c,a-vi} \cdot A_a \cdot (T_a - T_{vi}) \quad (2)$$

No qual,  $T_a$  (°C) corresponde à temperatura da água e  $T_{vi}$  (°C) é a temperatura do vidro interno e  $h_{c,a-vi}$  ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ) é o coeficiente convectivo de transferência de calor entre a superfície da água e a superfície interna da cobertura, que pode ser encontrado através da Equação (3):

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

Sendo,  $P_a$  pressão parcial do vapor de água na superfície da água e  $P_{vi}$  superfície interna da cobertura do vidro, podendo ser calculadas pelas Equações (4) e (5):

$$P_a = \exp \left( 25,317 - \frac{5144}{T_a + 273,15} \right) \quad (4)$$

$$P_{vi} = \exp \left( 25,317 - \frac{5144}{T_{vi} + 273,15} \right) \quad (5)$$

Compreender os princípios da convecção é essencial para a análise e otimização dos processos térmicos em sistemas de dessalinização solar. A eficiência desses sistemas depende diretamente da eficácia da transferência de calor por convecção, impactando significativamente o desempenho geral do processo.

### 3.4.3 Transferência de calor por radiação

No contexto de um destilador solar, a radiação térmica se manifesta devido à presença de um meio mais frio entre a água e o exterior do equipamento. A taxa de transferência de calor por radiação entre a superfície da água e a superfície interna do vidro do destilador solar é determinada pela diferença de temperatura entre essas superfícies e a emissividade dos materiais envolvidos.

A Equação 6 descreve a transferência de calor por radiação (Almajali *et al.*, 2024):

$$q_{R,a-vi} = h_{R,a-vi} \cdot A_a \cdot (T_a - T_{vi}) \quad (6)$$

Onde,  $h_{R,a-vi}$  ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ) é o coeficiente de transferência radiativo entre a superfície da água e a superfície interna do vidro, este, podendo ser obtido através da Equação 7.

$$h_{R,a-vi} = \varepsilon_{ef} \cdot \sigma [(T_a + 273,15)^2 + (T_{vi} + 273,15)^2] \cdot (T_a + T_{vi} + 546,3) \quad (7)$$

Onde,  $\sigma$  representa a constante de Stefan-Boltzmann de valor definido, sendo  $5,67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ .  $\varepsilon_{ef}$  trata-se da emissividade efetiva entre água e a superfície interna do vidro, sendo obtida através da Equação 8.

$$\varepsilon_{ef} = \left( \frac{1}{\varepsilon_a} + \frac{1}{\varepsilon_v} - 1 \right)^{-1} \quad (8)$$

Onde,  $\varepsilon_a$  representa a emissividade da água e  $\varepsilon_v$  a emissividade da cobertura do vidro.

A aplicação de revestimentos com alta emissividade nas superfícies internas do destilador pode aumentar a eficiência do processo de radiação térmica, enfatizando que a escolha dos materiais com alta emissividade melhora significativamente a eficiência dos dessalinizadores solares, aumentando a taxa de evaporação da água (Kabeel *et al.*, 2020)

Compreender os princípios da transferência de calor radiativo é essencial para a análise e otimização dos processos térmicos em sistemas de dessalinização solar. A eficácia da transferência de calor radiativo impacta diretamente a eficiência e a viabilidade desses sistemas, tornando esse conhecimento crucial para avanços tecnológicos no campo.

#### **3.4.4 Transferência de calor por evaporação**

A transferência de calor por evaporação é um mecanismo que ocorre entre a água e o vapor de água na interface do vidro. Esse processo é fundamental para a eficiência do destilador solar, pois a taxa de transferência de calor evaporativo determina a quantidade de água que pode ser convertida de líquido para vapor e, posteriormente, condensada como água dessalinizada (Mina *et al.*, 2021). A taxa entre a água e a superfície interna do vidro é expressa pela Equação (9).

$$q_{E,a-vi} = h_{E,a-vi} \cdot A_a \cdot (T_a - T_{vi}) \quad (9)$$

Onde,  $h_{E,a-vi}$  ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ) corresponde ao coeficiente de transferência de calor evaporativo entre a água e a cobertura de vidro interna, expressa por meio da Equação (10).

$$h_{E,a-vi} = 16,273 \times 10^{-3} \cdot h_{C,a-vi} \frac{(P_a - P_{vi})}{(T_a - T_{vi})} \quad (10)$$

O coeficiente total de transferência de calor  $h_{T,a-vi}$  ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ) é obtido através do somatório dos coeficientes convectivo, radiativos e evaporativo, como apresentado na Equação (11).

$$h_{T,a-vi} = h_{C,a-vi} + h_{R,a-vi} + h_{E,a-vi} \quad (11)$$

### 3.4.5 Condensação

O fenômeno da condensação ocorre quando a fase vapor de uma substância se transforma em líquido. Para a formação dessa nova fase, o sistema deve experimentar um desequilíbrio térmico, mecânico ou de concentração de massa, pois a transformação de fase requer uma variação no equilíbrio existente (Zhao *et al.*, 2021).

Quando o vapor entra em contato com uma superfície cuja temperatura está abaixo da temperatura de saturação do vapor, ocorre um desequilíbrio térmico, levando o vapor a se condensar e formar o condensado. Este processo é modelado utilizando equações de transferência de calor e massa, que são essenciais para a compreensão e otimização do desempenho de dessalinizadores solares (Li *et al.*, 2020).

## 3.5 Eficiência dos dessalinizadores

A eficiência dos dessalinizadores é um parâmetro crucial na avaliação do desempenho de um dessalinizador solar, podendo ser avaliada sob dois critérios principais: eficiência horária e eficiência diária.

A eficiência horária é definida pela relação entre o calor latente médio gerado pela água produzida a cada hora e a quantidade total de energia solar absorvida durante o mesmo período.

A variação na radiação solar ao longo do dia resulta em uma variação horária na eficiência da energia solar. Durante períodos de maior radiação, a eficiência tende a aumentar, refletindo a maior produção de água destilada. Em contrapartida, em momentos de menor incidência, a eficiência diminui, evidenciando a influência direta da disponibilidade de energia solar no desempenho do destilador (Silva *et al.*, 2024).

Esse entendimento detalhado das variações horárias na eficiência é essencial para aprimorar a operação de destiladores solares e desenvolver tecnologias que maximizem a produção de água potável em diferentes condições de irradiância solar.

A eficiência térmica horária e diária do dessalinizador solar por ser obtida, respectivamente, através das seguintes Equações 12 e 13 (Dhaoui *et al.*, 2024):

$$\eta_h = \frac{(M_a \times \lambda_a) / 3600}{(A_p \times I)} * 100 \quad (12)$$

(13)

$$\eta_D = \frac{1}{n} \sum_n \eta_h * 100$$

Onde,  $M_a$  (kg) é a produção horária de água,  $\lambda_a$  (J.Kg<sup>-1</sup>) o calor latente da água,  $A_p$  (m<sup>2</sup>) corresponde a área da placa,  $I$  (W.m<sup>-2</sup>) é a intensidade de irradiação solar, por fim,  $n$  é a quantidade de horas do experimento (Mandev *et al.* 2024).  $\lambda_a$  é dado através da Equação 14.

$$\lambda_a = (2501,9 - 2,40706 T_a + 1,192217 \times 10^{-3} T_a^2 - 1,5863 \times 10^{-5} T_a^3) \times 10^3 \quad (14)$$

### 3.6 Nanofluidos

A união de nanopartículas com fluido-base é denominada de nanofluidos e considera (1nm=10<sup>-9</sup> m) a escala nanométrica. Atualmente, os nanofluidos estão sendo muito estudados por apresentarem uma condutividade térmica muito superior ao fluido-base e também permitem uma melhoria para os processos de transferência de calor.

As nanopartículas apresentam propriedades ópticas diferentes, do metal que lhes deu origem, o que leva a uma excelente propriedade de fotoabsorção. Considerando-se este fato, as nanopartículas trazem um aumento considerável na transferência de calor do nanofluido, sendo que este nada mais é do que uma dispersão coloidal de nanopartículas de um metal ou de óxido de metal em solução líquida, por exemplo, aquosa. Experimentos com nanopartículas absorvendo energia solar no volume de líquido são recentes (Bandarra Filho *et al.*, 2014; Moghadam *et al.*, 2014). Comparando-se com as partículas de tamanho não nanométrico, as nanopartículas oferecem o benefício adicional de aumento exponencial da superfície de contato para o mesmo volume de partículas.

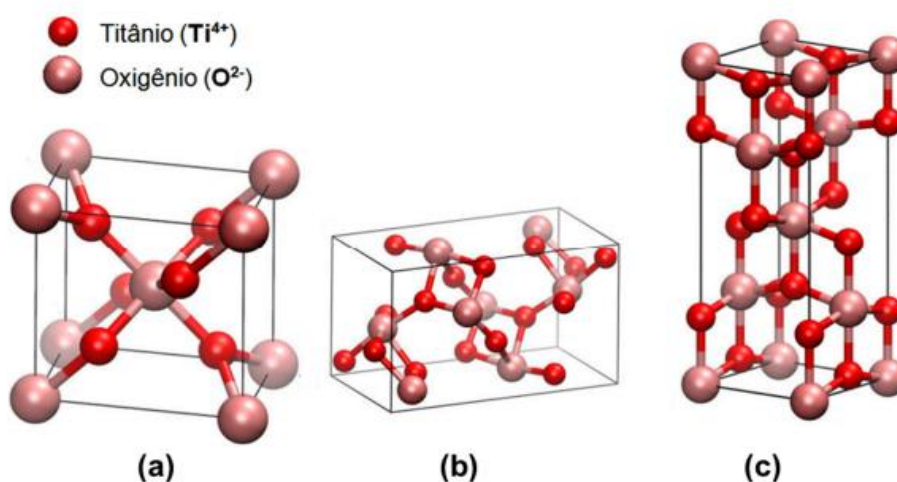
A utilização de partículas sólidas em suspensão nos fluidos tem o objetivo principal de aumentar a condutividade térmica, porém esta propriedade termofísica não é a única que influencia na transferência de calor, pois ao inserir nanopartículas nos fluidos formando assim os nanofluidos alteram-se outras propriedades do fluido-base como o calor específico, a massa específica e a viscosidade (Menezes, 2015).

Um dos principais fatores que influenciam a condutividade térmica dos nanofluidos é a concentração de nanopartículas que apresenta relação direta no incremento da condutividade térmica do nanofluido, pois os materiais das nanopartículas possuem condutividade térmica bem maior que a do fluido-base (Philip; Shima, 2012). Além da concentração de nanopartículas outros efeitos são atribuídos ao aumento da condutividade térmica do nanofluido, dentre eles podem ser citados o efeito da natureza da nanopartícula, o efeito do tamanho e forma das nanopartículas, o efeito da temperatura do nanofluido, o efeito de aditivos como dispersantes e o efeito da acidez (Menezes, 2015).

### 3.6.1 Dióxido de titânio

O dióxido de Titânio ( $\text{TiO}_2$ ) é um polimorfo. É composto por três fases: Rutilo (tetragonal) formada em altas temperaturas ( $>1000^\circ\text{C}$ ), Anatase (tetragonal) é formada a partir de baixas temperaturas ( $450^\circ\text{C}$ ) e Brookita (ortorrômbico) é instável, tornando-a de baixo interesse (Baur, 1961; Cromer; Herrington 1955). Suas estruturas são ordenadas em cadeias de octaedros de  $\text{TiO}_6$ , onde o titânio apresenta a mesma valência nas três fases ( $\text{Ti}^{4+}$ ), com 6 átomos de oxigênio ( $\text{O}^{2-}$ ), formando assim, a geometria octaédrica (Diebold, 2003), como apresentado na Figura 5.

**Figura 5** - Estruturas cristalinas do  $\text{TiO}_2$ : a) Rutilo, b) Brookita e c) Anatase, representadas por cadeias de octaedros.



Fonte: Adaptado de Moellmann *et al.*, 2012



Na anatase há quatro bordas compartilhadas por octaedro, no rutilo há duas arestas comuns com outros octaedros, já na brookila há três. De acordo com a regra da eletrostática, rutilo é a estrutura mais estável do  $\text{TiO}_2$  (Muller, 2007; Carp *et al.*, 2004).

As três fases do dióxido de titânio podem ser encontradas naturalmente como minerais ou podem ser obtidas sinteticamente em laboratório, porém somente as fases anatase e rutilo são produzidas de modo comercial (Cardoso *et al.*, 2010). As diferenças existentes nas estruturas causam diferentes densidades de massa da banda eletrônica entre as fases do  $\text{TiO}_2$ , determinam suas propriedades e aplicação (Chen e Mao, 2007).

**Tabela 1** - Propriedades do Dióxido de Titânio.

Material Fototérmico	Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )	Condutividade térmica (W/m.k)	Calor específico (kJ/kg.K)	Ponto de fusão (°C)
TiO <sub>2</sub>	4230	8,4	0,692	1843

Fonte: Ruchir *et al.*, 2022.

Por ser um material atóxico, insolúvel, com estabilidade química em ampla faixa de pH, tem sido utilizado em diversas áreas da tecnologia e indústrias. Onde, suas principais aplicações ganharam destaque em sensores de gás, protetores de corrosão, células solares e purificação de meio ambiente. Suas propriedades se tornam superiores se apresentar área superficial, tamanho de partículas em escala nanométrica e alta homogeneidade.

### 3.7 Estado da arte

Sahota e Tiwari (2016) estudaram e obtiveram uma expressão analítica da equação característica do destilador solar passivo de dupla inclinação (DSSS) para três nanofluidos diferentes. A análise foi realizada para concentração otimizada (0,25%) de nanopartículas metálicas. Uma maior eficiência energética térmica foi obtida para os nanofluidos ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow 50,34\%$ ;  $\text{TiO}_2 \rightarrow 46,10\%$ ; e  $\text{CuO} \rightarrow 43,81\%$ ) em relação ao fluido base (37,78%). A exergia térmica também foi maior para nanofluidos ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow 14,10\%$ ,  $\text{TiO}_2 \rightarrow 12,38\%$  e  $\text{CuO} \rightarrow 9,75\%$ ) em comparação com o fluido base (4,92%).

Asadi *et al.* (2017) avaliaram a eficiência de transferência de calor do nanofluido híbrido  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -MWCNT/óleo térmico em diferentes temperaturas (25-50 °C) e

concentrações de sólidos (0,125%–1,5%). Verificaram que o nanofluido apresentou comportamento newtoniano ao longo da faixa estudada de temperaturas e concentrações de sólidos. A viscosidade dinâmica apresentou tendência crescente à medida que a concentração de sólidos aumentou. Verificaram também, que o aumento mínimo da viscosidade dinâmica foi na temperatura de 50 °C em todas as concentrações sólidas estudadas, exceto 0,5% e 1%. Quanto à condutividade térmica, esta apresentou tendência crescente à medida que a temperatura e a concentração de sólidos aumentaram. O aumento máximo, de aproximadamente 45%, foi na temperatura de 50 °C e concentração de sólidos de 1,5%. Foi verificado que o uso deste nanofluido, em vez do fluido base, pode ser benéfico em todas as concentrações e temperaturas de sólidos estudados para ambos os regimes de fluxo laminar interno e turbulento, exceto as concentrações de sólidos de 1 e 1,5% em regimes de fluxo turbulento interno. O efeito da adição de nanopartículas na potência de bombeamento e no coeficiente de transferência de calor por convecção também foi teoricamente investigado.

Saeedi, Akbari e Toghraie (2018) analisaram, experimentalmente, a viscosidade dinâmica do nanofluido composto de CeO<sub>2</sub>-Etilenoglicol em 25-50 °C com intervalos de 50 °C e em seis frações de volume (0,05, 0,1, 0,2, 0,4, 0,8 e 1,2%), experimentalmente. O nanofluido foi exposto a ondas de ultrassom por várias vezes para estudar o efeito desse parâmetro na viscosidade dinâmica do fluido. Descobriram que a uma temperatura constante, a viscosidade do nanofluido aumenta com o aumento da fração de volume das nanopartículas. Além disso, em uma determinada fração de volume, a viscosidade do nanofluido diminui quando a temperatura é aumentada. O aumento máximo na viscosidade do nanofluido em comparação com a viscosidade do fluido de base ocorre a 25 °C e fração de volume de 1,2%. Pode-se inferir que a relação matemática obtida é um modelo de predição adequado para estimar a viscosidade dinâmica do CeO<sub>2</sub>-Etilenoglicol (EG) em diferentes frações volumétricas e temperaturas e seus resultados foram consistentes com resultados laboratoriais na fração volumétrica e faixas de temperatura definidas.

Esmaeilzadeh, Teja e Bakhtyari (2019), obtiveram resultados que confirmam que a condutividade térmica e viscosidade de nanofluidos aumentaram com o aumento da fração volumétrica da bentonita/n-pentadecano. Além disso, a condutividade térmica efetiva e a viscosidade diminuem com o aumento da temperatura, seguindo o comportamento do fluido base. A taxa de cisalhamento em

sua viscosidade revelou um comportamento não newtoniano, onde a tensão de cisalhamento não é diretamente proporcional à taxa de deformação.

Kabeel *et al.* (2019) realizaram um estudo sobre um novo dessalinizador solar tipo piramidal cuja bandeja foi revestida com nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  misturadas com tinta preta com finalidade de analisar o seu desempenho sob as diversas profundidades de água. As profundidades da água variaram de 1 cm a 3,5 cm em uma área de bandejas de  $0,25\text{m}^2$  que é quase igual à área da tampa de vidro. Os resultados experimentais revelaram que o uso de nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  na tinta preta aumentou a temperatura da água em  $1,5\text{ }^\circ\text{C}$  em comparação ao não uso de  $\text{TiO}_2$ . Com aumento profundidade da água na bandeja, a temperatura da água foi mínima o que resultou em um menor rendimento no dessalinizador sem revestimento, enquanto o que foi revestido o rendimento melhorou em 12%.

Wahab *et al.* (2019) forneceram uma revisão abrangente sobre as aplicações de nanofluidos em sistemas de energia solar como coletores solares, células fotovoltaicas, destiladores solares e armazenamento de energia térmica. O efeito de vários parâmetros críticos, incluindo taxa de fluxo de nanofluido, concentração de nanopartículas no fluido de base, tamanho e tipo de nanopartículas, sobre a eficiência dos sistemas solares, é cuidadosamente analisado por meios gráficos. A comparação é feita entre o desempenho do nanofluido e do fluido base em termos de melhorias de eficiência elétrica e térmica para todos os sistemas de energia solar. O efeito das nanopartículas na temperatura de saída do fluido de trabalho, redução da área do sistema solar, eficiência óptica, potência de bombeamento e fator de atrito do fluido de trabalho também foram analisados. Os resultados sugerem que o nanofluido tem um enorme impacto na transferência de calor e na eficiência geral do sistema em comparação com o fluido base em sistemas de energia solar.

Sajid e Bicer (2020) demonstraram uma revisão abrangente sobre os mais recentes desenvolvimentos relacionados à absorção do espectro solar, transmitância e características de dispersão de nanofluidos para aplicações potenciais na divisão do espectro solar e comprimento do caminho óptico nas características de absorção, transmitância e espalhamento do espectro solar de nanofluidos são revisados e discutidos em detalhes. As aplicações atuais e potenciais de nanofluidos como divisores de espectro solar também são mencionadas. Expressões matemáticas e modelos usados nos estudos revisados para cálculo de propriedades ópticas também são compilados. A maioria dos estudos concorda que o aumento do tamanho e

concentração das nanopartículas pode aumentar a absorção óptica do nanofluido. O comprimento do caminho óptico desempenhou um papel significativo na absorbância radiativa dos nanofluidos. A transmitância se deteriorou com o aumento do comprimento do caminho óptico, tamanho e concentração das nanopartículas. O fenômeno de espalhamento foi notável para nanopartículas com tamanho superior a 50 nm. A aglomeração de nanopartículas pode fortalecer o espalhamento e assim aumentar o coeficiente de extinção.

Xia *et al.* (2020) empregaram nanotubos de haloisita (Hal) (HNT) e óxido de grafeno (GO) como matérias-primas para produzir materiais solares fototérmicos eficientes (chamados de GO-HNT). A geração de vapor solar assistida por materiais fototérmicos tem atraído grande atenção devido às suas vantagens de excelente taxa de evaporação e alta eficiência de conversão fototérmica. O GO-HNT preparado tem uma boa porosidade, excelente absorção de luz de 90% e bom desempenho de isolamento térmico (condutividade térmica  $0,162 \text{ W m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ). Com base nessas características, o GO-HNT pode ser utilizado como um promissor receptor solar. Correspondentemente, a eficiência de conversão de energia solar do receptor solar GO-HNT foi medida para ser 83,67%, 77,17% e 77,05% respectivamente sob diferentes percentuais de irradiações solares. Como uma argila nanocristalina 1D mineral, HNT tem grandes vantagens de ser um material ecologicamente correto, custo-benefício e disponibilidade comercial com reservas abundantes. Em combinação com seu método de fabricação simples e escalável, este sistema solar baseado em GO-HNT receptor pode ter grandes potenciais para uma ampla gama de aplicações, como dessalinização de água do mar, destilação, esterilização e tratamento de esgoto.

Parikh *et al.* (2022) fizeram uso de nanopartículas de dióxido de titânio para aumentar o rendimento do destilador solar. Eles misturaram o dióxido de titânio em uma tinta preta, com concentrações de 20% e 40% (p/v). Para verificar o rendimento da produtividade, foram feitas leituras em diferentes profundidades da água, como 10mm, 15 mm e 20 mm. A leitura desses experimentos foi comparada com um destilador solar convencional no mesmo local (Gandhinagar, Índia, 23,2156°N, 72,6369°E) nas mesmas condições ambientais. O resultado do experimento mostrou que em maior profundidade a produtividade da energia solar ainda aumenta até um certo limite. Descobriram que, em comparação com o dessalinizador convencional,

ainda há um aumento de 11–18% e 20–23% na produtividade com mistura dos percentuais 20% e 40%.

Farouk *et al.* (2022) apresentaram uma formulação de modelagem matemática para prever o desempenho térmico do destilador solar piramidal usando a técnica de metodologia de superfície de resposta (MSR), para ser aplicada em destiladores solares sob diferentes parâmetros ambientais e tipos e concentrações de nanopartículas. Os parâmetros climáticos considerados mais influentes no processo foram a intensidade solar, a temperatura ambiente e a velocidade do vento. Os modelos de regressão para prever as respostas dos parâmetros de desempenho foram desenvolvidos usando MSR e uma estrutura composta central de quatro fatores e cinco níveis. Foram utilizados três nanomateriais diferentes (óxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ), óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e óxido de cobre ( $\text{Cu}_2\text{O}$ )). Os nanomateriais foram selecionados de acordo com suas propriedades ópticas, termofísicas e de transferência de calor.

Sharshir *et al.* (2022), usaram como teste duas unidades de destilação solar em formato de pirâmide, sendo uma unidade tradicional e a outra uma unidade de destilação solar piramidal modificada com material de pavio, refletores, resfriamento de cobertura de vidro e adição de nanopartículas de  $\text{TiO}_2$ . Utilizando 5 situações comparativas. Onde, no Caso 1 utilizou a destilação solar piramidal modificada com pavio suspenso. Caso 2 utilizou destilação solar piramidal modificada com pavio suspenso e resfriamento de vidro. Caso 3, destilação solar piramidal modificada com pavio suspenso e refletores. Caso 4, destilação solar piramidal modificada com pavio suspenso, resfriamento de vidro e refletores. Por fim, caso 5, destilação solar piramidal modificada com pavio suspenso, resfriamento de vidro, refletores e partículas nano- $\text{TiO}_2$ . Tendo o Caso 5 com melhores resultados, quando comparado com os demais.

