



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

KENIA KELLY FREITAS SARMENTO

**DESTILADOR SOLAR DO TIPO CASCATA COM O USO DE MATERIAIS
FOTOTÉRMICOS APLICADO NO TRATAMENTO DE ÁGUAS SUPERFICIAIS**

CAMPINA GRANDE
2025

KENIA KELLY FREITAS SARMENTO

**DESTILADOR SOLAR DO TIPO CASCATA COM O USO DE MATERIAIS
FOTOTÉRMICOS APLICADO NO TRATAMENTO DE ÁGUAS SUPERFICIAIS**

Tese apresentada à Coordenação do Curso de Doutorado em Engenharia Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Engenharia Ambiental

Linha de pesquisa: Tecnologias de Tratamento de Água e Resíduos

ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Antônio Pereira de Lima
COORIENTADORA: Profa. Dra. Keila Machado de Medeiros

**CAMPINA GRANDE
2025**

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto em versão 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.

S246d Sarmento, Kenia Kelly Freitas.

Destilador solar do tipo cascata com o uso de materiais fototermicos aplicado no tratamento de águas superficiais [manuscrito] / Kenia Kelly Freitas Sarmento. - 2024.
159 f. : il. color.

Digitado.

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

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

"Coorientação: Prof. Dra. Keila Machado de Medeiros, Reitoria".

1. Dessalinização solar. 2. Inativação de microrganismos. 3. Qualidade da água. 4. Tratamento de águas superficiais. I. Título

21. ed. CDD 628.162

KENIA KELLY FREITAS SARMENTO

DESTILADOR SOLAR DO TIPO CASCATA COM O USO DE MATERIAIS
FOTOTERMICOS APLICADO NO TRATAMENTO DE ÁGUAS SUPERFICIAIS

Tese apresentada à Coordenação do
Curso de Doutorado em Engenharia
Ambiental da Universidade Estadual da
Paraíba, como requisito parcial à
obtenção do título de Doutora em
Engenharia Ambiental

Linha de Pesquisa: Tecnologias de
Tratamento de Águas e Resíduos.

Aprovada em: 25/02/2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado eletronicamente por:

- **Weruska Brasileiro Ferreira** (***.536.974-**), em **15/04/2025 21:36:29** com chave **d63b11941a5a11f0b95d1a7cc27eb1f9**.
- **Geralda Gilvania Cavalcante** (***.045.864-**), em **15/04/2025 14:23:57** com chave **6a0cc95e1a1e11f0b3bd06adb0a3afce**.
- **DAYANE DE ANDRADE LIMA** (***.109.113-**), em **16/04/2025 12:32:19** com chave **fba970381ad711f09a171a7cc27eb1f9**.
- **Auristela Carla de Miranda** (***.017.894-**), em **14/04/2025 20:41:37** com chave **01e5303a198a11f09e7f1a7cc27eb1f9**.
- **Keila Machado de Medeiros** (***.752.434-**), em **15/04/2025 17:01:45** com chave **7506ddf21a3411f0848c2618257239a1**.
- **Carlos Antonio Pereira de Lima** (***.847.524-**), em **14/04/2025 20:22:13** com chave **4c1cf014198711f0a6101a1c3150b54b**.

Documento emitido pelo SUAP. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QrCode ao lado ou acesse https://suap.uepb.edu.br/comum/autenticar_documento/ e informe os dados a seguir.

Tipo de Documento: Folha de Aprovação do Projeto Final

Data da Emissão: 16/04/2025

Código de Autenticação: 8fec2a



AGRADECIMENTOS

É com imensa gratidão que registro, nesta seção, os meus sinceros agradecimentos, iniciando-os com uma palavra de reconhecimento a Deus, cuja presença constante tem sido uma fonte de força em minha jornada.

Agradeço profundamente ao meu orientador, Dr. Carlos Antônio Pereira de Lima, e à minha coorientadora, Dra. Keila Machado de Medeiros, pela orientação dedicada, pelo constante incentivo e pelas valiosas sugestões ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho, foram fundamentais para que eu pudesse alcançar este objetivo, sem o apoio de vocês esta conquista não teria sido possível.

Ao grupo GRUTAA, sou grata por todo conhecimento compartilhado. Aos professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, meu sincero agradecimento pela troca de conhecimentos, pelo apoio nas diversas fases deste percurso e pela convivência enriquecedora que contribuiu para o meu crescimento pessoal e intelectual.

Um agradecimento especial à minha família, que sempre me ofereceu amor, apoio e compreensão. Aos meus pais, Isabel Freitas Sarmiento e Sebastião Gonçalves Sarmiento, sou por grata por todo o apoio emocional, por acreditarem em mim e por me ensinarem a importância da perseverança em todos os momentos da vida. Aos meus irmãos, Camila Freitas Sarmiento, Diego Max Freitas Sarmiento e Daline Francisco de Lima, aos meus cunhados e cunhadas, especialmente a Fabiana Carlos de Lima Sarmiento, que me acompanhou desde o início, bem como meu primeiro sobrinho Gael Max, e a minha afilhada Wemilly Gabrielly, pelo carinho e apoio contínuo, que sempre acreditaram em mim e se fizeram presentes durante essa conquista.

Ao meu companheiro, Tiago Andrade Diniz, expresse minha profunda gratidão por sua paciência, compreensão e incentivo constante, especialmente nos momentos mais desafiadores dessa trajetória.

Por fim, agradeço a todos os amigos e pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta conquista, seja com palavras de motivação, seja com gestos de apoio.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba - Brasil (FAPESQ).

A todos, o meu mais sincero agradecimento.

RESUMO

A água destinada ao consumo humano deve ser potável e atender aos padrões físico-químicos, microbiológicos e radioativos estabelecidos, de modo a não representar riscos à saúde. A destilação solar é um processo que se assemelha ao ciclo hidrológico natural da água, composto por duas etapas principais: evaporação e condensação. O presente estudo teve como objetivo avaliar a incorporação de materiais fototérmicos (brita e bolas de gude) em um sistema de destilação solar, com vistas à produção eficiente e economicamente viável de água, à inativação de microrganismos e à análise do custo de produção da água destilada. A metodologia adotada consistiu na introdução desses materiais no interior dos destiladores, permitindo a absorção da radiação solar e, conseqüentemente, o aumento da temperatura da água. Foram realizados testes físico-químicos e bacteriológicos antes e após o processo de destilação, a fim de verificar a presença ou ausência de microrganismos. O sistema foi alimentado com água contaminada proveniente do açude de Bodocongó, localizado na cidade de Campina Grande – PB. Os resultados demonstraram que o uso dos materiais fototérmicos elevou significativamente a temperatura no interior dos destiladores, apresentando valores superiores aos sistemas sem esses materiais. Para validação das temperaturas registradas, foram capturadas imagens térmicas do sistema, verificando-se que os destiladores contendo brita e bolas de gude atingiram temperaturas de 70,0 °C e 69,5 °C, respectivamente, enquanto o destilador sem material fototérmico alcançou 69,3 °C. A produtividade de água destilada aumentou em 16% no destilador com brita e em 3% no sistema com bolas de gude, em comparação aos destiladores convencionais. Os índices de eficiência dos destiladores contendo materiais fototérmicos foram considerados satisfatórios, atingindo 58,14% e 58,02%, respectivamente, ao final do ciclo diário de operação. Conclui-se que a utilização de materiais fototérmicos mostrou-se eficaz na remoção de sais e microrganismos da água. Dessa forma, o desenvolvimento e a implementação de destiladores solares aprimorados com esses materiais representam uma alternativa viável, sustentável e de baixo custo. O custo estimado da produção de água foi de R\$ 0,14 por litro, evidenciando a aplicabilidade da tecnologia para atender às necessidades de comunidades isoladas, onde a demanda hídrica é moderada e há alta incidência de radiação solar, contribuindo para a promoção da saúde e do bem-estar em populações vulneráveis.

Palavras-chave: dessalinização solar; inativação de microrganismos; qualidade da água; tratamento de águas superficiais.

ABSTRACT

Water intended for human consumption must be potable and comply with the established physicochemical, microbiological, and radiological standards to prevent health risks. Solar distillation is a process that resembles the natural hydrological cycle of water, consisting of two main stages: evaporation and condensation. This study aimed to evaluate the incorporation of photothermal materials (gravel and marbles) into a solar distillation system to achieve efficient and economically viable water production, microorganism inactivation, and cost analysis of distilled water production. The adopted methodology involved introducing these materials into the distillers, allowing them to absorb solar radiation and consequently increase water temperature. Physicochemical and bacteriological tests were conducted before and after the distillation process to determine the presence or absence of microorganisms. The system was fed with contaminated water collected from the Bodocongó reservoir, located in Campina Grande, PB, Brazil. The results demonstrated that the use of photothermal materials significantly increased the temperature inside the distillers, presenting higher values compared to systems without these materials. To validate the recorded temperatures, thermal images of the system were captured, confirming that the distillers containing gravel and marbles reached temperatures of 70.0 °C and 69.5 °C, respectively, while the distiller without photothermal material reached 69.3 °C. The productivity of distilled water increased by 16% in the distiller with gravel and by 3% in the system with marbles, compared to conventional distillers. The efficiency rates of the distillers containing photothermal materials were considered satisfactory, reaching 58.14% and 58.02%, respectively, at the end of the daily operation cycle. It is concluded that the use of photothermal materials proved effective in removing salts and microorganisms from the water. Therefore, the development and implementation of solar distillers enhanced with these materials represent a viable, sustainable, and cost-effective alternative. The estimated water production cost was R\$ 0.14 per liter, highlighting the applicability of this technology to meet the needs of isolated communities, where water demand is moderate and solar radiation incidence is high, contributing to health promotion and well-being in vulnerable populations.

Keywords: solar desalination; inactivation of microorganisms; water quality; microbiological treatment.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Objetivos 6 e 7 das ODS	17
Figura 2: Principais vias de transmissão de microrganismos enteropatogênicos de veiculação hídrica.....	23
Figura 3: Estrutura das três classes de patógenos, e os desinfetantes aos quais cada componente microbiano é vulnerável durante os processos de inativação.	25
Figura 4: Distribuição espectral de irradiância no topo da atmosfera.	32
Figura 5: Formas principais de aproveitamento da energia solar.	33
Figura 6: Destilador solar do tipo bandeja.	35
Figura 7: Destilador solar tipo pirâmide.	35
Figura 8: Sistema de destilador com filme capilar.	36
Figura 9: Destilador solar do tipo mecha	37
Figura 10: Destilador solar tipo cascata.	38
Figura 11: Destilador solar tubular.	40
Figura 12: Diferentes configurações de desinfecção solar.....	41
Figura 13: Perspectiva isométrica do destilador solar em escala piloto.	44
Figura 14: Sistemas de coleta de água da chuva.....	44
Figura 15: Níveis de energia necessária e tempos de exposição para <i>Escherichia coli</i>	45
Figura 16: Destilador solar com absorvedor de calor.	45
Figura 17: Novos foto reatores solar, CPC e Calha - V.	46
Figura 18: Destilador solar operando com nanofluidos.	47
Figura 19: Destilador Solar Inclinado e Refletor Interno.....	48
Figura 20: Dessalinização solar com nanopartículas de titânia preto.....	51
Figura 21: a) Instalação e desempenho da dessalinização solar com reforço de plasmon; b) Esquema do plasmon	51
Figura 22: Dessalinizadores solar.	52
Figura 23: Esponja pintada.....	52
Figura 24: Dessalinizador solar com esferas de alumínio.....	53
Figura 25: Dessalinizador solar com bolas de gude.....	54
Figura 26: Dessalinizador solar com mármore escuro.	55
Figura 27: a) Bolas de Gude; b) Dessalinizador solar convencional e Dessalinizador com bolas de gude.	56
Figura 28: Dessalinizador solar com pedras de rocha.	57
Figura 29: Dessalinizadores e Materiais de armazenamento de calor.	58

Figura 30: Dessalinizadores solar tubular com materiais de armazenamento de calor. (a) Areia. (b) Cascalhos de brita (c) Granito preto	59
Figura 31: Dessalinizadores com materiais de armazenamento de calor.....	59
Figura 32: Materiais: fibra de luffa, fibra de luffa pintada de preto, lã de aço fina e almofadas de lã de aço na configuração experimental.	60
Figura 33: Principais características termofísicas dos materiais de armazenamento de energia.	61
Figura 34: Classificação de materiais de armazenamento de calor sensível.....	63
Figura 35: Destilador solar com placa absorvedora de calor no formato ondular.....	71
Figura 36: Componentes internos do destilador solar.....	72
Figura 37: Destilador com placa ondular absorvedora de calor.	73
Figura 38: Sistema Integrado de medição de parâmetros operacionais.	74
Figura 39: Destiladores com placa ondular absorvedora de calor, amarelo (D1), verde (D2) e azul (D3).....	76
Figura 40: Ensaios com materiais fototérmicos (a) sem pintura (b) com pintura	77
Figura 41: Destiladores: sem material fototérmico (D1) com materiais fototérmicos (D2) e (D3).....	78
Figura 42: Perfis de Temperaturas dos experimentos iniciais (03/02/2022).....	82
Figura 43: Perfis de Temperatura dos experimentos iniciais (10/02/2022).	83
Figura 44: Perfis de Temperatura dos experimentos iniciais (11/02/2022).	84
Figura 45: Perfis de Temperatura, sem matérias fototérmicos (14/11/2022).....	86
Figura 46: Produção de água em função da radiação solar monitoradas do experimento sem materiais fototérmicos (03/02/2022).....	87
Figura 47: Produção de água em função da radiação solar monitoradas do experimento sem materiais fototérmicos (10/02/2022).....	88
Figura 48: Produção de água em função da radiação solar monitoradas do experimento sem materiais fototérmicos (11/02/2022).....	89
Figura 49: Produção de água em função da radiação solar monitoradas do experimento sem materiais fototérmicos (14/11/2022).....	90
Figura 50: Eficiência dos destiladores sem os materiais fototérmicos. (03/02/2022)	91
Figura 51: Eficiência dos destiladores sem os materiais fototérmicos (10/02/2022)	92
Figura 52: Eficiência dos destiladores sem os materiais fototérmicos (11/02/2022)	93
Figura 53: Eficiência dos destiladores sem os materiais fototérmicos (14/11/2022)	94
Figura 54: Perfis de temperatura dos materiais fototérmicos sem pintura.....	95

Figura 55: Perfis de temperatura dos materiais fototérmicos com pintura	96
Figura 56: Imagens térmicas dos materiais fototérmicos e da água.	98
Figura 57: Perfis de Temperatura, com materiais fototérmicos (21/11/2022)	100
Figura 58: Perfis de Temperatura, com materiais fototérmicos 02/08/2023.....	101
Figura 59: Perfis de Temperatura, com materiais fototérmicos 16/10/2023.....	103
Figura 60: Perfis de Temperatura, com materiais fototérmicos 22/05/2024.....	105
Figura 61: Perfis de Temperatura, com materiais fototérmicos 07/10/2024.....	107
Figura 62: Imagens térmicas dos destiladores abertos. (a) (D1) sem material fototérmico. (b) (D2) com brita. (c) (D3) com bola de gude.	108
Figura 63: Produção de água, com materiais fototérmicos 21/11/2022.....	110
Figura 64: Produção de água, com materiais fototérmicos 02/08/2023.....	111
Figura 65: Produção de água, com materiais fototérmicos 16/10/2023.....	112
Figura 66: Produção de água, com materiais fototérmicos 22/05/2024.....	113
Figura 67: Produção de água, com materiais fototérmicos 07/10/2024.....	114
Figura 68: Eficiência dos destiladores com os materiais fototérmicos (21/11/2022).	116
Figura 69: Eficiência dos destiladores com os materiais fototérmicos (02/08/2023).....	117
Figura 70: Eficiência dos destiladores com os materiais fototérmicos (16/10/2023).....	118
Figura 71: Eficiência dos destiladores com os materiais fototérmicos (22/05/2024).....	119
Figura 72: Eficiência dos destiladores com os materiais fototérmicos (07/10/2024).....	121
Figura 73: Água bruta e as destiladas.	128
Figura 74: Teste de P/A para identificação de coliformes totais e <i>Escherichia coli</i> da amostra bruta e destilada. (a) inserido o teste para P/A. (b) positivo para coliformes totais (c) positivo para <i>Escherichia coli</i> na amostra bruta e negativo para destiladas sob câmara UV (366 nm).	129
Figura 75: a) amostra de água bruta e destilada com teste positivo para coliformes e negativa nas destiladas dos (D1; D2 e D3); b) amostra de água bruta e destilada sob luz UV, com teste positivo na bruta e negativo nas destiladas dos (D1; D2 e D3) para <i>Escherichia coli</i>	130
Figura 76: Contagem de unidades formadoras de colônia (UFC) a) apresentou colônias na amostra bruta b) sem colônias na destilada.....	131
Figura 77: Imagens térmicas dos destiladores fechados. (a) (D1) sem material fototérmico. (b) (D2) com brita. (c) (D3) com bola de gude.	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Alguns patógenos transmitidos pela água potável e suas doses mínimas de infecção.	22
Tabela 2: Importância das propriedades termofísicas de materiais de armazenamento de energia em estado sólido.	62
Tabela 3: Materiais de armazenamento de calor sensível.....	65
Tabela 4: Modelos de destiladores, tipo de material e custo da produção de água doce.....	68
Tabela 5: Precisão e erros para os instrumentos de medição.....	75
Tabela 6: Resultados comparativos dos experimentos sobre a produtividade de água sem a utilização de materiais fototérmicos.	90
Tabela 7: Resultados comparativos da eficiência máxima dos destiladores solares sem a utilização de materiais fototérmicos.	94
Tabela 8: Comparação dos resultados do teste de absorção de calor dos materiais fototérmicos.....	98
Tabela 9: Resultados comparativos da produtividade de água dos destiladores com materiais fototérmicos no D2 (Brita) e D3 (Bola de Gude).	115
Tabela 10: Resultados comparativos dos experimentos da eficiência máxima alcançada dos destiladores com materiais fototérmicos no D2 (Brita) e D3 (Bola de Gude).	121
Tabela 11: Resumo de materiais de armazenamento de energia em diferentes dispositivos solar.....	122
Tabela 12: Resultado da análise físico-química das amostras de água bruta e destilada dos experimentos iniciais sem materiais fototérmicos nos experimentos A.	123
Tabela 13: Resultado da análise físico-química das amostras de água bruta e destilada sem materiais fototérmicos nos experimentos B.	124
Tabela 14: Resultado da análise físico-química das amostras de água bruta e destilada com materiais fototérmicos nos experimentos C.	127
Tabela 15: Resultados referentes as análises bacteriológicas das amostras de água bruta e destiladas de presença/ausência de coliformes totais e <i>Escherichia coli</i> em 100ml de água.	129
Tabela 16: Resultados quantitativos referentes as análises bacteriológicas das amostras de água bruta e destiladas de coliformes totais e <i>Escherichia coli</i> em 100ml de água.	131
Tabela 17: Resultados referentes as análises bacteriológicas das amostras de água bruta e destiladas da técnica da membrana filtrante da contagem viáveis de colônias de coliformes totais e <i>Escherichia coli</i>	132
Tabela 18: Lista dos custos de matéria-prima e mão de obra.....	134
Tabela 19: Análise do custo unitário da água para os destiladores.....	134
Tabela 20: Análise do custo para o aumento da produção da água com uso dos materiais fototérmicos.....	135

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	16
2.1	OBJETIVO GERAL.....	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS).....	17
3.2	ESCASSEZ DA ÁGUA.....	18
3.3	CONTAMINANTES DA ÁGUA	20
3.4	MECANISMOS DE INATIVAÇÃO DE CONTAMINANTES	23
3.5	PADRÕES FÍSICO-QUÍMICOS E BACTERIOLÓGICOS DA ÁGUA.....	26
3.5.1	Parâmetros físico-químicos da água.....	26
3.5.2	Parâmetros bacteriológicos monitorados.....	27
3.5.2.1	Coliformes Totais; Coliformes Termotolerantes (<i>Escherichia coli</i>).....	30
3.6	ENERGIA E RADIAÇÃO SOLAR.....	31
3.7	DESTILAÇÃO SOLAR.....	33
3.7.1	Tipos de destiladores solares.....	34
3.7.1.1	Destilador solar do tipo bandeja	34
3.7.1.2	Destilador solar tipo pirâmide.....	35
3.7.1.3	Destilador solar de filme capilar.....	36
3.7.1.4	Destilador solar do tipo mecha	36
3.7.1.5	Destilador solar do tipo cascata	37
3.8	FATORES QUE AFETAM A PRODUTIVIDADE DOS DESTILADORES SOLARES.....	38
3.9	PRODUTIVIDADE, PRODUÇÃO E EFICIÊNCIA DE DESTILADORES SOLARES.....	39
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ESPECIFICA	41

4.1	DESCONTAMINAÇÃO DE ÁGUAS CONTAMINADAS VIA ENERGIA SOLAR.....	41
4.2	DESTILAÇÃO SOLAR COM MATERIAIS FOTOTÉRMICOS	49
4.2.1	Materiais fototérmicos	61
4.2.2	Propriedades termofísicas dos materiais fototérmicos	64
5	ANÁLISE DE CUSTOS	67
6	MATERIAIS E MÉTODOS	70
6.1	LOCAL DA PESQUISA.....	70
6.2	DESTILADOR SOLAR COM PLACA ABSORVEDORA DE CALOR DO TIPO ONDULAR.....	70
6.3	SISTEMA DE MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS	73
6.4	PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS E BACTERIOLÓGICOS DA ÁGUA..	75
6.5	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	75
6.5.1	Experimentos iniciais de Produtividade dos destiladores	76
6.5.2	Ensaio de absorção de calor dos materiais fototérmicos	77
6.5.3	Experimentos com a introdução dos materiais fototérmicos	77
6.6	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E BACTERIOLÓGICAS DAS ÁGUAS.....	78
6.6.1	Ensaio físico-químico das águas	78
6.6.2	Ensaio bacteriológico das águas	78
6.6.2.1	Teste de Presença - Ausência (P/A)	79
6.6.2.2	Técnica em cartelas (qualitativos e quantitativo - NMP).....	79
6.6.2.3	Técnica da Membrana filtrante	80
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES	81
7.1	TESTES TÉRMICOS DOS DESTILADORES SEM MATERIAIS FOTOTÉRMICOS	81
7.2	TESTES DE PRODUÇÃO DOS DESTILADORES SEM MATERIAIS FOTOTÉRMICOS	86
7.3	EFICIÊNCIA DOS DESTILADORES SEM MATERIAIS FOTOTÉRMICOS	90

7.4	TESTES DE ABSORÇÃO DE CALOR DOS MATERIAIS FOTOTÉRMICOS	94
7.5	TESTES TÉRMICOS DOS DESTILADORES COM MATERIAIS FOTOTÉRMICOS	98
7.6	TESTES DE PRODUÇÃO DOS DESTILADORES COM OS MATERIAIS FOTOTÉRMICOS	109
7.7	EFICIÊNCIA DOS DESTILADORES COM MATERIAIS FOTOTÉRMICOS	115
7.8	MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA	123
7.8.1	Parâmetros Físicos – químicos	123
7.8.2	Análise visual da água destilada.....	127
7.8.3	Análises bacteriológicas.....	128
7.8.3.1	Coliformes Totais; Coliformes Termotolerantes (<i>Escherichia coli</i>).....	128
7.8.3.2	Teste de Presença - Ausência (P/A)	128
7.8.3.3	Técnica em cartelas (quantitativo e qualitativo - NMP)	129
7.8.3.4	Técnica da Membrana filtrante.....	131
8	ANÁLISE DE CUSTOS E ESTUDO ECONÔMICO	134
9	CONCLUSÕES.....	136
	REFERÊNCIAS	137

1 INTRODUÇÃO

A água é essencial para o suprimento de alimentos do mundo, para a produção de energia, incluindo bioenergia e energia hidrelétrica e para o resfriamento de sistemas industriais de energia. A água já é escassa em muitas regiões do mundo e pode apresentar uma situação crítica, à medida que a sociedade tenta simultaneamente mitigar e se adaptar às mudanças climáticas, as secas severas, o crescimento populacional (Kim *et al.*, 2016; Salehi, 2022).

Em uma pesquisa realizada por Asgedom *et al.* (2025) relatou que as doenças associadas à água, saneamento e higiene continuam sendo um problema global de saúde pública e estão vinculadas ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6, que é assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos. Ainda, estima-se que 80% das doenças nos países pobres do hemisfério sul estão relacionadas à água contaminada (Bharadwaj *et al.*, 2019; Sprouse *et al.*, 2024). Além disso, a partir de dados fornecidos pelo Fundo das Nações Unidas para a Infância (UNICEF) e do Instituto Trata Brasil, cerca de 90 milhões de indivíduos não tem coleta de esgoto, é lançado sem tratamento nos mananciais, rios, lagos e áreas costeiras (Jatobá; Loschiavo, 2019; Trata Brasil, 2024).