Hamzat *et al.* (2022) realizaram uma revisão sobre o papel dos nanofluidos em vários sistemas de dessalinização movidos a energia solar, coletores solares de calha parabólica, coletores solares de placa plana, pratos solares, coletores solares de absorção direta, coletores solares de tubo evacuado, fogões solares e sistema térmico fotovoltaico. O desempenho do coletor foi comparado com nanofluido e fluido de convecção como fluido de trabalho com base no desempenho da transferência de calor, exergia e melhoria da eficiência energética e melhoria da eficiência térmica. Foi verificado que o aprimoramento máximo do desempenho do coletor é obtido usando

nanofluido. Mais água doce foi produzida com entrada de baixa energia em um sistema de dessalinização movido a energia solar baseado em nanofluido.

Dhaoui *et al.* (2024) investigou o impacto de diferentes configurações de destiladores solares, com foco nos projetos de destiladores solares em pirâmide e destiladores solares de inclinação dupla. A eficiência energética foi calculada ao longo de vários dias para determinar o efeito do número de aletas angulares ( $3 \times 3$ ), ( $3 \times 5$ ) e ( $3 \times 7$ ) no desempenho de ambos os destiladores solares e para comparar as duas configurações. Os resultados mais favoráveis foram obtidos usando uma placa absorvedora com aletas angulares ( $7 \times 3$ ). O sistema de dessalinização piramidal com uma placa absorvedora sem aletas anguladas atingiu uma eficiência energética de 26,18%, enquanto a sistema dupla inclinação equipado de forma semelhante atingiu uma eficiência energética de 22,39%. Em relação à eficiência exérgica, o piramidal mostrou uma eficiência energética média diária sem aletas anguladas de 1,94%, mas o uso de aletas anguladas ( $7 \times 3$ ) aumentou para 2,66%, o maior valor observado. Da mesma forma, a eficiência de energética do sistema de dupla inclinação começou em 1,54% sem aletas, mas atingiu 2,15% com aletas ( $7 \times 3$ ). No geral, porém, o piramidal superou consistentemente a dupla inclinação em termos de eficiência energética nas várias configurações de placas absorvedoras. Essas descobertas ressaltam a eficácia do uso de placas absorvedoras com aletas para aumentar a taxa de evaporação e melhorar a eficiência geral dos destiladores solares.

Elashmawy *et al.* (2024) realizaram revisão com base em uma análise bibliométrica da literatura disponível sobre dessalinização de destilador solar para analisar os principais periódicos, autores, financiamento, países, palavras-chave e documentos na área de pesquisa. Um número considerável de revisões na literatura para destiladores solares foi encontrado com um grande foco nas técnicas e economia desenvolvidas. O estudo abrangeu os materiais usados para desenvolver o design do destilador solar, além dos materiais usados para dar suporte à operação do dispositivo, como materiais de mudança de fase e nanomateriais. O estudo destaca as lacunas de conhecimento relacionadas aos materiais usados para desenvolver e avaliar o destilador solar e descobrir as necessidades futuras de desenvolvimento. Os resultados e a análise deste estudo servirão como norte para os pesquisadores com a finalidade de concentrarem nos pontos de pesquisa mais eficazes para o desenvolvimento e a disseminação mais rápida de tecnologias de dessalinização de

água solar como uma alternativa limpa em vez de sistemas de dessalinização de água de combustível fóssil.

A partir dos estudos relacionados com a utilização de nanofluidos em sistemas de dessalinização solar, percebe-se que dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ), cobre (Cu), óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de cério ( $\text{CeO}_2$ ) e óxido de cobre (CuO) estão bem consolidados em aplicações para esta tecnologia. Contudo, diante da presente pesquisa, a utilização do  $\text{TiO}_2$  em sistemas de dessalinização solar, se mostra pouco explorado, tendo aplicabilidade em dessalinizadores solares do tipo pirâmide e utilizando diferentes percentuais, possibilitando boas perspectivas na utilização deste material para melhorar a eficiência térmica dos dessalinizadores.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Pesquisa em Ciências Ambientais - LAPECA, do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - DESA do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual da Paraíba – UEPB (Figura 6) em parceria com os Laboratórios de Desenvolvimento de Membranas - LDM e de Caracterização de Materiais - LCM da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais - UAEMa do Centro de Ciências e Tecnologia - CCT da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG.

**Figura 6** – Mapa com a localização dos experimentos.



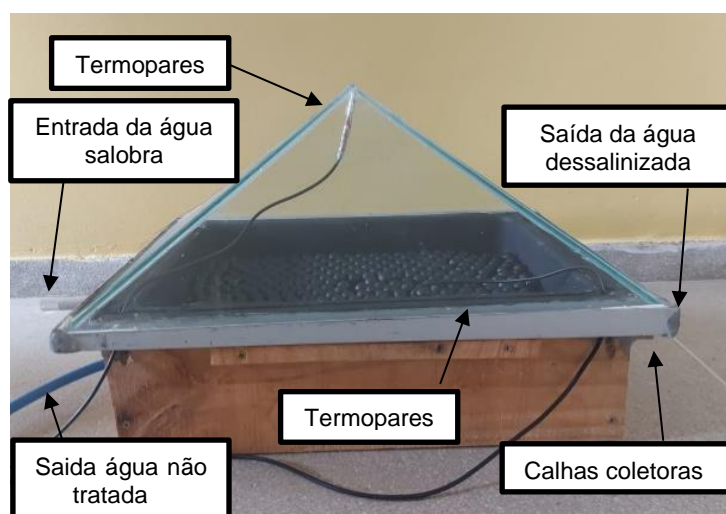
Fonte: Google Earth, (2024).

### 4.1 Protótipo do dessalinizador solar

No experimento foram utilizados três dessalinizadores solares do tipo pirâmide assimétrico (Figura 7), que operaram simultaneamente, alimentados por um sistema de alimentação contínua, por gravidade. Suas bandejas retangulares são de alumínio, medindo 0,44 m de comprimento, 0,30 m de largura e 3 mm de espessura, uma área de 0,132 m<sup>2</sup>, pintadas de preto, assim, aumentando a absorção da radiação solar. Sua cobertura foi de polimetilmetacrilato (PMMA), o que proporcionou menor custo, quando comparado ao vidro. O destilado é coletado pela calha e contabilizados em uma proveta. As laterais internas e a base são isoladas com uma manta térmica e sua parte externa são isoladas por madeira, enquanto seu interior foi revestido com lã de vidro evitando a dissipação de calor.



**Figura 7** - Dessalinizador solar do tipo pirâmide assimétrico.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

A cobertura transparente de PMMA possui 3 mm de espessura, que permite a transmissão da radiação solar e a reflexão da radiação térmica, reduzindo perdas de energia, resultando, no aumento da temperatura da água salobra. Os parâmetros construtivos do dessalinizador são apresentados na Tabela 2:

**Tabela 2** - Parâmetros construtivos e operacionais do dessalinizador.

Descrição	Nomenclatura	Valor	Unidade	Autores
Área do PMMA	$A_p$	0,28	m <sup>2</sup>	Trabalho atual
Emissividade da água	$\varepsilon$	0,95	--	Dumka e Mishra, (2020)
Área da água	$A_b$	0,132	m <sup>2</sup>	Trabalho atual
Absorvidade do PMMA	$\alpha_m$	0,05	--	Caruana, Abela e Refaloe, (2021)
Área da bandeja	$A_b$	0,132	m <sup>2</sup>	Trabalho atual
Condutividade Térmica da água	$K_a$	0,67	W.m <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup>	Maddah <i>et al.</i> , (2020)
Absorvidade da água	$\alpha_a$	0,05	--	Dumka e Mishra, (2020)
Transmitância do PMMA	$\tau_m$	0,92	--	Alatawi, <i>et al.</i> , (2022)
Condutividade Térmica da bandeja	$K_b$	240	W.m <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup>	Dumka e Mishra, (2020)
Absorbância da bandeja	$\tau_{al}$	0,42	--	Maddah <i>et al.</i> , (2020)
Transmitância água	$\tau_a$	0,95	--	Abu-arabi <i>et al.</i> , (2020)
Condutividade térmica isolante	$K_i$	0,11	W.m <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup>	Abu-arabi <i>et al.</i> , (2020)
Área isolante	$A_i$	0,38	m <sup>2</sup>	Trabalho atual
Condutividade Térmica PMMA	$K_m$	0,19	W.m <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup>	Kabeel <i>et al.</i> , 2020

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

## **4.2 Material fototérmico**

O material fototérmico utilizado para o desenvolvimento desta pesquisa foi o dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>) P-25, identificado como Aeroxide® com grau de pureza de 99,5% em forma de pó fino fornecido pela Evonik Industries Degussa, que consiste em 70% da fase anatase e 30% da fase rutilo.

## **4.3 Caracterização do material fototérmico**

### ***4.3.1 Fluorescência de Raios-X (FRX)***

As análises químicas de TiO<sub>2</sub> foram realizadas em um aparelho de espectroscopia de energia dispersiva de raios-X no instrumento Shimadzu EDX 700 do LCM/UAEMa/UFCG.

### ***4.3.2 Difração de Raios X (DRX)***

O TiO<sub>2</sub> foi analisado à temperatura ambiente, no equipamento Shimadzu XDR-6000, do LCM da UAEMa/UFCG, utilizando radiação Cu K $\alpha$  ( $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ ), tensão de 40 kV de tensão, corrente de 30 mA, varredura de 2° a 75° e uma taxa de varredura de 2°.min<sup>-1</sup>, do LCM/UAEMa/UFCG.

### ***4.3.3 Espectroscopia do Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)***

O FTIR do TiO<sub>2</sub> foi obtido pelo espectrômetro modelo 400 FTIR/FT-NIR da marca Perkin Elmer, entre 4000 e 400 cm<sup>-1</sup>, com resolução de 4 cm<sup>-1</sup> e 20 varreduras, que pertence ao Laboratório de Síntese de Materiais Cerâmicos - LabsMac da UAEMa/UFCG. As tintas fototérmicas foram caracterizadas na forma de filmes finos em um Espectrômetro de Infravermelho da marca Bruker, modelo Alpha II, usando o módulo de reflectância total atenuada - ATR, 32 scans e resolução de 4 cm<sup>-1</sup>, com varredura de 4000 a 400 cm<sup>-1</sup>, pertencente ao LDM/UAEMa/UFCG.

#### **4.3.4 Distribuição Granulométrica**

A distribuição granulométrica foi realizada em um Mastersizer 2000 de instrumentos de Malvern, neste método foi combinada a relação proporcional entre difração a laser e concentração e tamanho de partícula. Esta análise foi realizada no LabsMac da UAEMA/UFCG.

#### **4.3.5 Área Superficial, Volume e Diâmetro Médio de Poros**

As características texturais das estruturas obtidas, tais como área superficial, volume de poros e diâmetro médio de poros foram determinadas por meio da técnica de adsorção/dessorção de N<sub>2</sub>, para isso foi utilizado um equipamento Quantachrome, modelo Nova 3200 pertencente ao LabsMac/UAEMA/UFCG e, para a determinação destas características foi utilizada a teoria desenvolvida por Braunauer, Emmet e Teller conhecida com método BET.

#### **4.3.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

As fotomicrografias da morfologia do TiO<sub>2</sub> foram obtidas por microscopia eletrônica de varredura utilizando o equipamento de marca TESCAN, modelo VEGA3 e tensão de 20 kV. A amostra de TiO<sub>2</sub> foi revestida com ouro (“*sputtering*” – Metalizador Shimadzu-IC-50, utilizando uma corrente de 4mA por um período de 3 minutos), que pertence ao Laboratório de Microscopia de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande DEM/UFCG.

#### **4.3.7 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)**

Para analisar o TiO<sub>2</sub> foi utilizado em torno de 5 mg da amostra, aquecida com uma taxa de 10 °C.min<sup>-1</sup> em atmosfera de nitrogênio e faixa de temperatura de 20°C até 360°C. A análise foi feita no equipamento, DSQ20 da TA Instruments que pertence ao LCM/UAEMA/UFCG.

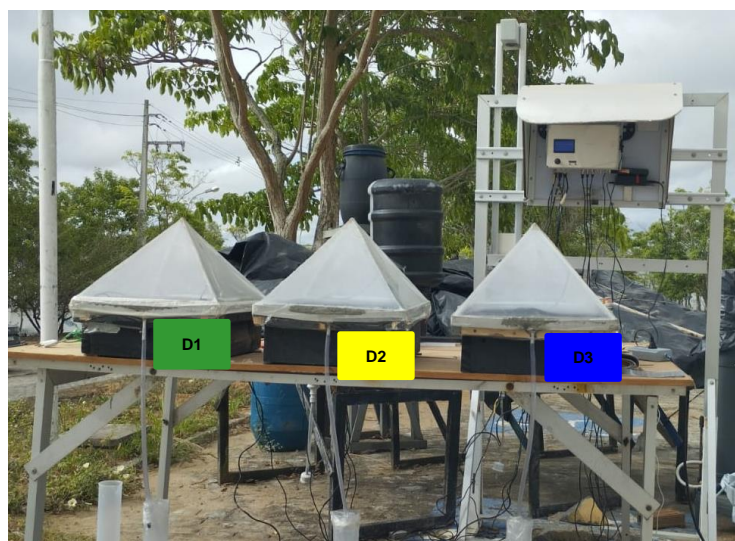
#### 4.3.8 Termogravimetria (TG)

A análise termogravimétrica do  $\text{TiO}_2$  foi realizada em um analisador térmico, modelo RB – 3000 – 20, com taxa de aquecimento de  $10\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ , em atmosfera de nitrogênio, usando um cadinho de alumina e faixa de temperatura ambiente ( $25\text{ }^\circ\text{C}$ ) até a temperatura máxima de  $1000^\circ\text{C}$ , e com 5 mg da amostra. O ensaio foi realizado no LCM/UAEMa/UFCG.

#### 4.4 Procedimento experimental

Inicialmente, foi realizado um experimento para definir quais dessalinizadores iriam receber os percentuais do Dióxido de Titânio, onde o dessalinizador que teve maior produtividade, não recebeu o  $\text{TiO}_2$  (D1), e os demais, receberam os percentuais de 0,1% (D2) e 0,5% (D3) de  $\text{TiO}_2$ , respectivamente, como apresentados na Figura 8.

**Figura 8** – Dessalinizadores D1, D2 e D3.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Na segunda etapa, foi adotada uma metodologia onde os dessalinizadores foram alimentados por água salobra, os dois dessalinizadores, que tiveram uma menor produtividade, receberam os percentuais de 0,1% e 0,5% de  $\text{TiO}_2$ , baseados no cálculo da área da bandeja. Ao realizar diversos experimentos com esta metodologia, os resultados obtidos não foram satisfatórios, pois, o dessalinizador ao qual não foi adicionado o  $\text{TiO}_2$ , continuou tendo maior produção de água dessalinizada que os dessalinizadores que continham os percentuais do  $\text{TiO}_2$ .

Este fato pode ser justificado através das características do material utilizado, considerando que este, é um material insolúvel, sendo assim, o  $\text{TiO}_2$  sedimentava, deixando o fundo da bacia, completamente branco, dificultando a absorção de radiação, como pode ser observado na Figura 9.

**Figura 9** - Dessalinizador solar do tipo pirâmide com o  $\text{TiO}_2$  na água salobra.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Diante disso, foi adotada a metodologia utilizada por Parikh *et al.*, (2022), onde foi misturado o percentual de concentração de  $\text{TiO}_2$  de 40% e 20% (p/v) na tinta preta. No presente trabalho, foram utilizadas uma concentração de 2,5% e 5% (p/v) do  $\text{TiO}_2$  na tinta preta fosca, aplicando duas demãos desta mistura, nas bandejas dos dessalinizadores que tiveram menor produtividade.

A água salobra utilizada no presente experimento foi proveniente de um poço artesiano localizado no sítio Campo Comprido, situado na cidade de Queimadas/PB, operando de forma contínua e monitorados no intervalo das 07h00 às 19h00.

Durante o experimento, a cada 30 minutos, foram medidos os parâmetros de radiação, temperatura em diversos pontos do dessalinizador, umidade relativa do ar, temperatura ambiente, velocidade do vento e a produção de água dessalinizada. As temperaturas do vidro nas partes interna e externa e a temperatura da água foram verificadas através de termopares, como é possível identificar na Figura 9. Nos balanços térmicos foram utilizados os resultados experimentais e equações da literatura para analisar a vazão de água salobra, com os perfis de temperatura e de

radiação, a produção de água dessalinizada em função da temperatura, a eficiência térmica do dessalinizador e os coeficientes de transferência de calor.

#### 4.5 Teste hidrodinâmico

Para ajustar os dessalinizadores à melhores condições de operação, foi realizado o teste hidrodinâmico. O ajuste da lâmina d'água, para alimentação contínua, por gravidade, para garantir que os três dessalinizadores operassem em condições mais semelhantes possível (Figura 10). Para manter o fluxo de água constante foi necessário:

- Que o sistema estivesse devidamente nivelado;
- A bandeja estivesse na mesma altura que a coluna de água do reservatório superior, assim, à medida que a água evaporou, esta foi imediatamente reabastecida;
- O reservatório superior precisou ser elevado com suportes de diferentes espessuras, para obter as lâminas de água de 1 cm e 2 cm. Dessa forma, à medida que o reservatório foi elevado, a lâmina d'água dentro do dessalinizador também elevava.
- Para garantir que as lâminas d'água estivessem no mesmo nível nos três dessalinizadores, foi verificada sua altura antes e após iniciar e terminar cada experimento.

**Figura 10** - Esquema do dessalinizador solar piramidal com alimentação contínua por gravidade.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

#### 4.6 Parâmetros Físico-químicos das águas

A qualidade da água doce é indispensável para a realização das atividades humanas como o consumo e o abastecimento público; a agricultura; a indústria; e a geração de energia elétrica. No entanto, a qualidade necessária para cada tipo de finalidade tem critérios de avaliação diferentes. A qualidade da água não se refere apenas ao seu estado de pureza, mas também às suas características físicas, químicas e biológicas. A Tabela 3 apresenta os indicadores físico-químicos que foram analisados das águas sem tratamento, provenientes de poços do interior da Paraíba. Todas as determinações foram feitas seguindo as especificações descritas no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (Baird, Eaton e Rice, 2017).

**Tabela 3** - Indicadores físico-químicos e os equipamentos utilizados.

Indicador	Unidade	Método/Equipamento
Temperatura	°C	Termômetro
pH	Adimensional	pHmetro
Condutividade elétrica	$\mu\text{Scm}^{-1}$	Condutivímetro
Cloreto	$\text{mg Cl}^{-1}\text{L}^{-1}$	Mohr
Dureza	$\text{mg CaCO}_3\text{L}^{-1}$	Titulométrico - EDTA
Alcalinidade	$\text{mg CaCO}_3\text{L}^{-1}$	Titulométrico com indicador
Turbidez	NTU	Nefelométrica
Sódio	$\text{mg Na}^{+}\text{L}^{-1}$	Fotômetro de chama
Potássio	$\text{mg K}^{+}\text{L}^{-1}$	Fotômetro de chama

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

#### 4.7 Monitoramento dos parâmetros operacionais do dessalinizador

Para a medição dos indicadores físico-químicos foi utilizado 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 11), sistema desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Tratamentos Avançados de Águas (GRUTAA) da UEPB em parceria com a Stand-up ALCALITECH-Fabricação de Aparelhos e Equipamentos de Medida e Controle Ltda, cujo pedido de patente foi depositado (Ramos *et al.*, 2021).

**Figura 11** - Sistema de medição dos parâmetros físico-químicos operacionais.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

O equipamento apresentado na Figura 11, fornecerá os dados de temperatura captadas pelos termopares, que estarão nos dessalinizadores, assim como, temperatura ambiente e umidade relativa do ar.



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados estão divididos nas seguintes categorias: parâmetros meteorológicos, perfis de temperatura e incidência de radiação solar, produtividade de água destilada, eficiência térmica do destilador, coeficientes de transferência de calor na destilação solar, para os três dessalinizadores: Dessalinizador 1, 2 e 3, qualidade físico-química da água e a caracterização do TiO<sub>2</sub>.

Para efeito de estudo, foi selecionado 5 dias, dia 24/01/2024 para avaliar a produtividade dos dessalinizadores, os dias 17/04/2024 e 18/04/2024 foi utilizado lâminas de 1 cm e os dias 05/02/2024 e 08/04/2024 foram usadas lâminas de 2 cm, como apresentados na Tabela 5. Durante a pesquisa foram realizados diversos experimentos para ajuste de metodologia onde os resultados obtidos não foram aceitáveis, outros experimentos não foram concluídos, até o final do dia, por motivos meteorológicos.

**Tabela 4** – Dias selecionados para efeito de estudo e lâminas utilizadas.

	Lâmina de 1 cm	Horário de operação	Lâmina de 2 cm	Horário de operação
Produtividade	24/01/2024	7:00 às 17:00	-	-
Com TiO <sub>2</sub>	17/04/2024	7:30 às 19:00	05/02/2024	7:00 às 18:00
	18/04/2024	7:00 às 18:30	08/04/2024	7:00 às 19:00

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

### 5.1 Caracterização do material fototérmico TiO<sub>2</sub>

#### 5.1.1 Fluorescência de Raios-X (FRX)

A composição química do TiO<sub>2</sub> foi determinada através de dados de fluorescência de raios-X. A Tabela 5 apresenta a composição química em % em peso, normalizada para 100% de óxidos.

**Tabela 5** - Pureza do TiO<sub>2</sub> e quantidade de impurezas semiquantificadas.

Constituinte	TiO <sub>2</sub>	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	NbO	ZrO <sub>2</sub>
Porcentagem (%)	98,603	0,468	0,409	0,362	0,101	0,034	0,023

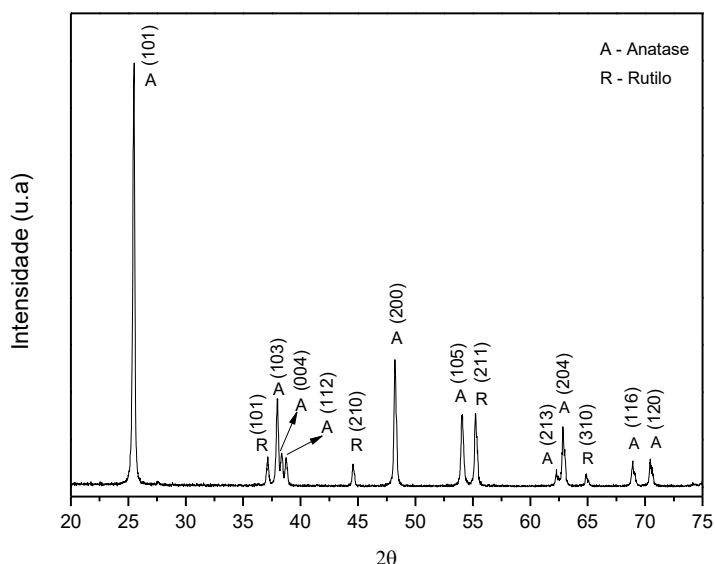
Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

A partir da Tabela 5 pode-se comprovar que no  $\text{TiO}_2$  foi verificada uma pureza de 98,6%, com a presença de óxidos minerais secundários, utilizando uma técnica semiquantitativa (Kazemi *et al.*, 2016). Os dados obtidos concordam com a composição do material Degussa P25, conforme descrito na ficha do fabricante ( $\text{TiO}_2$  min 98%). A detecção de pentóxido de fósforo pela FRX é prevista pelo fabricante (0-2%) e pode indicar a presença de algum tipo de aditivo à base de fosfato e potássio como dispersante devido à sua principal aplicação como pigmento. A presença de óxidos secundários pode acelerar ou retardar a transformação da fase anatase-rutilo, devido ao aumento ou diminuição da concentração nas fases cristalinas da amostra.

### 5.1.2 Difração de Raios-X (DRX)

Por difração de raios X, foi possível identificar as fases e planos cristalinos da amostra, como pode ser visto na Figura 12

**Figura 12** - Difratoograma DRX do  $\text{TiO}_2$ .



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

. De acordo com o difratograma ilustrado na Figura 12, pode-se observar que as fases cristalinas características do  $\text{TiO}_2$  foram anatase e rutilo. Os picos de difração característicos da fase anatase do  $\text{TiO}_2$  são  $2\theta = 25,4^\circ$ ;  $37,9^\circ$ ;  $38,4^\circ$ ;  $38,7^\circ$ ;  $48,3^\circ$ ;  $54,0^\circ$ ;  $62,2^\circ$ ;  $62,9^\circ$ ;  $68,8^\circ$ ;  $70,5^\circ$  e dos planos cristalinos (101), (103), (004), (112),

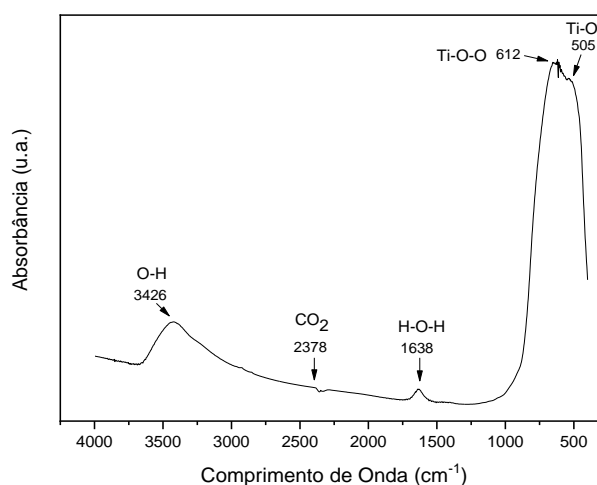
(200), (105), (213), (204), (116) e (220), respectivamente. Também no padrão DRX, foram visualizados picos característicos da fase rutilica  $\text{TiO}_2$  a  $2\theta = 37,8^\circ$ ;  $44,5^\circ$ ;  $55,5^\circ$ ;  $64,8^\circ$  e planos cristalinos (101), (210), (211) e (310), respectivamente. Portanto, as amostras prevaleceram na fase anatase, confirmando que o material utilizado como fonte de  $\text{TiO}_2$  foi o Degussa P25, que consiste de 70% de anatase e 30% de rutilo, os dados obtidos corroboram com Soltani; Entezari. (2013) e Galdino *et al.* (2014).

A atividade fototérmica do  $\text{TiO}_2$  é fortemente dependente do tamanho do seu cristalito, estrutura de fase, estrutura porosa e área de superfície específica. Devido a um gap maior (3,2 eV) de anatase do que o rutilo (3,0 eV), o anatase possui menor capacidade de absorção em relação à luz solar do que o rutilo (Zangeneh *et al.*, 2015). Além disso, a atividade fotocatalítica do anatase é aparentemente superior ao rutilo. Isto deve-se que a taxa de recombinação de portadores de menor carga do anatase e maior capacidade de adsorção de superfície aos grupos hidroxilo do que o rutilo (Matioli, Miagava e Gouvêa, 2012). O anatásio cristalino é a fase predominante, esta característica é importante porque é a fase mais fotoativa do dióxido de titânio, o que é altamente desejável para ser utilizado como um material fototérmico (Moro, Lansarin e Bagnara, 2012; Dostanić *et al.*, 2013).

### 5.1.3 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Os resultados da análise FTIR das bandas características do dióxido de titânio podem ser vistos na Figura 13.

**Figura 13** - Espectro de FTIR do  $\text{TiO}_2$ .



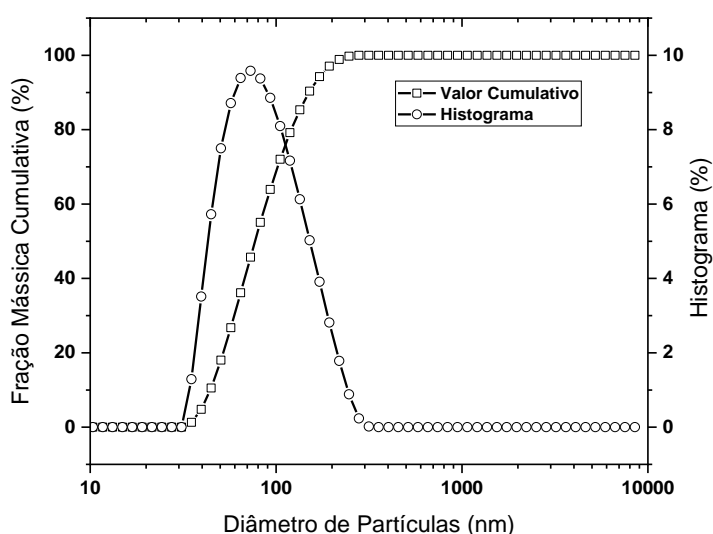
Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Na Figura 13 na faixa do espectro de FTIR  $505\text{ cm}^{-1}$ , é devido à vibração da ligação Ti-O (Sohrabnezhad, 2011) e a banda a  $612\text{ cm}^{-1}$  é atribuída à vibração da ligação Ti-OO (Saleiro, *et al.*, 2010). A banda a  $1638\text{ cm}^{-1}$  é atribuída ao modo de vibração de ligação H-O-H da água fisissorvida (Choudhury; Choudhury, 2012). Ainda na faixa a  $2378\text{ cm}^{-1}$  é atribuída ao  $\text{CO}_2$  presente na atmosfera (Devi *et al.*, 2009). Para a amostra de  $\text{TiO}_2$ , o espectro apresenta uma forte banda de absorção a  $3426\text{ cm}^{-1}$ , correspondente ao isolado -OH, relacionado ao estiramento -OH atribuída à água superficial adsorvida pela amostra de  $\text{TiO}_2$ . A quantidade de grupos O-H adsorvidos na superfície do nanomaterial é responsável por melhorar a eficiência do material fototérmico (Gandhi; Mishra; Joshi, 2012).

#### 5.1.4 Análise Granulométrica

A Figura 14 ilustra a distribuição granulométrica e o diâmetro médio das partículas de  $\text{TiO}_2$ . O conhecimento da distribuição granulométrica estatística e do tamanho de partículas elementares é fundamental, pois influencia de maneira significativa a microestrutura, afetando a densidade, as propriedades térmicas e elétricas. Portanto, a determinação do tamanho das partículas do  $\text{TiO}_2$  e a comprovação das nanopartículas, por meio da distribuição granulométrica é de suma importância para atuar de forma mais eficiente como material fototérmico.

Figura 14 - Distribuição granulométrica do  $\text{TiO}_2$ .



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Na Figura 14 pode ser observado que a curva do histograma de frequência para a distribuição do tamanho de partículas do TiO<sub>2</sub> é unimodal com uma faixa de distribuição com diâmetro médio de partículas de 59,6 nm. A faixa de distribuição de tamanho se estende de 30-300 nm (Ngaotrakanwivat; Heawphet; Rangsunvigit, 2020; Yan *et al.*, 2020). Cerca de 57,3% em massa das partículas acumuladas apresentam tamanhos menores que 87,8 nm. Quanto mais estreita for a distribuição apresentada pela curva do diâmetro das partículas, maior será a homogeneidade em relação à distribuição, tamanho e geometria das partículas. Ainda foi verificado que o d<sub>10</sub> = 10% das partículas foram com diâmetros inferiores a 46,1 nm, d<sub>50</sub> = 50% das partículas apresentaram diâmetros inferiores a 76,8 nm e d<sub>90</sub> = 90% das partículas apresentaram diâmetros inferiores a 158,6 nm (Joseph; Mathew, 2014). Além disso, a diminuição do tamanho das partículas é acompanhada por um aumento na relação superfície/volume, o que faz com que a energia superficial contribua significativamente para a energia total do material. Isso significa que, para partículas de tamanho reduzido, a forma polimórfica com menor energia superficial exibe a mais alta estabilidade termodinâmica, o que contribui para um melhor desempenho do material fototérmico (Dai *et al.*, 2007).

### 5.1.5 Área Superficial, Volume e Diâmetro Médio dos Poros

A Tabela 6 apresenta os valores da análise textural que correspondem à área superficial específica (S<sub>BET</sub>) que foi determinada pelo método BET desenvolvido por Stephen Brunauer, Paul Hugh Emmett e Edward Teller, e o volume de poros (V<sub>p</sub>) e diâmetro médio de poros (D<sub>p</sub>) que foram calculados pelo método que foi descrito por Barrett-Joyner-Halenda (BJH) e ficou conhecido como o método BJH.

**Tabela 6** - Análise textural do TiO<sub>2</sub>.

Análise textural	TiO <sub>2</sub>
Área superficial específica (m <sup>2</sup> .g <sup>-1</sup> )	39,14
Volume de poros (cm <sup>3</sup> .g <sup>-1</sup> )	0,03
Diâmetro médio de poros (nm)	2,26

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

O método de BET descreve a adsorção física de moléculas de gás sobre uma superfície sólida e serve como base para uma técnica de análise importante para medição de área superficial específica de um material. O S<sub>BET</sub> apresentado Tabela 6

foi de  $39,14 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ , considerado um elevado valor de área superficial, que é favorável para melhorar o desempenho do material fototérmico, sendo resultante de partículas de pequenas dimensões ou estrutura porosa (Vakros, 2020; Qin *et al.*, 2009).

Através da Equação 15, foi obtido o diâmetro da partícula equivalente, onde o  $d_{BET} = 0,036 \text{ }\mu\text{m}$ .

$$d_{BET} = \frac{6}{S_{BET}\rho} \quad (15)$$

A atuação do  $\text{TiO}_2$  depende de muitos parâmetros, incluindo a estrutura cristalina, a relação entre as fases anatase e rutilo, o tamanho da partícula, a área superficial específica e o tamanho médio dos poros (Bessergenev *et al.*, 2015).

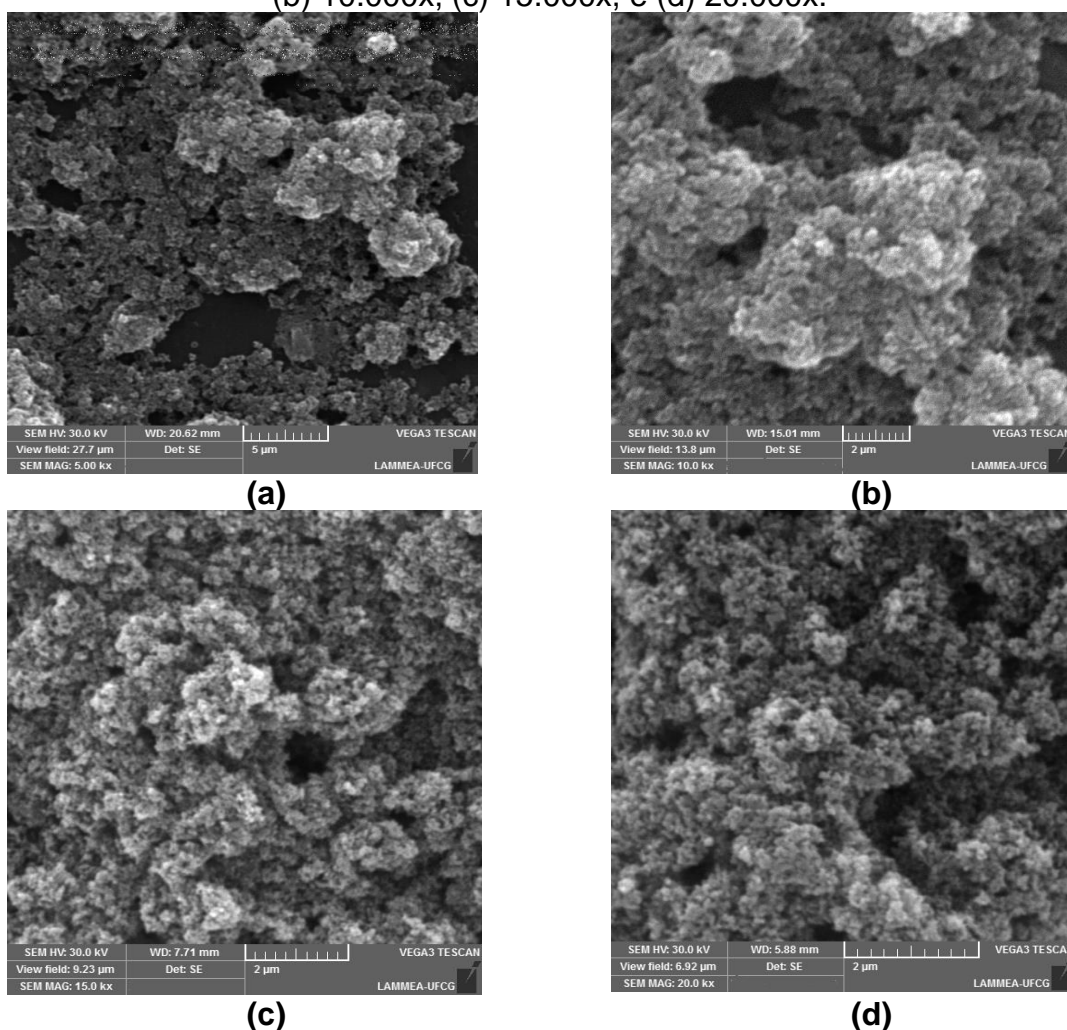
A adsorção de nitrogênio utilizando o método BJH fornece informação sobre a mesoporosidade do material. De acordo com o resultado obtido de  $V_p = 0,034 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ , além de um  $D_p = 2,26 \text{ nm}$  (Tabela 6) que pode ser classificado como um material com estrutura mesoporosa (largura dos poros na faixa de 2-50 nm) segundo a classificação da IUPAC, ocorrendo o preenchimento dos poros por: condensação de poros, que reflete uma transição de fase gás-líquido de primeira ordem (Šihor *et al.*, 2020).

A classificação da IUPAC baseia-se em medições de adsorção e dessorção de nitrogênio gasoso na sua temperatura de ebulição, e na largura estatística das camadas de  $\text{N}_2$  gasoso adsorvidas. O  $\text{TiO}_2$  mesoporoso é o resultado de poros formados em suas partículas, apresentando uma grande área superficial por estrutura porosa confinada e elevada relação superfície/volume (El-sheikh *et al.*, 2017). Além disso, a mesoporosidade está relacionada à presença de cavidades, canais ou interstícios, capazes de interagir com átomos, íons, moléculas e nanopartículas, não apenas em suas superfícies, mas também em toda a massa, tornando-a de grande importância como material fototérmico.

### **5.1.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

As fotomicrografias obtidas por MEV foram necessárias para estudar a microestrutura do  $\text{TiO}_2$ , identificando o tamanho, o formato e a aglomeração de partículas, conforme ilustrado na Figura 15.

**Figura 15** - Fotomicrografias obtidas por MEV do  $\text{TiO}_2$  com aumentos de: (a) 5.000x, (b) 10.000x, (c) 15.000x, e (d) 20.000x.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Das fotomicrografias, podem-se observar na Figura 15 (a) e (b), aumentos de 5.000x e 10.000x, respectivamente, que as amostras possuem uma variação morfológica na sua superfície, com grandes aglomerados de partículas de tamanhos diferentes, sem formatos definidos e com pouca distribuição homogênea desses agregados. De maneira geral, a maioria das nanopartículas comercialmente disponíveis é formada por grandes aglomerados com cerca de 1  $\mu\text{m}$  de dimensão máxima, compostos por partículas primárias com tamanhos variando de 5 a 50 nm. Os grandes aglomerados dispersam a luz e não são adequados para sistemas ópticos (as partículas primárias podem ser mantidas juntas por interações fracas de Van der Waals, no caso de aglomerados, ou por interações fortes, no caso de agregados). O grau de aglomeração das partículas de  $\text{TiO}_2$  depende de fatores como o pH da

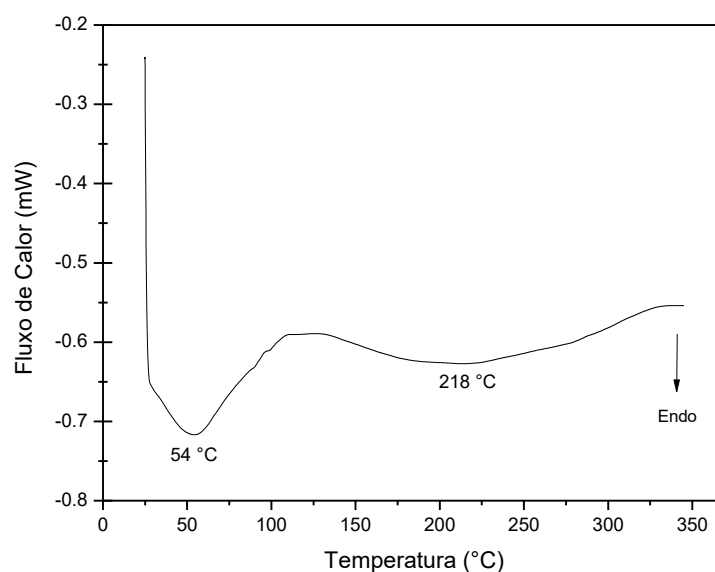
suspensão, a força iônica, o tamanho das partículas e a concentração de partículas (Venkov; Hadjiivanov, 2003 e Vishwanath *et al.*, 2017).

Ainda na Figura 15 (c) e (d), foi possível observar que os aumentos maiores de 15.000x e 20.000x, respectivamente, permitiram a observação de formação de uma estrutura morfológica com partículas esféricas e distribuídas de maneira uniforme. A microestrutura das partículas de TiO<sub>2</sub> obtida, favoreceu a sua aplicação como material fototérmico, porque muitos fatores têm uma influência significativa sobre o desempenho, incluindo o tamanho, área superficial específica, volume de poros, estrutura de poros, fase de cristal e os aspectos em que a superfície está exposta (Duvarci; Çiftçioğlu, 2012).

### 5.1.7 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

A calorimetria exploratória diferencial é uma técnica usada para determinar o fluxo de calor dentro e fora de uma amostra quando submetida a um programa de temperatura em atmosfera controlada. A partir do DSC, ao aquecer uma amostra, mudanças térmicas em um material são acompanhadas por uma troca de calor, daí a temperatura dessas transformações e fluxo de calor podem ser determinados. A Figura 15 ilustra a curva de DSC.

**Figura 16** - Curva de DSC do TiO<sub>2</sub>.



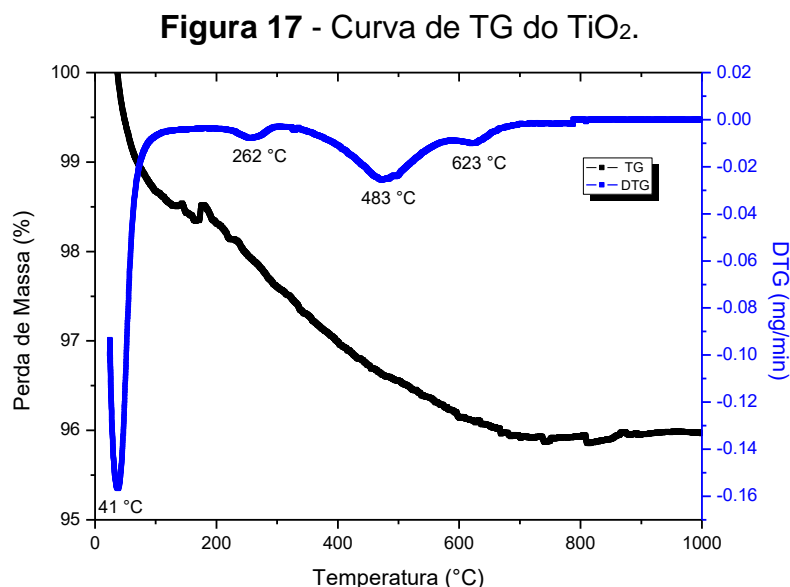
Fonte: Elaborada pela autora, 2024.



Na curva DSC apresentada na Figura 16, podem ser observados os seguintes eventos endotérmicos: em 54 °C que pode estar relacionada com a água fisicamente adsorvida na superfície do catalisador; e em 218 °C pode ser atribuída à saída da água de formação do TiO<sub>2</sub>. Essas águas mencionadas, contidas no material estudado são um fator positivo para ser aplicado como material fototérmico. É importante ressaltar que uma faixa de temperatura mais ampla, até 1000 °C poderia revelar outros eventos, que possibilitariam atribuir a temperaturas de transições da fase amorfa para anatase e da anatase para rutilo. Entretanto, o instrumento de análise de DSC utilizado não permitiu obter eventos acima de 350 °C, por isso foi necessário realizar outra análise térmica, a Termogravimetria (TG), para ampliar essa faixa de temperatura e poder observar as transições de fases ocorridas no TiO<sub>2</sub> (Marinescu *et al.*, 2011).

### 5.1.8 Termogravimetria (TG)

A termogravimetria segue as mudanças de massa em uma amostra submetida ao tratamento térmico. Uma análise termogravimétrica pode ser registrada como uma alteração na massa da amostra com a temperatura e tempo, e com a composição de pressão e gás. A Figura 17 apresenta a curva de TG.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

A curva de termogravimetria da Figura 17 evidencia uma perda total de massa de 4%. Os eventos de perda de massa detectados do TiO<sub>2</sub> ocorreram em 41°C


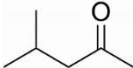
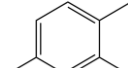
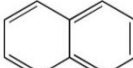
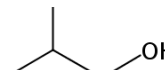
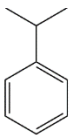

referente à dessorção de água; em 262°C, inerente a perda de água quimissorvida do TiO<sub>2</sub> cristalino, eliminando grupo hidroxila como vapor de água por condensação de grupos Ti-OH, produzindo a ligação Ti-O-Ti; em 483°C relacionado à conversão de Ti(OH)<sub>4</sub> em TiO<sub>2</sub>, indicando início da organização estrutural do sistema, que possivelmente induzirá a cristalização da fase amorfa para anatase; e em 623°C provavelmente corresponde à transição da fase anatase para rutilo (Delekar *et al.*, 2012; Yu *et al.*, 2002; Vishwanath, *et al.*, 2017).

Ainda de acordo com a TG, ficou constatado que os picos endotérmicos, entre a temperatura ambiente até 100°C, foi proveniente da água livre e de moléculas de água fisicamente adsorvida na superfície do TiO<sub>2</sub> por ligações de hidrogênio, pois a água molecular e a dissociada (grupos -OH) adsorvidas no semicondutor atuam favorecendo o processo fototérmico (Janitabar Darzi; Mahjoub; Nilchi, 2010; Liu *et al.*; 2014).

#### **5.1.9 FTIR dos Revestimentos Fototérmicos**

A composição da tinta fototérmica é formada por xileno, alumínio, destilados de petróleo levemente tratados com hidrogênio, metil isobutil cetona, 1,2,4-trimetilbenzeno, nafta aromática, álcool isobutílico, isopropilbenzeno, etanol e metanol. A Tabela 7 ilustra os compostos químicos, a composição, a fórmula molecular e estrutura química da tinta fototérmica. Essas informações e outras mais detalhadas podem ser encontradas na ficha de informação de segurança de produtos químicos (FISPQ) da tinta (Tintas Maza, 2020).