Lund Schlamovitz e Becker (2021) estudaram a escassez global de água e constataram que cerca de 25% das grandes cidades estão enfrentando alguns níveis de estresse hídrico. Orimoloye *et al.* (2021) relata que o crescimento populacional e o aumento da procura por água doce nas últimas décadas resultaram numa severa escassez de água, pelo menos uma vez por mês ao longo de um ano, apresenta escassez severa. As mudanças climáticas e as atividades humanas são problemas que ameaçam mais de um bilhão de pessoas (Zhang *et al.*, 2021). De acordo com Mortadi e Laasri (2024) a água potável está a tornar-se cada vez mais escassa, desta forma impõe aos pesquisadores a conceber métodos inovadores para responder a esta demanda por água tratada.

No Brasil, a Agência Nacional de Águas (ANA, 2019), é quem acompanha a situação quantitativa e qualitativa da água e realiza o monitoramento, fornecendo informações para o cidadão acerca dos parâmetros da gestão da mesma sob as condições do território nacional. Todas as informações são fornecidas por meio de estudos que resultam em avanços metodológicos e o Manual de usos consultivos da água no Brasil é parte de um estudo abrangente que indica que a demanda por água no Brasil é crescente, com aumento estimado de aproximadamente 80% no total retirado nas últimas décadas, com previsão de aumento em 24% até 2030.

A água destinada ao consumo humano necessita ser potável e estar em conformidade com os padrões físico-químico, microbiológico e radioativo, a fim de não oferecer riscos à

saúde. Para isso, o Ministério da Saúde por meio da Portaria GM/MS N° 888, de 04 de maio de 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 contaminação da água é um problema recorrente e de acordo com Sharma e Bhattacharya (2017) pode se apresentar de forma geológica e antropogênica e é causado pela presença de organismos vivos (algas, bactérias, protozoários ou vírus) e cada um deles podem causar problemas distintos ao ser humano. A necessidade de soluções para fornecimento de água não contaminada resulta em diversos métodos, tais como: químico, desinfecção, destilação e filtração. Portanto, a tecnologia adequada é baseada nas características da água bruta, infraestrutura, acessibilidade e/ou custo e aceitação.

Existem diversas opções para se realizar a destilação e a escolha depende de considerações econômicas e ambientais. A destilação, originalmente desenvolvida para fins industriais, é a técnica mais simples e comum, cujos componentes presentes na água são separados pela aplicação de calor. Resultando na separação entre a água e as substâncias inorgânicas e orgânicas, além dos microrganismos patogênicos (Isenmann, 2018).

Nos destiladores solares, a destilação consiste no aquecimento da água pelos raios solares, propiciando a produção do vapor que, posteriormente, é condensado numa superfície fria e coletado. Além disso, a destilação solar poderá produzir água pura a um custo razoável e os testes de laboratório mostram que o destilador pode eliminar, além de sólidos não voláteis, vírus e bactérias (Bezerra, 1990).

Sharshir *et al.* (2016) afirmaram que a quantidade de água produzida por unidade de área por dia pode variar de acordo com o destilador e as condições climáticas. Haja vista, que o destilador possui uma configuração geométrica permanente e a produção depende exclusivamente da insolação.

De acordo com Jani e Modi (2018) existem vários tipos de destiladores solares, tais como: pirâmide, cascata, multiestágio, filme capilar, mecha, entre outros. A produtividade do destilador solar depende dos parâmetros naturais como intensidade da radiação solar, velocidade do vento e da temperatura ambiente. Os parâmetros de construção também afetam a produtividade, como a diferença de temperatura entre o vidro de cobertura e a água, profundidade da água da bandeja, inclinação e espessura do vidro (Velmurugan; Srithar, 2011).

O uso de materiais de armazenamento de calor nos destiladores faz com que se tenha um aumento na eficiência e conseqüentemente na produtividade, por conta da dificuldade de dissipação do calor do destilador. Existem várias pesquisas que utilizam materiais fototérmicos com o intuito de manter maior temperatura da água e conseqüentemente uma maior taxa de

produção de água tratada, mesmo com a diminuição da radiação solar. Conforme Murugavel *et al.* (2010) as técnicas com os materiais de armazenamento térmico podem ser utilizadas para melhorar a eficiência dos sistemas térmicos de destilação.

De acordo com Saxena *et al.* (2022) o processo de destilação pode ser modificado para obter alta produtividade em um destilador solar simples, dessa maneira a pesquisa foi desenvolvida com a finalidade de destacar melhorias adicionais nos destiladores. Incorporar materiais de armazenamento de calor é uma alternativa de grande importância para aumentar a eficiência da destilação de água, permitindo o acúmulo de energia, e conseguindo prolongar o período de destilação e conseqüentemente o aumento da capacidade de evaporação conforme citado pelos pesquisadores (Reyes *et al.*, 2023). Desta forma este trabalho apresenta uma grande contribuição no tratamento de águas contaminadas para consumo humano, com o intuito de torná-la dentro dos padrões de potabilidade, através do uso de destiladores solares do tipo cascata associados a utilização de materiais fototérmicos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar o desempenho de três destiladores solares do tipo cascata com o uso de materiais fototérmicos para tratamento de águas superficiais contaminadas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar o uso de três destiladores solares do tipo cascata, comparando a utilização de materiais fototérmicos;
- Avaliar a produção de água tratada em função das variações climáticas;
- Analisar a qualidade físico-química e bacteriológica da água antes e após o processo de destilação;
- Comparar a eficiência dos destiladores solares propostos com modelos convencionais;
- Avaliar o custo de produção da água tratada dos destiladores solares.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS)

Na transição sustentável para tecnologias de baixo impacto, existem algumas considerações importantes que devem ser levadas em consideração ao incorporar o armazenamento de energia solar térmica em aplicações de calor na destilação de água. A energia solar é a fonte renovável mais abundante, promissora, limpa e acessível (Koçak; Fernandez; Paksoy, 2020). De acordo com Boer et al. (2020) é necessário selecionar os parâmetros corretamente para que sejam projetados e otimizados de forma sustentável os sistemas de destilação com armazenamento de energia térmica.

Nas ODS visualizadas na Figura 1, o objetivo 6 que é assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos e objetivo 7 que é assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todas e todos.

Figura 1: Objetivos 6 e 7 das ODS



Fonte: Organização das Nações Unidas, 2024.

O Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6, visa assegurar a disponibilidade e a gestão sustentável da água potável e saneamento para todos. O mesmo reflete a preocupação de enfrentar desafios globais relacionados à água, considerando que bilhões de pessoas ainda não têm acesso à água potável, ao saneamento e à higiene, sendo a escassez de água é um problema crescente. A poluição da água é um desafio essencial para a promoção da saúde, pois, afeta tanto a saúde das pessoas quanto o meio ambiente (Van Puijenbroek *et al.*, 2023).

É de extrema importância destacar que o acesso à água potável e ao saneamento está diretamente ligado à saúde pública, fazendo com que a ODS 6 seja uma prioridade global. A água potável é um recurso vital para prevenir doenças, permitir a produção de alimentos, e promover a dignidade das populações, especialmente em áreas vulneráveis (Pereira; Marques, 2021).

No projeto de um sistema de destilação com armazenamento de energia solar térmica, três pontos principais devem ser considerados: características técnicas, relação custo-benefício e impactos ambientais. As características técnicas dos materiais é um fator primordial para armazenamento de energia. Para começar, uma alta capacidade de armazenamento térmico é fundamental para aumentar a eficiência do sistema, garantindo que a energia térmica seja liberada e absorvida, o material de armazenamento de calor e o fluido de transferência de calor devem manter uma taxa de transferência de calor alta. Em terceiro lugar, o material de armazenamento deve ser de alta estabilidade (Tian; Zhao,2013).

Para uma abordagem mais abrangente, a avaliação do ciclo de vida é usada para avaliar os efeitos ambientais dos materiais de armazenamento de energia solar térmica (López-Sabiron *et al.*, 2014; Nienborg *et al.*, 2018). A energia contida nos materiais utilizados deve ser levada em consideração para uma análise completa de sustentabilidade (Rostampour *et al.*, 2019).

Em conformidade com os pesquisadores Chauhan, Shukla e Rathore (2022) o uso de materiais fototérmicos aumenta a eficiência de sistemas de destilação e com impacto mínimo no meio ambiente. Esses materiais de armazenamento de energia natural fornecem energia eficiente e ambientalmente inofensiva durante aplicações de aquecimento solar, podendo atender significativamente às necessidades da sociedade. Alguns benefícios significativos dos materiais de armazenamento de energia natural incluem redução das emissões de dióxido de carbono e clorofluorcarbono; redução dos custos de aquecimento e arrefecimento; melhor temperatura ambiente; baixa carga elétrica; menor demanda de energia; e disponibilidade 24 horas por dia. Autores como Mahala e Sharma (2024) afirmam que utilizar materiais de armazenamento térmico não só oferece aumento de temperatura, eficiência e boa relação com o custo-benefício, mas também desempenha um importante papel na sustentabilidade ambiental ao reduzir as emissões de CO₂.

3.2 ESCASSEZ DA ÁGUA

A água, recurso natural renovável, bem de uso comum e essencial à vida no planeta, apresenta um ciclo que sustenta a biodiversidade e mantém os ecossistemas, as populações e as comunidades nos ambientes terrestres e aquáticos. Com a população mundial crescente aumenta a necessidade por água com qualidade para diferentes usos. (Biswas; Tortajada, 2018; Van Vliet *et al.*, 2021). Este recurso natural está presente no estado líquido, constituindo os mares, oceanos, os lagos e áreas represadas, tais como as áreas naturais alagadas e os lençóis subterrâneos. No estado sólido, a água se encontra presente nas geleiras e calotas polares, podendo ser também encontrada no estado gasoso na atmosfera (Dajoz, 2005).

A escassez e a falta de água potável são os desafios mais sérios do século XXI. Um terço da população mundial vive em países com estresse hídrico, por volta de 2025, esse número poderá subir para dois terços. Além da escassez, a qualidade da água continua sendo uma grande ameaça à saúde e ao bem-estar humano. Nos países em desenvolvimento, existem mais de 1 bilhão de pessoas que não têm acesso a água tratada, resultando na principal causa da maioria das doenças diarreicas e da mortalidade de mais de 2 milhões de crianças por ano (Connor *et al.*, 2019; Alum; Obeagu; Ugwu, 2024).

Estudos apontaram que cerca de 80% da superfície da Terra é composta de água, assim distribuída: 97,5% estão nos oceanos e o restante (cerca de 2,5%) nas reservas de água doce, as quais, em princípio, seriam apropriadas para consumo. Adicionalmente, é preciso atentar para o fato de que as geleiras nos círculos polares representam 77% da água doce, 22% são águas subterrâneas e apenas 1% encontra-se na superfície, presente nos rios, lagos, açudes e represas. Dessa forma, cerca de 60% do consumo global de água potável é extraído de reservatórios subterrâneos não renováveis (Resende, 2002; Gelain; Istake, 2015; Ferreira; Ribeiro, 2022).

No Brasil a Lei nº 9433/97 institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e no Art. 1º traz que a água é um bem de domínio público, recurso natural limitado e a gestão deste recurso de proporcionar o uso múltiplo das águas (Brasil, 2005). Além disso, engloba todas as atividades que utilizam este recurso, onde se pode citar consumo humano e animal, irrigação, indústria, aquicultura, geração de energia elétrica, navegação, turismo e lazer, preservação da vida aquática, saneamento e lançamento de efluentes. De acordo com a Lei, em caso de escassez, o uso da água deve ser prioritário para consumo humano e dessedentação animal (Dornfeld; Talamoni; Queiroz, 2019).

Águas salobras e a água do mar também são utilizadas para estes fins, desde que previamente tratadas, pois as fontes de água doce são escassas (Shen *et al.*, 2020). Estas fontes são facilmente poluídas por atividades advindas das agroindústrias e por descargas inadequadas de efluentes domésticos, o que pode gerar doenças e danos ambientais aos ecossistemas aquáticos (Chen *et al.*, 2019).

Com o desenvolvimento contínuo da economia global e a população cada vez maior a atual escassez de água está acontecendo de forma acelerada, cada vez mais proeminente e também podem representar regiões sob estresse em relação à qualidade da água e impactando um número crescente de consumidores de água residenciais, comerciais, industriais e agrícolas em todo o mundo (Mishra *et al.*, 2021; Van Vliet *et al.*, 2021; Yu *et al.*, 2024).

3.3 CONTAMINANTES DA ÁGUA

A poluição da água tem várias causas, como a liberação de efluentes de diversas indústrias, esgoto contendo resíduos domésticos e pesticidas agrícolas, de água superaquecida e de resíduos oleosos. Os poluentes industriais, como mercúrio, cádmio, cromo e chumbo são capazes de entrar na cadeia alimentar e causar doenças no corpo humano. Pesticidas organoclorados, como o Dicloro-difenil-tricloroetano (DDT), na agricultura não são degradáveis e podem ser liberados nas cadeias alimentares. Alguns efluentes industriais também podem causar alterações na cor, odor e sabor da água natural (Hussain; Kecili, 2020).

Basicamente, existem quatro tipos de poluentes que são associados à água: os inorgânicos, orgânicos, radiológicos e biológicos. Dentre os componentes inorgânicos mais comuns, podem citar as altas concentrações de dureza, cloretos, sódio, potássio e alcalinidade. Exposição prolongada à água contendo esses sais podem causar cálculos renais, hipertensão, envelhecimento, entre outros problemas. Além disso, existem vários compostos inorgânicos (flúor, arsênico, chumbo, cobre, cromo, mercúrio, antimônio, cianeto) que podem poluir também as águas (Sharma; Bhattacharya, 2017).

Além das diversas fontes antropogênicas de poluentes orgânicos, as principais são: os pesticidas, resíduos domésticos e industriais. Por exemplo, os pesticidas contaminam tanto os produtos agrícolas quanto os mananciais e fontes de abastecimento. Já os efluentes industriais podem originar subprodutos perigosos por oxidação, hidrólise, ou outras reações químicas. De maneira geral, a poluição por materiais orgânicos pode causar sérios problemas de saúde como câncer, interrupções hormonais e distúrbio do sistema nervoso (Damalas; Eleftherohorinos, 2011).

Os poluentes radiológicos presentes na água, também, são causados por elementos radioativos, onde são encontrados nos solos contaminados ou advindos de resíduos industriais. A erosão de depósitos naturais de certos minerais radioativos pode emitir radiações α e β . Os elementos radiológicos como o urânio, rádio e radônio tendem a ser um problema maior nas águas subterrâneas do que nas águas superficiais. Todos os tipos de poluentes radiológicos aumentam o risco de câncer (Alireza *et al.*, 2010).

Os poluentes biológicos caracterizam-se pela presença de microrganismos de origem fecal que são geralmente associados ao despejo de esgoto. A contaminação biológica em ambientes aquáticos pode ser indicada pela presença de bactérias, vírus, protozoários e helmintos. A avaliação da qualidade da água, associada aos riscos à saúde pública é necessária para propor efetivas estratégias de remediação e descontaminação microbiana (Blaschke *et al.*, 2016).

A contaminação da água é o processo de introdução e adaptação de espécies que não fazem parte naturalmente de um dado ecossistema, mas que se naturalizam e passam a provocar mudanças em seu funcionamento (Almeida, 2021). A introdução pode ser realizada intencional ou acidentalmente, por vias humanas ou não. Ao contrário de muitos problemas ambientais que se amenizam com o tempo, a contaminação biológica tende a se multiplicar e espalhar, causando problemas de longo prazo que se agravam com o tempo e não permitem que os ecossistemas afetados se recuperem naturalmente (Alegbeleye; Sant'ana, 2020).

Nos países em desenvolvimento e industrializados, um número crescente de organismos patogênicos estão contaminando o sistema de abastecimento de água. Cada vez mais, a saúde pública e as preocupações ambientais direcionam esforços para descontaminar as águas anteriormente consideradas limpas. Métodos para tratamento de água mais eficazes, de baixo custo e robustos são necessários para desinfetar e descontaminar às águas da fonte ao ponto de uso, sem estressar ainda mais o meio ambiente ou pôr em risco a saúde humana (Shannon *et al.*, 2008).

Canepari e Pruzzo (2008) relataram que a transmissão de doenças infecciosas pela água acontece não somente em países em desenvolvimento devido à escassez de recursos e métodos para avaliação qualitativa e purificação, mas também em países desenvolvidos são reportadas quase que diariamente as microepidemias.

A qualidade da água para consumo humano é de grande importância, pois se não for tratada a mesma consegue veicular contaminantes relacionados a problemas de saúde. De acordo com a Secretaria de Vigilância em Saúde as preocupações quanto aos níveis de qualidade, contaminação das águas e manutenção dos recursos hídricos assume importância, à medida que a água é destinada ao consumo humano ou a transformação econômica. Água não potável, ou seja, contaminada de alguma forma por agentes patogênicos nocivos, pode pôr em perigo a saúde e comprometer o desenvolvimento das comunidades humanas (Brasil, 2006).

Diversos fatores podem comprometer a qualidade da água, destacando-se o destino final dos esgotos domésticos, e a disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos e industriais. Além disso, a modernização da agricultura representa também uma fonte de contaminação das águas. Em muitos locais, o cultivo das lavouras é realizado sem práticas conservacionistas, podendo contaminar os mananciais de água das propriedades (Malheiros *et al.*, 2009). A contaminação da água é aumentada com a destruição das matas ciliares, com o uso do solo fora da sua condição de melhor aptidão e com manejo inadequado do solo.

A qualidade bacteriológica é uma das características mais importantes da água de consumo, principalmente porque a mesma está diretamente ligada com doenças de origem

hídrica. Apesar de indispensável para a vida humana, a água pode atuar como um reservatório de diversos tipos de organismos patogênicos, como bactérias, protozoários, vírus (Braga *et al.*, 2010; Gonçalves, 2003). A Tabela 1 apresenta as categorias, os patógenos transmitidos pela água potável e suas doses mínimas de infecção.

Tabela 1: Alguns patógenos transmitidos pela água potável e suas doses mínimas de infecção.

Categorias	Patógenos	Doses de Infecção
Bactérias	<i>Salmonella spp</i>	> 1.000.000
	<i>Shigella spp</i>	100
	<i>Campylobacter spp</i>	1.000.000
Protozoários	<i>Cryptosporidium parvum</i>	1-30
	<i>Giardia lamblia</i>	1-10
	<i>Entamoeba histolytica</i>	10-1.000
Vírus	Norwalk vírus	1-10
	Rotavírus	1-10
	Adenovírus	1-10

Fonte: Doménech, 2003; Costa *et al.*, 2021.

As bactérias patogênicas são unicelulares microscópicas e podem contaminar as águas, resultando em problemas de saúde como febre tifoide, disenteria, cólera e gastroenterite. Algumas bactérias não patogênicas, embora não seja prejudicial, podem causar problemas de paladar e odor (Fellenberg, 2012).

Os protozoários também são organismos unicelulares e microscópicos, como exemplo, a *Giardia lamblia* e o *Cryptosporidium parvum* são comumente encontrados em rios, lagos e córregos contaminados com fezes de animais ou que recebem água residual de estações de tratamento de esgoto. Estes podem causar diarreia, cólicas estomacais, náuseas, fadiga, desidratação e dores de cabeça (Spiro; Stigliani, 2008).

Os vírus são os menores organismos vivos capazes de produzir infecção e causar doenças. Os vírus da hepatite (A, E) e da poliomielite são comumente relatados nas águas contaminadas (Rosa; Fraceto; Moschini-Carlos, 2012).

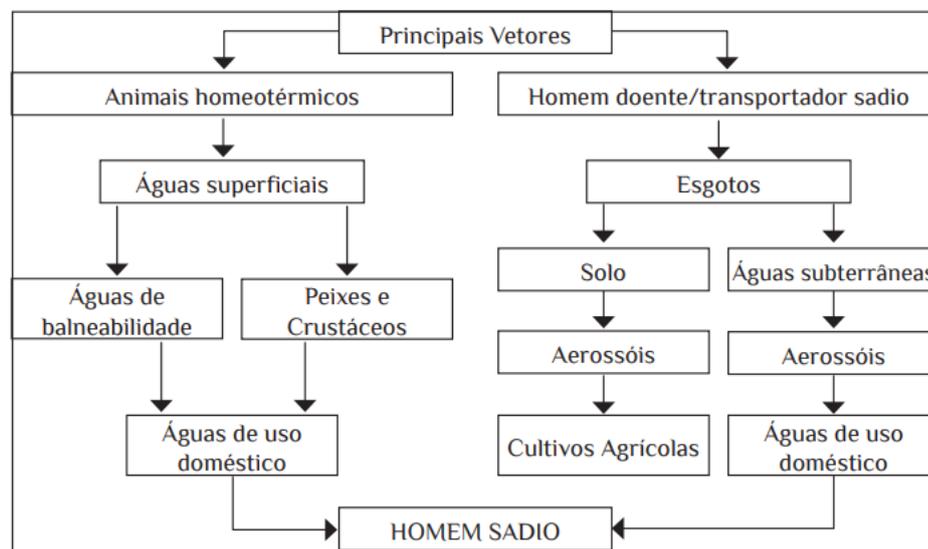
A constante e intensa intervenção do homem no ambiente alterou a qualidade do ar, das águas e do solo com descargas poluidoras que causaram mudanças profundas na distribuição dos diversos componentes da biota (Tundisi; Matsumura- Tundisi, 2011). As doenças de veiculação hídrica são causadas principalmente por microrganismos patogênicos de origem humana ou animal, transmitidas pela rota fecal e oral, que são excretados nas fezes de

indivíduos infectados e ingeridos na forma de água ou alimento contaminado pela água (Abu Amra; Yassin, 2008).

Jani e Modi (2018) relataram que a maioria da população mundial não tem acesso a água potável, e que é a principal causa de doenças transmitidas pela água, sendo responsável pela morte de mais de 6 milhões de crianças todos os anos. Além disso, a água contaminada pode conter microrganismos patogênicos, impurezas físicas e químicas responsáveis por graves danos à saúde humana. Portanto, a água disponível nas várias fontes aquáticas (rios, lagos, oceanos e chuva) devem ser tratadas. E tais poluentes e contaminantes podem ser eliminados usando destilação por meio da energia solar.

As doenças veiculadas pela água se caracterizam pelo microrganismo patogênico ser transportado pela água e o homem e os animais se infectam pela ingestão dessa água contaminada ou pelo contato com ela. A água age como veículo direto na transmissão do agente infeccioso e também é local de criação de vetores biológicos e mecânicos (Silva *et al.*, 2017). A Figura 2 resume as principais vias de transmissão das doenças de veiculação hídrica.

Figura 2: Principais vias de transmissão de microrganismos enteropatogênicos de veiculação hídrica



Fonte: Ceballos; Diniz, 2017.

3.4 MECANISMOS DE INATIVAÇÃO DE CONTAMINANTES

Em consequência da falta de um tratamento eficaz para remoção de agentes patogênicos presentes na água existem um grande número de casos de doenças de veiculação hídrica. Para

que se possa assegurar a saúde da população, é necessário realizar o controle da qualidade da água, com a ausência de risco de ingestão de microrganismos causadores de doenças, geralmente provenientes da contaminação pelas fezes humanas e outros animais de sangue quente. Os microrganismos patogênicos incluem vírus, bactérias, protozoários e helmintos. A melhor forma de se controlar a contaminação por patogênicos é pela sua inativação.

A desinfecção pode ser definida como um processo de inativação ou destruição de agentes patogênicos e outros microrganismos indesejáveis. Segundo Santos (2011), no Brasil é comum utilizar o cloro para fazer a desinfecção durante o tratamento de água, o que pode contribuir para que as concentrações de *Escherichia coli* que porventura estejam presentes na água bruta sejam removidas. De acordo com Zainudin, Hasan e Abdullah (2018), em países em desenvolvimento, a cloração é uma das técnicas mais simples para desinfetar a água e bastante utilizada, nestes países, estima-se que metade da população tem problemas de saúde associados ao consumo de água contaminada por microrganismos.

De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS, 1995), as bactérias do grupo coliformes estão presentes no intestino humano e de animais de sangue quente e são eliminadas nas fezes. Entretanto, o grupo dos coliformes inclui bactérias não exclusivamente de origem fecal, podendo ocorrer naturalmente no solo, na água e em plantas. Além disso, principalmente em climas tropicais, os coliformes apresentam capacidade de se multiplicar na água.