**Tabela 7** - Compostos químicos, composição, fórmula molecular e estrutura química da tinta fototérmica.

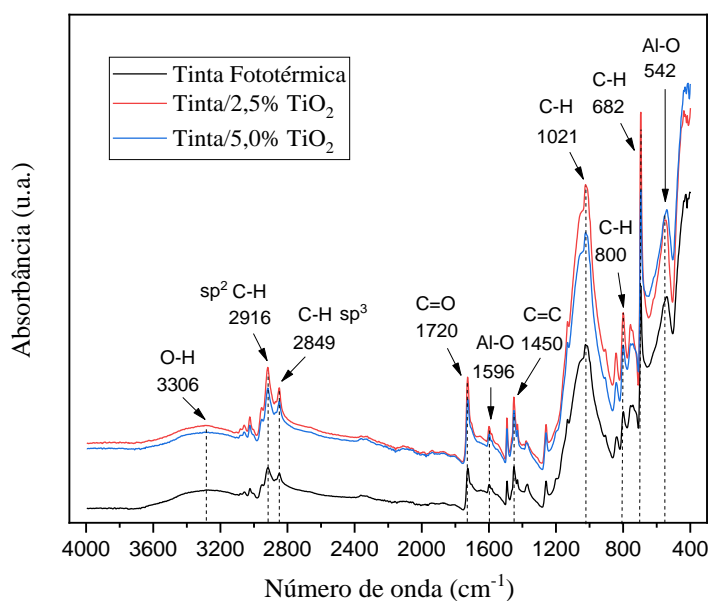
Compostos químicos	Composição (%)	Fórmula molecular	Estrutura química
Xileno	12,54 - 37,63	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	
Alumínio	3,48 - 10,44	-	-
Metil isobutil cetona	2,00 - 6,00	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	
Destilados de petróleo levemente tratados com hidrogênio	2,16 - 6,49	-	-
1,2,4-trimetilbenzeno	1,79 - 5,38	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	
Nafta aromática	0,42 - 1,26	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	
Álcool isobutílico	0,25 - 0,76	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	
Isopropilbenzeno	0,06 - 0,18	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	
Etanol	0,06 - 0,17	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	
Metanol	0,05 - 0,15	CH <sub>4</sub> O	H <sub>3</sub> C—OH

Fonte: Adaptado de Leng, 2008; Silverstein e Webster, 2005.

A Figura 18 apresenta as bandas características dos revestimentos das tintas fototérmicas sem e com o dióxido de titânio. Podemos observar os FTIR dos revestimentos das tintas fototérmicas sem e com o dióxido de titânio. Em todos os espectros, podemos observar a faixa em 3306 cm<sup>-1</sup>, é devido à vibração da ligação O-H do álcool isobutílico e do etanol; em 2960 cm<sup>-1</sup>, é referente à ligação C-H axial assimétrica do CH<sub>3</sub> pode pertencer aos compostos alifáticos e aromáticos pertencentes à composição da tinta; em 2916 cm<sup>-1</sup> e em 2849 cm<sup>-1</sup>, são bandas devida à deformação axial assimétrica e simétrica da hibridização sp<sup>2</sup> e sp<sup>3</sup> do grupo CH<sub>2</sub>, compostos provenientes dos destilados de petróleo, do metil isobutil cetona, do álcool isobutílico e do etanol; em 1720 cm<sup>-1</sup>, é uma banda referente ao composto carbonilado C=O do metil isobutil cetona; em 1720 cm<sup>-1</sup>, é uma banda relacionada à ligação Al-O (Ghezalgheshlaghi *et al.*, 2018) referente ao alumínio presente; em 1450 cm<sup>-1</sup>, é referente à ligação C=C pertencente aos anéis aromáticos, no caso, o xileno, 1,2,4-

trimetilbenzeno, a nafta aromática e ao isopropilbenzeno; em 1021  $\text{cm}^{-1}$ , 800  $\text{cm}^{-1}$  e 682  $\text{cm}^{-1}$  são referentes às ligações C-H dos compostos aromáticos existentes; e uma banda em 542  $\text{cm}^{-1}$ , relacionada à ligação Al-O (Contreras *et al.*, 2006) referente ao alumínio presente na tinta fototérmica (Leng, 2008; Silverstein e Webster, 2005).

**Figura 18** - Espectros de FTIR dos Revestimentos Fototérmicos.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

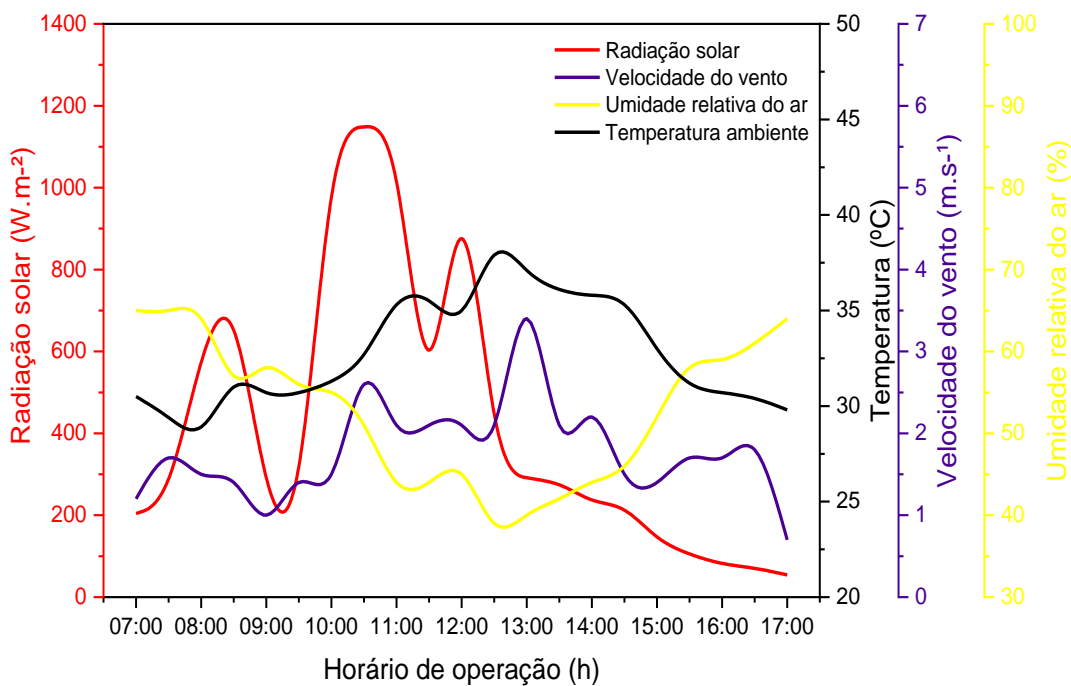
Além disso, foi possível perceber um aumento discreto na intensidade das absorções nas tintas, com o aumento de 2,5 para 5,0% de  $\text{TiO}_2$ , entre a faixa 403-978  $\text{cm}^{-1}$ , que deveu-se além das bandas características da tinta, às vibrações do  $\text{TiO}_2$ , conforme visto anteriormente no espectro de FTIR do  $\text{TiO}_2$ .

## 5.2 Avaliação dos parâmetros meteorológicos

A Figura 19 representa os parâmetros meteorológicos temperatura ambiente, umidade relativa do ar, velocidade do vento em função da radiação solar incidente nos dessalinizadores monitorados no dia 24/01/2024 das 07h00min às 17h00min. Segundo Bezerra *et al.* (2021), a radiação solar é um parâmetro que influencia diretamente na produtividade de água do dessalinizador. Na Figura 19, pode-se verifica-se que a intensidade solar média foi de 422,71  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ , no início do experimento às 07h00min, a intensidade solar registrada foi de 204  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ , atingindo a sua maior incidência às 12h30min com 1153  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Além disso, durante o experimento observa-

se uma média da velocidade do vento, umidade relativa do ar e temperatura ambiente de  $1,77 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $52,81\%$  e  $29,8^\circ\text{C}$ , respectivamente.

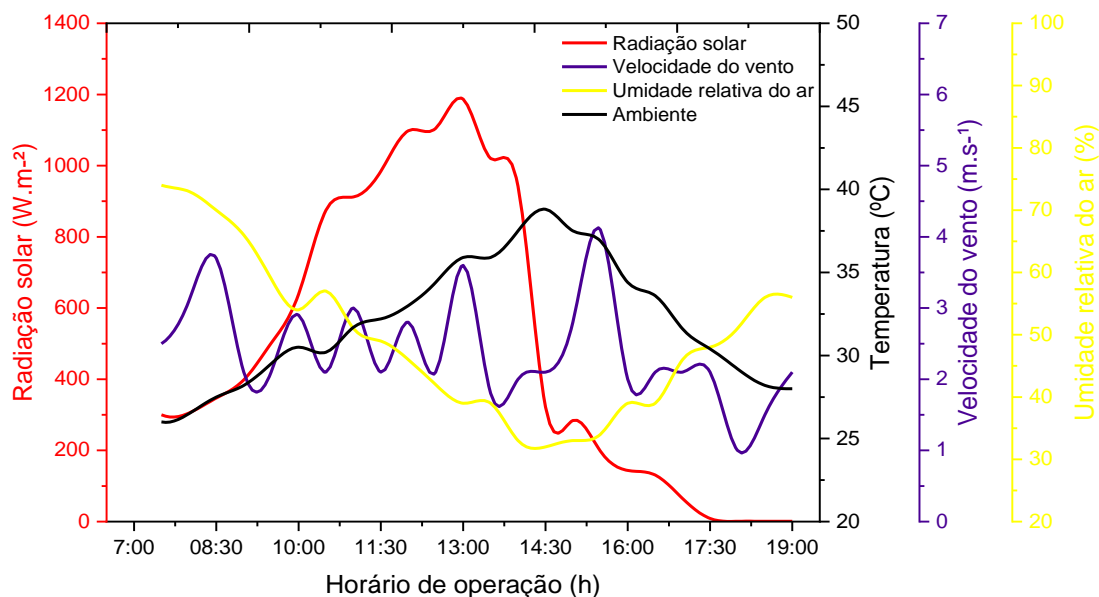
**Figura 19** - Parâmetros meteorológicos do dia 24/01/2024.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

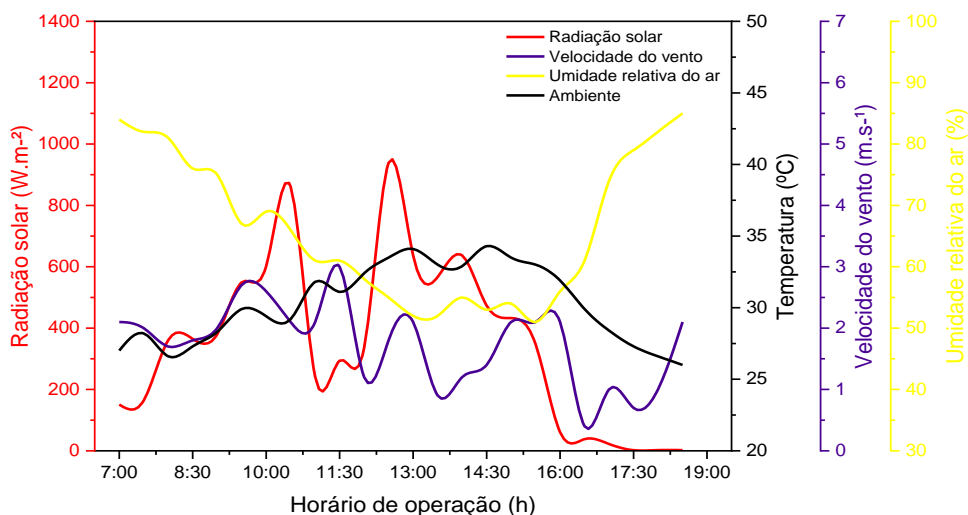
Na Figura 20, os parâmetros meteorológicos foram registrados durante o dia 17/04/2024, este experimento operou no intervalo das 07:30 às 19:00. Conforme apresentado na Figura 20, observa-se que a velocidade do vento teve como valor mínimo às 18:30 de  $1,5 \text{ m.s}^{-1}$  e a máxima de  $4,1 \text{ m.s}^{-1}$ , às 15:30. A velocidade do vento é um fator crucial no resfriamento da cobertura de vidro e na transferência de calor por convecção em sistemas de dessalinização solar. Ela é considerada um dos parâmetros mais importantes para a otimização de sistemas de dessalinização solar, influenciando tanto a eficiência térmica quanto a produtividade do sistema, podendo aumentar a eficiência da remoção de calor da superfície do vidro, facilitando uma maior taxa de evaporação e condensação (Eltawil *et al.*, 2022).

**Figura 20 - Parâmetros meteorológicos do dia 17/04/2024.**



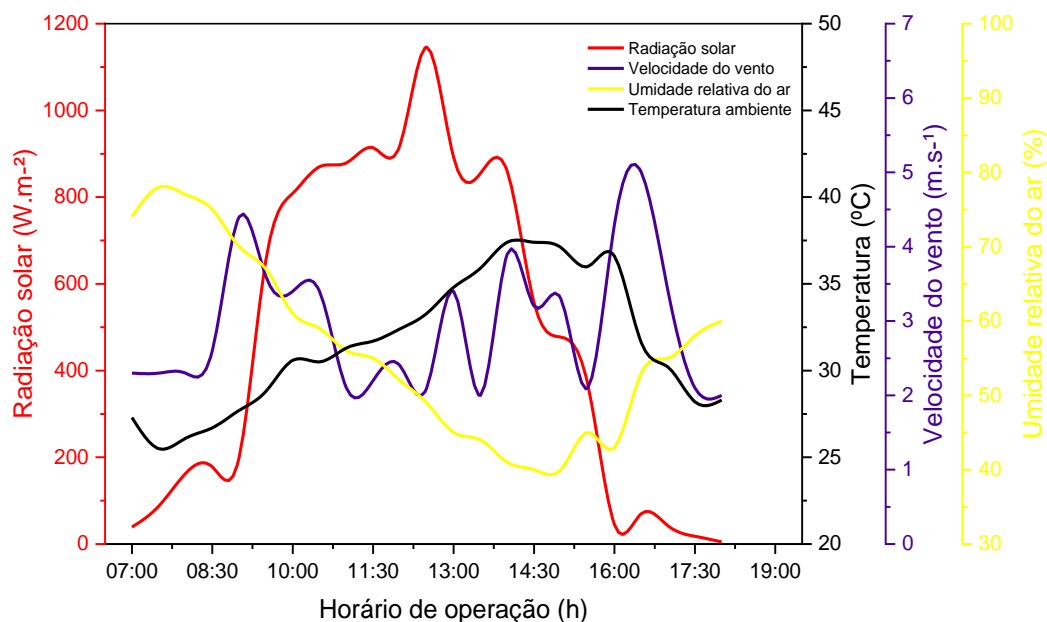
A Figura 21 mostra a variação dos parâmetros ao longo do dia 18/04/2024. A radiação solar apresenta um aumento gradual até atingir o seu pico às 12h30min com valor de radiação solar de  $939 \text{ W.m}^{-2}$ . Após esse horário, observa-se que a radiação começa a diminuir e continua a reduzir até o final do experimento. A velocidade do vento varia ao longo do dia, atingindo o valor máximo e mínimo entre 11h30min e 16h30min com valores de  $3,0 \text{ m.s}^{-1}$  e  $0,4 \text{ m.s}^{-1}$ . A umidade relativa do ar apresentou mais alta pela manhã com redução ao longo do dia, atingindo o seu mínimo às 15h30min. para Hamoodi *et al.* (2023) quando a umidade está elevada a produtividade é baixa, isso ocorre devido ao baixo coeficiente convectivo e as baixas temperaturas.

**Figura 21 - Parâmetros meteorológicos do dia 18/04/2024.**



A Figura 22, apresenta os resultados obtidos no experimento realizado no dia 05/02/2024, no intervalo das 07:00 às 18:00.

**Figura 22 - Parâmetros meteorológicos do dia 05/02/2024.**

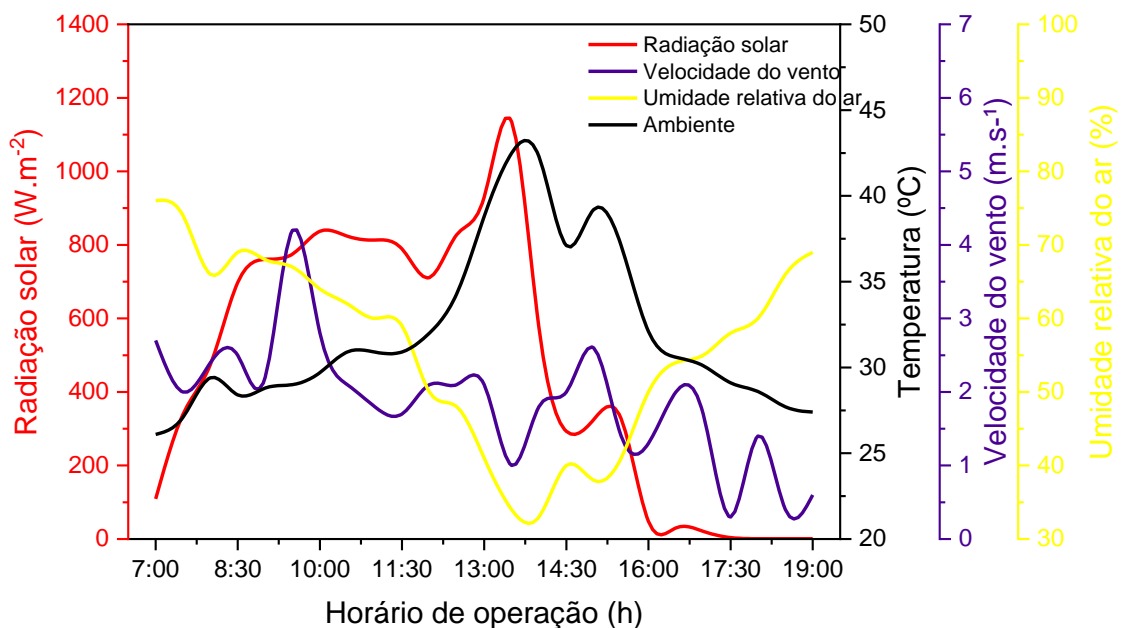


Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Na Figura 22, os resultados mostraram que a umidade relativa do ar teve seu pico às 07:30, apresentando um índice 78%. À medida que a radiação solar e a temperatura ambiente aumentaram, houve um significativo decréscimo, atingindo sua mínima às 14:30, com um índice de 70%. Essa variação na umidade relativa influencia diretamente a produtividade dos sistemas de dessalinização solar. Quando a umidade relativa está alta, a produtividade tende a ser baixa. Isso pode ser atribuído a dois fatores principais: um baixo coeficiente de convecção e baixas temperaturas de saturação do vapor dentro do destilador (Qasem *et al.*, 2020).

A Figura 23 apresenta as curvas obtidas durante o experimento realizado no dia 08/04/2024, que teve início às 07:00 e foi até as 19:00. A temperatura ambiente, apresentou seu menor valor nas primeiras horas do experimento, às 07:00 com 26,1 °C, e seu maior pico foi registrado às 13:30 atingindo 42,5 °C. Qasem *et al.*, 2020 afirmam que temperaturas mais elevadas aumentam a taxa de evaporação, melhorando a produção de água destilada. Eles observaram que a produtividade do sistema é significativamente maior durante os períodos de alta temperatura, quando a radiação solar é mais intensa.

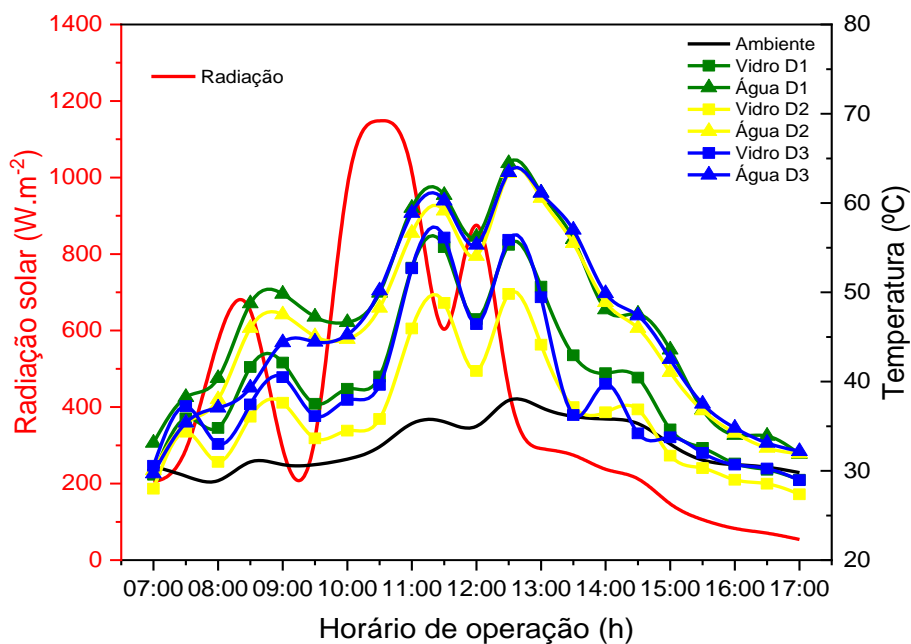
**Figura 23** - Parâmetros meteorológicos 08/04/2024.



### 5.3 Perfis de temperatura e incidência de radiação

No experimento realizado em 24/01/2024, foram monitoradas as variações de temperatura da água, do vidro e do ambiente, de acordo com a radiação solar incidente. Os dados coletados mostraram uma forte correlação entre a radiação solar e as temperaturas registradas, apresentada na Figura 24.

**Figura 24** - Perfis de temperatura D1, D2 e D3, lâmina 1 cm, dia - 24/01/2024.



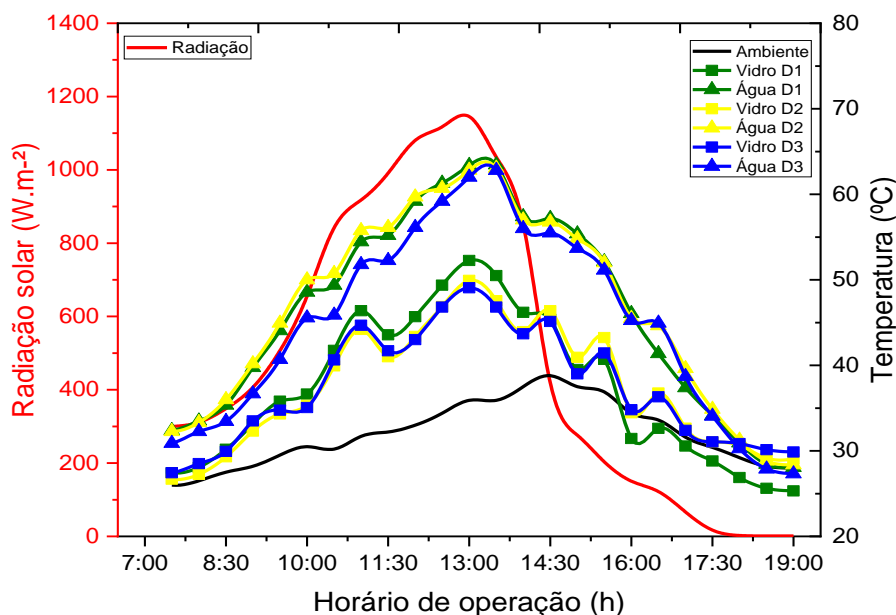


Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

A relação entre a radiação solar e a variação de temperatura dos dessalinizadores, apresentada na Figura 24, foi evidente desde as primeiras horas do monitoramento. Ao início do experimento, às 07h00, a incidência de radiação solar atingiu um valor de  $204 \text{ W.m}^{-2}$  às 08h00min, quando a temperatura da água estava em  $40,38 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $38,00 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $39,02$  nos dessalinizadores 1, 2 e 3, respectivamente, e a radiação solar incidente era de  $609 \text{ W/m}^{-2}$ . Nota-se também que no intervalo das 08:00 às 08:30 houve um aumento significativo, atingindo um pico de  $773 \text{ W.m}^{-2}$  este aumento brusco e rápido na radiação solar resultou em mudanças correspondentes nas temperaturas monitoradas nos horários seguintes, após esse pico.