Séculos passaram até o homem perceber que não era suficiente para usar uma água com segurança, verificar apenas sua transparência, cor, odor e sabor. Com o passar do tempo foram estimulados o desenvolvimento de técnicas diversas de tratamento de água, a fervura é um dos métodos mais antigo, com os avanços do conhecimento e das tecnologias permitiram orientar o tratamento da água à eliminação de microrganismos para a proteção à saúde. (Elango; Gunasekaran e Sampathkumar, 2015).

O estudo de Malato *et al.* (2009) considera que as temperaturas de até de 40°C não provocam diferença nas velocidades da desinfecção dos agentes patogênicos, mas a partir de temperaturas superiores a 45°C acontece um sinergismo entre o aquecimento térmico e a radiação UV acelerando e melhorando a desinfecção solar.

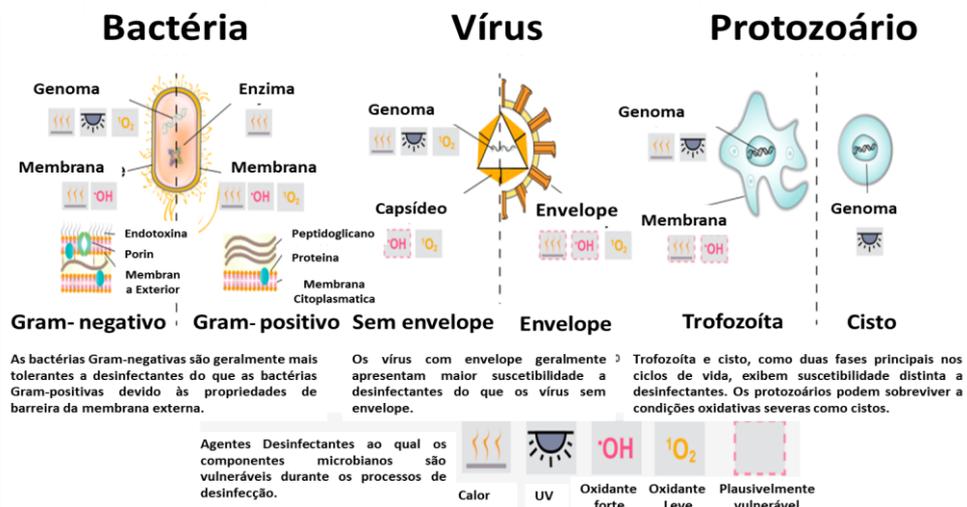
Com elevação da temperatura da água e até mesmo fervura durante um determinado tempo é possível à inativação de microrganismos como bactérias, vírus e protozoários. As bactérias são passíveis de inativação em curtos períodos de fervura e em temperaturas entre 62-72 °C, a *Escherichia coli* e a *Salmonella typhi* são removidas em menos de dois segundos de exposição (Spinks *et al.*, 2006; Costa *et al.*, 2021).

Em um sistema baseado em radiação solar para desinfecção de vírus e bactérias foi possível ter a eficiência de remoção/inativação de *Escherichia coli* de 100%, muito maior do que a de filtração simples comparada a técnicas de tratamento avançadas como as membranas de micro e ultrafiltração (Nascimento *et al.*, 2018).

As variações sazonais e diárias modificam a intensidade da radiação solar, onde essa diferença sazonal varia de acordo com a latitude, sendo o principal responsável pelo clima de cada região. Essas alterações sazonais são importantes, pois têm grande influência sobre a desinfecção solar, sendo avaliadas antes da implementação da desinfecção solar (SODIS). Além disto, a intensidade da radiação solar está submetida a variações diárias, como condições de nebulosidade diminuindo a radiação disponível (Luzi *et al.*, 2002).

Os pesquisadores Chu *et al.* (2019), demonstraram que o aquecimento localizado usando nanopartículas pode ser explorado para a inativação fototérmica direta de bactérias e vírus na água. A desinfecção da água potável usando luz ultravioleta germicida (UV-C) tornou-se popular na década de 1990 porque não produz praticamente nenhum subproduto da desinfecção (por exemplo, compostos orgânicos clorados) e é eficaz contra cistos de protozoários que não são facilmente inativados por desinfetantes convencionais, como cloro. Ainda segundo os autores, a irradiação UV tem como alvo específico o genoma de bactérias, vírus e protozoários, conforme visto na Figura 3. Lesões induzidas, que são formadas principalmente pela formação fotoquímica de dímeros de pirimidina cis-sinciclobutano, inibem a replicação de genomas, no caso de vírus, inibem a injeção de genoma por meio de modificação de proteínas relacionadas.

Figura 3: Estrutura das três classes de patógenos, e os desinfetantes aos quais cada componente microbiano é vulnerável durante os processos de inativação.



Fonte: Adaptado de Chu *et al.*, 2019.

De acordo com Verma, Gupta e Gupta (2016), o ozônio é um poderoso agente oxidante que pode destruir qualquer bactéria patogênica e não patogênica. Segundo Silva (2015), o mecanismo de inativação bacteriana pelo ozônio ocorre pela inativação geral da célula inteira. O ozônio, por mecanismo oxidativo, rompe a membrana celular, a parede celular, os cromossomos, as ligações de nitrogênio carbônico entre o açúcar e as bases, as ligações de hidrogênio do DNA, bem como as ligações de fosfato de açúcar, levando à despolimerização e ao vazamento de constituintes celulares e à inibição irreversível de enzimas em microrganismos.

Zainudin, Hasan e Abdullah (2018) relata que o ozônio é um potente oxidante, capaz de oxidar diversos compostos orgânicos e inorgânicos presentes na água, no tratamento da água por ozonização, a redução da temperatura e do pH, aumenta a solubilidade do gás, aumentando consequentemente a concentração de ozônio disponível e favorecendo as reações de oxidação e desinfecção.

O ozônio apresenta elevado poder germicida na inativação de grande variedade de organismos patogênicos, incluindo bactérias, vírus e protozoários. Protozoários intestinais, como oocistos de *Cryptosporidium parvum*, *Entamoeba histolytica* e *Giardia intestinalis*, são potencialmente patogênicos para humanos, por serem resistentes ao cloro, frequentemente o ozônio é usado como uma alternativa eficiente (Souza; Daniel, 2008; Mao *et al.*, 2014; Mao *et al.*, 2018).

3.5 PADRÕES FÍSICO-QUÍMICOS E BACTERIOLÓGICOS DA ÁGUA

3.5.1 Parâmetros físico-químicos da água

Os parâmetros físico-químicos da água são essenciais para avaliar sua qualidade da água bruta e a produzida pelos destiladores solares e identificar possíveis alterações que possam comprometer sua utilização em diversas finalidades, como o abastecimento humano, a agricultura e a preservação ambiental. Os parâmetros descritos no Quadro 1, possuem importância para verificar a qualidade da água e garantir que a mesma atenda aos padrões de potabilidade e esteja adequada para o consumo humano e outros usos.

A turbidez indica a quantidade de partículas suspensas na água, influenciando sua aparência e transparência. A cor da água está relacionada à presença de substâncias dissolvidas, como matéria orgânica e minerais, que podem alterar visualmente a água. O pH indica a acidez ou alcalinidade da água, essencial para a estabilidade química e biológica dos corpos d'água.

Os cloretos são importantes para avaliar a salinidade da água, enquanto a dureza refere-se à concentração de íons de cálcio e magnésio, influenciando a formação de incrustações em

tubulações e a eficiência de sabões e detergentes. O sódio é um componente natural das águas, mas seus níveis precisam ser monitorados para evitar efeitos adversos à saúde. Os sólidos totais dissolvidos (STD) medem a quantidade total de substâncias dissolvidas, como minerais e sais, que podem influenciar o sabor e a potabilidade da água.

A alcalinidade total reflete a capacidade da água de neutralizar ácidos, sendo um indicador importante do equilíbrio químico. A temperatura afeta diretamente as reações químicas e a dissolução de gases como o oxigênio, enquanto a condutividade elétrica mede a capacidade da água de conduzir corrente elétrica, que é proporcional à presença de íons dissolvidos.

A qualidade físico-química das águas está indicada no Anexo 11 da Tabela de padrão organoléptico de potabilidade e os principais são: turbidez, cor, pH, cloretos, dureza, sódio, sólidos totais dissolvidos e alcalinidade total, e os parâmetros de temperatura e condutividade elétrica, conforme Quadro 1.

Quadro 1: Parâmetros físico-químicos analisados e equipamentos utilizados.

Parâmetro	Unidade	Método/Equipamento
Temperatura	°C	Termopares
pH	---	pHmetro
Condutividade elétrica	$\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	Condutivímetro
Cor aparente	uH	Colorímetro
Cloreto	mg Cl^{-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	Turbidímetro
Sódio	$\text{mg Na}^+\text{L}^{-1}$	Fotômetro de chama
Potássio	$\text{mg K}^+\text{L}^{-1}$	Fotômetro de chama
Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)	mgL^{-1}	Sonda multiparâmetros

Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

3.5.2 Parâmetros bacteriológicos monitorados

As bactérias do grupo coliformes totais pertencem à família *Enterobacteriaceae*, compreendendo bacilos Gram-negativos, e não formadores de esporos, anaeróbios facultativos, capazes de fermentar a lactose com produção de gás, quando incubados à temperatura de 35-37 °C, por 48 horas. Esse grande grupo contém um subgrupo chamado inicialmente de coliformes fecais e atualmente denominado de coliformes termotolerantes, e a espécie *Escherichia coli* é considerada a única que confirma a contaminação fecal, incluindo cerca de 20 espécies, abrangendo bactérias de origem gastrointestinal de humanos e outros animais de sangue quente.

Além de presentes nas fezes, os coliformes podem ser encontrados também em vegetais e no solo (Soares; Evangelista-Barreto; Marbach, 2021).

Coliformes termotolerantes possuem definições semelhantes aos coliformes totais, porém este subgrupo corresponde às bactérias coliformes, de ocorrência mais restrita às fezes humanas e animais de sangue quente, que apresentam a capacidade de continuar fermentando a lactose com produção de gás a 44-45,5 °C por 24 horas. Existem quatro gêneros, *Escherichia coli*, *Enterobacter*, *Klebsiella* e *Citrobacter* que são coliformes oriundos do trato gastrintestinal. *Escherichia coli* representa cerca de 90% deste grupo (Soares; Evangelista-Barreto; Marbach, 2021).

Conforme o Programa Nacional de Avaliação da Qualidade das Águas (PNQA) as bactérias coliformes termotolerantes ocorrem no trato intestinal de animais de sangue quente e são indicadoras de poluição por esgotos domésticos. Sua presença em grandes números indica a possibilidade da existência de microrganismos patogênicos que são responsáveis pela transmissão de doenças de veiculação hídrica (disenteria bacilar, febre tifoide, cólera) (PNQA, 2021).

Escherichia coli faz parte do subgrupo dos coliformes totais, sendo o integrante mais numeroso. Pertencente à família *Enterobacteriaceae* e, como todos os coliformes, caracteriza-se pela presença das enzimas β -galactosidase e β -glucuronidase. Enquanto a primeira é comum a todos os coliformes, a segunda é exclusiva de *Escherichia coli*. Esta última enzima age sobre o substrato 4-Methyl-Umbilipheril- β -D - Glucoronosídeo (MUG) e libera o 4-Methyl-Umbilipheril que produz luminescência azul intensa quando iluminado com UV de λ 360 nm, identificando *Escherichia coli* (Ceballos; Diniz, 2017).

Escherichia coli é um patógeno de origem alimentar relacionado à contaminação fecal. Esse microrganismo pode reduzir nitrato a nitrito, de fermentar a glicose com produção de ácido e gás, é oxidase negativa e catalase positiva. Geralmente móvel com flagelos peritríquios, metaboliza uma ampla variedade de substâncias, como carboidratos, proteínas, aminoácidos, lipídeos e ácidos orgânicos (Franco; Landgraf, 2008). Sendo um dos microrganismos mais comuns habitando no trato digestório de humanos e de animais, quando relatada presente em animais, algumas bactérias desse tipo podem produzir enterotoxinas que podem causar a diarreia, doença de origem alimentar grave que pode ser ocasionada a partir da ingestão de água contaminada (Oliveira *et al.*, 2016; Fiorese *et al.*, 2019).

A colonização do trato gastrointestinal humano por *Escherichia coli* ocorre logo após o nascimento e, após a colonização, esta persiste como integrante da microbiota normal do intestino por toda a vida. A detecção de *Escherichia coli* pode indicar possível ocorrência de

outros microrganismos com patogenicidade ainda maior para o ser humano e animais (Trabulsi; Alterthum, 2008). Entretanto, apesar de fazer parte da microbiota fecal humana e/ou animal, algumas cepas de *Escherichia coli* podem causar doenças, devido à obtenção de fatores de virulência por transferência horizontal de material genético (Soares, Evangelista-Barreto; Marbach, 2021).

De maneira geral, cepas de *Escherichia coli* são classificadas em dois grupos: *Escherichia coli* diarreio gênicas, sendo o intestino o seu sítio de infecção e *Escherichia coli* patogênicas extra intestinais, que apresentam capacidade de colonização em outros sítios orgânicos, como sangue, sistema nervoso central e trato urinário (Johnson; Russo, 2005). Trata-se de um microrganismo que pode provocar grande variedade de doenças devido a diversos fatores de virulência que apresenta. Sua caracterização antigênica baseia-se de acordo com a presença dos antígenos O (somático), encontrado na parede celular, H (flagelares) e K (capsulares) (Trabulsi; Alterthum, 2008).

De acordo com as características de virulência, a bactéria *Escherichia coli* é classificada em patotipos, como *Escherichia coli* enteropatogênica, *Escherichia coli* enterotoxigênica, *Escherichia coli* enteroinvasora), *Escherichia coli* enterohemorrágica, *Escherichia coli* enteroagregativa e *Escherichia coli* uropatogênica (Croxen; Finlay, 2010; Souza *et al.*, 2016).

A presença da *Escherichia coli* em água, solo e alimentos, entre outros ambientes e materiais, confirma a contaminação fecal e indica provável presença de microrganismos patogênicos. Para se obter o controle microbiológico de água para o consumo humano é necessário haver a inexistência do microrganismo indicador de contaminação fecal que é a *Escherichia coli* em 100mL da amostra destinada para consumo humano de acordo com a portaria vigente. (Costa *et al.*, 2021).

De acordo com Raina *et al.* (2019) em alguns lugares que necessitam de abastecimento de água a granel usando caminhões-pipa para atender as necessidades das condições severas de escassez de água, esses fornecedores podem negligenciar as práticas sanitárias. Devido à falta ou a desinfecção de forma errada desses caminhões e durante o procedimento de transporte e distribuição final resultando em contaminação microbiológica (Al-Badaii; Halim, 2021). Segundo estudo realizado por Constantine *et al.* (2017) identificaram os caminhões-pipa como fonte principal de coliformes totais para contaminação da água devido às práticas de higiene.

Os parâmetros bacteriológicos, de contaminação para comprovar a qualidade das águas estão indicados no Anexo 1, inerente a Tabela de padrão bacteriológico de bactérias esporogênicas (Coliformes totais e *Escherichia coli*) da água para consumo humano, contida na Portaria GM/MS nº 888/2021 do Ministério da Saúde. O Quadro 2 apresenta os valores

máximos permissíveis para os parâmetros bacteriológicos monitorados na pesquisa de acordo com a portaria vigente.

Quadro 2: Parâmetros bacteriológicos

Formas de abastecimento		Parâmetro		VMP (1)
SAI		<i>Escherichia coli</i> (2)		Ausência em 100 mL
SAA e SAC	Na saída do tratamento	Coliformes totais (3)		Ausência em 100 mL
	Sistema de distribuição e pontos de consumo	<i>Escherichia coli</i> (2)		Ausência em 100 mL
		Coliformes totais (4)	Sistemas ou soluções alternativas coletivas que abastecem menos de 20.000 habitantes	Apenas uma amostra, entre as amostras examinadas no mês pelo responsável pelo sistema ou por solução alternativa coletiva de abastecimento de água, poderá apresentar resultado positivo.
			Sistemas ou soluções alternativas coletivas que abastecem a partir de 20.000 habitantes	Ausência em 100 mL em 95% das amostras examinadas no mês pelo responsável pelo sistema ou por solução alternativa coletiva de abastecimento de água.

NOTAS: (1) Valor Máximo Permitido pela **Portaria nº 888 de 04 de maio de 2021 do Ministério da Saúde**, (2) Indicador de contaminação fecal, (3) Indicador de eficiência de tratamento, (4) Indicador da condição de operação e manutenção do sistema de distribuição de sistema de abastecimento de água para consumo humano (SAA) e pontos de consumo e reservatório de solução alternativa coletiva de abastecimento de água para consumo humano (SAC) em que a qualidade da água produzida pelos processos de tratamento seja preservada (indicador de integridade). *solução alternativa individual de abastecimento de água para consumo humano (SAI).

Fonte: Brasil, 2021.

3.5.2.1 Coliformes Totais; Coliformes Termotolerantes (*Escherichia coli*)

As análises bacteriológicas da água têm a capacidade de verificar sua condição de uso, seja para recreação, para irrigação agrícola, ou água potável, confirmando a ausência de microrganismos enteropatogênicos de forma que seu uso, incluída sua ingestão, não represente riscos de infecções. A Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021, estabelece que seja verificada na água para consumo humano a ausência de *Escherichia coli* e coliformes totais em amostras de 100ml de água, para determinação da sua potabilidade. (Brasil, 2021).

As bactérias do grupo coliformes são indicadores de higiene, enquanto *Escherichia coli* indica contaminação fecal e a presença de organismos patogênicos na água. A presença destes microrganismos na água pode representar risco de disseminação de várias outras doenças

infeciosas para o ser humano, evidência contaminação fecal, além de ser um bioindicador da presença de outros microrganismos e potencial risco de disseminação de doenças de veiculação hídrica (BRASIL, 2021).

A *Escherichia coli* é classificada como um coliforme termotolerante, ou seja, é capaz de realizar a fermentação da glicose a 44-45°C. Em ambientes aquáticos, ainda é considerada como a principal bactéria indicadora de contaminação fecal (Xavier et al, 2022).

3.6 ENERGIA E RADIAÇÃO SOLAR

A radiação solar desempenha um importante papel em muitos processos ambientais. Quase todas as fontes de energia usadas pelo homem derivam do sol, e as plantas dependem da energia solar para a fotossíntese e o crescimento. Em virtude de sua interação com o óxido de nitrogênio na atmosfera, a energia solar também afeta a densidade e a poluição do ar (Fellenberg, 2012). Existe um crescente interesse na utilização direta da energia solar para diversos fins, como por exemplo, na descontaminação de águas. Além disso, através de processos térmicos e fotovoltaicos, tem o potencial de atender as demandas de calefação ambiental, de calor para processos e de eletricidade.

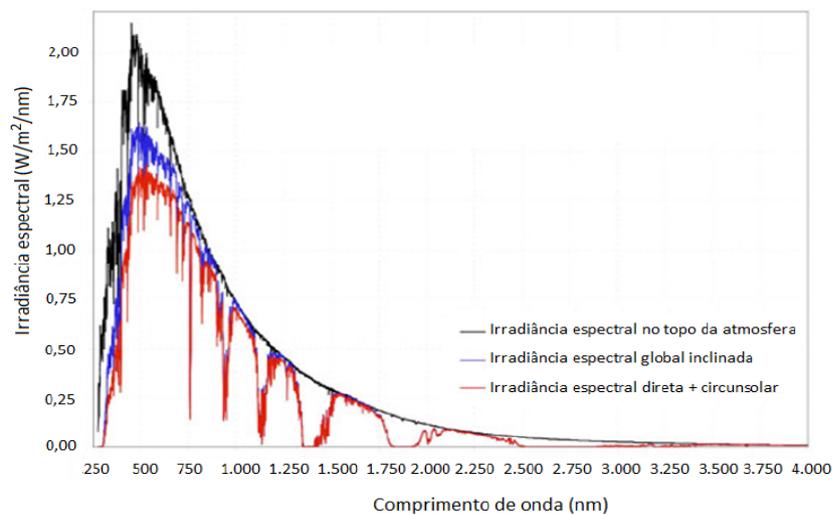
A energia solar é uma energia abundante e disponível em todo o globo terrestre, isto constitui seguramente o fator predominante que faz residir na energia solar uma promissora solução de um grande número de problemas decorrentes da crise energética do início da década de 70, além de constituir um fabuloso potencial energético renovável e inesgotável na escala humana, sendo ainda uma forma de energia limpa e susceptível de inúmeras aplicações. A energia solar apresenta uma característica importante que é a de não ser poluente, podendo ser utilizada de forma concentrada ou não, dependendo da maneira como ela for captada, os níveis de temperatura obtidos podem variar desde a temperatura ambiente até alguns milhares de graus centígrados (Kalogirou, 2014).

A quantidade de energia solar radiante que chega sobre uma superfície por unidade de área e de tempo é chamada irradiância. A irradiância extraterrestre média normal fora da atmosfera da terra é de aproximadamente 1,36 kW.m⁻². Como a órbita da terra é elíptica, à distância sol-terra varia ligeiramente com a época do ano, e a irradiância extraterrestre real varia ± 3,4% durante o ano (Goswami, 2015).

Uma fonte de radiação, como o sol, emite radiação em todo o espectro mostrado na Figura 4. Por exemplo, decompondo-se a luz solar com um prisma é possível ver um espectro de cores, como as do arco-íris. Outras são invisíveis ao olho humano, mas detectáveis por instrumentos (Incropera; Dewitt, 2014).

Quanto aos empregos da energia solar, sabendo-se que a mesma é constituída por radiações eletromagnéticas, podem ser compreendidas desde os raios cósmicos até as ondas longas de rádio; 99% da energia solar radiante de origem térmica estão entre 280-780 nm. Sabe-se que a radiação visível está compreendida entre 400 nm (luz violeta) a 700 nm (luz vermelha) a maior parte da energia solar radiante está entre o ultravioleta e o infravermelho (Duffie; Beckman, 2013).

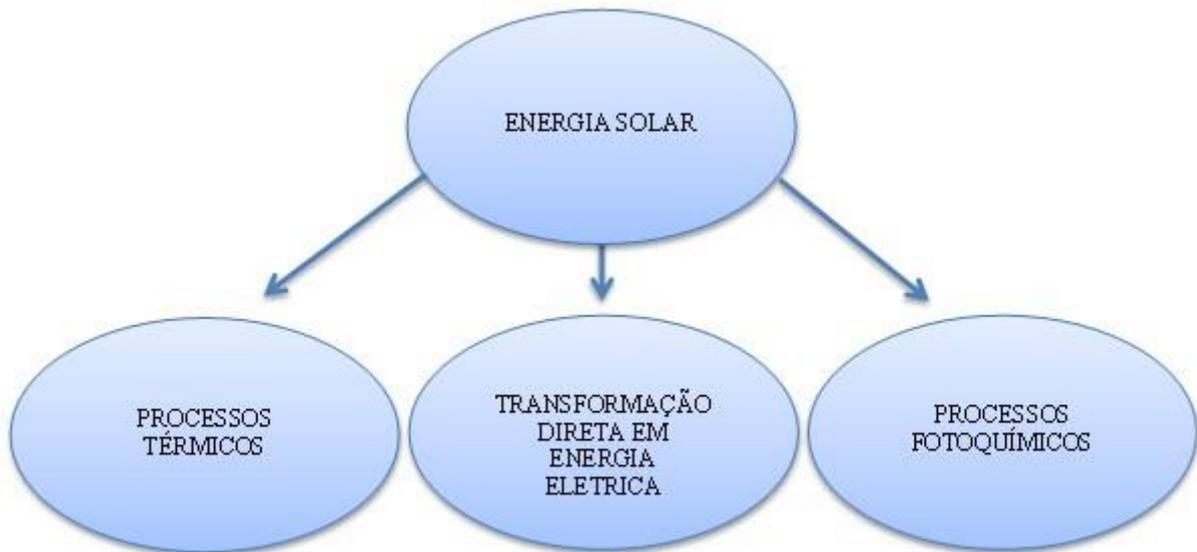
Figura 4: Distribuição espectral de irradiância no topo da atmosfera.



Fonte: Pinho; Galdino, 2014.

Para utilizar a energia solar, o homem precisa, inicialmente transformá-la na forma de energia de que necessita, seja energia elétrica, energia interna, trabalho, energia química, entre outras. Portanto, a forma de conversão é então um fator determinante da tecnologia de captação que deverá ser utilizada. De maneira geral, podem-se distinguir as aplicações em duas grandes classes: as que desfrutam de todo o espectro da energia solar incidente, e as que só utilizam determinada faixa do espectro. A Figura 5 ilustra os principais métodos de utilização da radiação solar.