A Figura 25 apresenta as temperaturas dos vidros, temperaturas da água e temperatura ambiente, em relação à radiação solar. Ao início do monitoramento às 07h30, as temperaturas da água nos dessalinizadores eram de D1  $32,38 \text{ }^\circ\text{C}$ , D2  $32,25 \text{ }^\circ\text{C}$  e D3  $30,87 \text{ }^\circ\text{C}$ , com incidência de radiação de  $300 \text{ W/m}^{-2}$ , chegando a sua temperatura máxima às 13h30, sendo elas para D1  $63,44 \text{ }^\circ\text{C}$ , D2  $63,06 \text{ }^\circ\text{C}$  e D3  $62,8 \text{ }^\circ\text{C}$ , para uma radiação de  $1020 \text{ W/m}^{-2}$ . Kabeel *et al.* (2019), obtiveram resultados semelhantes ao utilizar  $0,1\%$  de  $\text{TiO}_2$  misturado em sua tinta de revestimento da bandeja, em um dessalinizador em formato triangular equilátero.

**Figura 25** - Perfis de temperatura D1, D2 e D3, lâmina de 1 cm, dia- 17/02/2024.



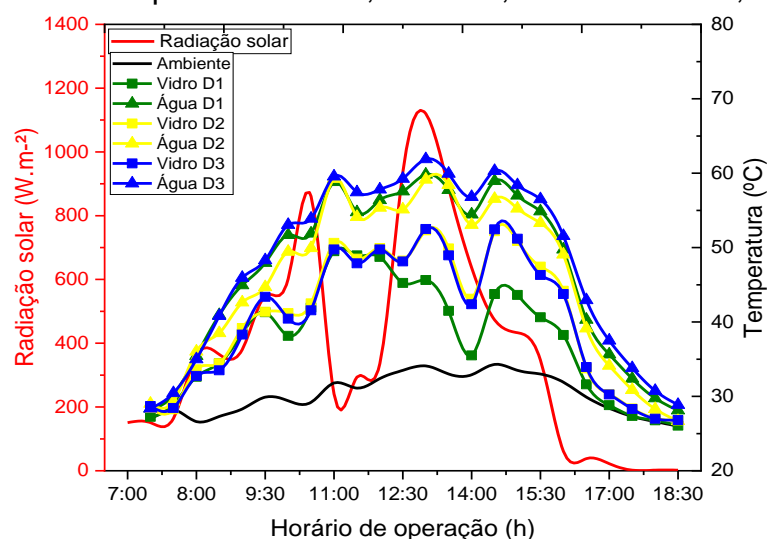
Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Ainda sobre a Figura 25, os perfis de temperatura apresentados atingiram seus valores máximos às 13h00, no D1 52,25 °C e 63,25 °C, D2 49,94 °C e 62,01 °C e D3 49,06 °C e 60,94 °C correspondentes às temperaturas dos vidros internos e externos, respectivamente, nos três dessalinizadores. Esse, deveu-se ao aumento significativo da incidência de radiação nos horários anteriores. Essa relação entre incidência de radiação e aumento nas temperaturas se mostra evidente ao longo de todo o dia.

Selvaraj e Natarajan (2018) afirmam que uma maior diferença de temperatura entre a água e a cobertura de vidro resulta em uma maior taxa de evaporação, o que, por sua vez, aumenta a produção de água dessalinizada. Eles explicam que a maior temperatura da água em comparação com a temperatura da cobertura de vidro resulta em coeficientes térmicos eficientes, promovendo a evaporação rápida da água e sua condensação na superfície de vidro mais fria.

Na Figura 26 são apresentados os perfis das temperaturas internas e externas do vidro, temperaturas das bacias, temperatura ambiente, assim como a incidência de radiação solar que foram coletadas durante o experimento do dia 18/04/2024, que teve duração de 11h30h, tendo início às 07:00h e finalizando às 18:30h.

**Figura 26** - Perfis de temperatura de D1, D2 e D3, lâmina de 1 cm, dia- 18/04/2024.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Durante o experimento, observa-se que a radiação solar atingiu seus maiores índices no intervalo das 09:30 até as 12:30, onde seu valor máximo foi de 939  $W.m^{-2}$ , após esse pico, houve variações, em sua maioria, decrescentes, até atingir seu valor mínimo de 2  $W.m^{-2}$  às 17:30 perdurando até o fim do experimento (Figura 26). Sharshir *et al.* (2022) relataram resultados análogos, onde sua radiação máxima foi de 900

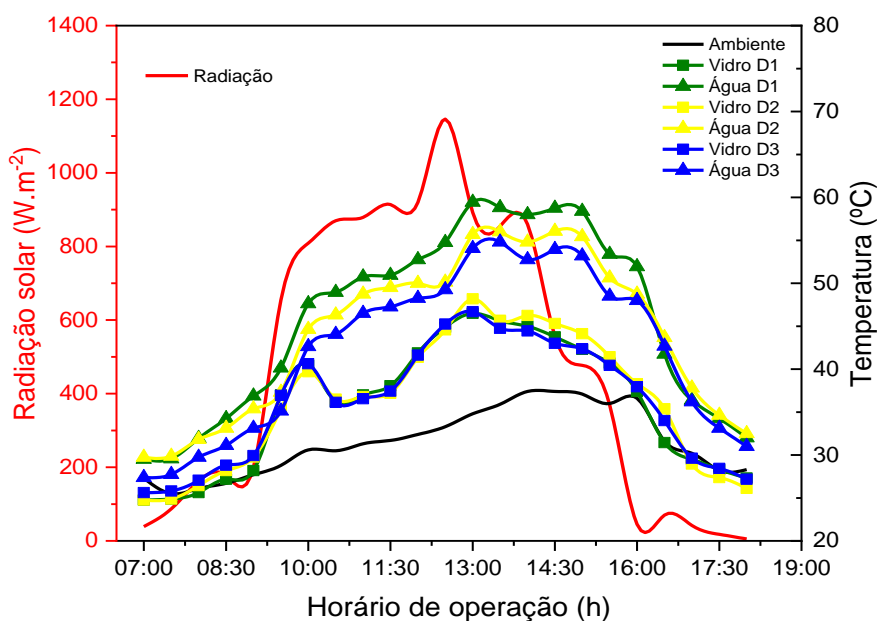
$W.m^{-2}$  ao utilizar o  $TiO_2$  em um dessalinizador solar piramidal, e suas maiores radiações no intervalo das 09h00 às 13h00.

A relação entre a radiação solar e as variações de temperaturas se mostram evidentes durante todo o experimento, resultando em alterações na temperatura da água, podendo ser observadas durante os picos de maiores e menores incidência de radiação, quando às 07:00h as temperaturas das águas dos dessalinizadores D1, D2 e D3 estavam em  $28,37\text{ }^{\circ}C$ ,  $26,69\text{ }^{\circ}C$  e  $28,37\text{ }^{\circ}C$ , respectivamente, a radiação solar estava com  $151\text{ }W.m^{-2}$ , enquanto seus valores máximos foram encontrados às 13:00h, com valores de  $61,88\text{ }^{\circ}C$ ,  $58,13\text{ }^{\circ}C$  e  $59,81\text{ }^{\circ}C$ , ocorreram 30 minutos após o maior pico de radiação. Os dessalinizadores D2 e D3, que receberam o  $TiO_2$  registraram menores temperaturas em relação ao que não recebeu.

Parsa *et al.* (2021), obtiveram resultados semelhantes, justificando que este resultado seria o esperado, considerando uma característica do  $TiO_2$ , cuja condutividade térmica é baixa, dessa forma, resultando em uma menor transferência de calor, quando comparado a outros materiais fototérmicos, como exemplo prata e ouro. Em contrapartida, o  $TiO_2$  possui calor específico elevado, contribuindo assim, para uma maior estabilidade térmica no sistema de dessalinização solar.

A Figura 27 representa o experimento realizado no dia 05/02/2024, que teve início às 07h00 e seguiu até às 18h00. Nela, pode-se observar as temperaturas interna e externa do vidro, temperatura da água, temperatura ambiente em relação com a radiação solar.

**Figura 27** - Perfis de temperatura D1, D2 e D3, lâmina de 2 cm, dia - 05/02/2024.

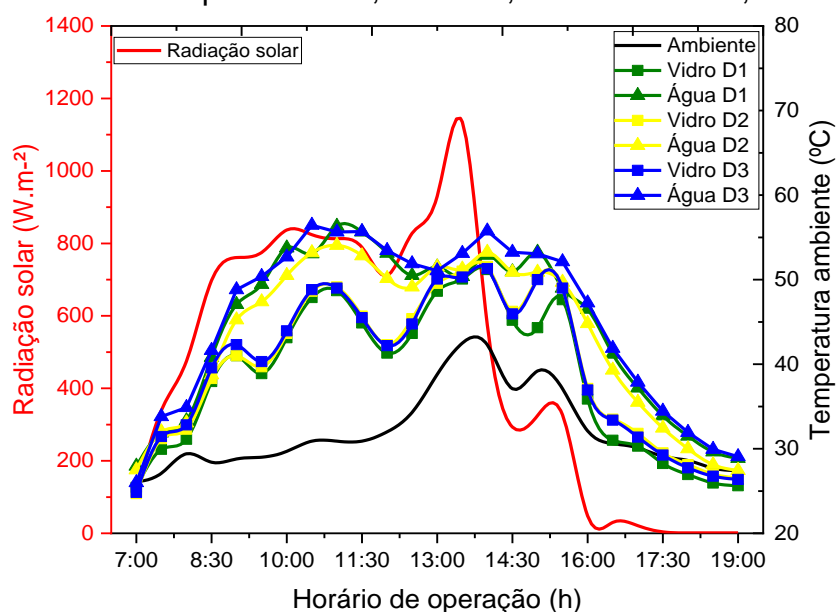


Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Durante todo o experimento a relação entre as temperaturas é evidente, onde às 13h00, em seu maior pico D1 46,50 °C 57,69 °C 59,69°C, D2 48,19 °C 58,00 °C e 59,69 °C D3 46,69 °C, 54,06 °C, 57,75 °C as temperaturas interna e externa do vidro e temperatura da água, respectivamente. Os resultados obtidos mostram que as diferença de temperatura entre a água e a cobertura de vidro são crescentes, como podemos observar. Esse comportamento ocorre de forma gradativa do interior para a parte exterior do dessalinizador devido aos mecanismos internos e externos de transferência de calor, esses resultados vão de encontro do relatado por Sharshir *et al.* (2022).

A Figura 28 apresenta os perfis de temperaturas do vidro interno e externo, temperatura da água e temperatura ambiente, com relação à incidência de radiação solar, durante o experimento realizado dia 08/04/2024, durante o período das 07h00 às 19h00.

**Figura 28** - Perfis de temperatura D1, D2 e D3, lâmina de 2 cm, dia - 08/04/2024.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Durante o experimento foi possível observar que houve variações significativas na radiação solar, após atingir seu maior pico  $1135 \text{ W.m}^{-2}$ , que ocorreu às 13h30, após este horário, às 14h00, a radiação atingiu um valor de  $575 \text{ W.m}^{-2}$ , e continuou decaindo até atingir a radiação mínima, às 18h00, de  $1 \text{ W.m}^{-2}$ . Essas mudanças

bruscas, sendo elas de incidências maiores ou menores, acompanham as condições climáticas no momento da coleta dos dados.

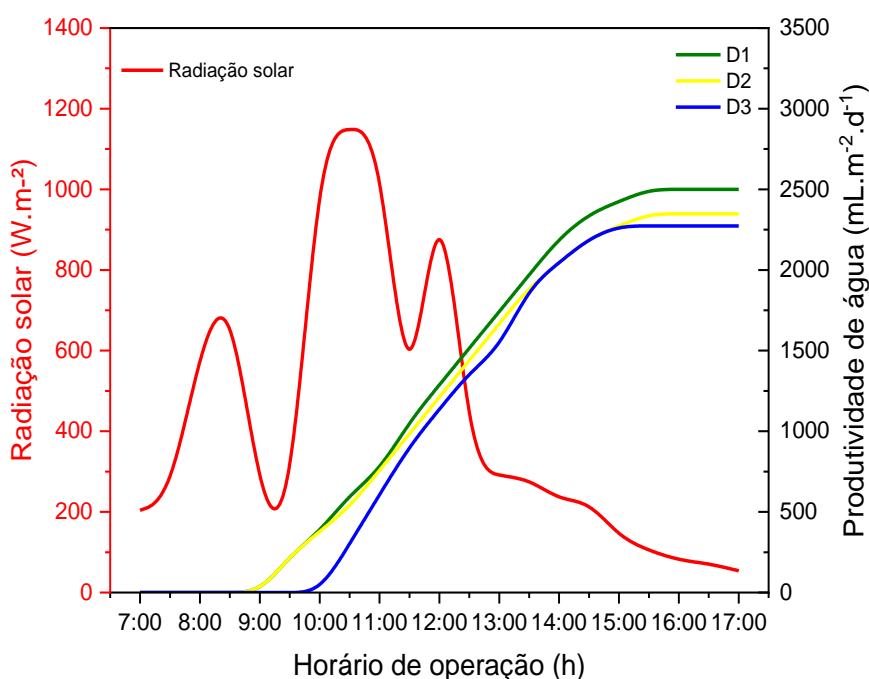
Essas variações interferem diretamente nas temperaturas da água, considerando que são diretamente relacionadas. Conforme Tony e Nabwey, (2024) o aumento da intensidade da radiação solar é o principal responsável pela produção de água dessalinizada.

#### 5.4 Produtividade de água dessalinizada

Com o objetivo de avaliar a eficiência dos dessalinizadores em função da produtividade, durante os experimentos foram coletados os dados dos valores de água dessalinizada horária. Ao final, foi calculada a produtividade total de água dessalinizada acumulada.

A Figura 29, ilustra a produtividade de água com o horário de operação em função da radiação solar nos três dessalinizadores D1, D2 e D3, com lâmina de 1cm. Os experimentos foram realizados no dia 24/01/2024, visando acompanhar o desempenho dos três dessalinizadores e identificar o mais produtivo, para utilizá-lo como referência.

**Figura 29** - Produção de água dessalinizador D1, D2 e D3, lâmina de 1 cm, dia-24/01/2024.



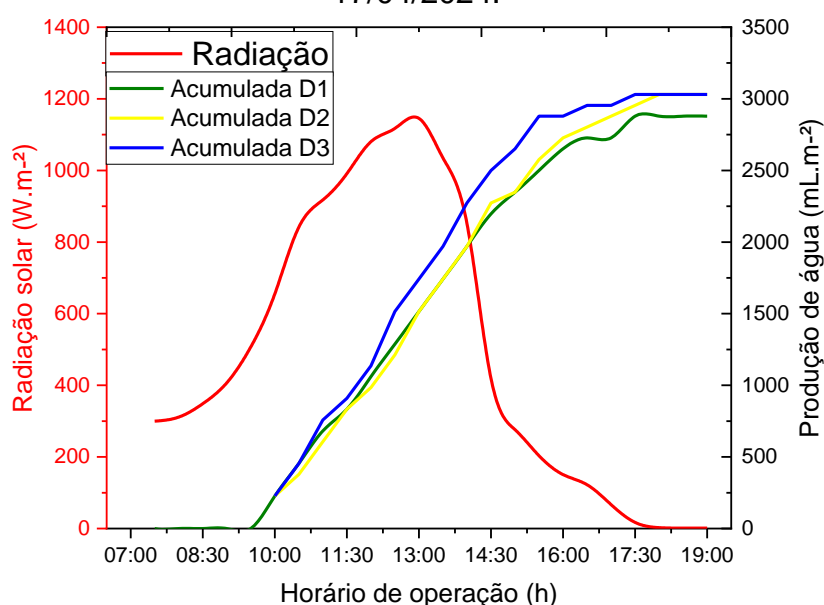
Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Ainda sobre a Figura 29, os dessalinizadores foram alimentados apenas com água salobra, sem a presença do  $\text{TiO}_2$ . Nota-se que o dessalinizador (D1) obteve a maior produtividade quando comparado com os dessalinizadores (D2) e (D3). A produtividade de água dessalinizada durante o experimento foi de  $2500,00 \text{ mL.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  para (D1),  $2348,48 \text{ mL.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  para (D2) e  $2272,73 \text{ mL.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  para (D3). O rendimento da água dessalinizada teve início para o (D1) e (D2) às 09h30min, para o (D3), às 10h30min. Tei *et al.* (2023) alcançaram uma produtividade de água dessalinizada de  $1500 \text{ mL.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ , utilizando o dessalinizador convencional de bandeja única, resultado inferior à maior produtividade obtida nesse experimento com o dessalinizador (D1), que foi de  $2500,00 \text{ mL.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ .

Na Figura 30, observa-se que, ao longo do dia, o volume de água dessalinizada varia de acordo com a incidência de radiação solar. No início do experimento, a radiação já apresentava níveis elevados, alcançando seus picos máximos entre 12h00 e 13h30, com uma média de  $1102,05 \text{ W.m}^{-2}$ .

Ao avaliar os dessalinizadores D2 e D3, observa-se que ambos alcançaram uma produção acumulada de água dessalinizada semelhante, com D2 produzindo cerca de  $2879,78 \text{ mL.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  e D3 produzindo  $3030,3 \text{ mL.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ . Esses resultados reafirmam que a adição de  $\text{TiO}_2$  potencializa o processo de dessalinização devido às suas propriedades fototérmicas.

**Figura 30** - Produção de água dessalinizador D1, D2 e D3, lâmina de 1 cm, dia-17/04/2024.



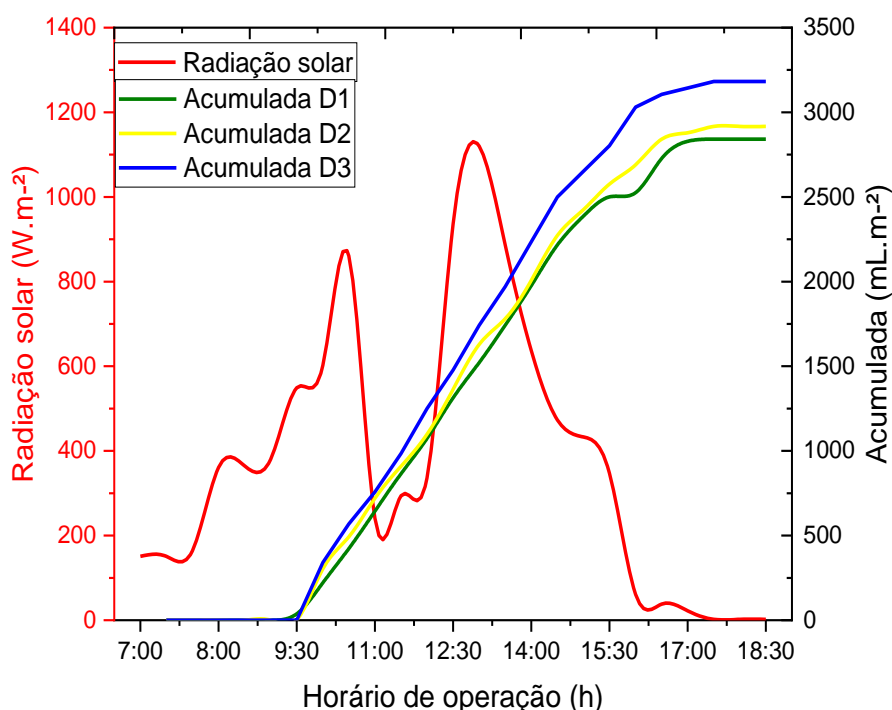
Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Os resultados apresentados (Figura 30) são considerados satisfatórios, especialmente quando comparados aos obtidos por Senthilkumar *et al.* (2024), que utilizaram esferas de vidro como material fototérmico e registraram uma produção de  $2940 \text{ mL.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ .

Na Figura 31, observam-se as produtividades dos dessalinizadores D1, D2 e D3, respectivamente. Os três dessalinizadores começaram a produzir às 10h00, onde, a produtividade acumulada dos dessalinizadores obtiveram resultados de D1  $2840,90 \text{ mL.m}^{-2}$ , D2  $2916,66 \text{ mL.m}^{-2}$  e D3  $3181,82 \text{ mL.m}^{-2}$  aproximadamente, onde o D3 teve maior produtividade, quando comparado a D1 e D2. Diante do apresentado, percebe-se que os dessalinizadores com o  $\text{TiO}_2$  obtiveram melhores resultados, quando comparados ao dessalinizador de referência (D1).

Este desempenho pode ser explicado pelas propriedades específicas do  $\text{TiO}_2$ . Conforme discutido por Parsa *et al.* (2021), o  $\text{TiO}_2$  possui uma baixa condutividade térmica, mas um alto calor específico, o que permite uma retenção de calor específico e uma liberação de progressiva, otimizando o processo de dessalinização solar.

**Figura 31** - Produção de água dessalinizador D1, D2 e D3, lâmina de 1 cm, dia-18/04/2024.



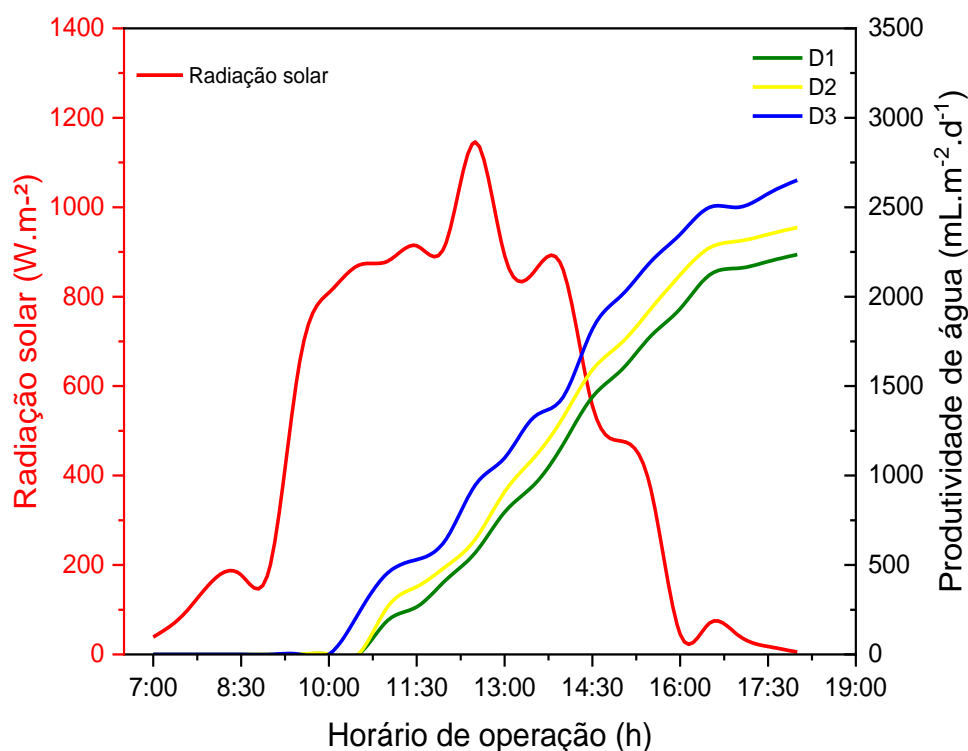
Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Para o dia 05/02/2024, utilizou-se uma lâmina com altura de 2 cm nos dessalinizadores. Nos dessalinizadores (D2) e (D3), foi utilizado como material fototérmico o  $\text{TiO}_2$ , sendo 2,5% de  $\text{TiO}_2$  para (D2) e 5,0% para (D3). O dessalinizador

(D1) foi utilizado como referência. Pode-se observar na Figura 32 a produtividade de água dessalinizada acumulada em virtude da radiação solar. A radiação solar e as variações de temperatura durante o experimento resultaram em uma produtividade acumulada de 2651,5 mL.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup> para o (D3), 2386,4 mL.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup> para (D2) e 2234,9 mL.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup> para (D1). Resultados semelhantes foram encontrados por Carmo e Soares (2022) que registraram uma produtividade acumulada de 2360 mL.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup> quando avaliado com maior velocidade do vento, utilizando um dessalinizador solar piramidal.