Figura 5: Formas principais de aproveitamento da energia solar.



Fonte: Adaptado de Bertogli *et al.*, 2008.

A radiação solar está se tornando cada vez mais utilizada devida ser uma fonte inesgotável de energia natural que, juntamente com outras formas de energias renováveis, tem um grande potencial para uma ampla variedade de aplicações. A radiação solar está ganhando terreno rapidamente como um complemento às fontes não renováveis de energia, as quais têm um suprimento finito (Acra *et al.*, 1990; Fochezatto; Korzeniewicz; Fochezatto, 2020).

3.7 DESTILAÇÃO SOLAR

A destilação solar assemelha-se ao ciclo hidrológico natural da água, que inclui duas etapas, a evaporação e a condensação. Pode-se explorar a intensa radiação solar para instalação de destiladores, visto que, é uma fonte de energia limpa e abundante.

Os destiladores solares também podem ser utilizados para fins domésticos, principalmente em regiões sem acesso à energia elétrica, por ser uma tecnologia social, tem proporcionado benefícios socioeconômicos e ambientais, uma vez que, favorece a disseminação social, o que possibilita seu uso individual ou coletivo, e não causando impactos ambientais. As unidades de destilação movidas à energia solar podem reduzir as emissões de carbono e fornecer água descontaminada de maneira sustentável, com impactos mínimos no meio ambiente e são adequadas para áreas remotas e rurais, onde não é possível fornecer abastecimento de água potável (Sharon; Reddy, 2015).

O destilador solar é um dispositivo de baixo custo que produz água potável a partir de água salobra ou contaminada, utilizando a energia do sol. O fenômeno básico deste dispositivo é que a água impura que fica dentro de um recipiente fechado é evaporada usando o calor retido absorvido do sol. Então, esse vapor d'água é condensado nas paredes de vidro do destilador e depois é acumulado (Ibrahim; Allam; Elshamarka, 2015).

3.7.1 Tipos de destiladores solares

Os destiladores solares podem variar desde os modelos convencionais (de simples efeito) até os modelos que foram desenvolvidos a partir deste modelo convencional, com o intuito de melhoria nos rendimentos e, conseqüente, diminuição dos custos. Os destiladores solares são reservatórios de grande área e pequena altura, com cobertura de vidro ou material polimérico, permitindo a livre passagem dos raios solares, gerando vapor, que se condensa para converter-se em água potável, em seguida, é enviada para os reservatórios de armazenamento. A seguir podem-se observar alguns modelos de destiladores solares: do tipo bandeja, do tipo pirâmide, de filme capilar, do tipo mecha e o do tipo cascata.

3.7.1.1 Destilador solar do tipo bandeja

O esquema de um destilador solar tipo bandeja é apresentado na Figura 6. Os componentes básicos são: uma bandeja (plana de alumínio) pintada na cor preta, que tem por objetivo aumentar a absorção de energia solar incidente, onde é alimentada a água; uma cobertura de vidro por onde a radiação solar entra no destilador, e que serve para condensar a água; as calhas que permitem recolher a água da base da cobertura para o reservatório de armazenamento; Possuindo termopares para fazer a verificação da temperatura; e o isolamento na base e nas laterais para evitar as perdas de calor para o ambiente (Varun, 2010).

Figura 6: Destilador solar do tipo bandeja.



Fonte: Alqsair, 2024.

3.7.1.2 Destilador solar tipo pirâmide

O destilador do tipo pirâmide possui as mesmas características do destilador do tipo bandeja, diferenciando apenas pela sua cobertura superior que tem a forma de pirâmide. Além disso, a cobertura de vidro pode ser no formato triangular ou quadrada (Sathyamurthy *et al.*, 2014).

As principais vantagens do tipo pirâmide em relação ao modelo convencional são as seguintes: a) um destilador solar convencional deve estar localizado de modo que sua superfície inclinada fique diretamente voltada para o sol e também seja continuamente deslocado de acordo com o movimento do sol para obter a máxima radiação solar, enquanto que no formato pirâmide esse ajuste não é necessário; b) para a mesma área da bandeja, a produção em forma de pirâmide é maior, pois a sua área de condensação é maior do que a de inclinação única do modelo do tipo bandeja (Nayi; Modi, 2018). Na Figura 7 pode ser observado o destilador solar tipo pirâmide.

Figura 7: Destilador solar tipo pirâmide.

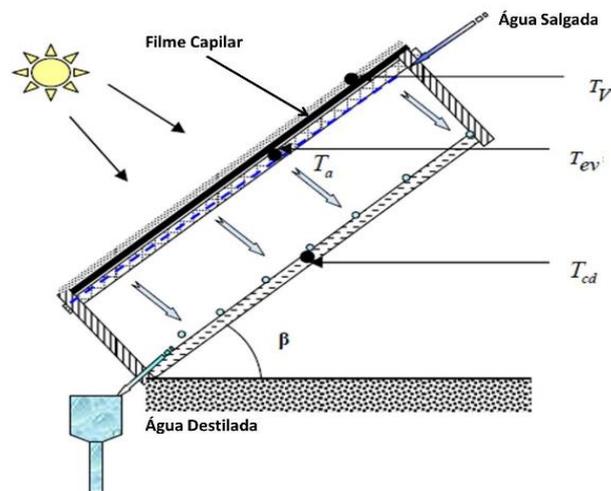


Fonte: Al-Hassan; Algarni, 2013.

3.7.1.3 Destilador solar de filme capilar

O destilador do tipo filme capilar tem como principal característica o uso da propriedade de capilaridade da água (Boucheikima, 2002). Na Figura 8 pode ser observado o diagrama geral de funcionamento. O dispositivo é composto por: uma tampa de vidro; duas placas de metal dispostas face a face e inclinadas a certo ângulo, a primeira face frontal da placa é pintada de preto; a água a ser destilada escorre lentamente pelo tecido, e do outro lado este tecido é adequado para formar um filme de água capilar; o vapor de água produzido deixa o tecido e se condensará em contato com a segunda placa, a água destilada e o resíduo são recuperados pelos coletores; o isolamento térmico da unidade é garantido por uma placa de madeira.

Figura 8: Sistema de destilador com filme capilar.

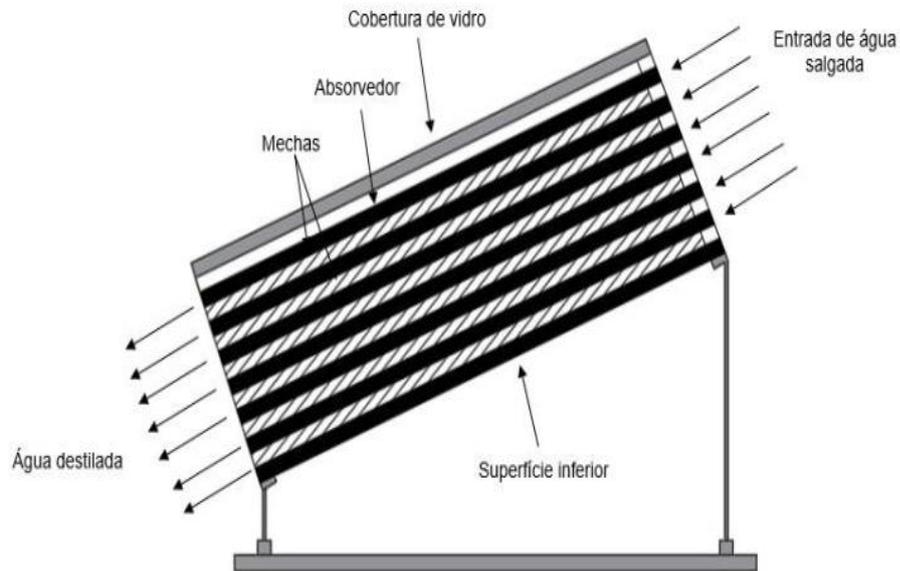


Fonte: adaptado de Abdenacer; Rym; Yacine, 2008.

3.7.1.4 Destilador solar do tipo mecha

Os destiladores solares do tipo mecha se caracterizam por possuir uma espécie de tecido recobrendo sua superfície de evaporação que fica cheio de água a ser destilada. Desta forma, a água passa lentamente através deste tecido poroso chamado mecha, absorvendo a radiação. A Figura 9 ilustra o destilador solar do tipo mecha.

Figura 9: Destilador solar do tipo mecha

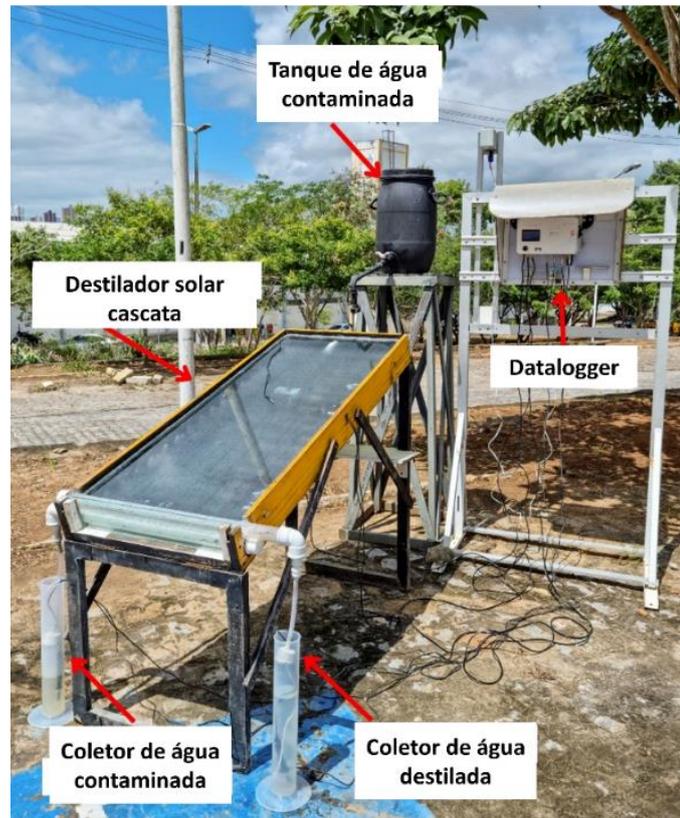


Fonte: Adaptado de Kaviti; Yadav; Shukla, 2016.

3.7.1.5 Destilador solar do tipo cascata

No destilador solar do tipo cascata, a radiação solar aquece a água que evapora e é coletada na parte inferior da tampa de vidro, devido à pequena distância entre a tampa e a placa absorvedora de calor, o destilador fica rapidamente saturado com vapor de água (Cardoso *et al.*, 2022). Este destilador apresenta maior produtividade e eficiência se comparado com outros modelos. O sistema de destilação do tipo cascata com seus componentes é ilustrado na Figura 10, o mesmo é composto por três partes principais: a placa absorvedora de calor, o vidro de condensação da água destilada e o sistema de isolamento térmico.

Figura 10: Destilador solar tipo cascata.



Fonte: Adaptado de Silva *et al.*, 2024.

3.8 FATORES QUE AFETAM A PRODUTIVIDADE DOS DESTILADORES SOLARES

A produtividade do destilador solar depende dos parâmetros naturais como intensidade da radiação solar, velocidade do vento e da temperatura ambiente. Os parâmetros de construção também afetam a produtividade, como a diferença de temperatura entre a placa de cobertura e a água, profundidade da água da bandeja, inclinação e espessura do vidro (Velmurugan; Srithar, 2011).

A partir de tais parâmetros tem-se a energia absorvida pelo vidro, energia transmitida pelo vidro, energia absorvida pela bandeja, e a energia armazenada no sistema. Considerando-se também as perdas de calor no sistema por meio da cobertura e das paredes (lateral e fundo). Sambare, Joshi e Kanojiya (2023) afirmam que modificar a geometria do destilador solar e usar diferentes materiais são as duas alternativas mais viáveis para aumentar a produtividade dos mesmos.

Os processos de transferência de calor da bandeja para a cobertura, e da cobertura para o exterior devem ser otimizados, com o objetivo de maximizar a produtividade do destilador

solar. A variação destes processos de transferência de calor depende de vários fatores como: a variação da intensidade de radiação solar, a variação da temperatura e da umidade ao longo do dia, a latitude e a longitude do local, a velocidade do vento incidente na superfície do destilador, a espessura da cobertura, a orientação e a inclinação da cobertura, a profundidade da água na bandeja, as características dos materiais constituintes do destilador e a utilização de refletores aumenta o fluxo de calor da radiação melhorando o rendimento (Duffie; Beckman, 2013; Selvaraj; Natarajan, 2018).

3.9 PRODUTIVIDADE, PRODUÇÃO E EFICIÊNCIA DE DESTILADORES SOLARES

A quantidade de água destilada produzida pelos destiladores solares varia segundo a configuração do destilador, a insolação e as condições climáticas. Uma vez que um destilador está construído e instalado, ele tem uma configuração geométrica permanente pelo qual seu rendimento será função exclusivamente da insolação e das condições ambientais. A produtividade horária de água destilada é obtida pela Equação (1) (El-Sebaili *et al.*, 2009).

$$P_h = \frac{h_{evap} A_a (T_a - T_v) 3600}{L_a} \quad (1)$$

Onde P_h [$\text{Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$] é a taxa de condensação horária de água destilada, h_{evap} [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$] o coeficiente de troca de calor por evaporação entre a água salobra e a cobertura de vidro, A_a [m^2] a área da água salobra, T_a e T_v [$^{\circ}\text{C}$] são respectivamente a temperatura da água e a temperatura interna do vidro e L_a [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$] é o calor latente da vaporização da água é obtida pela Equação (2).

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

A produção diária é calculada pelo somatório da produção horária ao longo de um dia, como apresentado na Equação (3).

$$P_d = \sum_{24 \text{ horas}} P_h \quad (3)$$

A eficiência térmica global η do destilador solar pode ser determinada pela Equação (4) (El-Sebaili *et al.*, 2009).

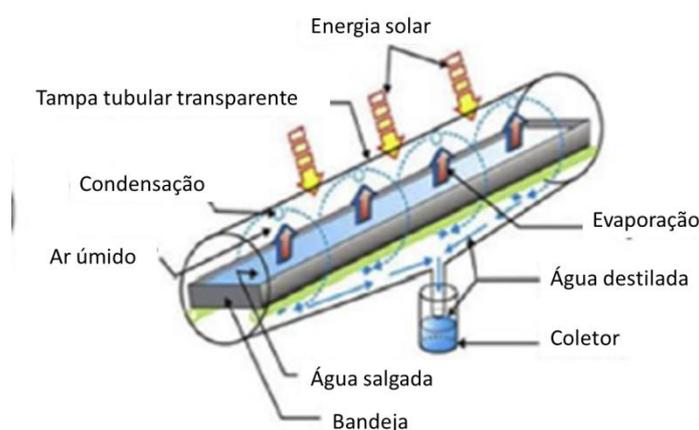
$$\eta = \frac{P_d.L_a}{(A_v \sum I) \Delta t} \times 100(\%) \quad (4)$$

Onde, A_v [m^2] é a área de cobertura do vidro e $I(t)$ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] é a intensidade de radiação que incide na área de cobertura ao longo de um dia, e Δt é o intervalo de tempo durante o qual a radiação solar é medida.

Sempre que está em operação um destilador, visa-se maximizar o q_{e-av} , calor que está relacionado ao transporte do vapor de água da bandeja até a superfície inferior da cobertura, onde é condensado. A energia de evaporação (q_{e-av}) é diretamente proporcional à produtividade do destilador.

Kabeel *et al.* (2019) realizaram um estudo de um destilador solar tubular demonstrado na Figura 11, que foi utilizado para superar a baixa produção de destiladores solares convencionais e reduzir o custo da água doce produzida. Este trabalho fornece uma revisão abrangente, avaliação, viabilidade econômica e desenvolvimento recente dos vários projetos de destiladores solar tubulares. Onde verificaram o desenvolvimento e configuração de diferentes destiladores solar e análises econômicas realizadas. Confirmando, com base no custo de produção de água, o destilador solar tubular horizontal é mais eficiente do que o tipo destilador solar tubular vertical.

Figura 11: Destilador solar tubular.



Fonte: Kabeel *et al.*, 2019.

4 REVISÃO BIBLIOGRAFICA ESPECIFICA

4.1 DESCONTAMINAÇÃO DE ÁGUAS CONTAMINADAS VIA ENERGIA SOLAR.

A desinfecção solar (SODIS) é baseado exclusivamente na utilização de energia solar, e sua eficácia para a eliminação de patógenos da água foi amplamente demonstrado na Figura 12. Este estudo analisa as tecnologias convencionais que estão sendo aplicado em escalas de médio e grande porte para purificar a água e tecnologias emergentes atualmente em desenvolvimento.

Figura 12: Diferentes configurações de desinfecção solar.



Fonte: Pichel *et al.*, 2018.

McGuigan *et al.* (2006) avaliaram experimentalmente a desinfecção solar (SODIS) da água contaminada para inativar oocistos de *Cryptosporidium parvum* e cistos de *Giardia muris*. As suspensões de oocistos e cistos foram expostas a simulações de irradiação solar global de 830 W.m^{-2} para diferentes tempos de exposição e temperatura constante de $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Os resultados mostraram que cistos de *Giardia muris* e oocistos de *Cryptosporidium parvum* foram completamente inativados após exposições ao SODIS em períodos de 4 e 10 h, respectivamente.

Navntoft *et al.* (2008) observaram a cinética de inativação para suspensões de *Escherichia coli* em água de poço usando um coletor concentrador parabólico composto (CPC) para aumentar a eficiência do SODIS. Em dias com maior taxa de radiação, o sistema com refletores de CPC alcançou a inativação completa. Nos dias nublados, os sistemas convencionais não tiveram êxito, apenas sistemas equipados com CPC inativaram completamente a *Escherichia coli*.

Polo-Lopez *et al.* (2011) estudaram reatores de tubo de vidro de baixo custo em conjunto com a tecnologia de CPC, para aumentar a eficiência da desinfecção solar. O reator foi testado usando *Escherichia coli* como patógeno encontrado na água de um poço natural, o reator aprimorado diminuiu o tempo de exposição necessário para atingir a dose letal de UV-A, em comparação com um sistema CPC.

Asadi *et al.* (2013) realizaram o tratamento de águas residuais sanitárias e industriais em um dessalinizador solar. A eficiência de remoção de demanda química de oxigênio (DQO) do dessalinizador foi superior a $86,83 \pm 3,45\%$. Foi obtida uma água dentro dos padrões de qualidade em relação aos sólidos totais dissolvidos (STD). O método também teve sucesso na remoção de bactérias. Quanto às contagens de bactérias heterotróficas, foram enumeradas e determinadas a porcentagem de inativação da contagem de placas heterotróficas (CPH) com uma redução superior a $86,75 \pm 10,88\%$.

Ismail *et al.* (2013) utilizaram dois métodos de purificação solar de água, sendo a dessalinização solar e SODIS que foram combinados para criar um novo modelo de purificador de água. Eles conseguiram uma eficiência de água purificada do modelo duplo para cada um dos dias conseguiram uma média de 65%. Portanto, o purificador duplo se apresentou como uma alternativa acessível para o uso doméstico.

Dessie *et al.* (2014) analisaram a eficiência da desinfecção solar na inativação dos microrganismos e utilizaram o coliforme termotolerante (conhecido por coliforme fecal) como indicador de contaminação. O experimento SODIS foi realizado em 2 NTU de turbidez, pH 7 e diferentes temperaturas da água e intensidades solares, usando garrafas de plástico transparentes pintada de preto com diferentes volumes de água. Os resultados mostraram que a taxa de inativação microbiana em relação à profundidade da água, turbidez, tipo e cor do recipiente, intensidade de luz foi eficiente. O crescimento bacteriano não foi observado após a desinfecção solar.

Castro-Alfárez *et al.* (2016) analisaram um modelo da inativação de *Escherichia coli* na desinfecção solar de água (SODIS), utilizaram dados experimentais de inativação de *Escherichia coli* por desinfecção solar em diferentes condições controladas de irradiância solar e concentração inicial do contaminante. Eles verificaram que o bom ajuste dos resultados simulados e experimentais sugere que o processo mecanístico proposto é uma abordagem realista do processo de desinfecção.

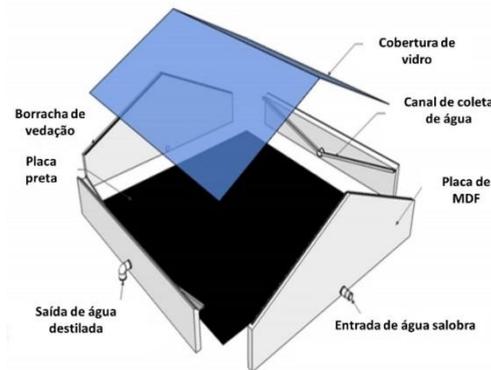
Figueredo-Fernández *et al.* (2017) propuseram uma equação para estimar a dose letal de radiação UV, que realmente atinge a água. A equação foi empregada para discutir a desinfecção solar de Cepas de *enterococos* que é evidenciada nas águas residuais usando vários

dispositivos SODIS, constataram que o tempo de exposição solar necessário para uma aplicação segura do método SODIS pode ser estimado com a utilização de medições simples e versáteis para várias condições de irradiância UV da água e o tipo de dispositivo SODIS.

Vivar *et al.* (2017) analisaram o efeito real da temperatura durante o processo SODIS com água em uma série de experimentos. Três reatores planos de desinfecção foram instalados simultaneamente, um em operação a SODIS (radiação UV + temperatura), um em operação à radiação UV natural, mas com temperatura controlada abaixo de 15 °C (apenas radiação UV) e o terceiro no escuro, operado ao mesmo perfil de temperatura, seguido do processo SODIS sob o sol (apenas temperatura). Foram avaliados os microrganismos *Escherichia coli* e *Enterococcus spp.* Resultados microbiológicos mostraram forte sinergia de UV e temperatura acima de 45 °C. Abaixo de 40 °C, as experiências ópticas (somente UV) e SODIS seguiram a mesma cinética de desinfecção. Mas, entre 40-45 °C, sob condições UV não tão fortes ou não contínuas, o processo SODIS diminuiu a velocidade em comparação com o processo óptico (somente UV) e o reator térmico detectou crescimento microbiano. Portanto, este estudo confirma que existem certas temperaturas (aquelas na faixa em torno da temperatura microbiana ideal de crescimento) que pode prejudicar a desinfecção solar.

Nascimento *et al.* (2018) construíram um destilador solar em escala piloto para verificar a eficiência do equipamento na desinfecção de água ilustrado na Figura 13. A destilação natural da água pode destruir e/ou inativar microrganismos que são sensíveis ao calor e a radiação UV-A. A verificação da eficiência do equipamento foi baseada na determinação do número mais provável (NMP) de Coliformes Totais e Coliformes Termotolerantes bem como no número do ácido desoxirribonucleico (DNA) do adenovírus humano tipo 5 (HAdV-5) em amostras de água antes e após a destilação. Os resultados demonstraram que houve 100% de remoção de coliformes totais e coliformes termotolerantes e 99,98% de remoção do HAdV-5 após a destilação, estando de acordo com o padrão microbiológico de potabilidade determinado pela legislação vigente.

Figura 13: Perspectiva isométrica do destilador solar em escala piloto.



Fonte: Adaptado de Nascimento *et al.*, 2018.

Strauss *et al.* (2018) analisaram a eficiência de 2 sistemas SODIS-CPC. A água da chuva colhida no telhado foi exposta à luz solar direta em um reator de vidro de borossilicato por um período de 8 horas. A água da chuva não tratada e tratada com SODIS foi analisada por alguns parâmetros físico-químicos e microbiológicos. As concentrações de ânion e cátion permaneceram dentro das diretrizes de água potável. As contagens de *Escherichia coli*, *Legionella* e *Pseudomonas spp.* viáveis foram reduzidas para abaixo do limite de detecção em todas as amostras colhidas nos 2 sistemas mostrado na Figura 14. Os sistemas SODIS-CPC melhoraram a qualidade da água de chuva para fins domésticos.

Figura 14: Sistemas de coleta de água da chuva.

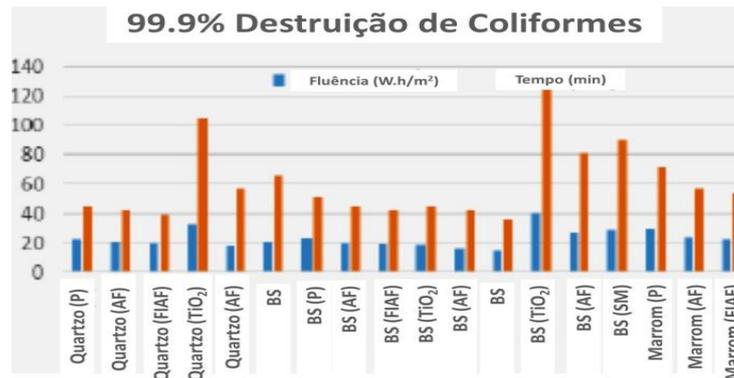


Fonte: Strauss *et al.*, 2018.

Ayoub e Malaeb (2019) avaliaram a eficiência da inativação bacteriana de reatores solares construídos com diferentes materiais. A constante da taxa de foto inativação foi usada como base para analisar os diferentes reatores. Foram usados borossilicato e quartzo, que revelaram ter maior transmissão de radiação em comparação com o vidro marrom testado. O tipo de contaminante, material do reator, temperatura, tamanho do reator e configuração do

reator afetaram o processo SODIS. Entre os contaminantes investigados, *Escherichia coli* apresentou menor resistência a foto inativação UV-A, seguida de *Escherichia coli* e coliforme total, conforme mostrado na Figura 15.

Figura 15: Níveis de energia necessária e tempos de exposição para *Escherichia coli*.



Fonte: Ayoub; Malaebet, 2019.

Wilson *et al.* (2019), utilizaram um destilador solar caseiro que utiliza um absorvedor de radiação flutuante que teve eficiência térmica de 80% sob irradiação solar, como mostra na Figura 16. Além dos níveis de salinidade da água, a água purificada obtida da purificação foi testada para colônias de bactérias e nenhuma unidade formadora de colônia (UFC) estava presente. Os resultados obtidos mostraram que materiais fototérmicos é eficiente na sua aplicação em destiladores para obter produção de água potável.

Figura 16: Destilador solar com absorvedor de calor.



Fonte: Wilson *et al.*, 2019.

Chu *et al.* (2019) estudaram diferentes tecnologias solares não convencionais, eles relataram avanços em eficiência nos materiais e nos processos que podem aproveitar a luz solar para desinfecção da água. Os mesmos concluem que diferentes tecnologias de desinfecção solar

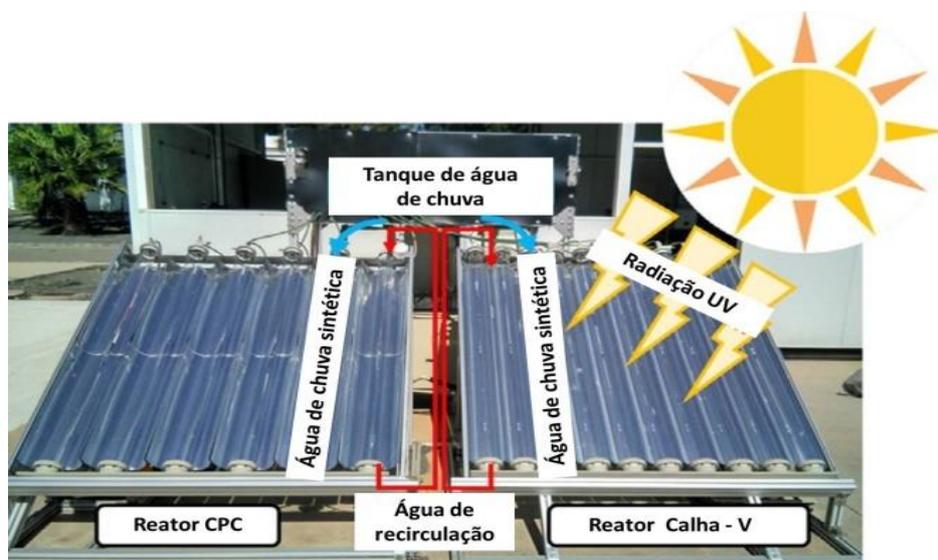
devem ser aplicadas dependendo da qualidade da água e do patógeno alvo devido a variações significativas na suscetibilidade dos componentes microbianos a desinfetantes distintos e conseguir desempenhar um papel fundamental na redução de doenças transmitidas pela água.

Zuluaga-Gomez *et al.* (2019) realizaram um estudo de revisão de técnicas de desinfecção da água, onde foram revisados diversos métodos de purificação de água baseados em técnicas microbiológicas, químicas e físicas. O estudo procurou explicar os últimos avanços em destiladores solares, e estudos recentes têm usado melhorias para aumentar o rendimento da água destilada, como coletores solares e materiais de armazenamento de calor.

Kvam e Benner (2020) investigaram o mecanismo de foto inativação bacterianas por meio de um protótipo de LED com espectro UV-A (365 nm). A partir dos resultados obtidos, foi visto que as bactérias forçadas à dormência metabólica por dessecação tornaram-se hipersensibilizadas aos efeitos da radiação UV, permitindo assim uma foto inativação significativa. Portanto, esses resultados comprovaram o mecanismo e potencial da aplicação da radiação do espectro UV-A para fins de desinfecção bacteriana.

Martínez-García *et al.* (2020) analisaram um foto-reator solar baseado em espelhos no formato V como alternativa ao CPC em escala piloto ilustrado na Figura 17. Para este estudo, foram utilizadas cepas de *Escherichia coli*, *Enterococcus faecalis*, *Salmonella enteritidis* e *Pseudomonas aeruginosa*, patógenos que são comumente encontrados no armazenamento de água de chuva. Eles concluíram que os melhores resultados foram obtidos com a calha no formato V em condição estática.

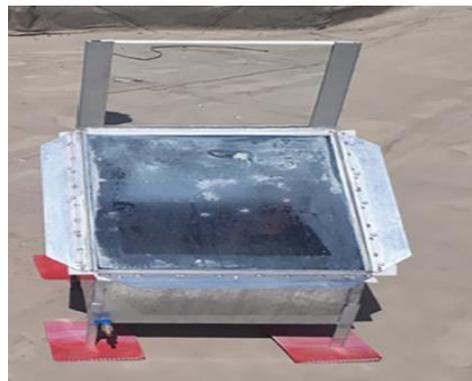
Figura 17: Novos foto reatores solar, CPC e Calha - V.



Fonte: Martínez-García *et al.*, 2020.

Parsa *et al.* (2020) estudaram o desempenho de dois dessalinizadores solares baseados em nanofluidos, expostos a uma altitude em torno de 4000 m, apresentado na Figura 18. A água produzida nessas condições, a partir de sistemas coletados em garrafas plásticas transparentes expostas a luz solar, durante 8h de experimento, sendo eficiente o sistema SODIS. A maior eficiência instantânea de energia e exergia foram obtidas com o nanofluido em 55,98% e 9,27%, respectivamente. Além disso, a eficiência energética e exergia geral do sistema carregado com nanofluido em comparação com o sistema sem nanofluido melhorou em cerca de 110% e 196%, respectivamente. Finalmente, a exposição da água destilada sob a radiação solar do SODIS, usando nanopartículas de prata, para a aplicação antibacteriana e melhoria na transferência de calor/massa, resultou na obtenção de uma água mais saudável.

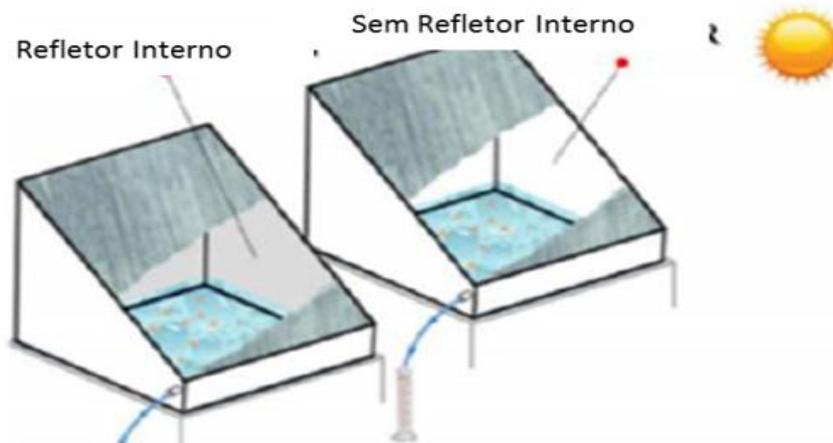
Figura 18: Destilador solar operando com nanofluidos.



Fonte: Parsa *et al.*, 2020.

Fadhe, Abed e Al-Shamkhee (2021) realizaram um estudo de revisão que enquadraram expressões matemáticas, realizaram experimentos e confirmaram o resultado dos diferentes tipos de destiladores solares, mostrado na Figura 19, usando tipos de materiais absorventes, refletores e um dispositivo de rastreamento do sol que foi introduzido, a intensidade da energia solar estando máxima e, assim, verificou, a melhoria da produção e de absorção em 380%, um aumento geral na eficiência de 2% aumentou a produção para cerca de 22% em algumas pesquisas. Neste estudo, os resultados mostraram que o uso de redes de arame e areia no destilador aumenta a produção diária de água doce em cerca de 3,1%, 13,7% no inverno, cerca de 3,4% e 14,1% no verão. Os resultados também mostram que a eficiência do destilador solar é afetada pelos tipos, design e sistema de armazenamento de calor.

Figura 19: Destilador Solar Inclinado e Refletor Interno.



Fonte: Fadhe; Abed; Al-Shamkhee, 2021.

Faisal e Hamee (2021) realizaram estudo de revisão verificando técnicas de melhoria para aumentar a produtividade e a eficiência do destilador por meio da adoção de uma ampla gama de modificações. Eles relatam várias técnicas de modificação que foram investigadas para melhorar a eficiência e a produtividade da água limpa, onde a destilação solar é uma tecnologia comprovada para produzir água limpa e remover impurezas sólidas e dissolvidas, bem como contaminantes químicos perigosos, bactérias orgânicas e não orgânicos.

Wang *et al.* (2022) avaliaram a reativação de três bactérias após tratamento completo pelos processos separadamente de UV₃₆₅, cloro e UV₃₆₅/cloro, para garantir a eficiência da desinfecção. Sendo que o processo combinado apresentou o menor potencial de reativação, e estudaram o desempenho do processo UV₃₆₅/cloro na inativação bacteriana. A técnica UV₃₆₅ apresentou melhor desempenho separadamente do que apenas o cloro. Inativação de *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Bacillus subtilis* foi refletido através da avaliação da permeabilidade da membrana, vazamento de adenosina-trifosfato (ATP) e dano da morfologia da superfície celular.

Hong *et al.* (2022), estudaram um mecanismo de inativação bacteriana usando um reator de desinfecção solar baseado em um filme de nanotubos de carbono que converte energia solar em calor. O reator fototérmico mostrou aumento sinérgico da inativação de *Escherichia coli*. Várias vias metabólicas relacionadas à geração de espécies que reagem ao oxigênio que deveriam ser reguladas negativamente pelo estresse térmico permaneceram inalteradas na luz solar. A enorme quantidade de espécies que reagem ao oxigênio atacou as membranas celulares

e o RNA e resultou na morte celular. Este método fornece uma alternativa possível para a desinfecção de água potável e baixo consumo de energia e sem subprodutos tóxicos.

Xia *et al.* (2022) investigaram a cinética de inativação, fatores influenciadores, mecanismos e recrescimento de esporos de fungos no processo SODIS. A inativação se mostrou eficiente com o modelo de ajuste de Geeraerd e Van Impe de inativação com *Penicillium polonicum* foi mais sensível à luz solar simulada do que *Aspergillus niger*. O valor de pH na faixa de 5 a 9 e o ácido húmico em baixa concentração não afetaram a inativação solar dos esporos fúngicos, enquanto o ácido húmico na concentração acima de 5,0 mg/L inibiu a eficiência da inativação solar. Ao longo da faixa testada, a eficiência de inativação foi obtida na temperatura próxima à temperatura ideal de crescimento (30-40°C para *Aspergillus niger*, 20-30°C para *Penicillium polonicum*). Durante o processo SODIS, o DNA e a cadeia respiratória dos esporos fúngicos foram atacados. Este trabalho descobriu o controle de fungos aquáticos pelo SODIS.

Portanto, considerando as discussões apresentadas sobre descontaminação via energia solar de águas superficiais contaminadas é notório que para a destilação solar de água com presença de microrganismos com destilador solar tipo cascata com placa absorvedora de calor no formato ondular associada com o uso de materiais fototérmicos, não foi encontrada pesquisas até o presente momento com esta temática, o que confirma a relevância de novas pesquisas de destilação de água superficial contaminada. Nesse contexto, fica evidente a inovação desta pesquisa que está relacionada a utilização de um destilador solar do tipo cascata para remoção/inativação de microrganismos, uma vez que a energia solar, como vista nos artigos sobre descontaminação de água superficial contaminada, é capaz de desempenhar um importante papel para potabilidade da água. Além disso, foi possível comprovar a boa variabilidade de utilização do equipamento em águas superficiais contaminadas.

4.2 DESTILAÇÃO SOLAR COM MATERIAIS FOTOTÉRMICOS

A produção de água é diretamente proporcional ao aumento da capacidade térmica do material do dessalinizador solar. Sendo que a capacidade térmica desempenha um papel importante na produtividade do dessalinizador solar (Bhattacharyya, 2013). De acordo com Manokar, Murugavel e Esakkimuthu (2014) a utilização de materiais de armazenamento térmico faz com que se tenha um aumento na produtividade, devido ao acúmulo de calor dentro do dessalinizador, para se obter uma maior condutividade térmica, são utilizadas nanopartículas suspensas para aumentar a área de superfície da bandeja.

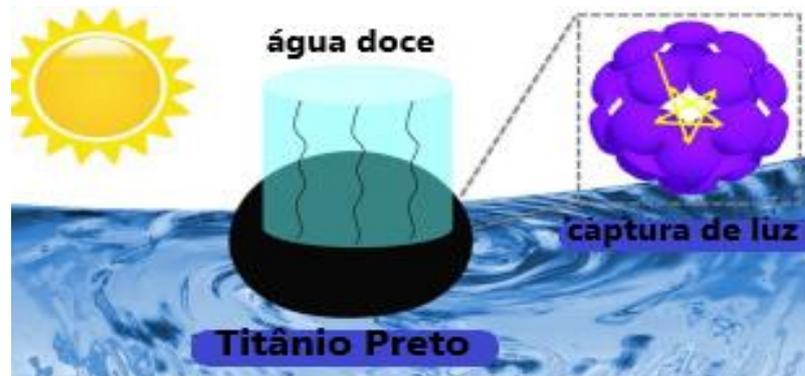
Murugavel *et al.* (2010) analisaram um dessalinizador solar tipo bandeja, os mesmos realizaram experimentos utilizando diversos tipos de materiais capaz de armazenar calor, dentre eles a rocha de quartzito, pedaços de tijolos vermelhos, pedaços de cimento, pedras lavadas e restos de ferro, o intuito foi avaliar o melhor material de armazenamento de calor, para aumentar o rendimento, e descobriram que a rocha de quartzito de 19 mm foi o material mais eficaz neste experimento.

Abdel-Rehim e Lasheen (2005) projetaram e construíram três dessalinizadores para comparar o desempenho dos sistemas de dessalinização solar. O primeiro usa uma camada compactada de bolas de vidro para aumentar a eficiência, e o segundo usa um eixo rotativo enquanto o terceiro é um dessalinizador convencional. A camada compactada de bolas de vidro de 13,5 mm de diâmetro cobre a superfície do fundo da bandeja do dessalinizador, enquanto o eixo rotativo está localizado no meio, próximo à superfície da água da bandeja do dessalinizador. Três conjuntos de experimentos foram realizados nos parâmetros operacionais selecionados. Eles concluíram que a camada compactada de bolas de vidro foi mais eficiente para aumentar a produtividade da água doce.

Panchal (2015) utilizou um destilador solar em diferentes condições operacionais para determinar o seu desempenho, em um dos experimentos utilizou cascalho de granito preto como material de armazenamento de energia, sendo este material eficiente para ajudar na evaporação, e que o mesmo aumentou a ação capilar e a produtividade do dessalinizador solar.

Zhu *et al.* (2016) projetaram um destilador com nanopartículas de titânio preto conforme mostra na Figura 20, simultaneamente com melhoria no efeito de captura de luz, aumentando a transferência de calor e a evaporação da água, desta forma as nanopartículas, que teve uma eficiência na absorção da irradiação solar, devido a camada auto flutuante de titânio, convertendo em energia térmica, com isso obtiveram 70,9% de eficiência na remoção dos sais da água.

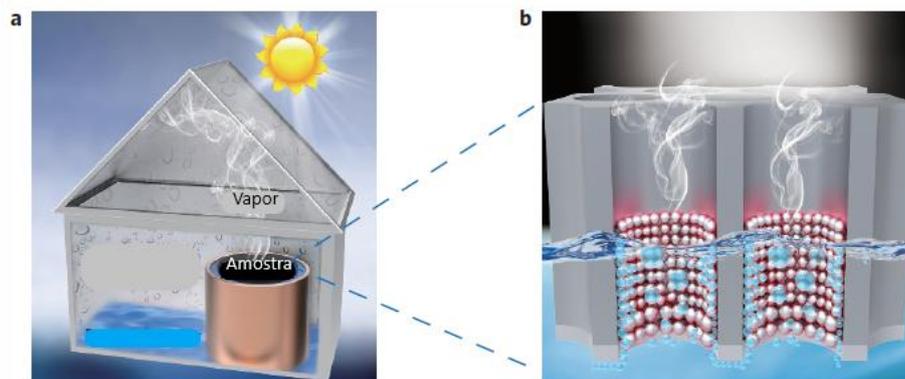
Figura 20: Dessalinização solar com nanopartículas de titânia preto



Fonte: Adaptado de Zhu *et al.*, 2016.

Zhou *et al.* (2016) realizaram experimentos em um dessalinizador solar de baixo custo, aprimorado com plasmon, como mostra na Figura 21, através da automontagem de nanopartículas de alumínio em uma membrana porosa 3D, capaz de flutuar na água, conseguindo absorver com eficiência um amplo espectro solar e concentrar a energia absorvida na superfície da água para permitir eficiência na dessalinização. Este dispositivo reduz a salinidade em quatro ordens de magnitude e mantém seu desempenho em 25 ciclos.

Figura 21: a) Instalação e desempenho da dessalinização solar com reforço de plasmon; b) Esquema do plasmon



Fonte: Zhou *et al.*, 2016.

Sharshir *et al.* (2017) estudaram três dessalinizadores conforme a Figura 22, com o emprego de microfocos de grafite e óxido de cobre, e resfriamento da cobertura de vidro no desempenho do dessalinizador solar. Eles registraram que a melhor concentração dos microfocos de grafite e óxido de cobre foi de 1%, alcançando um aumento na produtividade de

água de 54%. Além disso, a eficiência diária do destilador com o resfriamento da cobertura de vidro foi aumentada de 30% para 49%.

Figura 22: Dessalinizadores solar.



Fonte: Adaptado de Sharshir *et al.*, 2017.

Salem *et al.* (2020) examinaram a influência da integração de uma camada de esponja flutuante no destilador solar do tipo telhado, mostrada na Figura 23, contendo várias densidades de espessuras e diferentes profundidades de água. Os resultados mostram que a integração da esponja muda seus princípios operacionais, perfis de temperatura e desempenho, podendo variar conforme a espessura da esponja fornecendo eficiência térmica superior ao destilador convencional, A produtividade máxima de água foi registrada $4,9 \text{ L.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, tendo ocorrido um aumento de 58,1% comparado ao modelo destilador solar convencional.

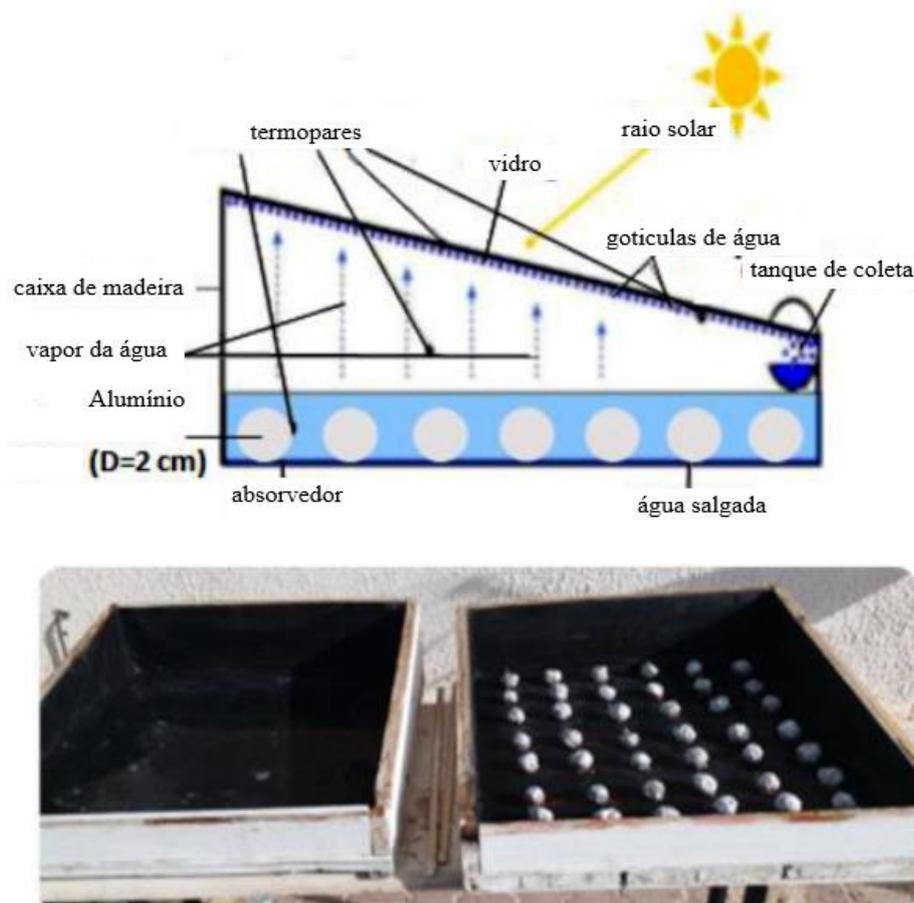
Figura 23: Esponja pintada.



Fonte: Salem *et al.*, 2020.

Attia *et al.* (2020) realizaram experimentos com um dessalinizador solar, para aumentar a produção de água destilada, eles adicionaram 42 bolas de alumínio com 2 cm de diâmetro na bandeja do dessalinizador como mostra na Figura 24, desta forma conseguiram elevar a temperatura da água salina, os resultados mostraram na pesquisa destes autores que as bolas de alumínio aumentaram a eficiência térmica e a destilação de água em cerca de 27,16%.

Figura 24: Dessalinizador solar com esferas de alumínio.



Fonte: Adaptado de Attia *et al.*, 2020.

Kabeel *et al.* (2020a) introduziram experimentos em um dessalinizador para mostrar o efeito da incorporação de uma mistura de nanopartículas de óxido de grafeno em material com mudança de fase, os resultados indicaram que a utilização deste material a taxa de evaporação foi aumentada em 41,3%, desta forma teve um aumento na produtividade, foi comprovado também uma eficiência diária de aumento cerca de 50,9%.

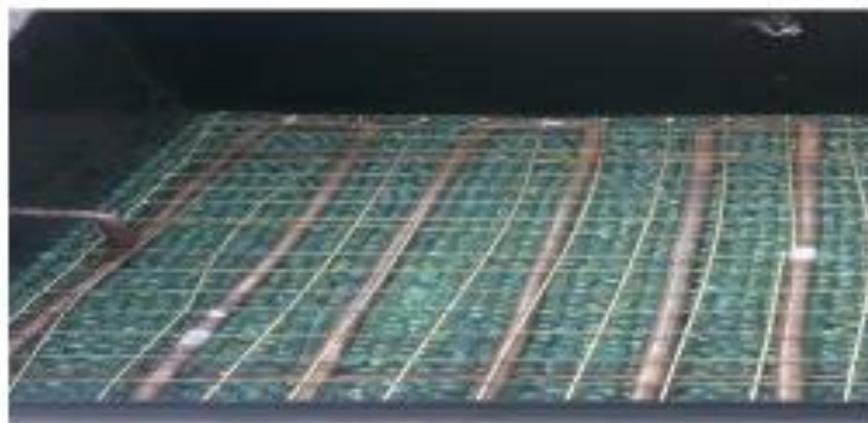
Kabeel *et al.* (2020b) utilizaram tijolos vermelhos revestidos de cimento em um destilador solar convencional de inclinação única para aumentar a produção de água destilada

por meio de armazenamento de energia. Devido à maior capacidade térmica dos materiais utilizados, eles constataram uma melhoria na temperatura da água em relação ao destilador tradicional de cerca de 30%, contribuindo para a evaporação da água no interior do destilador, juntamente, com aumento de 45% na produtividade.