Nota-se que o dessalinizador (D3), que utiliza 5,0% de TiO<sub>2</sub>, em sua bandeja como material fototérmico, apresenta-se com maior produtividade. Esses resultados corroboram com os encontrados por Parikh *et al.* (2022), que observaram um aumento na produtividade de 11-18% ao utilizar TiO<sub>2</sub> com briquetes pretos, quando comparado com o dessalinizador convencional. No experimento realizado, o dessalinizador (D3) obteve um aumento de 18% na produtividade em comparação com o (D1), confirmando a eficácia do TiO<sub>2</sub> como material fototérmico.

**Figura 32** - Produção de água dessalinizada D1, D2 e D2, lâmina de 2 cm, dia 05/02/2024.

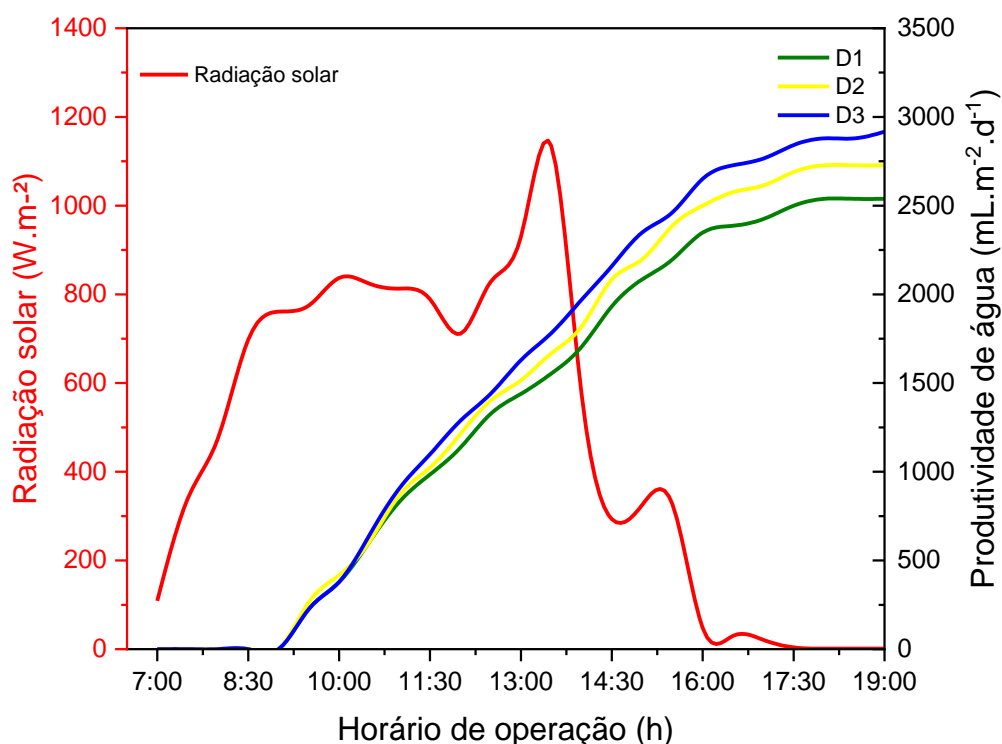


Fonte: Elaborada pela autora, 2024.



A Figura 33, referente ao experimento do dia 08/04/2024 representa os resultados relacionando a produtividade horária com a radiação solar ao utilizar uma lâmina com altura de 2 cm. Observa-se que, das 08h30 às 12h, houve uma radiação média de  $644,67 \text{ W.m}^{-2}$ , o que favoreceu resultados significativos na produtividade para os dessalinizadores (D1), (D2) e (D3). A produtividade alcançou  $2537,88 \text{ mL.m}^{-2}$  para D1,  $2727,27 \text{ mL.m}^{-2}$  para D2 e  $2916,67 \text{ mL.m}^{-2}$  para D3. Em análise comparativa da produtividade acumulada, os dessalinizadores (D2) e (D3) apresentaram aumentos de produtividade de 7,5% e 15%, respectivamente, em comparação ao dessalinizador de referência (D1). Dentre eles, o dessalinizador com 5% de  $\text{TiO}_2$  destacou-se com uma produtividade de  $2916,67 \text{ mL.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ , quando operado com uma lâmina de 2 cm. O estudo de Yuvaperiyasamy, Senthilkumar e Deepanraj (2023), investigou diferentes alturas de lâmina, variando entre 2 cm e 6 cm, para identificar a altura ideal. Eles alcançaram uma produtividade de  $1250,3 \text{ mL.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$  utilizando um dessalinizador piramidal com profundidade de 2 cm.

**Figura 33** - Produção de água dessalinizada D1, D2 e D3, lâmina de 2 cm, dia-08/04/2024.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

## 5.5 Eficiência

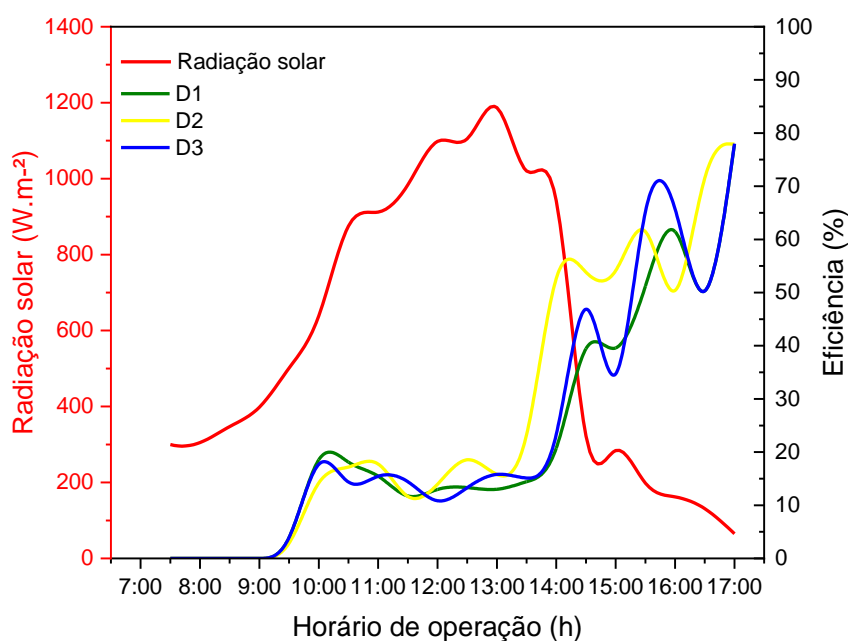
A eficiência é um parâmetro crucial para avaliar o desempenho de um dessalinizador solar e pode ser medida em bases horária e diária. A eficiência horária representa a relação entre o calor latente médio gerado pela água produzida a cada hora e a quantidade total de energia solar absorvida. Devido à variação na irradiação solar ao longo do dia, a eficiência do dessalinizador solar pode apresentar flutuações horárias (Silva *et al.*, 2024).

Observa-se, durante os experimentos, que há uma relação direta entre a eficiência térmica e o comportamento da incidência de radiação solar, onde essa relação exerce influência na produção de água dessalinizada.

Na Figura 34, pode-se observar que a eficiência térmica horária, tem como pico máximo para o D1 77% às 17h00, D2 78% às 16h30 e D3 79% às 17h00. No entanto, as eficiências médias diárias, para cada um dos dessalinizadores foram de D1 46,76% D2 49,47 % e D3 49,54%.

Esses resultados são superiores aos achados por Alshqirate *et al.* (2023) que obteve uma média diária registrada em 47,19% que fizeram uma análise comparativa utilizando dois destiladores solares piramidal, um com fibras naturais (folha de palma) e outro convencional, onde foram atingidos eficiência diárias de 44,9% e 31% respectivamente.

**Figura 34** - Eficiência térmica horária D1, D2 e D3, lâmina de 1 cm, dia - 17/04/2024.

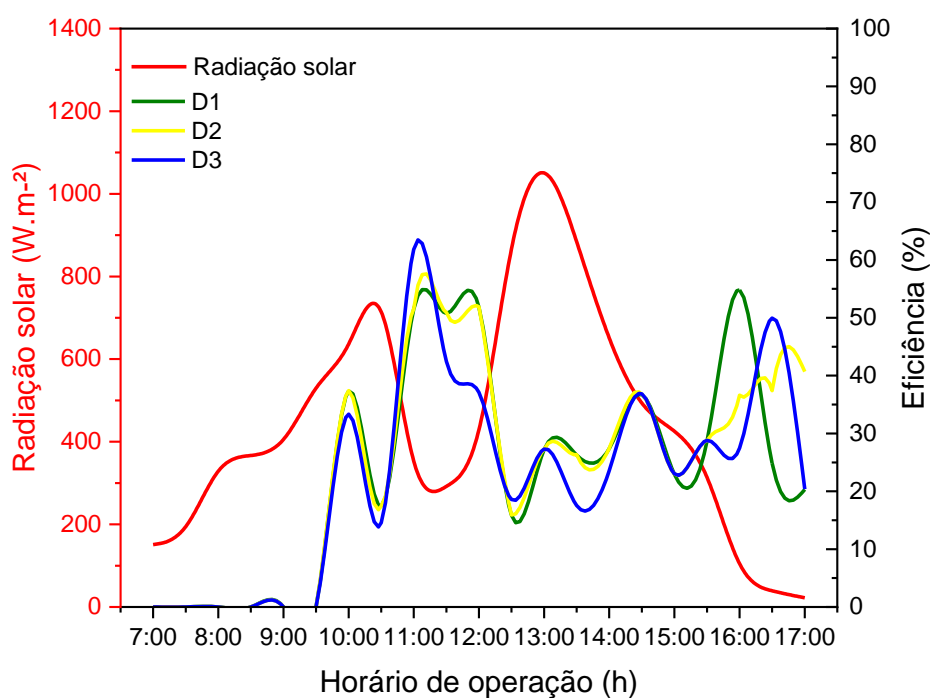


Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Na Figura 35 a eficiência térmica horária dos dessalinizadores demonstrou um comportamento diretamente relacionado à radiação solar, refletindo na produção de água dessalinizada durante o experimento realizado no dia 18/04/2024. As eficiências térmicas máximas observadas foram de 78% para os dessalinizadores D1 e D3 às 16h00, enquanto o D2 atingiu uma eficiência de 88% no mesmo horário. Mesmo com a redução da intensidade da radiação solar nesse período, esse fenômeno pode ser atribuído à capacidade térmica da água, que resulta em uma taxa constante de evaporação, juntamente com o acúmulo de energia térmica previamente armazenada no interior do dessalinizador.

Resultados semelhantes foram relatados por Beik, Assari e Tabrizi (2020), que apresentaram uma eficiência térmica máxima de 89% para um dessalinizador solar de pirâmide escalonada. Esses achados destacam a alta eficiência térmica do dessalinizador solar analisado neste estudo, demonstrando sua eficácia em alcançar elevadas taxas de eficiência térmica comparáveis aos melhores valores da literatura.

**Figura 35** - Eficiência térmica horária D1, D2 e D3, lâmina de 1 cm, dia- 18/04/2024.

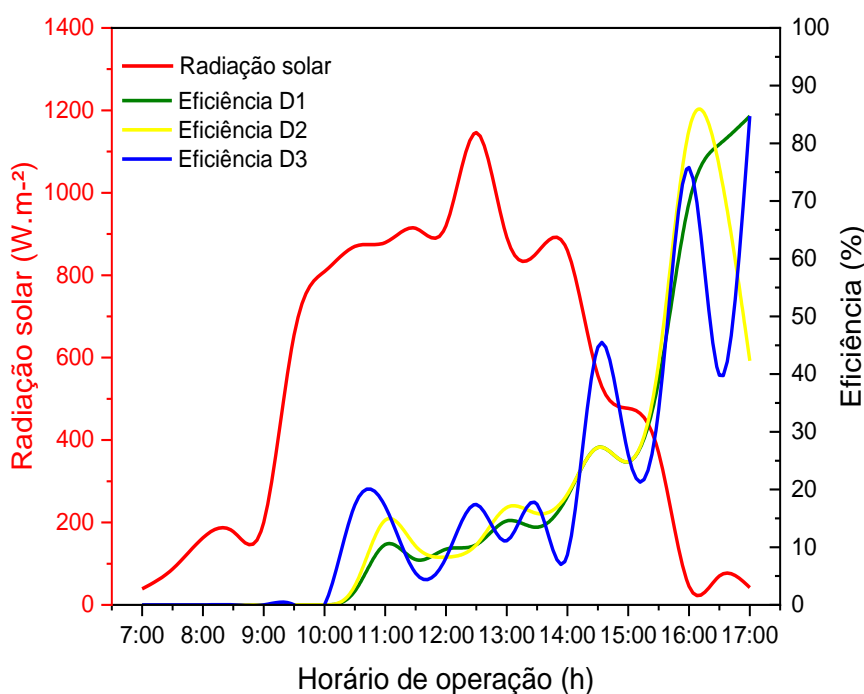


Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

A Figura 36 apresenta os resultados referentes às relações mencionadas para o dia 05/02/2024. As maiores eficiências horárias registradas foram de 95% para o dessalinizador D1, e 84% para os dessalinizadores D2 e D3. A eficiência diária atingiu valores de 39,96% para D1, 40,76% para D2 e 41,19% para D3. Comparando esses

resultados com os achados de Salinas-Freire, Pérez-Ones e Rodríguez-Muñoz (2019), que realizaram análises comparativas de dessalinizadores solares passivos, percebe-se uma diferença significativa. Eles observaram que a eficiência horária máxima desses sistemas variava entre 25% e 63%, enquanto os dados da eficiência diária atingiram um máximo de 45%. Os valores superiores encontrados no presente estudo destacam uma eficiência térmica aprimorada do dessalinizador solar aqui analisado, afirmando a eficácia do sistema em aproveitar e armazenar energia térmica de maneira mais eficiente.

**Figura 36** - Eficiência térmica horária D1, D2 e D3, lâmina de 2 cm, dia - 05/02/2024.

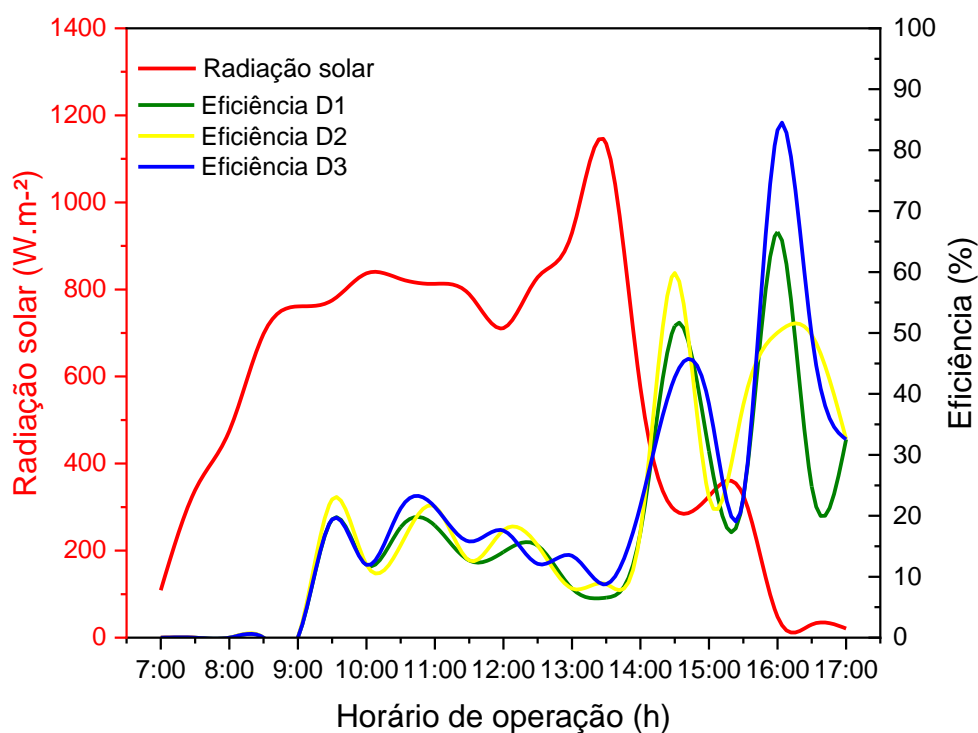


Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

A partir da Figura 37, foi visto que as eficiências térmicas horárias atingiram valores máximos de 66% para o dessalinizador D1 às 16h00, 59% para o dessalinizador D2 às 14h30 e 83% para o dessalinizador D3 às 16h30. As eficiências térmicas diárias foram de 37,02% para o D1, 40,44% para o D2 e 45,56% para o D3, durante o período de operação do experimento. Comparando esses resultados com o estudo realizado por Shanmugan *et al.* (2020), que também utilizou TiO<sub>2</sub> misturado no revestimento da bacia para potencializar o processo de dessalinização solar, observa-se uma diferença significativa. No estudo de Shanmugan *et al.* (2020) a eficiência média diária do sistema foi de 36,69% em condições climáticas semelhantes às do presente experimento. No entanto, os valores obtidos neste estudo são superiores,

evidenciando a eficácia dos dessalinizadores analisados em alcançar uma eficiência térmica mais elevada.

**Figura 37** - Eficiência térmica horária D1, D2 e D3, lâmina de 2 cm, dia- 08/04/2024.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Diante do exposto, os dessalinizadores D2 e D3 apresentaram uma eficiência superior em todos os experimentos, comprovando que a adição de  $\text{TiO}_2$  como material fototérmico foi validada e resultou em uma melhoria significativa na eficiência térmica dos dessalinizadores. Segundo Hameed, Diabil e Moussawi (2023) os materiais fototérmicos funcionam com um armazenamento de calor que libera energia quando a temperatura ambiente diminui, especialmente à noite. Foi descoberto que o melhor tipo de material fototérmico deve ser caracterizado pelo ponto de fusão e calor latente de fusão mais altos.

## 5.6 Coeficientes transferência de calor

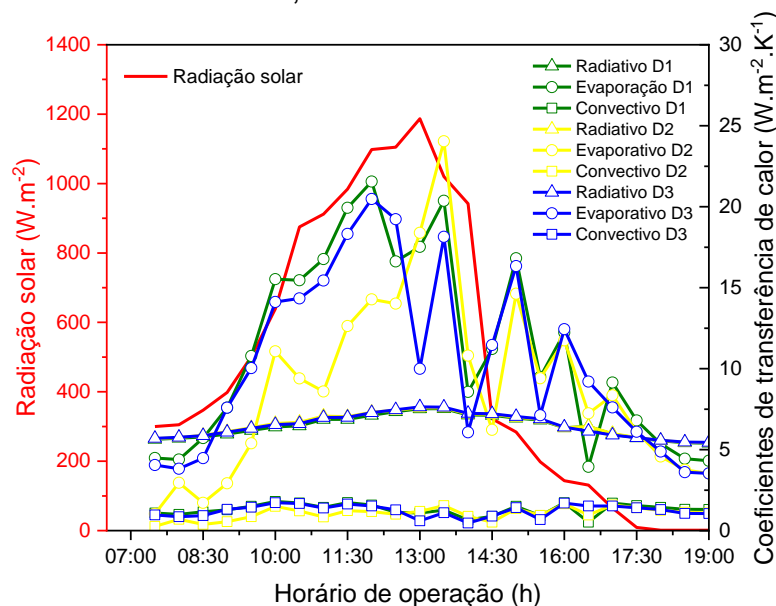
De acordo com Tiwari e Sahota (2017), as curvas dos coeficientes de convecção estão associadas ao movimento do fluido. Em contraste, as curvas de radiação estão relacionadas às temperaturas do vidro e da água, bem como à emissividade do vidro e da água. Por outro lado, as curvas de evaporação apresentam

valores superiores aos dos coeficientes de convecção e radiação, e são geralmente mais sensíveis às variações de temperatura. Isso destaca a importância da evaporação na transferência de calor no dessalinizador solar, evidenciando sua maior resposta às mudanças térmicas em comparação com os outros mecanismos de transferência de calor.

A Figura 38 ilustra as curvas dos coeficientes de convecção, evaporação e radiação para o experimento realizado em 17/04/2024. Os coeficientes de convecção e radiação apresentaram, respectivamente, as seguintes médias: para D1, 1,18 e 6,40  $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ , para D2, 1,30 e 6,42  $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ; e para D3, 1,00 e 6,33  $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ . O coeficiente de evaporação atingiu seus valores máximos de 20,47  $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  para D1 às 12h00, 21,55  $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  para D2 às 12h00 e 24,04  $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  para D3 às 13h30.

Esses dados destacam as diferenças na eficiência térmica dos dessalinizadores analisados e evidenciam o comportamento dos coeficientes em resposta às condições experimentais específicas, ao longo do dia.

**Figura 38** - Coeficientes de transferência de calor dos dessalinizadores, lâmina de 1 cm, dia- 17/04/2024.

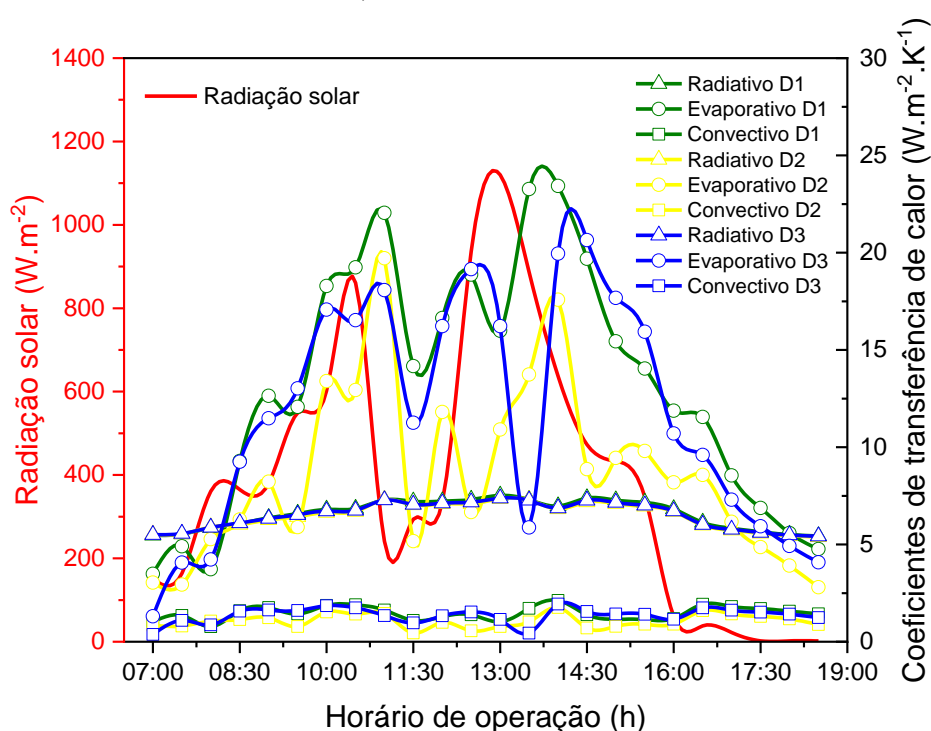


Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

A Figura 38 evidencia uma discrepância significativa entre os valores máximos dos coeficientes de transferência de calor por convecção, D1 1,761  $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ , D2 1,939  $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  e D3 2,12  $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  e radiação D1 7,352  $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ , D2 7,37  $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  e D3 7,52  $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  e, respectivamente, em relação aos valores do coeficiente de transferência de calor por evaporação D1 19,71  $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ , D2 20,64  $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  D3

23,43  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ . Para que ocorra a dessalinização solar, a principal forma de transferência de calor no destilador é a evaporação da água. No entanto, durante este experimento, a curva dos coeficientes evaporativos não desempenhou um papel significativo, podendo ser justificado pelas baixas temperaturas registradas durante o dia, que afetaram o processo de evaporação. Diante disso, o coeficiente evaporativo apresentou um valor máximo limitado, não alcançando a expectativa usual de sua contribuição predominante na transferência de calor.