Elashmawy (2020) utilizou cascalho de brita dentro de uma calha semicilíndrica pintada de preto colocada no centro de um tubo transparente, como material de armazenamento de calor sensível no desempenho de um destilador solar tubular com um sistema de rastreamento solar com concentrador parabólico, realizaram dois experimentos em dois dias consecutivos com e sem cascalho. A eficiência térmica e o rendimento obtidos com brita foram de 36,34% e 4510 mL.m⁻² respectivamente comparados com 31,9% e 3960 mL.m⁻² sem brita. O uso de cascalho aumenta a eficiência e o rendimento em 13,89% e 14,18%, respectivamente.

Madiouli *et al.* (2021) apresentaram uma comparação de desempenho experimental de três casos, (1) Destilador solar convencional, (2) Destilador solar de inclinação simples incorporado com coletor parabólico e (3) Destilador solar de inclinação simples incorporado com coletor parabólico e camada compactada de bolas de vidro na bandeja mostrado na Figura 25. Eles confirmaram que o caso (3) tem a maior produtividade de água doce seguido pelo caso (2) e (1), respectivamente. O aumento percentual no rendimento do destilador solar foi de 152% para o caso (3) e 130% para o caso (2) quando comparado ao destilador solar convencional. A melhoria da eficiência e viabilidade econômica mostraram que as modificações propostas foram altamente promissoras para as regiões com escassez de água.

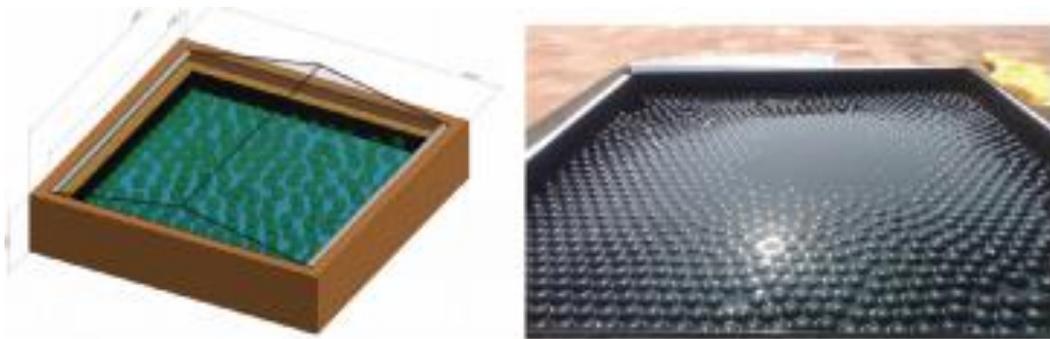
Figura 25: Dessalinizador solar com bolas de gude.



Fonte: Adaptado de Madiouli *et al.*, 2021.

Saravanan, Rajakumar, e Moshi, (2021) construíram um sistema de dessalinização de baixo custo mostrado na Figura 26, baseado em energia renovável para converter a água salobra em água potável, realizaram uma investigação experimental sobre o aumento de desempenho de destiladores solares de bandeja única e dupla inclinação usando mármorees como materiais de armazenamento de calor sensível. O destilador solar projetado foi fabricado e testado sob condições atmosféricas normais, onde os autores citaram que o desempenho do destilador solar com mármorees foi superior ao do destilador convencional em 16,32%.

Figura 26: Dessalinizador solar com mármorees escuro.



Fonte: Adaptado de Saravanan; Rajakumar; Moshi, 2021.

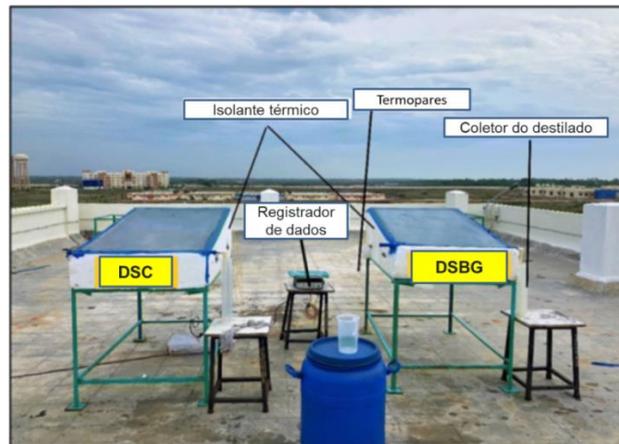
Suraparaju, Ramasamy e Natarajan, (2021) realizaram o desempenho energético e econômico com destilador solar de inclinação única usando bolas de gude (DSBG) onde foi investigado e comparado os resultados com destilador solar convencional (DSC) como mostra na Figura 27, os experimentos foram conduzidos em dias ensolarados e nublados para avaliar o desempenho da destilação solar. As bolas de gude aumentaram a taxa de evaporação e a produtividade quando comparado ao destilador convencional, devido à energia térmica sensível armazenada pelas mesmas na bandeja absorvedora de calor. O rendimento de água potável foi melhorado em 22,86% e 21,23%, durante dias ensolarados e nublados, respectivamente. A produtividade acumulada máxima obtida no destilador com bola de gude foi de $2950 \text{ mL.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ e $2150 \text{ mL.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, nos dias ensolarados e nublados, respectivamente.

Figura 27: a) Bolas de Gude; b) Dessalinizador solar convencional e Dessalinizador com bolas de gude.

a)



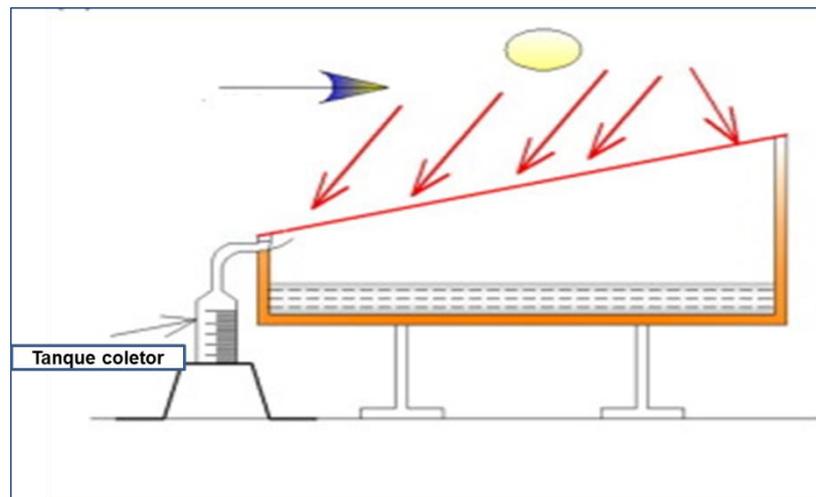
b)



Fonte: Adaptado de Suraparaju; Ramasamy; Natarajan, 2021.

Karthick *et al.* (2021) construíram dois dessalinizadores solares, sendo um convencional e outro com pedras na bandeja, como mostra na Figura 28 e realizaram um estudo experimental para avaliar a melhoria da produtividade com a introdução de pedras rochosas, cobrindo a bandeja do dessalinizador. O leito de rochas pode absorver a energia solar durante a luz do sol e liberar a energia para vaporizar a água do mar após o término da luz do sol, o que leva a um aumento na produtividade da água doce. Eles conseguiram melhorar a produtividade em 18,6% com o destilador com as pedras, em relação ao dessalinizador convencional.

Figura 28: Dessalinizador solar com pedras de rocha.



Fonte: Adaptado de Karthick *et al.*, 2021.

Gnanaraj e Velmurugan (2022) fabricaram três dessalinizadores solares com dimensões idênticas como mostra na Figura 29, e espalharam material de armazenamento de calor na bandeja e conseguiram concentrar a radiação solar com um refletor externo. Realizaram experimentos com um dessalinizador convencional, com materiais de armazenamento de calor como granito preto, seixos, borracha preta, pedra de tijolo, carvão e no outro dessalinizador contendo areia no terceiro dessalinizador com refletor externo. No dessalinizador com refletor, a taxa de aumento da temperatura da água e a produção de destilados foram altas durante o aumento da irradiação, chegando à temperatura máxima de 63 °C e o aumento da produtividade foi de 23,08%. Mas o dessalinizador com materiais de armazenamento de calor sustentou uma maior taxa de temperatura da água com a temperatura máxima de 59 °C durante o declínio das horas de sol.

Figura 29: Dessalinizadores e Materiais de armazenamento de calor.



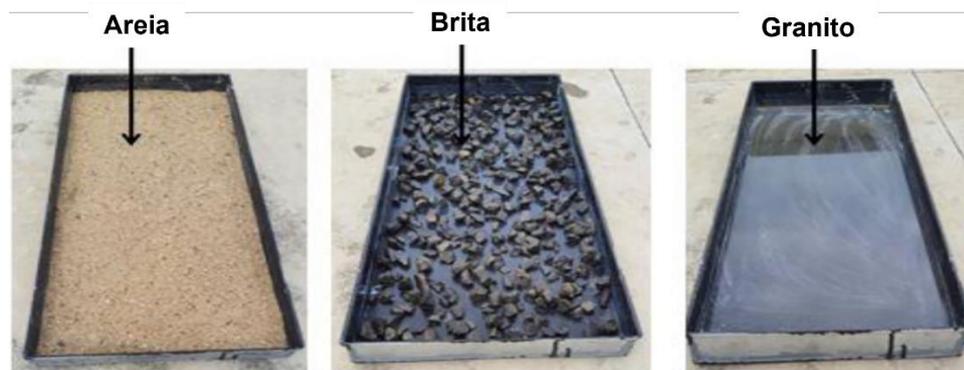
Fonte: Adaptado de Gnanaraj; Velmurugan, 2022.

Natarajan *et al.* (2022) relataram e utilizaram materiais de baixo custo e ecológicos, e conseguiram alcançar aumento de absorção de calor e da taxa de evaporação da água do mar, juntamente com a taxa de condensação sobre a cobertura de vidro do destilador solar. Os materiais de baixo custo e ecológicos utilizados foram pó de melaço, serragem e casca de arroz. Além desses materiais, palha de bambu, caule de folha de bananeira e palha de arroz foram utilizados como materiais absorventes sobre a cobertura de vidro para aumentar a taxa de condensação, com temperaturas máximas atingidas da água de 67,6 °C, 69,1 °C, 69,2 °C e 70,1 °C, respectivamente. Os resultados da investigação experimental destacaram que o destilador solar com materiais de armazenamento térmico obteve-se uma taxa de evaporação comparativamente melhor e um maior rendimento que o destilador convencional.

Conforme Sambare *et al.* (2022) foi realizado o trabalho experimental em destilador solar tubular com diferentes materiais de armazenamento sensíveis de baixo custo mostrado na Figura 30 (areia, brita e granito preto). Eles conseguiram com a introdução dos materiais de armazenamento de energia utilizados aumentar a produtividade, a eficiência térmica e a eficiência exergética do destilador solar tubular. O rendimento produzido a partir da introdução do granito preto foi aumentado em 10,5% e 32,3% em comparação com o que acrescentou

cascalho de brita e o de Areia. A eficiência térmica e exergética diária do uso com granito preto foi melhorada em (32,4%, 9,8%) e (92,1%, 21,9%) em comparação com o destilador solar tubular com areia e cascalho de brita. O granito preto melhorou significativamente a taxa de evaporação do que a areia e os cascalhos de brita durante o trabalho experimental.

Figura 30: Dessalinizadores solar tubular com materiais de armazenamento de calor. (a) Areia. (b) Cascalhos de brita (c) Granito preto



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

Sambare, Joshi e Kanojiya (2023) desenvolveram sistemas de destilação mostrado na Figura 31, conseguiram deixar mais eficientes através da implementação de materiais de armazenamento de calor de baixo custo, utilizaram três materiais diferentes, a saber, tecido de juta, peças de ferro e tela de arame em destiladores solares tubulares. Mostraram que a tela de arame sobressaiu na taxa de evaporação sendo significativamente maior do que a do tecido de juta e das peças de ferro.

Figura 31: Dessalinizadores com materiais de armazenamento de calor.



Fonte: Adaptado de Sambare; Joshi; Kanojiya, 2023.

Ramzy *et al.* (2023) melhoraram o desempenho e a produtividade dos destiladores solares através da introdução de diferentes materiais de armazenamento térmico, como luffa, luffa pintado de tinta preta, lã de aço fina e almofadas de lã de aço conforme apresentado na Figura 32. Os resultados mostraram que a escolha do material de armazenamento térmico impactou significativamente a produtividade do destilador solar, na utilização da fibra natural de luffa com apenas 40% da área coberta com 15 pedaços de fibra natural de luffa. Já as almofadas de lã de aço alcançaram maior rendimento de 4.384 L.m^{-2} e maior eficiência térmica, com 32,74%. Os resultados demonstraram que a incorporação de almofadas de lã de aço foi a modificação mais promissora para melhorar o desempenho do destilador solar em comparação com outras modificações.

Figura 32: Materiais: fibra de luffa, fibra de luffa pintada de preto, lã de aço fina e almofadas de lã de aço na configuração experimental.



Fonte: Adaptado de Ramzy *et al.*, 2023.

Diversas outras pesquisas foram desenvolvidas com o uso de materiais fototérmicos para melhorar o desempenho de destiladores: como a utilização de cascalho de tijolos vermelhos (Murugavel *et al.*, 2010; Murugavel; Srithar, 2011); utilização de cascalho de granito preto (Panchal, 2015; Sakthivel; Shanmugasundaram, 2008); camada de esponja (Samuel *et al.*, 2016); Salem *et al.*, 2020); utilização de óleo térmico (Patel; Kumar, 2016); cera de parafina (Sathish Kumar; Jegadheeswaran; Chandramohan, 2019; Omara *et al.*, 2021); esferas de

alumínio na bandeja do dessalinizador (Attia *et al.*, 2020); camada compactada de bolas de vidro na bandeja (Abdel-Rehim; Lasheen, 2005; Suraparaju; Ramasamy; Natarajan, 2021); utilização de mármore na bandeja de destiladores solar de dupla inclinação (Saravanan; Rajakumar; Moshi, 2021); carboneto de silício (Tei *et al.*, 2023); rochas na bandeja (Karthick *et al.*, 2022); cascalho de brita (Gnanaraj; Velmurugan, 2022). Estes pesquisadores utilizaram estes materiais para armazenar energia térmica e melhorar a eficiência dos sistemas de destilação.

4.2.1 Materiais fototérmicos

Os materiais que possuem a capacidade de armazenamento térmico são conhecidos como, materiais fototérmicos. O interesse pela utilização desses materiais na destilação solar tem crescido consideravelmente devido às melhorias observadas nos parâmetros térmicos. Esses materiais proporcionam eficiência ao sistema, uma vez que aumentam a absorção da luz e a eficiência na conversão da energia solar em calor (Liu *et al.*, 2019; Thoai *et al.*, 2021). Na Figura 33, são destacadas algumas características mais importantes que um material fototérmico deve possuir.

Figura 33: Principais características termofísicas dos materiais de armazenamento de energia.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Nos últimos anos, os materiais fototérmicos vem desempenhando um papel fundamental para a conversão e armazenamento eficiente da energia solar, para se obter uma maior eficiência nos destiladores solar, é um campo de estudo que tem despertado grande interesse devido ao seu significativo potencial para se tornar uma abordagem econômica e ambientalmente sustentável na obtenção de água potável, onde a energia térmica resultante pode ser aproveitada para impulsionar a produção de vapor. Existem várias tecnologias para armazenar energia em diferentes formas, incluindo energia mecânica, elétrica e térmica. (Chauhan *et al.*, 2021). Alguns parâmetros devem ser atendidos para que um sistema de armazenamento de energia térmica seja eficaz, na tabela 2 descreve a importância de várias propriedades termofísicas de materiais de armazenamento de energia em estado sólido.

Tabela 2: Importância das propriedades termofísicas de materiais de armazenamento de energia em estado sólido.

Propriedade	Requerimen to	Razão / Descrição
Densidade (ρ) (kg.m^{-3})	Alto	O material de alta densidade pode aumentar sua capacidade de armazenamento para um determinado volume do sistema. Pode reduzir o volume necessário do sistema para produzir o mesmo efeito de aquecimento.
Calor específico de massa (C_m) ($\text{kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$)	Alto	Alto valor indica que o material de armazenamento pode melhorar sua densidade de armazenamento.
Condutividade térmica (k) ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	Alto	A alta condutividade térmica do material pode aumentar sua taxa de carga e descarga de energia.
Estabilidade térmica	Alto	Os materiais de armazenamento não devem decair (ou) se decompor em aplicações de temperatura mais alta. As propriedades termofísicas dos materiais devem ser estáveis mesmo após o uso repetido de aplicações de resfriamento e aquecimento.
Disponibilidade	Abundante e facilmente disponível	Todos os materiais de armazenamento de energia devem estar disponíveis de forma abundante e fácil no mercado local.
Custo	Barato	O investimento deve ser reduzido.

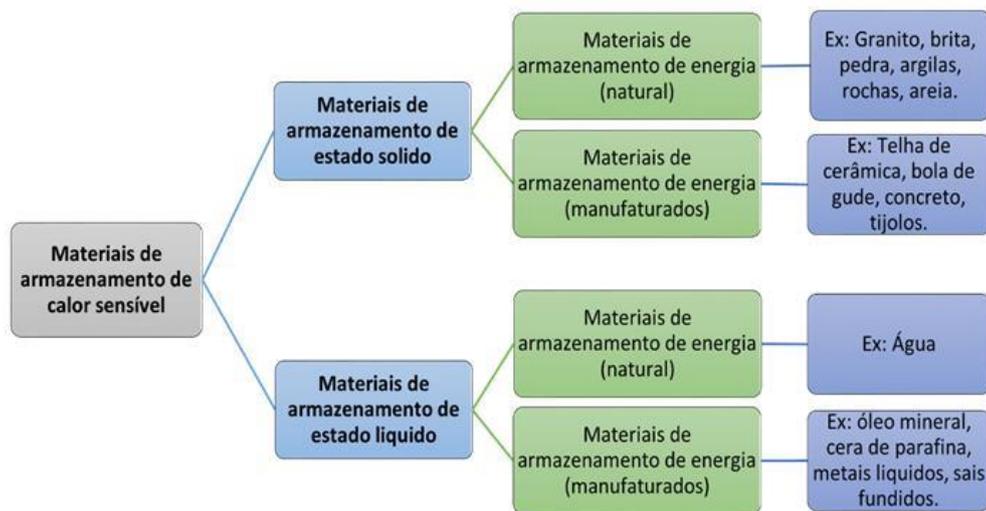
Fonte: Adeyanju, 2015; Palacios *et al.*, 2020; Adaptado de Mugi *et al.*, 2022.

O armazenamento térmico está se tornando um componente de grande importância para garantir a confiabilidade em sistemas de destilação e a rentabilidade econômica. Os sistemas de armazenamento podem ajudar a resolver parte de problemas relacionados a períodos nublados ou noturnos (Medrano *et al.*, 2010).

Os materiais de armazenamento de energia térmica são classificados de forma ampla como materiais de armazenamento de calor sensível, latente e termoquímico. Os materiais de armazenamento de calor sensível são capazes de armazenar e liberar grandes quantidades de energia térmica durante mudanças de temperatura, o que os torna úteis em diversas aplicações, como sistemas de aquecimento e resfriamento, aquecimento solar de água e em sistemas de destilação de água (Wu *et al.*, 2019).

A categorização principal dos materiais de armazenamento de calor sensível inclui o estado sólido e o estado líquido, sendo posteriormente subdividida em armazenamento de energia natural e de armazenamento de energia manufaturados (Gil *et al.*, 2010). Conforme mostra na Figura 34 a classificação.

Figura 34: Classificação de materiais de armazenamento de calor sensível



Fonte: Adaptado de Khatod; Katekar; Deshmukh, 2022.

Os materiais de armazenamento de calor sensível (ou) específico trazem consistentemente um aumento (ou) diminuição na temperatura do material. Os materiais específico de estado sólido são usados em muitas aplicações de armazenamento de

energia devido à sua consistência, baixo custo de investimento, fácil execução e adequação em diferentes aplicações práticas (Murugavel; Srithar, 2011).

Chandel e Agarwal (2017) relataram que o calor sensível de estado sólido é uma opção melhor para armazenar energia térmica para aplicações de aquecimento (ou) resfriamento devido à maior capacidade de calor dos materiais sólidos. Os materiais naturais usados no calor sensível podem armazenar energia térmica sem alterar sua fase.

Existem alguns materiais de armazenamento de energia térmica, como areia, seixo, granito e rocha, cascalho de brita, que são baratos e facilmente encontrados na natureza, e classificados como materiais de armazenamento de energia natural, têm sido utilizados para diferentes aplicações solar através da introdução de várias técnicas de armazenamento de energia (Mugi et al, 2022).

4.2.2 Propriedades termofísicas dos materiais fototérmicos

As propriedades termofísicas desempenham um papel fundamental na determinação das características de armazenamento de energia e no desempenho do gerenciamento térmico dos materiais fototérmicos (Luo *et al.*, 2023).

O conhecimento das propriedades termofísicas dos materiais é indispensável para definir sua melhor aplicação. No que se refere aos materiais para absorção de calor em destiladores, um conhecimento aprofundado das suas propriedades termofísicas é de fundamental importância para a realização de estudos sobre o desempenho termo energético dos destiladores.

Inicialmente foi realizado uma pesquisa com base nas propriedades termofísicas dos materiais fototérmicos para a escolha do melhor material, para ser inserido nos destiladores, entre elas, densidade, condutividade térmica, calor específico, difusividade térmica e capacidade calorífica volumétrica.

A pesquisa concentrou-se no uso dos materiais com armazenamento de calor sensível inseridos nos destiladores solares, o armazenamento de calor sensível é a tecnologia mais desenvolvida e há um grande número de materiais disponíveis e de baixo custo (Tian; Zhao, 2013; Gil et al., 2010). Sendo selecionados para estudo (brita, granito, bolas de gude e telha) conforme representa na Tabela 3, as propriedades termofísicas importantes dos materiais fototérmicos.

Tabela 3: Materiais de armazenamento de calor sensível

Materiais de armazenamento	Densidade (kg.m⁻³)	Condutividade térmica (W.m⁻¹.K⁻¹)	Calor específico (kJ.kg⁻¹.K⁻¹)	Difusidade térmica (m².s⁻¹)	Capacidade calorífica volumétrica (kJ.m⁻³.K⁻¹)
Brita	2400	1,8	1,0	0,75 x 10 ⁻⁶	2400
Vidro	2710	0,7 – 0,9	0,8	0,30 x 10 ⁻⁶	2168
Granito	2640	1,7 – 4,0	0,82	0,78 x 10 ⁻⁶ – 1,84 x 10 ⁻⁶	2164
Telha	1400 - 1900	0,9 – 1,2	0,8	0,25 x 10 ⁻⁶	1120

Fonte: Adaptado de Tian; Zhao, 2013; Rosa *et al.*, 2021; Khatod; Katekar; Deshmukh, 2022; Márquez; Bohórquez; Melgar, 2016; Mugi; Balijepalli; Chandramohan, 2022.

Esses materiais de armazenamento de energia natural selecionados da tabela 3, conforme estudo em aplicações térmicas, possuem boa confiabilidade térmica (sem variação nas características térmicas) e estabilidade química (sem alteração na composição química e sem deterioração) mesmo após vários testes térmicos realizados para estudo (Dincer, 2002). Conforme Dincer e Rosen (2021) esses materiais têm excelente estabilidade térmica devido à ausência de perda de peso ou degradação durante temperaturas mais altas (> 100 °C), possuindo vida longa, esses materiais naturais (rocha, solo, brita, granito, argila) são capazes de armazenar energia térmica de até 108 MJ por m³ vol para aplicações de aquecimento e resfriamento.

De acordo com Rosa et al (2021) o armazenamento de calor sensível é o processo de armazenamento de energia que aumenta a temperatura de um meio com alta capacidade térmica. Os materiais de armazenamento de energia natural no estado sólido englobam rochas, areia, cascalho, argila, concreto, tijolos e outros, têm sido empregados em aplicações de baixa e alta temperatura devido à sua característica de não congelar ou ferver. Em concordância relataram que esses materiais não enfrentam problemas como alta pressão de vapor de água ou desvantagens de outros líquidos.

Chauhan et al. (2021) evidenciaram que os materiais de armazenamento de energia melhoram a capacidade de transporte de calor ao meio-dia, o que ajuda a aumentar a produtividade no final da tarde. O granito é uma alternativa de grande importância para serem utilizados em destiladores para armazenar calor e que constataram o aumento de rendimento em até 10% em relação ao destilador solar convencional nos experimentos realizados.

Em conformidade com Ahmad e Prakash (2020) avaliaram a influencia de vários materiais de armazenamento de calor, e constatou que os materiais pintados de preto é fortemente recomendado para armazenamento máximo de calor.

As propriedades das telhas de cerâmica vermelha dependem da matéria prima usada e do processo de fabricação, elas são feitas de argilas comuns. Ao contrário das rochas naturais, essas telhas geralmente têm afinidade maior com a água, o que aumenta sua absorção (Gnanaraj;Velmurugan, 2022).

Elashmawy (2020) descreve sobre como a adição de cascalho de brita como material de armazenamento de calor contribui no desempenho de um destilador solar. Os resultados mostraram que o uso do cascalho de brita tem um grande potencial para melhorar a eficiência do sistema.

5 ANÁLISE DE CUSTOS

A fim de fazer uma avaliação da relação custo-benefício das plantas propostas dos destiladores solar passivos, foi realizada uma análise de custos simples. A análise do custo por litro de água produzida desempenha um papel importante para a avaliação da economia de um destilador solar (Nazari; Safarzadeh; Bahiraei, 2019). Assim, o custo da produção de água por litro (*CPL*) é dado pela Equação (5):

$$CPL = \frac{CAT}{M} \quad (5)$$

Onde, *CAT* é o custo anual total de água e *M* é a média anual de água produzida.

O custo anual total do destilador solar é calculado considerando os custos fixos através da Equação (6).

$$CAT = PCA + CMA - VRA \quad (6)$$

O primeiro custo anual (*PCA*) de operação do destilador solar é dado pela Equação (7) (Rahbar; Gharaiian; Rashid, 2017).

$$PCA = P * FRC \quad (7)$$

Onde, *P* é o custo de capital do destilador solar e *FRC* é o fator de recuperação de capital, calculado a partir da Equação (8) (Rahbar; Gharaiian; Rashid, 2017).

$$FRC = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (8)$$

Onde, *i* representa a taxa de juros anual bancária, que é de 10% no Brasil, e *n* indica o tempo de vida útil do destilador solar, que é assumido como 10 anos nesta pesquisa.

O custo médio anual (*CMA*) de operação e manutenção, que inclui os gastos com limpeza da bandeja e da cobertura de vidro, como também de tudo que for relacionado à conservação do equipamento, é equivalente a 10% do custo inicial e é obtido a partir da Equação (9) (Shoeibi *et al.*, 2021):

$$CMA = 0,10 * PCA \quad (9)$$

O valor residual anual (*VRA*) em energia solar é calculado a partir da Equação (10) (Saini *et al.*, 2019):

$$VRA = S * SSF \quad (10)$$

Onde, S demonstra o valor residual da energia solar do destilador solar e é geralmente considerado igual a 20% do custo de capital ($S = 0,2P$). O valor residual está relacionado à depreciação de peças do equipamento e a capacidade de implantação no futuro. Em geral, nesse valor de 20% todas as depreciações são levadas em consideração (Nazari; Safarzadeh; Bahiraei, 2019). Já o FFA é o fator de fundo de amortização, calculado pela Equação (11):

$$FFA = \frac{i}{(1+i)^n - 1} \quad (11)$$

O custo dos sistemas com materiais absorvedores de calor é um dos principais fatores que determinam se os sistemas de armazenamento podem ou não ser utilizados em aplicações de destilação de água ou até mesmo em aplicações industriais. Os sistemas de armazenamento de calor sensível (natural) são definidos como uma forma barata de armazenar energia térmica (Chen et al., 2019).

Conforme os materiais frequentemente utilizados são água, seixos, pedras, concreto, granito, brita, vidro e areia, etc. são preferidos pelo fato de ser baixo custo e por possuir um bom armazenamento térmico (Chandel; Agarwal, 2017).

Bansal et al (2020) observaram variações no desempenho de destiladores solares quando diferentes materiais absorventes são utilizados, tais como cascalho preto, cimento, esponja, seixos, brita, sal. A Tabela 4 consiste na comparação dos modelos de destiladores, tipo de material e custo da produção de água doce que transmite o avanço no uso dos materiais de armazenamento de calor utilizados na destilação de água.

Tabela 4: Modelos de destiladores, tipo de material e custo da produção de água doce.

Destiladores	Referência	Material de armazenamento de calor	Produtividade (kg.m ⁻²)	Custo (R\$.kg ⁻¹)
Convencional de inclinação única	Bilal <i>et al.</i> , 2019	10kg de Pedras-Pomes	2,60	0,004
Convencional de inclinação única	Dhivagar <i>et al.</i> , 2023.	Conchas (Biomaterial)	0,47	0,0018
Convencional com (camada adesiva)	Sellami <i>et al.</i> , 2016.	Cimento Portland	6,00	0,0063
Convencional	Kabeel; Abdelaziz; El-Said, 2019.	Cascalho preto	3.27	0,0061

Destiladores	Referência	Material de armazenamento de calor	Produtividade (kg.m⁻²)	Custo (R\$.kg⁻¹)
Convencional de inclinação única	Samuel <i>et al.</i> , 2016.	Sal encapsulado	3.70	0,045
Convencional de inclinação única	Samuel <i>et al.</i> , 2016.	Esponja Quadrada	2.60	0,063
Convencional	Velmurugan <i>et al.</i> , 2008.	Esponja	2.26	0,13
Escalonado aumentado com barbatanas	Velmurugan <i>et al.</i> , 2008.	Esponja e seixos	1,65	0,18

Fonte: Adaptado de Chauhan; Shukla e Rathore, 2022; Dhivagar *et al.*, 2023.

Os materiais de armazenamento de calor sensível estão prontamente disponíveis no ambiente, bastando selecioná-los cuidadosamente para que possam aprimorar tecnicamente o processo de dessalinização solar (Chauhan; Shukla e Rathore, 2022).

6 MATERIAIS E MÉTODOS

6.1 LOCAL DA PESQUISA

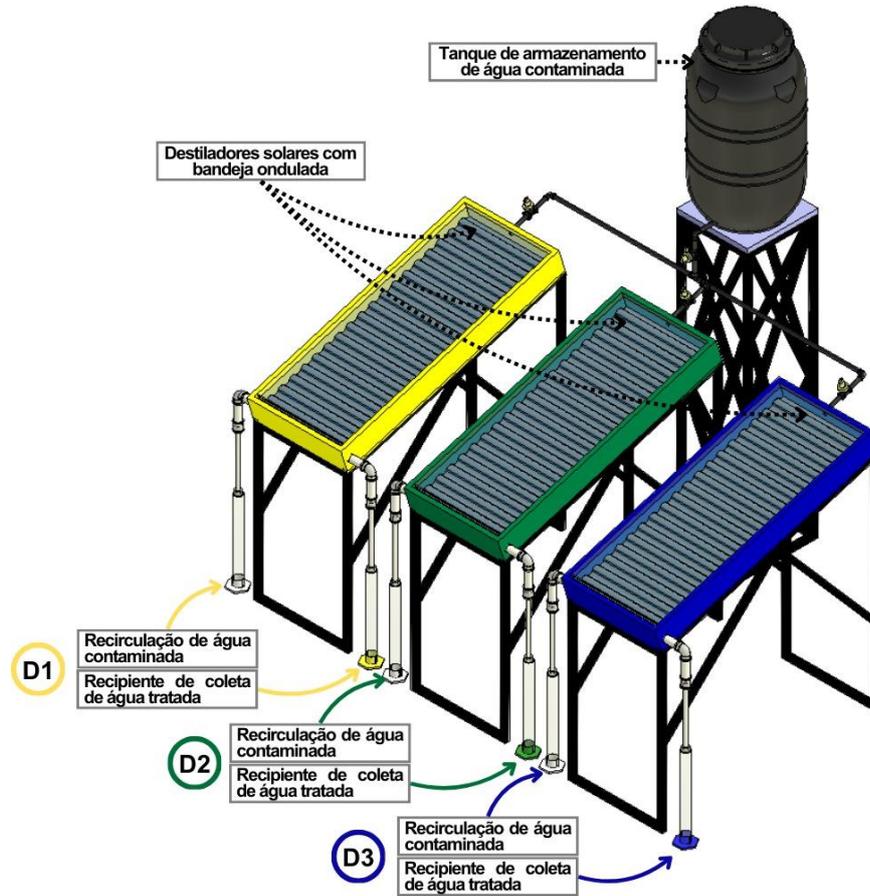
A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Pesquisa em Ciências Ambientais - LAPECA, do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - DESA do Centro de Ciências e Tecnologia - CCT da Universidade Estadual da Paraíba - UEPB, na cidade de Campina Grande - Paraíba, a uma latitude $7^{\circ}13'11''$ sul e longitude $35^{\circ}52'31''$ oeste, com altitude média de 550 metros, onde as etapas seguintes foram adotadas como metodologia de trabalho.

6.2 DESTILADOR SOLAR COM PLACA ABSORVEDORA DE CALOR DO TIPO ONDULAR

O sistema de destilação via energia solar com placa absorvedora de calor do tipo ondular foi construído de acordo com Cardoso *et al.* (2022) o mesmo é apresentado na Figura 35. O destilador possui comprimento de 1,45 m, largura de 0,55 m e 0,15 m de espessura, possuindo uma área de $0,78 \text{ m}^2$ de exposição solar. O mesmo foi operado com uma inclinação de 17° orientado para o norte, fato que maximiza a absorção de calor, como Bouzaid *et al.* (2019), que utilizaram a inclinação da placa de absorção igual a latitude do local, acrescentado de 10° para ajustes de erros e evitar o acúmulo de sujeiras. De acordo com Azooz e Younis (2016) o ângulo de inclinação do vidro é um fator importante na operação do destilador solar, tanto do ponto de vista teórico quanto de construção. Teoricamente, o ângulo de inclinação ideal está relacionado à tensão superficial das gotas de água, à força de adesão entre a água e o vidro e às correntes de convecção no interior do destilador. Para a construção, ângulos de inclinação maiores estão associados a custos mais elevados devido aos materiais de construção adicionais utilizados, o que não acontece para o destilador do nosso estudo, pois independente da inclinação do destilador o tamanho do vidro é o mesmo da placa de fibrocimento e a inclinação de 17° não mostrou nenhum tipo de gotejamento, por isso esse ângulo foi escolhido para a realização desse presente estudo.

A configuração experimental consiste principalmente em quatro partes, o tanque repositivo de água contaminada, os tanques de água tratada e de água de recirculação e o destilador solar com placa absorvedora de calor do tipo ondular.

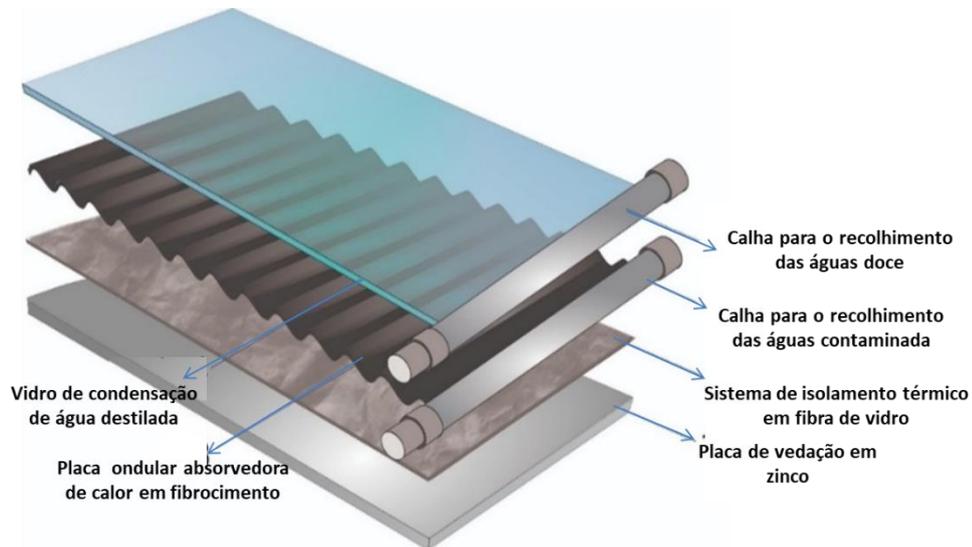
Figura 35: Destilador solar com placa absorvedora de calor no formato ondular.



Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Os componentes internos do destilador solar são apresentados e descritos na Figura 36, sendo composto por seis partes. Na confecção do protótipo do destilador solar, foi priorizada a utilização de materiais de baixo custo, de fácil aquisição no comércio local, de boa resistência e durabilidade, que fossem adequados à sua construção e à proposta do estudo.

Figura 36: Componentes internos do destilador solar.



Fonte: Sarmento *et al.*, 2024.

A placa ondulada absorvedora de calor possui dimensões de 1,40 m de comprimento e 0,50 m de largura, o formato ondulado favorece o tempo de permanência da água contaminada nos destiladores, a mesma foi pintada em preto fosco para aumentar a absorção da radiação, é necessário destacar a altura da ondulação com 51 mm e o passo (distância entre uma ondulação e outra) com valor de 177 mm. A cobertura de vidro tem 3 mm de espessura e a distância entre o vidro e a placa absorvedora de calor é de 4 cm, necessária para provocar o efeito estufa e possibilitar o processo de evaporação-condensação, a parte inferior da placa absorvedora é isolada com fibra de vidro para diminuir as perdas de calor para o ambiente. A Figura 37 apresenta o destilador solar com a placa absorvedora de calor do tipo ondulado.

Figura 37: Destilador com placa ondular absorvedora de calor.

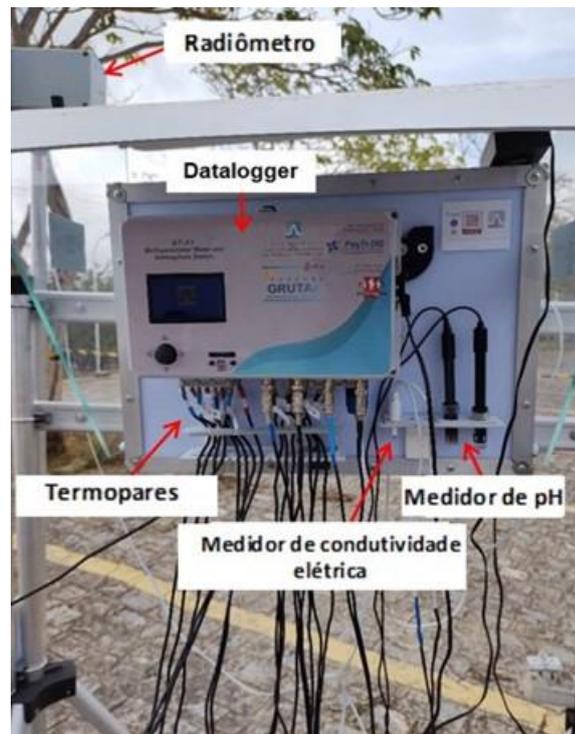


Fonte: Elaborada pela autora, 2021.

6.3 SISTEMA DE MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS

O sistema de destilação foi monitorado instantaneamente no intervalo de 07 às 17 horas sempre que esteve em operação, posicionados em uma área estratégica sem sombreamento. Para a medição dos dados meteorológicos (radiação solar e temperatura ambiente), e de temperatura em diferentes pontos do sistema de destilação, que inclui a temperatura da água no início, meio e final da placa absorvedora de calor, e a temperatura externa do vidro e físico-químicos (condutividade elétrica, pH e STD) foi usado 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 38), o qual foi desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Tratamento Avançados de Águas (GRUTAA) em parceria com a Stand-up ALCALITECH-Fabricação de Aparelhos e Equipamentos de Medida e Controle Ltda (Ramos *et al.*, 2021). (Por fim, foi realizado um estudo técnico-econômico do processo de destilação no equipamento proposto).

Figura 38: Sistema Integrado de medição de parâmetros operacionais.



Fonte: Sarmento *et al.*, 2024.

A radiação solar foi medida na faixa entre (1,0 a 1300,0 W.m⁻²) com precisão de $\pm 1,0$ W.m⁻². As temperaturas em diferentes pontos do sistema foram medidas usando termopares do tipo K com faixa (-50 a 300 °C) e precisão de $\pm 1,0$ °C. A água produzida foi medida usando um recipiente de laboratório graduado (0 a 1000 mL) com precisão de $\pm 10,0$ mL. A incerteza e os erros ocorridos nos instrumentos de medição são mostrados na Tabela 5. Os erros foram calculados para termopares, medidor solar e vaso coletor. O erro mínimo que ocorreu em qualquer instrumento foi igual à razão entre sua contagem mínima e valor mínimo da saída medida. A análise de incerteza de cada instrumento foi calculada conforme a Equação (12) Dumka; Mishra, 2020):

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

Onde, I corresponde à incerteza do aparelho e P é a precisão padrão do aparelho.

Os erros associados aos aparelhos de medição experimental, como radiômetro, termopar e os frascos de medição, foram calculados de acordo com a Equação (13) como segue.

$$Erro = \frac{\text{Precisão do instrumento}}{\text{Valor mínimo medido na saída}} \times 100 \quad (13)$$

Tabela 5: Precisões e erros para os instrumentos de medição

Instrumento	Faixa	Precisão	Incerteza	% Erro
Radiômetro	1 a 1300 W.m ⁻²	± 10 W.m ⁻²	5,77	5,0
Termopar digital	-50 a 300 °C	± 1,0 °C	0,58	0,25
Proveta graduada	0 a 1000 mL	± 10 mL	5,77	5,0

Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

6.4 PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS E BACTERIOLÓGICOS DA ÁGUA

Os parâmetros físico-químicos das águas contaminadas e tratadas, tais como Cor aparente, Cloreto, Dureza total, Turbidez, Sódio, Sólidos totais dissolvidos, serão avaliados de acordo com o que está indicado no Anexo 11 da Tabela de Padrão Organoléptico de Potabilidade contidos na Portaria GM/MS nº 888/2021 do Ministério da Saúde. Além disso, serão avaliados Temperatura, pH, Condutividade elétrica, Alcalinidade, Salinidade e Potássio. Seguindo as especificações descritas no *Standard Methods for Examination of Water and Waste water* (Baird; Eaton; Rice, 2017).

Os parâmetros de contaminação das águas estudadas antes e depois do processo de destilação, que foram analisados para comprovar a eficiência do tratamento bacteriológico, estão indicados no Anexo 1 da Tabela de Padrão Bacteriológico da Água para consumo humano inerente na Tabela de bactérias esporogênicas de Coliformes Termotolerantes (*Escherichia coli* e coliformes totais) da água para consumo humano, contida na Portaria GM/MS nº 888/2021 do Ministério da Saúde

6.5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

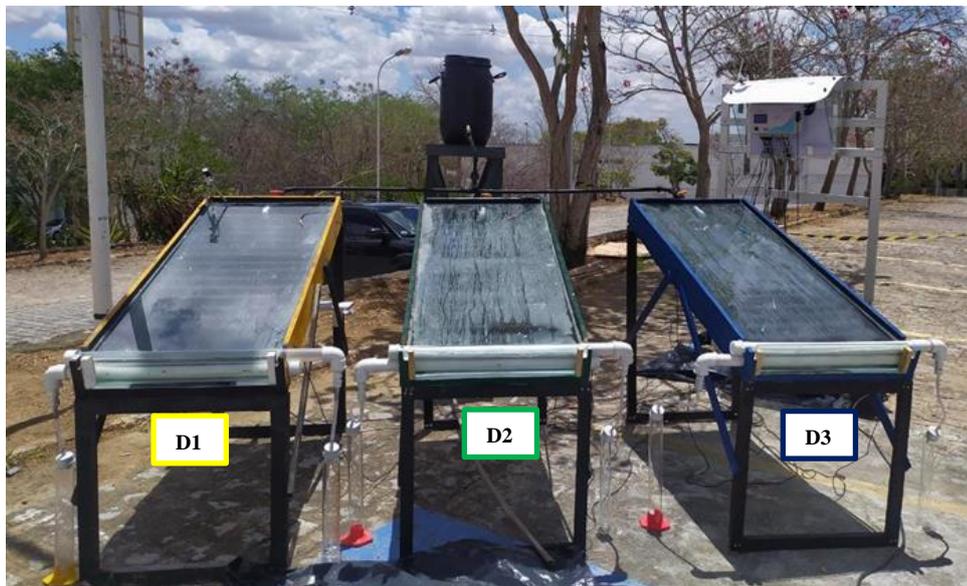
O sistema de destilação via energia solar com placa absorvedora de calor do tipo ondular foi projetado para operar com três destiladores simultaneamente. Sendo feito o monitoramento instantaneamente no intervalo de 07 às 17 horas sempre que estiveram em operação, foram acompanhados a radiação solar, temperatura ambiente e a temperatura em diferentes pontos do sistema de destilação, que inclui a temperatura da água no início, meio e final da placa absorvedora de calor, e a temperatura externa do vidro e físico-químicos (condutividade elétrica, pH e STD). Inicialmente foram feitos os testes de produtividade dos três destiladores (denominados D1, D2 e D3). Posteriormente foram feitos os ensaios de absorção de calor dos materiais fototérmicos, logo depois os testes de produção com a introdução dos materiais, sendo o primeiro destilador operado sem os materiais absorvedores de calor (denominado D1), o segundo e o terceiro destilador foi acrescido com materiais fototérmicos sobre a bandeja

(denominados D2 e D3), com a caracterização físico-química e microbiológica da qualidade da água. os mesmos foram realizados ao longo dos anos de 2022, 2023 e 2024.

6.5.1 Experimentos iniciais de Produtividade dos destiladores

Os destiladores (D1, D2 e D3) mostrado na Figura 39 foram alimentados com água coletada do açude de Bodocongó na cidade de Campina Grande - Paraíba, sendo monitorados de forma simultânea, para se obter o resultado de qual destilador conseguiu maior produtividade e maior desempenho térmico, onde foi determinada a melhor vazão de escoamento de 2300 mL.min⁻¹ a qual proporcionou um bom tempo de permanência da água com a placa ondular absorvedora de calor. O sistema foi operado em recirculação contínua em um tanque de cor preta, a água na alimentação percorreu a placa absorvedora que foi aquecida pela energia solar. Ao absorver o calor a água evaporou e condensou no lado interno do vidro, em virtude da temperatura do vidro ser inferior a temperatura do vapor de água. Em seguida, a água condensada foi coletada por uma calha, e contabilizada por uma proveta graduada.

Figura 39: Destiladores com placa ondular absorvedora de calor, amarelo (D1), verde (D2) e azul (D3).

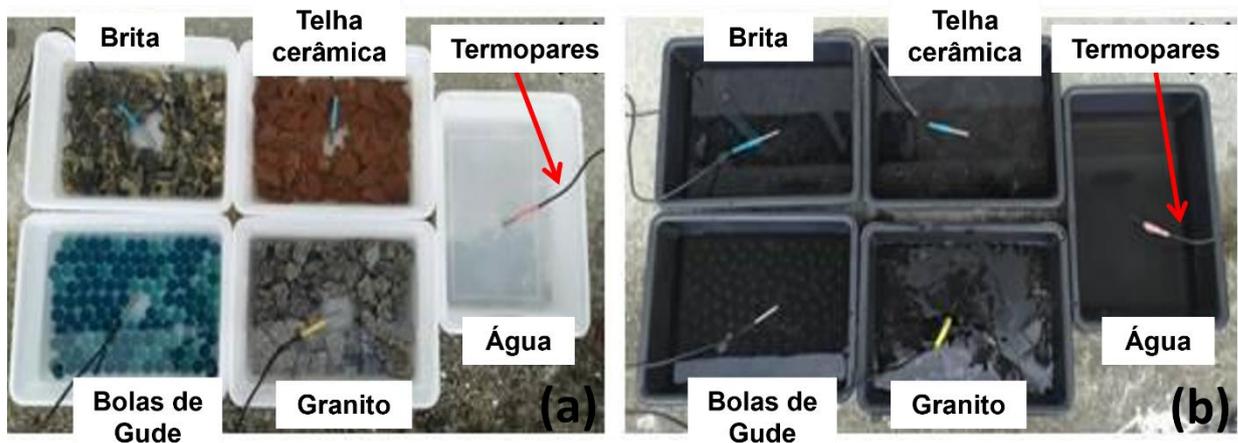


Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

6.5.2 Ensaios de absorção de calor dos materiais fototérmicos

Foram realizados ensaios para absorção de calor para saber qual teria maior desempenho térmico acontecendo dois tipos de ensaios: no primeiro os materiais fototérmicos e as bandejas estavam sem pintura conforme mostrado na Figura 40a e no segundo ensaio, os materiais fototérmicos e as superfícies das bandejas foram depositadas uma camada de tinta preta fosca absorvedora de calor visto na Figura 40b, os ensaios foram realizados em dias distintos. Foi priorizada a utilização de materiais fototérmicos de baixo custo para a realização do experimento de absorção de calor e selecionados os materiais absorvedores de calor com melhor desempenho, entre eles: Brita, Bolas de Gude, Granito e Telha cerâmica. Os materiais foram depositados em bandejas de polipropileno com dimensões 30 x 22 x 7.5 cm e adicionado 1000 mL de água em cada bandeja, essa quantidade foi ideal para cobrir os materiais, juntamente com eles uma bandeja com água com as mesmas dimensões para termos comparativos. Ao qual foram medidos a intensidade de radiação e a temperatura da água a cada 15 minutos, iniciando às 9:00h e finalizando às 14:00h.