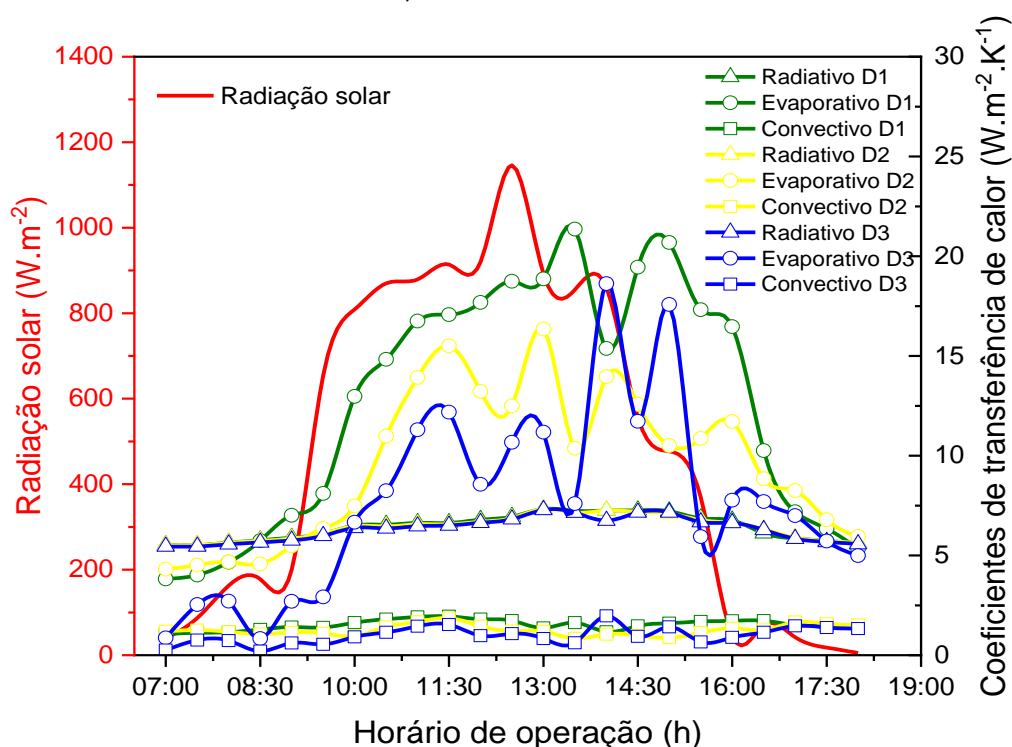
**Figura 39** - Coeficientes de transferência de calor dos dessalinizadores, lâmina de 1 cm, dia - 18/04/2024.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

A Figura 40 expressa os resultados obtidos durante o experimento, onde os coeficientes convectivos, de radiação e evaporativos apresentaram as seguintes médias: D1 1,52  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ , 6,42  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  e 12,61  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ , D2 1,26  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ , 6,39  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  e 9,55  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  e para D3 0,99  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ , 6,31  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  e 7,65  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  respectivamente. Dentre os três coeficientes de transferência de calor no destilador, o coeficiente evaporativo desempenha um papel fundamental. Este fenômeno ocorre porque o processo de evaporação é crucial para a transferência de massa da superfície da água para a condensação na cobertura de vidro (Silva *et al.*, 2024).

**Figura 40** - Coeficientes de transferência de calor dos dessalinizadores, lâmina de 2 cm, dia - 05/02/2024.

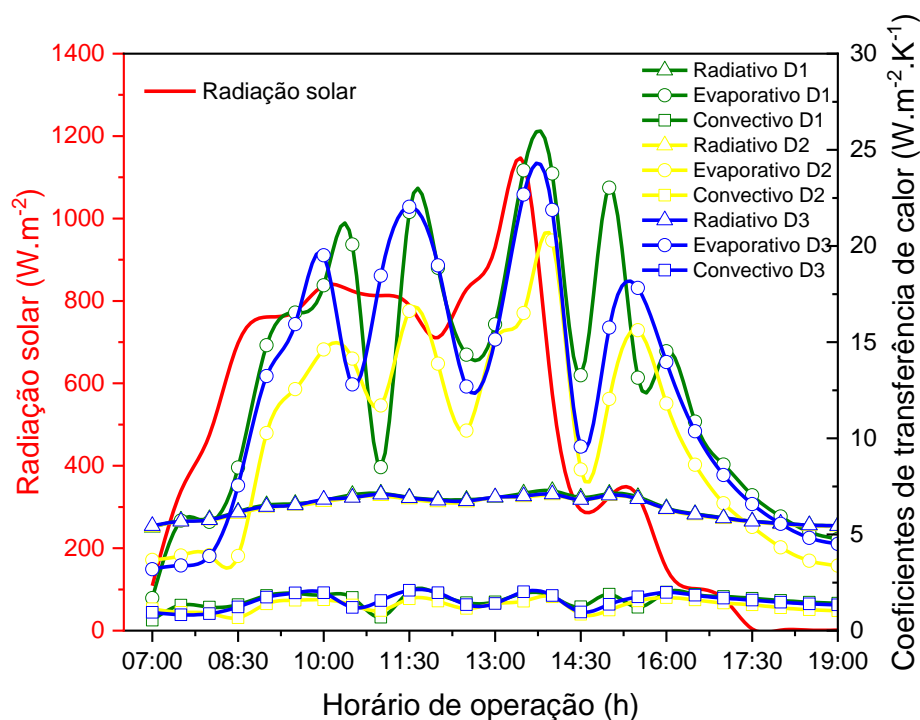


Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

A Figura 41 permite identificar os coeficientes de convecção, radiação e evaporação, que atingiram seus valores máximos nos seguintes pontos: D1 2,10  $W.m^{-2}.K^{-1}$ , 7,09  $W.m^{-2}.K^{-1}$  e 22,67  $W.m^{-2}.K^{-1}$  D2 1,75  $W.m^{-2}.K^{-1}$ , 7,04  $W.m^{-2}.K^{-1}$ , 20,27  $W.m^{-2}.K^{-1}$  e D3 2,04  $W.m^{-2}.K^{-1}$ , 7,42  $W.m^{-2}.K^{-1}$  e 23,93  $W.m^{-2}.K^{-1}$ , respectivamente. Os valores de evaporação variaram de 3,18 a 22,67  $W.m^{-2}.K^{-1}$  para D1, de  $W.m^{-2}.K^{-1}$  para D2 e de 1,68 a 23,93  $W.m^{-2}.K^{-1}$  para D3. Esses dados destacam que, embora todos os coeficientes desempenhem papéis importantes na transferência de calor, o coeficiente de evaporação apresenta uma variação significativa, indicando sua sensibilidade às condições experimentais.



**Figura 41** - Coeficientes de transferência de calor dos dessalinizadores, lâmina de 2 cm, dia- 08/04/2024.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

## 5.7 Qualidade físico-química da água

Os resultados dos indicadores físico-químicos da água dessalinizada estão apresentados nas Tabelas 8, 9, 10 e 11 quando utilizadas lâminas de 1 cm e 2 cm, respectivamente. As amostras das águas utilizadas nos dessalinizadores foram coletadas no Sítio Campo Comprido, localizado no município de Queimadas/PB. Conforme os indicadores físico-químicos analisados, o processo de dessalinização solar utilizando a água salobra, demonstrou-se eficaz, uma vez que a condutividade elétrica, alcalinidade, turbidez, cloretos, dureza total, sódio, potássio e pH apresentam-se dentro dos padrões de potabilidade após a dessalinização.

O pH trata-se de um indicador de acidez de uma amostra de água, medido em uma escala que 0 a 14 (Jamil; Akhtar, 2017). Os resultados obtidos das análises, apresentam que o potencial hidrogênio (pH) da água bruta mostra um valor acima de 7, classificando-a como básica. Após o processo de dessalinização, o pH das águas dessalinizadas ficou no intervalo de 6 e 6,5. Conforme a Portaria de Consolidação nº 5 do Ministério da Saúde (Brasil, 2017), que dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano, recomenda-se

para a água potável a faixa de pH entre 6,0 e 9,5, o que significa que os valores obtidos com a água dessalinizada estão dentro dos limites aceitáveis.

**Tabela 8** - Parâmetros físico-químicos dos dessalinizadores para o dia 17/04/2024.

Parâmetro de controle	A.B.	17/04/2024		
		A.D.[1]	A.D.[2]	A.D.[3]
pH	7,7	6,0	6,1	6,0
Condutividade elétrica ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	130	1,8	1,1	1,3
Alcalinidade ( $\text{mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ )	240,6	7,0	8,0	7,0
Turbidez (NTU)	3,0	0,30	0,40	0,17
Cloretos ( $\text{mg Cl}\cdot\text{L}^{-1}$ )	320	22,5	29,8	22,7
Dureza total ( $\text{mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ )	352	0,0	0,0	0,0
Sódio ( $\text{mg Na}^+\cdot\text{L}^{-1}$ )	402	4,0	4,0	4,0
Potássio ( $\text{mg K}^+\cdot\text{L}^{-1}$ )	30	1,0	0,0	0,0

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

A.B. = Água bruta; A.D. = Água dessalinizada; VPM\*\* = Valor máximo permitido conforme a Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021 do Ministério da Saúde.

**Tabela 9** - Parâmetros físico-químicos dos dessalinizadores para o dia 18/04/2024.

Parâmetro de controle	A.B.	18/04/2024			
		A.D.[1]	A.D.[2]	A.D.[3]	V.M.P.
pH	7,7	6,0	6,2	6,2	6,0-9,0
Condutividade elétrica ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	130	2,6	2,7	2,8	-
Alcalinidade ( $\text{mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ )	240,6	8,0	7,0	8,0	-
Turbidez (NTU)	3,0	0,40	0,42	0,28	5,0
Cloretos ( $\text{mg Cl}\cdot\text{L}^{-1}$ )	320	24,8	28,7	28,6	250,0
Dureza total ( $\text{mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ )	352	0,0	0,0	0,0	500,0
Sódio ( $\text{mg Na}^+\cdot\text{L}^{-1}$ )	402	4,0	3,0	2,0	300,0
Potássio ( $\text{mg K}^+\cdot\text{L}^{-1}$ )	30	0,0	0,0	1,0	-

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

A.B. = Água bruta; A.D. = Água dessalinizada; VPM\*\* = Valor máximo permitido conforme a Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021 do Ministério da Saúde.

A condutividade elétrica é a capacidade de uma substância de conduzir corrente elétrica. No caso da água, a condutividade elétrica é proporcional a concentração de sais dissolvidos, que estão presentes na forma de íons (cátions e ânions) (Jamil; Akhtar, 2017). Os valores encontrados na água dessalinizada foram entre  $1,1 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  e  $2,8 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , foi possível observar redução entre 97% e 99% na

condutividade elétrica nas águas após o processo de dessalinização solar. Resultados semelhantes foram obtidos por Sarmiento *et al.* (2024), no estudo analisaram águas dessalinizadas na cidade de Campina Grande-PB, e obtiveram valores entre 2,0 e 9,0  $\mu\text{S.cm}^{-1}$ .

**Tabela 10** - Resultado dos parâmetros físico-químicos dos dessalinizadores para o dia 05/02/2024.

Parâmetro de controle	A.B.	05/02/2024		
		A.D.[1]	A.D.[2]	A.D.[3]
pH	7,7	6,0	6,2	6,3
Condutividade elétrica ( $\mu\text{S.cm}^{-1}$ )	130	1,2	1,1	1,9
Alcalinidade ( $\text{mg CaCO}_3.\text{L}^{-1}$ )	240,6	11,0	8,0	10,0
Turbidez (NTU)	3,0	0,15	0,73	0,42
Cloretos ( $\text{mg Cl}^-\text{.L}^{-1}$ )	320	22,5	26,2	23,9
Dureza total ( $\text{mg CaCO}_3.\text{L}^{-1}$ )	352	0,0	0,0	0,0
Sódio ( $\text{mg Na}^+.\text{L}^{-1}$ )	402	2,0	3,0	3,0
Potássio ( $\text{mg K}^+.\text{L}^{-1}$ )	30	0,0	0,0	0,0

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

A.B. = Água bruta; A.D. = Água dessalinizada; VPM\*\* = Valor máximo permitido conforme a Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021 do Ministério da Saúde.

**Tabela 11** - Resultado dos parâmetros físico-químicos dos dessalinizadores para o dia 08/04/2024.

Parâmetro de controle	A.B.	08/04/2024			
		A.D.[1]	A.D.[2]	A.D.[3]	V.M.P.
pH	7,7	6,1	6,1	6,2	6,0-9,0
Condutividade elétrica ( $\mu\text{S.cm}^{-1}$ )	130	1,4	1,2	1,3	-
Alcalinidade ( $\text{mg CaCO}_3.\text{L}^{-1}$ )	240,6	10,0	10,0	9,0	-
Turbidez (NTU)	3,0	0,22	0,46	0,18	5,0
Cloretos ( $\text{mg Cl}^-\text{.L}^{-1}$ )	320	28,7	26,2	23,9	250,0
Dureza total ( $\text{mg CaCO}_3.\text{L}^{-1}$ )	352	0,0	0,0	0,0	500,0
Sódio ( $\text{mg Na}^+.\text{L}^{-1}$ )	402	5,0	2,0	3,0	300,0
Potássio ( $\text{mg K}^+.\text{L}^{-1}$ )	30	0,0	1,0	0,0	-

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

A.B. = Água bruta; A.D. = Água dessalinizada; VPM\*\* = Valor máximo permitido conforme a Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021 do Ministério da Saúde.

Alfaifi *et al.* (2020), apresenta que uma maior alcalinidade aumenta a capacidade da água de neutralizar ácidos, enquanto uma menor alcalinidade reduz essa capacidade. As amostras analisadas, apresentaram valores entre 7 mg.L<sup>-1</sup> e 11 mg.L<sup>-1</sup>, todas as amostras apresentaram uma redução significativa após o processo de dessalinização. Embora na portaria não apresente limites máximos permitidos, percebe-se reduções acima de 95%. O indicador turbidez, em unidades nefelométricas de turbidez (NTU), refere-se à turbidez da água causada por partículas suspensas, como argila e silte, precipitados químicos como manganês e ferro. A água turva reduz sua aceitabilidade estética para consumo humano. Nota-se que a amostra da água bruta, mesmo antes do processo de dessalinização, apresentava valor de 3,0 NTU, ou seja, abaixo de 5,0 NTU e dentro do limite permitido pela portaria. Resultados semelhantes encontrando valores de 0,58 NTU, 0,25 NTU e 0,30 NTU, foram encontrados por Alfaifi *et al.* (2020),

Os teores de cloretos nas amostras da água dessalinizada foram entre 22,5 mg. L<sup>-1</sup> e 29,8 mg. L<sup>-1</sup> após o processo de dessalinização, com remoção superior a 90%, valores se assemelham aos resultados de Brito *et al.* (2020) que foram de 21,3 mg.L<sup>-1</sup>. Para Masood *et al.* (2021), o excesso de cloreto nas águas pode ocasionar sabor salgado na água e aumentar a sua corrosividade. Além disso, a exposição à água com alto teor de cloreto pode causar efeitos laxativos em seres humanos. Alfaifi *et al.* (2020), a dureza de uma amostra é atribuída à presença de sais de cálcio e magnésio. Para a água em estudo, observa-se que a água bruta apresentava valor de dureza total de 352 mg.L<sup>-1</sup> abaixo do valor máximo permitido pela portaria. É importante destacar que, na água dessalinizada, a remoção de dureza total atingiu 100% em todos os dias do experimento.

Com relação ao sódio, o valor máximo permitido pela Portaria nº 888/2021, é de 200mg.L<sup>-1</sup>. No estudo, foi utilizada uma água bruta com teor de sódio de 402mg.L<sup>-1</sup>, após a dessalinização houve uma redução considerável acima de 98%, com valores entre 2,0 mg.L<sup>-1</sup> e 5,0 mg.L<sup>-1</sup>. Tais valores de sódio na água bruta se mostram inferiores ao encontrado por Brito *et al.* (2020), que foi de 420mg.L<sup>-1</sup>. No entanto, a água dessalinizada apresentou um valor de 7,0 mg.L<sup>-1</sup>, o que representa superior ao encontrado nessa pesquisa.

Com relação ao potássio, a Portaria de consolidação nº 005/2017 do Ministério da Saúde não estabelece limites nas águas de abastecimento humano. Porém, é importante destacar que, após o processo de dessalinização, as amostras utilizadas

apresentaram redução acima de 96% do teor de potássio, valores entre 0,0 mg.L<sup>-1</sup> e 1,0 mg.L<sup>-1</sup>. Valores semelhantes foram encontrados por Silva *et al.*(2024), obtiveram uma remoção de 100%.

## 6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, foi possível chegar as seguintes conclusões:

- Através das caracterizações foi possível obter a composição química, morfológica e análises térmicas que são características do  $\text{TiO}_2$ , confirmando a composição do material, sua distribuição granulométrica, assim como, seus picos e bandas.

- Ao utilizar a mistura  $\text{TiO}_2$  na tinta resultou em um aumento na produtividade em D2 e D3, quando comparado ao D1. Foi possível identificar que os experimentos em que a lâmina de 1 cm foi utilizada, tiveram melhores resultados em sua produtividade de água dessalinizada, quando comparada aos de 2 cm.

- Portanto, a introdução do  $\text{TiO}_2$  na tinta fototérmica presente na bandeja dos dessalinizadores, resultou na sinergia das propriedades destes materiais, confirmando que o  $\text{TiO}_2$  possui características adequadas para atuar como material fototérmico na dessalinização via energia solar. Além disso, o uso dos dessalinizadores solares do tipo pirâmide, garantiu a potabilidade da água, atendendo aos padrões estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888 do Ministério da Saúde.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Foram identificados ajustes para otimizar os sistemas em trabalhos futuros:

- Melhorar o isolamento térmico nas técnicas de construção, como forma de otimizar os processos de aproveitamento da radiação solar.
- Realizar outras avaliações e testes em períodos mais longos.
- Analisar as características microbiológicas da água antes e após o processo de dessalinização.
- Fazer a modelagem térmica e estatística dos dessalinizadores.
- Estudar a viabilidade técnico-econômica do dessalinizador solar proposto para atender as necessidades de comunidades isoladas.

## REFERÊNCIAS

- ABU-ARABI, M. *et al.* Arabi, M., Al-harahsheh, M., Ahmad, M., Mousa, H., 2020. Theoretical modeling of a glass-cooled solar still incorporating PCM and coupled to flat plate solar collector. **Journal of Energy Storage**, v. 29, 2020.
- ALATAWI, I.; SUBHANI, T.; MOHAMED M.Z. AHMED, M. M. Z.; ALQSAIR, U. F.; A.S. Abdullah, A. S.; Mohamed Elashmawy, M. Experimental investigation of a developed tubular solar still with longitudinal wicked fins. **Renewable Energy** v. 193, p. 1074-1081, 2022
- ALSHQIRATE, A.; AWAD, A. S.; ALAWIN, A. Al.; ESSA, Mohamed A. Experimental investigation of solar still productivity enhancement of distilled water by using natural fibers. **Desalination**, v. 553, p. 116487, 2023.
- ALFAIFI, H.J.; KAHAL, A.Y.; ABDELRAHMAN, K.; ZAIDI, F. K.; ALBASSAM, A.; LASHIN, A. Assessment of groundwater quality in Southern Saudi Arabia: case study of Najran area. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 13, p. 101, 2020.
- AKBARZADEH. A.; AHMADLOUYDARAB. M.; NIAEI. A. Capabilities of  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and bentonite dry powders used in flat plate solar collector for thermal energy storage. **Renewable Energy**, v. 173, p. 704-720, 2021.
- AMJAD, M. JIN, H.; DU, X.; WEN, D. Experimental photothermal performance of nanofluids under concentrated solar flux. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 182, p. 255-262, 2018.
- AMORIM. L. V.; GOMES. C. M.; SILVA. F. L. H.; FRANÇA. K. B.; LIRA. H. L.; FERREIRA. H. C. Uso da eletrodialise na eliminação de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> e sua influência na reologia de dispersões de argilas bentoníticas da Paraíba. **Cerâmica** v. 51, p. 319, 2005.
- AMORIM, M. C. C.; Porto, E. R.; Matos, A. N. B.; Silva, D. F. **Diagnóstico de sistemas de dessaliniza o de água salobra subterrânea em municípios do estado da Paraíba – Brasil**. Congresso Brasileiro de  guas Subterrâneas, p. 1-17, 2004.
- ASADI. A.; ASADI. M.; REZANIAKOLAEI. A.; LASSE AISTRUP ROSENDAHL. L. A.; WONGWISES. M. A. S. Heat transfer efficiency of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MWCNT/thermal oil hybrid nanofluid as a cooling fluid in thermal and energy management applications: An experimental and theoretical investigation. **International Journal of Heat and Mass Transfer**,v.117, p. 474-486, 2018.
- BAIRD, R.B.; EATON, A. D.; RICE, E. W. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 1496 p. 23 edition. Washington, USA: American Public Health Association, 2017.



BANDARRA FILHO, E. P.; MENDONZA, O. S. H.; MENEZES, A.; BEICKER, CAROLINA L. A. U; WEN, DONGSHENG. Experimental investigation of a silver nanoparticle-based direct. **Energy Conversion and Management**, v. 84, p. 261-267, 2014.

BAUR, W. H. Atomabstande um bindungswinkel im brookit,  $\text{TiO}_2$ . **Acta Crystallographica**, 14, 214-216, 191.

BEIK, A. J. G.; ASSARI, M. R.; TABRIZI, H. B. Passive and active performance of a multi- side-stepped square pyramid solar still; experimental and modeling. **Journal of Energy Storage**, v. 32, p. 101832, 2020.

BESSERGENEV, V. G.; MATEUS, M. C.; REGO, A. M. B.; HANTUSCHC, M.; BURKEL, E. An improvement of photocatalytic activity of  $\text{TiO}_2$  Degussa P25 powder, **Applied Catalysis A: General**, v. 500, p. 42-50, 2015.

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.

BRASIL. **Portaria GM/MS de nº 888 de 04 de maio de 2021 do Ministério da Saúde**. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, 2021.

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

BHALLA, V.; TYAGI, H. Solar energy harvesting by cobalt oxide nanoparticles, a nanofluid absorption based system. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 24, p. 45-54, 2017.

CARUANA, L.; ABELA, S. C.; REFALO, P. Development and Analysis of a Floating Solar Distillation Device. **Desalination and Water Treatment**, v. 228, p. 36-46, 2021.

BURN,S.; HOANG, M.; ZARZO, D.; WNIK, F. O.; CAMPOS, E.; BOLTO, B.; BARRON, O. Desalination techniques- A review of the opportunities for desalination in agriculture. **Desalination**, v. 364, p. 2-16, 2015.

CARP, O.; HUISMAN, C. L.; RELLER, A. Photoinduced reactivity of titanium dioxide. **Progress in Solid State Chemistry**, 32, 33-177, 2004.

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

CARMO, C. G. S.; SOARES, M. B. D.; Avaliação Preliminar Do Desempenho De Um Destilador Solar Piramidal Para Produção De Água Para Consumo Humano. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 30, 2022.

CHEN, X.; & MAO, S. S. Titanium Dioxide Nanomaterials: Synthesis, Properties, Modifications, and Applications. **Chemical reviews**, v. 107, n. 7, p. 2891-2959, 200.

CHOUDHURY, B.; CHOUDHURY, A. Luminescence characteristics of cobalt doped TiO<sub>2</sub> nanoparticles, **Journal of Luminescence**, v. 132, p. 178-184, 2012.

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

CONTRERAS, C. A.; SUGITA, S.; RAMOS, E. Preparation of sodium aluminate from basic aluminium sulfate. *Advances in Technology of Materials and Materials Processing Journal*, v. 8, n° 2, p. 122-129, 2006.

DHAOUI, S.; CHOUBANI, K.; HAMDY, F.; GHRIS, O.; BOUABIDI, A.; ALASIRI, A.; EL HADI, M. A. Attia Experimental investigation of the effect of angled fins on the energy and exergy efficiencies of solar stills: A comparison between double slope and pyramid solar stills under Tunisia weather conditions, **Process Safety and Environmental Protection**, v.188, p. 1069-1080, 2024.

DIWANIA, S.; KUMAR, R.; KUMAR, S. S.; DUA, G. S.; Khetrapal. P. Performance assessment of a serpentine tube PVT system using Cu and TiO<sub>2</sub> nanofluids: an experimental study. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, 2022.

DAI, K.; CHEN, H.; PENG, T.; KE, D.; YI, H. Photocatalytic degradation of methyl orange in aqueous suspension of mesoporous titania nanoparticles, **Chemosphere**, v. 69 p. 1361-1367, 2007.

DELEKAR, S. D.; YADAV, H. M.; ACHARY, S. N.; MEENA, S. S.; PAWAR, S. H. Structural Refinement and Photocatalytic Activity of Fe-Doped Anatase TiO<sub>2</sub> Nanoparticles, **Applied Surface Science**, v. 263, p. 536-545, 2012.

DEVI, L. G.; MURHTY, B. N.; KUMAR, S. G. Photo catalytic degradation of imidachloprid under solar light using metal ion doped TiO<sub>2</sub> nano particles: influence of oxidation state and electronic configuration of dopants, **Catalysis Letters**, v. 130, p. 496-503, 2009.

DIEBOLD, U. The surface science of titanium dioxide. **Surface Science Reports**, v. 48, p. 53-229, 2003.

DOSTANIĆ, J.; GRBIĆ, B.; RADIĆ, N.; STOJADINOVIĆ, S.; VASILIĆ, R.; VUKOVIĆ, Z. preparation and photocatalytic properties of TiO<sub>2</sub>-P25 film prepared by spray pyrolysis method, **Applied Surface Science**, v. 274, p. 321-327, 2013.

DUBON, J. A. M.; PINHEIRO, J. C. V. Aproveitamento de águas residuais provenientes de dessalinizadores instalados no estado de Ceará. Ceará: [s.n.], 2001.

DUMKA, P.; MISHRA, D. R. Performance evaluation of single slope solar still augmented with the ultrasonic fogger. **Energy**, v. 190, 2020.

DUVARCI, Ö. Ç.; ÇİFTÇIOĞLU, M. Preparation and characterization of nanocrystalline titania powders by sonochemical synthesis, **Powder Technology**, v. 228, p. 231-240, 2012.

FARHANA, K.; KADIRGAMA, K.; RAHMAN, M. M.; RAMASAMY, D.; NOOR, M. M.; NAJAFI, G.; SAMYKANO, M.; MAHAMUDE, A. S. F. Improvement in the performance of solar collectors with nanofluids - a state-of-the-art review. **Nano-Structures & Nano- Objects**, v. 18, p. 100276, 2019.

ESMARILZADE. F.; TEJA. S. A.; BAKHTYARI. A. The thermal conductivity, viscosity, and cloud points of bentonite nanofluids with n-pentadecane as the base fluid. **Journal of Molecular Liquids**, v 300, p 112307, 2020.

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

ELTAWIL, M. A.; ABDELFATTAH, A. A.; & ELSHERIF, H. Performance Analysis of Solar Desalination Systems under Varying Meteorological Conditions. **Desalination**, v. 532, p. 115396, 2022.

ELASHMAWY, M.; MOHAMED M. AHMED, M. Z. M.; WISSAM H. ALAWEE W. H.; S. SHANMUGAN, S.; Z. M. OMARA, M. Z. Scientometric analysis and review of materials affecting solar still performance, **Results in Engineering**, v. 23, p. 102574, 2024.

EL-SHEIKH, S. M.; KHEDR, T. M.; HAKKI, A.; ISMAIL, A. A.; BADAWY, W. A.; BAHNEMANN, D. W. Visible light activated carbon and nitrogen Co-doped mesoporous TiO<sub>2</sub> as efficient photocatalyst for degradation of ibuprofen, **Separation and Purification Technology**, v. 173, p. 258-268, 2017.

ELTAWIL, M. A., ZHENGMING, Z., & YUAN, L. *A review of renewable energy technologies integrated with desalination systems*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13(9), p. 2245-2262, 2019.

FAROUK, W. M., ABDULLAH, A. S., MOHAMMED, S. A., ALAWEE, W. H., OMARA, Z. M., & ESSA, F. A. Modeling and optimization of working conditions of pyramid solar still with different nanoparticles using response surface methodology. **Case Studies in Thermal Engineering**, 33, 101984, 2022.

FOUNDATION FOR WATER RESEARCH. **Desalination for Water Supply**. Buchs, UK, p. 35, 2011.

GAIANET. **Dessalinização de águas**. Folheto Ecológico, 2021. Acesso em: 27/01/2021. Disponível em: <https://gaianet.com/dessalinizacao-de-aguas/>

GAIO, S. S. M. Produção de água potável por dessalinização: tecnologias, mercado e análise de viabilidade econômica. Dissertação de Mestrado. Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciência, 2016.

GALDINO, A. G. S.; OLIVEIRA, E. M.; MONTEIRO, F. B. F.; ZAVAGLIA, C. A. C. Análise de ensaios in vitro do compósito de 50% ha-50% TiO<sub>2</sub> fabricados pelo método da esponja polimérica, **Cerâmica**, v. 60, p. 586-593, 2014.

GANDHI, V. G.; MISHRA, M. K.; JOSHI, P. A. A study on deactivation and regeneration of titanium dioxide during photocatalytic degradation of phthalic acid, **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 18, n. 6, p. 1902-1907, 2012.

GHEZELGHESHLAGHI, S.; MEHRNIA, M. R.; HOMAYOONFAL, M.; MONTAZER-RAHMATI, M. M. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/poly acrylonitrile nanocomposite membrane: from Engineering design of pores to efficient biological macromolecules separation. **Journal of Porous Materials**, v. 25, p. 1161-1181, 2018.

GORJI, T. B.; RANJBAR, A. A. A review on optical properties and application of nanofluids in direct absorption solar collectors (DASCs). **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 10-32, 2017.

GORJI, T. B.; RANJBAR, A. A. Thermal and exergy optimization of a nanofluid-based direct absorption solar collector. *Renew. Energy* v. 106, p. 274-287, 2017.

GUPTA, H. K.; AGRAWAL, G. D.; MATHUR, J. Investigations for effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O nanofluid flow rate on the efficiency of direct absorption solar collector. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 5, p. 70-78 2015.

HAMEED, H. G; DIABIL, H. A. N.; M.A. AL-MOUSSAWI, M.A. A numerical investigation of the enhancement of single-slope single-basin solar still productivity. v. 9, p. 484-500, 2023.

HAMEED, H.; G.; DIABIL, H. A. N.; AL-MOUSSAWI M.A. A numerical investigation of the enhancement of single-slope single-basin solar still productivity. **Energy Reports**, v. 9, p. 484-500, 2023.

HAMMOODI, K. A.; DHAHAD, H. A.; ALAWEE, W. H.; OMARA, Z. M.; A detailed review of the factors impacting pyramid type solar still performance. *Alexandria Engineering Journal*, v. 66, p. 123-154, 2023.

ISENMANN, A. F. **Operações Unitárias na Indústria Química**. 3ª edição, Timóteo, MG Edição do Autor, 2018.

JAMIL, B.; AKHTAR, N. Effect of specific height on the performance of a single slope solar still: An experimental study, **Desalination**, v. 414, p. 73-88, 2017.

KABEEL, A. E.; ABDELGAIED, M.; & EL-AGOUZ, S. A. The Impact of Ambient Temperature on Solar Desalination System Efficiency. **Energy Conversion and Management**, v. 178, p. 160-169, 2018.

JANITABAR DARZI, S.; MAHJOUR, A. R.; NILCHI, A. Synthesis of Spongelike Mesoporous Anatase and its Photocatalytic Properties. **Journal of Chemistry and Chemical Engineering**, v. 29, n. 2, p. 37-42, 2010.

JOSEPH, S.; MATHEW, B. Microwave assisted biosynthesis of silver nanoparticles using the rhizome extract of alpinia galanga and evaluation of their catalytic and antimicrobial activities, **Journal of Nanoparticles**, v. 2014, p. 1-9, 2014.

KABEEL. A.E.; HARBYB. K.; MOHAMED. A.; EISA. A.; Performance of the modified tubular solar still integrated with cylindrical parabolic concentrators. **Solar energy**, v. 204, p. 181-189, 2020.

KABEEL, A. E.; ABDELGAIED, M.; & HAMED, M. H. *Performance enhancement of a single basin solar still using a developed film cooling method: An experimental approach.* **Desalination**, v. 474, p. 114189, 2020.

KAMEL. M. S.; AL-ORAN. O.; LEZSOVITS. F. Thermal Conductivity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CeO<sub>2</sub> Nanoparticles and Their Hybrid Based Water Nanofluids: An Experimental Study. **Periodica Polytechnica Chemical Engineering**, v. 65, p. 50-60, 2021.

KUMAR. S.; CHANDER. N.; KUMAR. V. G.; KUKREJA. R. Progress, challenges and future prospects of plasmonic nanofluid based direct absorption solar collectors – A state-of-the-art review. **Solar Energy**, v. 227, p. 365-425, 2021.

KUMAR, P. M.; C. SENTHIL KUMAR, C. S.; MURALIDHARAN, K.; MUNIRATNAM, Y.; ABRAHAM, K.; MANIKANDAN, V.; STALIN, P. M. J.; PRASANTH, S. J. Augmenting the performance of conventional solar still through the nano-doped black paint (NDBP) coating on absorber. **Materials Today: Proceedings**, v. 47, p. 4929-4933, 2021.

KAZEMI, F.; MOHAMADNIA, Z.; KABOUDIN, B.; KARIMI, Z. Photodegradation of methylene blue with a titanium dioxide/polyacrylamide photocatalyst under sunlight, **Journal of Applied Polymer Science**, v. 133, p. 43386-43394, 2016.

LEITE, W. U. Destilação solar para fins de dessalinização: aplicação de materiais alternativos e tecnológicos para a produção mais eficiente de água potável. Mestrado em Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2019.

LENG, Y. **Materials Characterization: Introduction to Microscopic and Spectroscopic Methods.** JohnWiley & Sons (Asia), University of Science and Technology, Hong Kong, 2008.

LEE. R.; KIM. J. B.; QIN. C.; LEE. H.; LEE. B. J.; JUNG. G. Y. Synthesis of Thermanolbased plasmonic nanofluids with core/shell nanoparticles and characterization of their absorption/scattering coefficients. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 209, p. 110442, 2020.

LEE, B. J.; PARK, K.; WALSH, T.; XU, L. Radiative heat transfer analysis in plasmonic nanofluids for direct solar thermal absorption. **Journal of Solar Energy Engineering**, v. 134, p. 021009, 2012.

LEONG, K. Y.; ABDUL RAHMAN, M. R.; GURUNATHAN, B. A. Nano-enhanced phase change materials: a review of thermo-physical properties, applications and challenges. **Journal of Energy Storage**, v. 21, p. 18-31, 2019.

LIU, J.; ZHANG, Q.; MA, H.; TADE, M. O.; WANG, S.; LIU, J. Facile synthesis of carbon-doped mesoporous anatase TiO<sub>2</sub> for the enhanced visible-light driven photocatalysis, **Chemical Communications**, v. 50, p.13971-13974, 2014.

MADDAH, H. A. *et al.* Performance estimation of a mini-passive solar still via machine learning. **Renewable Energy**, v. 162, 2020.

MALLAH, A. R.; ZUBIR, M. N. M.; ALAWI, O. A.; NEWAZ, K. M. S.; BADRY, A. B. M. Plasmonic nanofluids for high photothermal conversion efficiency in direct absorption solar collectors: Fundamentals and applications. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 201, p. 110084, 2019.

MANDEV, E.; MURATÇOBANOGLU, M.; ÇELIK, A.; CEVIZ, M. A.; NICOLA, G.; AFSHARI, F. Improving solar still efficiency through integration of cellulose-based water absorbers and Peltier condensation, **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 49, p. 102475, 2024.

MANOKAR, A.M.; MURUGAVEL, K. K.; ESAKKIMUTHU, G. Different parameters affecting the rate of evaporation and condensation on passive solar still — a review, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 38, p. 309- 22, 2014.

MARINESCU, C.; SOFRONIA, A.; RUSTI, C.; PITICESCU, R.; BADILITA, V.; VASILE, E.; BAIES, R.; TANASESCU, S. DSC Investigation of Nanocrystalline TiO<sub>2</sub> Powder, **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 103, p. 49-57, 2011.

MASOOD, A.; ASLAM, M.; PHAM, Q.B.; KHAN, W.; MASSOD, S. Integrating water quality index, GIS and multivariate statistical techniques towards a better understanding of drinking water quality. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, p. 26860–26876, 2022.

MATIOLI, A.; MIAGAVA, J.; GOUVÊA, D. Modificação da estabilidade dos polimorfos de TiO<sub>2</sub> nanométrico pelo excesso de superfície de SnO<sub>2</sub>, **Cerâmica**, v. 58 p. 53-57, 2012.

MASUDA, H.; EBATA, A.; TERAMAE, K.; HISHINUMA, N. Alteration of Thermal Conductivity and Viscosity of Liquid by Dispersing Ultra-Fine Particles (Dispersion of a -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> Ultra-Fine Particles). **Netsu Bussei**, v. 4, p. 227-233, 1993.

MENEZES, A. **Conversão fototérmica em nanofluidos utilizando coletor plano montado em posicionador solar**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 2015.

MOELLMANN, J. *et al.* A DFT-D study of structural and energetic properties of TiO<sub>2</sub> modifications. **Journal of Physics: Condensed Matter**, v. 24, p. 1-8, 2012.

MOGHADAM, A. J.; FARZANE-GORD, M.; SAJADI, M.; HOSEYN-ZADEH, M. Effects of CuO/water nanofluid on the efficiency of a flat-plate solar. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 58, p. 9-14, 2014.

MUHAMMAD, B. Energy consumption, CO<sub>2</sub> emissions and economic growth in developed, emerging and Middle East and North Africa countries. **Energy**, v. 179, p. 232–245, 2019.

MORO, C. C.; LANSARIN, M. A.; BAGNARA, M. Nanotubos de TiO<sub>2</sub> dopados com nitrogênio: comparação das atividades fotocatalíticas de materiais obtidos através de diferentes técnicas, **Química Nova**, v. 35, p. 1560-1565, 2012.

NAFEY, A.S.; ABDELKADER, M.; ABDELMOTALIP, A.; MABROUK, A.A. Solar still productivity enhancement, **Energy Conversion and Management**, v. 42, p. 1401 - 1408, 2001.

NGAOTRAKANWIWAT, P.; HEAWPHET, P.; RANGSUNVIGIT, P. Enhancement of photoelectrochemical cathodic protection of copper in marine condition by Cu-doped TiO<sub>2</sub>, **Catalysts**, v. 10, p. 146-155, 2020.

ONU. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. No Dia Mundial da Água, Guterres lembra que cerca de 2,2 bilhões carecem de água potável. Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2020/03/1708162>>. Acesso em: 02/06/2022.

PHILIP, J.; SHIMA, P. D. Thermal properties of nanofluids. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 183-184, n. 30-45, 2012. ISSN ISSN 0001-8686.

QASEM, M.; AL-WAHEED, S.; & IBRAHIM, H. Influence of Ambient Temperature on the Performance of Solar Desalination Systems. **Renewable Energy**, v. 145, p. 231-240, 2020.

QIN, X.; JING, L.; TIAN, G.; QU, Y.; FENG, Y. Enhanced photocatalytic activity for degrading rhodamine B solution of commercial Degussa P25 TiO<sub>2</sub> and its mechanisms, **Journal of Hazardous Materials**, v. 172, p. 1168-1174, 2009.

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.

PARIKH, R.; PATDIWALA, U.; PARIKH, S.; PANCHAL, H.; SADASIVUNI, K. K. Performance enhancement using TiO<sub>2</sub> nano particles in solar still at variable water depth, **International Journal of Ambient Energy**, v 43, p. 4037-4044, 2022.

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

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

SAJID, M. U.; BICER, Y. **Nanofluids as solar spectrum splitters: A critical review**. *Solar Energy*, v. 207, p. 974-1001, 2020.

SALEIRO, G. T.; CARDOSO, S. L.; TOLEDO, R.; HOLANDA, J. N. F. Avaliação das fases cristalinas de dióxido de titânio suportado em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 56, p. 162-167, 2010.

SALINAS-FREIRE, H. A.; PÉREZ-ONES, O.; RODRÍGUEZ-MUÑOZ, S. Límites termodinámicos a la productividad de los destiladores solares pasivos. **Revista ION**, v. 32, n. 1, p. 7-20, 2019.

SARMENTO, K. K. F.; SILVA, C. B.; BENEDITO, D. S. A.; CAVALCANTE, G. G.; MEDEIROS, K. M.; LIMA, C. A. P. Cascade type solar distiller with the use of photothermic materials applied in the treatment of surface water. **Applied Thermal Engineering**, v. 244, p. 122721, 2024.

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

SAMPAIO, C. M. dos S. **Dessalinização da água através de painéis solares fotovoltaicos**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro, Aveiro, 2016.

SHANMUGAN, S.; ESSA, F. A.; GORJIAN, S.; KABEEL, A.E.; SATHYAMURTHY, R.; MANOKAR, A. M. Experimental study on single slope single basin solar still using TiO<sub>2</sub> nano layer for natural clean water invention, **Journal of Energy Storage**, v. 30, p. 101522, 2020.

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

ŠIHOR, M.; RELI, M.; VAŠTYL, M.; HRÁDKOVÁ, K.; MATEJOVÁ, L.; KOCÍ, K. Photocatalytic oxidation of methyl tert-butyl ether in presence of various phase compositions of TiO<sub>2</sub>, **Catalysts**, v. 10, p. 35-47, 2020.

SILVA, C. B.; Silva, K. S.; SARMENTO, K. K. F., Pascoal, S. A.; CAVALCANTE, G. G.; MEDEIROS, K. M.; LIMA, C. A. P. Removal of the veterinary antibiotics oxitetracycline from contaminated water by solar distillation, **Journal of Water Process Engineering**, V. 58, p. 104784, 2024



SILVA, M.C.C.; SENS, M.L.; SOARES, C.; ANDRADE NETO, C.O. Water purification by direct solar distillation process in isolated households. **Acta Scientiarum**, v. 36, n. 1, p. 75-80, 2014.

SILVERSTEIN, R. M.; WEBSTER, F. X. **Spectrometric Identification of Organics Compounds**. USA, John Wiley & Sons, 7th ed, 2005.  
SOHRABNEZHAD, S. Study of catalytic reduction and photodegradation of methylene blue by heterogeneous catalyst, **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 81, p. 228-235, 2011.

SOLTANI, T.; ENTEZARI, M. H. Photolysis and photocatalysis of methylene blue by ferrite bismuth nanoparticles under sunlight irradiation, **Journal of Molecular Catalysis A: Chemical**, v. 377, 197-203, 2013.

SOUZA, L. H. V.; FERREIRA, L. C. Energias renováveis e segurança hídrica: a energia termossolar como alternativa para a dessalinização da água do mar no Norte da África e Oriente Médio. **Sustentabilidade em Debate**, v. 7, p. 15-28, 2016.

SOUZA, L. F. **Dessalinização como fonte alternativa de água potável**. Norte Científico, Boa Vista, v. 1, n. 1, 2006.

STRUCHALIN, P. G.; ULSET, E. T.; KOSINSKI, P.; KARAZHANOV, S. Z.; HE, Y.; BALAKIN, B. V. Comparative analysis of photothermal boiling of water enhanced by nano- and micro-particles of carbon black. **Materials Letters**, v. 285, p. 129078, 2021.

TONY, M. A.; NABWEY, H. A. Recent advances in solar still technology for solar water desalination. **Applied Water Science**. v. 14, p. 147, 2024.

UNESCO. **Unesco: 80% da água residual no mundo é despejada sem tratamento**, 2017. Publicado em: 22/03/2017. Acesso em: 27/01/2022. Disponível em: <https://noticias.r7.com/internacional/unesco-revela-que-80-da-agua-residual-no-mun-do-e-despejada-sem-tratamento-22032017>

TAYYEBI, S. E ALISHURI, M. The control of MSF desalination plants based on inverse model control by neural. **Desalination**, v. 333, n. 1, p. 92-100, 2014.

TEI, E. A.; HAMEED, R. M. S.; ATHIKESAVAN, M. M.; SRINIVASAN, A. Enhancing the performance of conventional solar still using sensible heat energy storage materials. **Environmental Science and Pollution Research**. v. 30, p. 391221-39130, 2023.

TINTAS MAZA. **Ficha de informação de segurança do de produto químico-FISPQ. Tinta alta temperatura**. Disponível em <https://www.maza.com.br/produto/52/tinta-alta-temperatura>. Acessado em 26 de fev. 2024.

VAKROS J. The influence of preparation method on the physicochemical characteristics and catalytic activity of Co/TiO<sub>2</sub> catalysts, **Catalysts**, v. 10, p. 88-103, 2020.

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

VENKOV, T.; HADJIIVANOV, K. FTIR Study of CO Interaction with Cu/TiO<sub>2</sub>, **Catalysis Communications**, v. 4, p. 209-213, 2003.

VISHWANATH, A. D.; SHANKAR, J. S.; EKNATH, N. M.; EKNATH, A. A.; HARIBHAU, K. N. Preparation, characterization and photocatalytic activities of TiO<sub>2</sub> towards methyl red degradation, **Oriental Journal of Chemistry**, v. 33, p. 104-112, 2017.

VILLES, V. S; VELHO, J. P; CHRISTOFARL; L. F; LAZZAR, R. Água como bem econômico: dessalinização para o combate da escassez hídrica no agronegócio, 2019.

WANG, X.; HE, Y.; LIU, X.; SHI, L.; ZHU J. Investigation of photothermal heating enabled by plasmonic nanofluids for direct solar steam generation. **Solar Energy**, v. 157, p. 35-46, 2017.

WAHAB. A.; HASSAN.A.; QASIM. M. A.; ALI, H. M.; BABAR. H.; SAJID. M. U. Solar energy systems – Potential of nanofluids. **Journal de Líquidos Moleculares**, v. 289, p.11149, 2019.

XIA, M.; CHEN, L.; ZHANG, C.; HASI, Q. M.; LI, Z.; LI, H. Porous architectures based on halloysite nanotubes as photothermal materials for efficient solar steam generation. **Applied Clay Science**, v. 189, p. 105523, 2020.

YAN, X.; WANG, Y.; ZHANG, L.; FU, H.; HE, P.; HAN, D.; LAWSON, T.; AN, X. The use of tunable optical absorption plasmonic Au and Ag decorated TiO<sub>2</sub> structures as efficient visible light photocatalysts, **Catalysts**, v. 10, p. 139-153, 2020.

YAO, G.; FENG, Y.; LIU, G.; XU, J. Solar vapor generation using bubbly flow nanofluids with collaborative light-harvesting nanoparticles. **Solar Energy**, v. 207, p. 1214-1221, 2020.

YU, J. C.; YU, J.; HO, W.; JIANG, Z.; ZHANG, L. Effects of F<sup>-</sup> Doping on the Photocatalytic Activity and Microstructures of Nanocrystalline TiO<sub>2</sub> Powders, **Chemistry of Materials**, v. 14, p. 3808-3816, 2002.

YUVAPERIYASAMY, M.; SENTHILKUMAR, N.; DEEPANRAJ, B. Experimental investigation on the performance of a pyramid solar still for varying water depth, contaminated water temperature, and addition of circular fins. **International Journal of Renewable Energy Development**, v. 12, p. 1123-1130, 2023.

ZANGENEH, H.; ZINATIZADEH, A. A. L.; HABIBI, M.; AKIA, M.; ISA, M. H. Photocatalytic oxidation of organic dyes and pollutants in wastewater using different modified titanium dioxides: a comparative review, **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 26, p.1-36, 2015.