Figura 40: Ensaios com materiais fototérmicos (a) sem pintura (b) com pintura



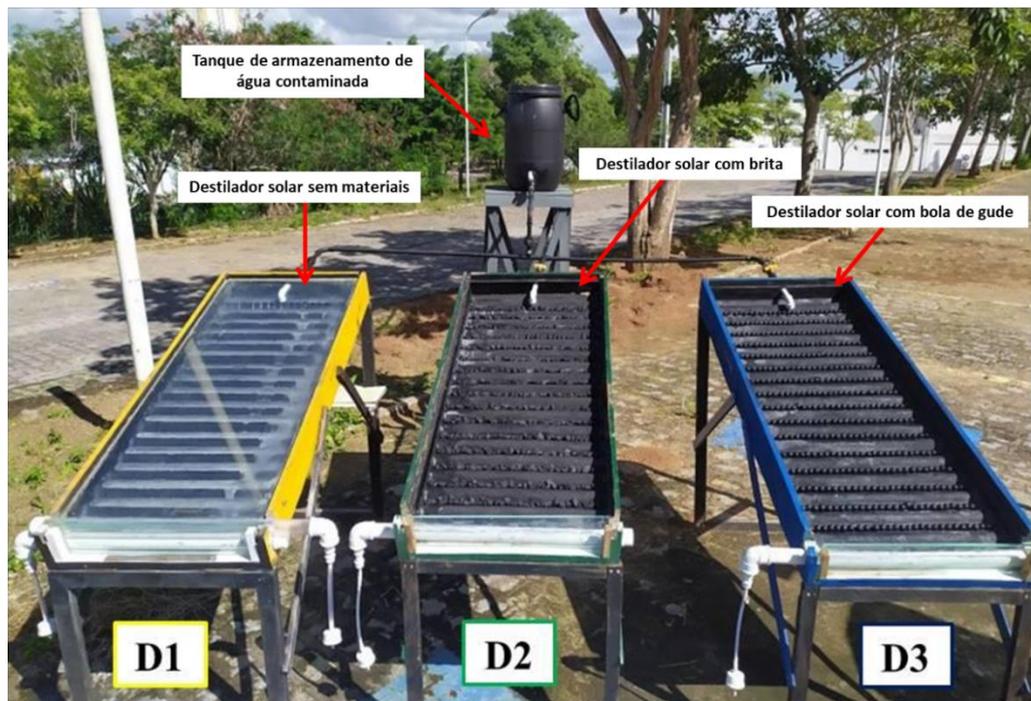
Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

6.5.3 Experimentos com a introdução dos materiais fototérmicos

Os destiladores menos produtivos, no caso (D2 e D3) foram abertos e inseridos os materiais fototérmicos que tiveram o maior desempenho no teste de absorção de calor (britas e bolas de gude) enquanto o destilador mais produtivo (D1) permaneceu sem a colocação do material fototérmico, este foi utilizado como destilador de referência, os mesmos foram

operados simultaneamente com a mesma vazão de escoamento da água e com recirculação contínua, para se obter o resultado de qual destilador conseguiu maior produtividade e maior desempenho térmico, conforme Figura 41.

Figura 41: Destiladores: sem material fototérmico (D1) com materiais fototérmicos (D2) e (D3)



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

6.6 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E BACTERIOLÓGICAS DAS ÁGUAS

6.6.1 Ensaios físico-químico das águas

A eficiência do sistema do destilador está relacionada à qualidade da água destilada, tendo como uma das finalidades dos destiladores solar. Dessa forma, tanto a água contaminada como a destilada foram submetidas a testes para verificar alguns parâmetros físicos químicos que são importantes segundo a legislação de potabilidade da água citada nesse estudo.

6.6.2 Ensaios bacteriológicos das águas

Com os materiais fototérmicos inseridos nos destiladores e realizados os experimentos, em seguida foram analisados antes e após o processo de destilação os parâmetros de contaminação das águas para comprovar a eficiência do tratamento bacteriológico após o

processo de destilação, que estão indicados no Anexo 1 da Tabela de Padrão Bacteriológico da Água para consumo humano inerente na Tabela de bactérias esporogênicas de Coliformes totais e Coliformes Termotolerantes (*Escherichia coli*), de acordo com a Portaria GM/MS nº 888/2021 do Ministério da Saúde. Os processos de descontaminação têm como objetivo a destruição ou inativação de microrganismos patogênicos capazes de provocar doenças ou de outros organismos indesejáveis.

Foram efetuados ensaios de presença e ausência (P/A) e quantitativos. As ferramentas utilizadas para a realização dos testes (vidrarias com e sem água de diluição e ponteiras, frascos estéreis, cartelas e COLILERT) foram devidamente limpas e autoclavadas. Ao longo da realização dos ensaios (P/A e quantitativo) o ambiente de experimentos foi mantido esterilizado com o uso do bico de bunsen.

6.6.2.1 Teste de Presença - Ausência (P/A)

O teste de Presença - Ausência (P/A) permite avaliar de forma qualitativa a presença ou ausência de diversas bactérias indicadoras em um volume de 100 mL de amostra, utilizando-se um frasco estéril com meio de cultura específico, nestes ensaios utilizou-se para identificar a presença ou ausência (P/A) de microrganismos o kit teste da marca Colilert, que se baseia na tecnologia de substrato enzimático, incubando a $35 \pm 0,5$ °C por 24h e depois aferiu-se a mudança de cor e existência de fluorescência. Realizado de acordo com Ceballos; Diniz, 2017.

Quando o coliforme total metaboliza o indicador ONPG ocorre a coloração da amostra para a cor amarela turva. *Escherichia coli* metaboliza o indicador MUG, tornando a amostra fluorescente (Idexx, 2024).

6.6.2.2 Técnica em cartelas (qualitativos e quantitativo - NMP)

Para realizar o teste qualitativo e quantitativo, usa-se cartelas específicas também da COLILERT com depressões ou cavidades denominadas células, seguindo a metodologia dos autores (Ceballos; Diniz, 2017; Idexx, 2024; Gibson; Maritim; Marion, 2021). A cartela foi selada e incubada na estufa bacteriológica. Para realizar a leitura dos resultados na cartela após a incubação da cartela por 24 horas, conta-se as cavidades amarelas = Coliformes Totais e Amarelos/Azul fluorescente = *Escherichia coli*.

6.6.2.3 Técnica da Membrana filtrante

A técnica da membrana filtrante é um processo de separação de sólido particulado de um fluido, no caso um líquido, por meio de um material poroso (a membrana), conforme mostra na Figura 46, onde a membrana retém os microrganismos, de tamanhos iguais ou inferiores a $1\mu\text{m}$. As bactérias crescem nos poros que ficarão retidas na parte superior da membrana, quando colocada numa placa de Petri com um meio de cultura que se difunde através da membrana (Colilert, 2002; Ceballos; Diniz, 2017).

Inicialmente é realizado o meio de cultura sólido ágar nutriente, para ser colocado nas placas de petri autoclavadas, e realização de diluições da amostra bruta, e posteriormente filtradas na membrana. As placas são incubadas a $35\pm 1^\circ\text{C}$ durante 24 horas na estufa e realizadas a quantificação, com identificação das membranas com colônias de coliformes totais (amarelas) e coliformes termotolerantes (colônias azuis), caso apresentem na amostra bruta e destilada, baseada na contagem de colônias utilizando a unidade UFC (Unidades Formadoras de Colônias).

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos estão divididos em: testes térmicos, produção dos destiladores e o monitoramento físico-químico e microbiológico da qualidade da água.

7.1 TESTES TÉRMICOS DOS DESTILADORES SEM MATERIAIS FOTOTÉRMICOS

Foram realizados e destacados os experimentos iniciais sem materiais fototérmicos. A Figura 42 representa as variações de temperatura da água na placa absorvedora, temperatura do vidro externo e a temperatura ambiente em função da taxa de radiação solar incidente nos destiladores (D1, D2 e D3). Percebe-se que teve variações na incidência da taxa de radiação em alguns momentos, e apresentou aumento gradativo dos perfis de temperatura até às 12h30min. Neste ensaio, a taxa de radiação teve variações, destacando-se a maior incidência no horário das 11h00min às 12h30min atingindo 1095 W.m^{-2} .

No destilador D1 a temperatura da água na placa absorvedora sofre variações nos três perfis de temperaturas. Inicia às 07h00min com a temperatura ambiente de $24,4 \text{ }^\circ\text{C}$ e a Temperatura da água da placa $31,8 \text{ }^\circ\text{C}$ e atingem maior temperatura às 12h30min, alcançando a temperatura da água de $70,75 \text{ }^\circ\text{C}$ e apresentou a maior taxa de radiação de 1095 W.m^{-2} minutos antes de atingir este valor.

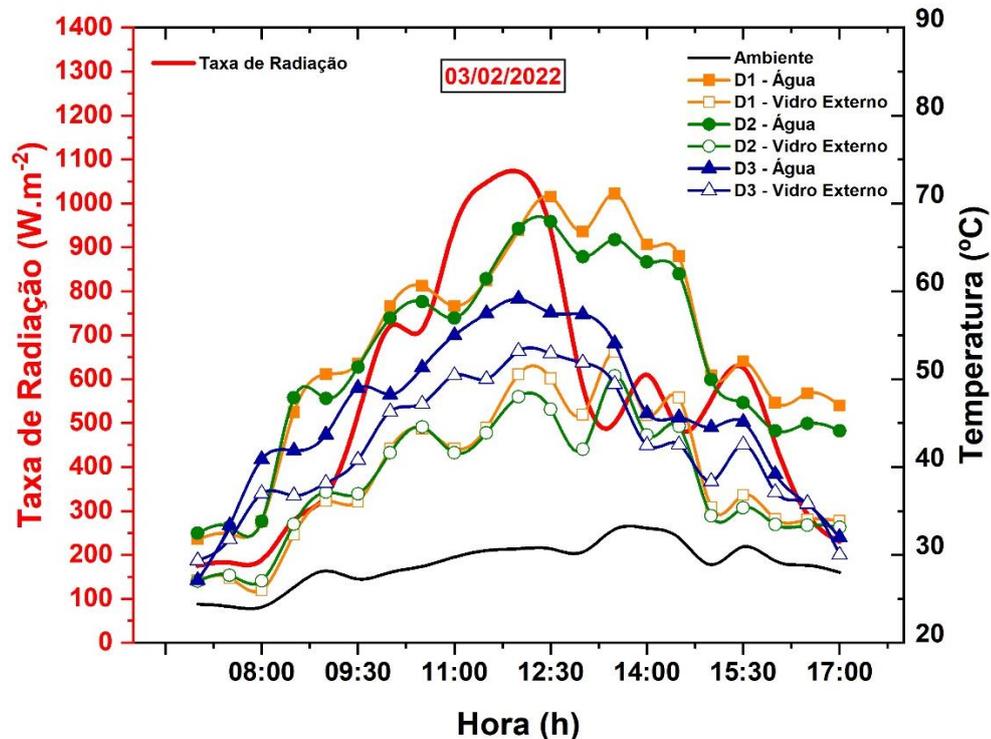
Destacou-se que os valores da temperatura do vidro mantiveram-se inferiores da temperatura da água, e isso de fato ocorre devido o vidro permanecer com uma temperatura inferior ao do vapor d'água, fazendo desta forma a condensação. De acordo com Murugavela; Chockalingama e Sritharb (2009) analisaram diferentes temperaturas da água e do vidro nos seus experimentos, eles concluíram o fato da temperatura do vidro do dessalinizador ser inferior as outras temperaturas faz com que a taxa de produção seja maior.

No destilador D2 representado pela cor verde, as temperaturas dos perfis do começo do dia permaneceram estáveis, observa-se que os pontos de temperatura também variaram. A Temperatura da água no horário de 12h00min atingiu $68,5 \text{ }^\circ\text{C}$ e a temperatura do vidro externo $46,56 \text{ }^\circ\text{C}$.

No destilador D3, representado pelas curvas na cor azul mostra que neste dia de experimento a temperatura da água da placa absorvedora sofre variações, iniciou às 07h00 min com a temperatura ambiente de $24 \text{ }^\circ\text{C}$, a Temperatura da água de $30 \text{ }^\circ\text{C}$, conseguindo posteriormente atingir próximo a 12h30min o ponto de Temperatura da água da placa de $66,87 \text{ }^\circ\text{C}$, nota-se no período da tarde depois das 13h00min apresentando menor incidência de radiação, diminuindo os pontos de temperatura em todos os perfis. Neste dia de experimento,

apresentou os perfis de temperatura do D1 mostrou-se que estavam mais elevados do que nos outros destiladores, com a variação da velocidade do vento de 1 a 2,8 m/s nos destiladores.

Figura 42: Perfis de Temperaturas dos experimentos iniciais (03/02/2022).



Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

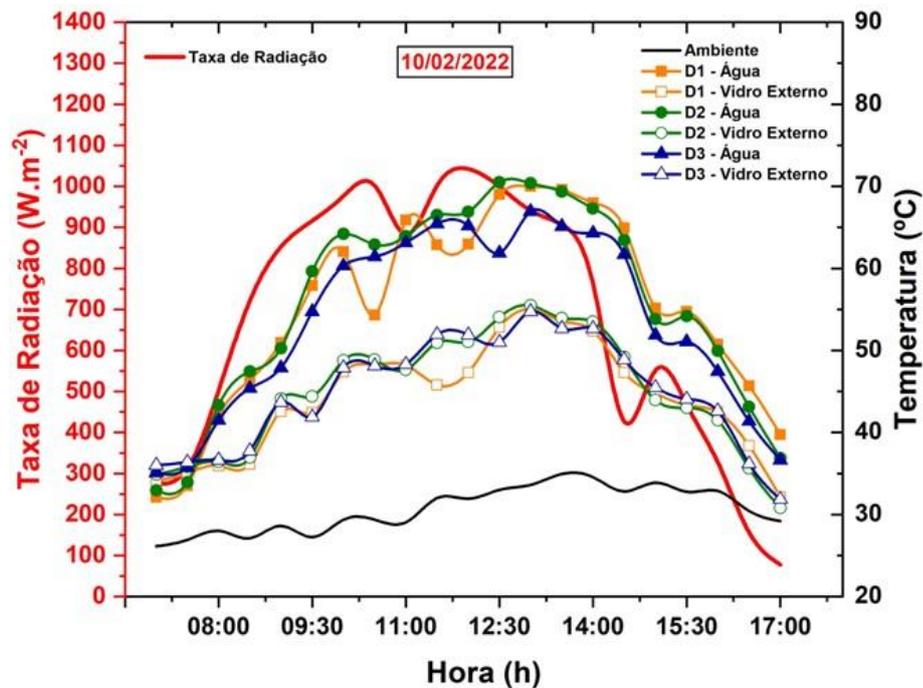
Na Figura 43 observa-se que a velocidade do vento registrou de 0,5 a 3,9 m/s. Os valores de temperatura do vidro externo também se mantiveram inferior às demais temperaturas dos destiladores. Ao longo do experimento, a temperatura da água na placa absorvedora também apresentou variação e atingiram maior temperatura às 13h00min, alcançando 70 °C, e destacando também a maior incidência de radiação solar durante o experimento deste dia foi de 1060 W.m⁻², desta forma apresentando maior aquecimento da água para evaporação. Tiware e Rathore (2022) concluiu que a temperatura máxima da água em destilador solar cascata de 58 °C às 14h00min e a radiação solar era de 855 W.m⁻². Neste ensaio mostra maior temperatura atingindo 70 °C, desta forma tendo maior eficiência do que a pesquisa desses autores.

No destilador (D2) o perfil de temperatura da água na placa absorvedora de calar conseguiu atingir 70,5°C, em seguida a taxa de radiação começou a diminuir para ambos destiladores, conseqüentemente os valores das temperaturas, aconteceu a partir do horário das 13h30min com a taxa de radiação de 900 W.m⁻², devido ao sombreamento neste período da tarde.

No destilador (D3) analisando os resultados, a taxa de radiação iniciou com 275 W.m^{-2} as 07h00min registrando para os três destiladores com os valores de temperatura: com a temperatura ambiente de $26,14 \text{ }^\circ\text{C}$, a Temperatura da água $35,1 \text{ }^\circ\text{C}$, posteriormente atingiu próximo às 12h30min com 1030 W.m^{-2} , o perfil de Temperatura da água $61,88 \text{ }^\circ\text{C}$ e a do vidro apresentando 51°C aconteceu sempre inferior dos outros perfis de temperatura.

Neste experimento, a temperatura da água na placa absorvedora de calor no horário das 13h00min manteve-se a mesma temperatura para ambos destiladores, conforme os valores obtidos, demonstrou maior incidência de radiação, contribuindo para se ter aumento das temperaturas, conseqüentemente um maior aquecimento da água.

Figura 43: Perfis de Temperatura dos experimentos iniciais (10/02/2022).



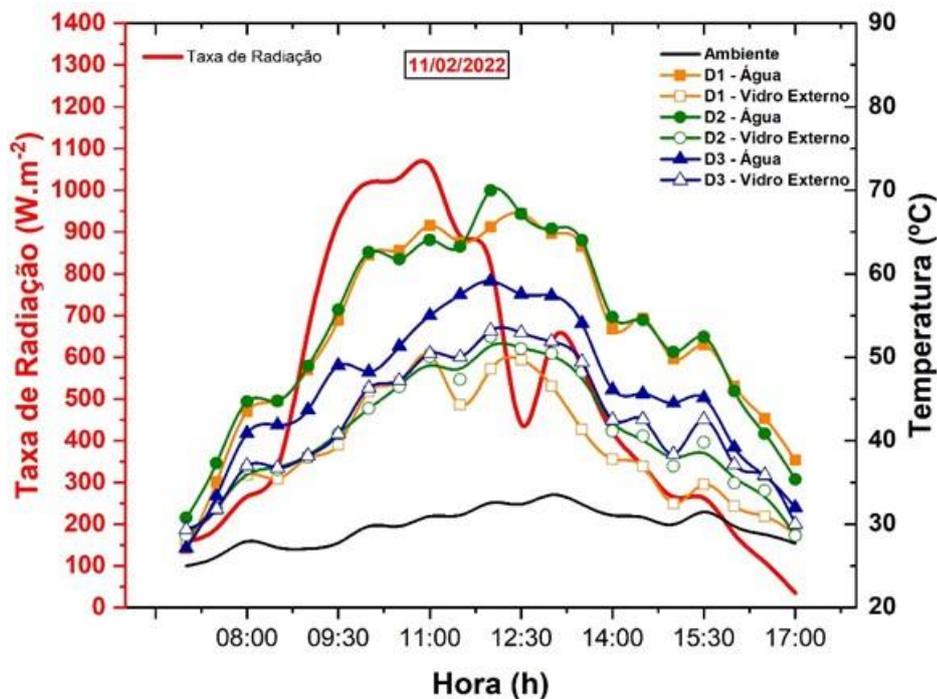
Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

A Figura 44 mostra-se os perfis de temperatura monitoradas do dia 11/02/2022. A velocidade do vento de $0,8$ a $3,4 \text{ m/s}$, ao longo do experimento no destilador D1, constatou-se que a temperatura da água apresentou aumento, destacando-se a temperatura no horário das 12h00min às 13h00min alcançando $74 \text{ }^\circ\text{C}$ e tendo a maior incidência de taxa de radiação solar durante o experimento neste dia que foi de 1137 W.m^{-2} acontecendo 1h antes da maior incidência de radiação.

No destilador (D2) neste ensaio das 11h00min a taxa de radiação quando atingiu 1137 W.m^{-2} , a temperatura conseguiu logo em seguida às 11h30min aumentar chegando à temperatura da água 70°C como demonstrado no gráfico e a temperatura do vidro externo 52 °C, mas logo em seguida a incidência da radiação diminuiu depois das 13h00min apresentando 715 W.m^{-2} , já nos outros experimentos apresentados neste mesmo horário dos outros dias apresentava taxa de radiação maior.

No destilador (D3) observa-se como analisado para os outros dois destiladores que o período maior incidência de taxa de radiação solar foi de 1137 W.m^{-2} e logo depois neste destilador a temperatura conseguiu aumentar chegando à temperatura da água 69,9 °C. Logo em seguida a taxa de radiação diminuiu bem como os perfis de Temperatura. De acordo com Toosi, Goshayeshi e Heris (2021) compara diferentes destiladores (simples e modificados) no destilador solar sem modificação atingiu a temperatura de 48 °C, já no destilador com modificações a temperatura da água atingiu cerca de 54 °C, esses valores são inferiores aos valores encontrados neste experimento.

Figura 44: Perfis de Temperatura dos experimentos iniciais (11/02/2022).



Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

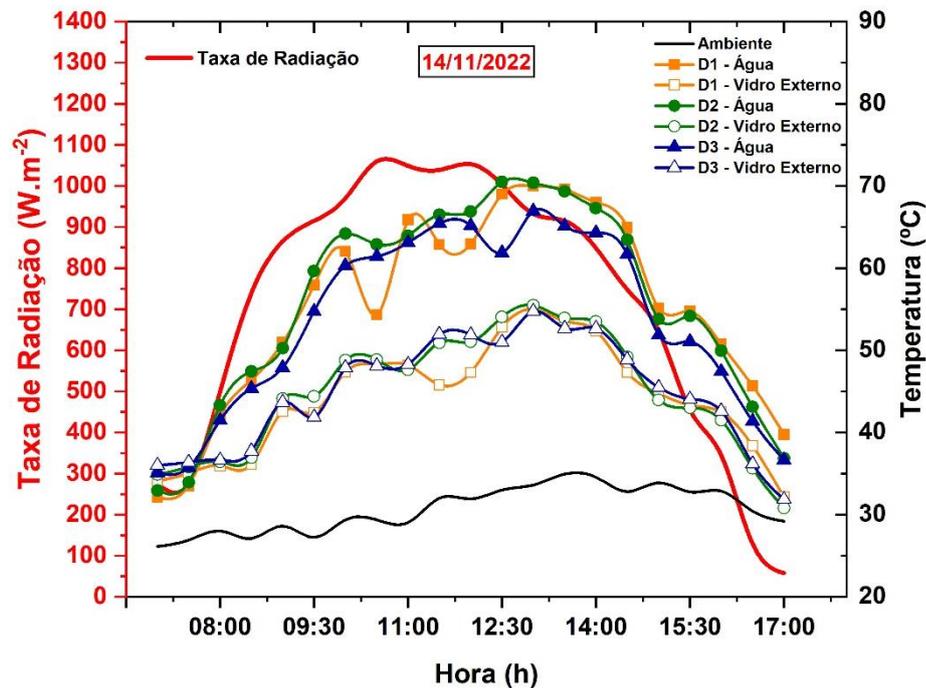
A Figura 45 é possível verificar os valores de temperatura do vidro externo se mantiveram inferior à temperatura da água da placa dos destiladores. Ao longo do experimento o D1 representado pela cor amarela a temperatura da água na placa absorvedora apresentou avanço e atingiu maior pico de temperatura às 13h00min, alcançando 70 °C e destacando a maior taxa de radiação solar durante o experimento deste dia foi de 1060 W.m⁻², pelo fato da intensidade da radiação solar incidente que entra no destilador de forma gradual, desta forma apresentando maior aquecimento da água para evaporação. Conforme relata Omara *et al.* (2021) que obter maior temperatura da água na bandeja do destilador solar, consegue ter maior evaporação de água no destilador. Al-Hinai *et al.* (2002), concluíram na pesquisa que o aumento da temperatura ambiente tende a aumentar a eficiência do destilador em 8,2 % para uma mudança de 23°C a 33°C. Neste ensaio mostra maior temperatura atingindo 70 °C, desta forma tendo maior eficiência do que a pesquisa desses autores.

Nas curvas de cor verde o destilador (D2) apresentou o perfil de temperatura que conseguiu atingir 70,5°C da água na placa indicando a maior temperatura, em seguida a taxa de radiação começou a diminuir consequentemente os valores das temperaturas também, este fenômeno ocorreu a partir do horário das 13h30min com a taxa de radiação de 915 W.m⁻², devido a diminuição da intensidade da radiação. Em concordância com Abdullah *et al.* (2021) que as temperaturas diminuíram conforme a diminuição da incidência da radiação solar.

No destilador (D3) representado pelas curvas de cor azul, a taxa de radiação iniciou com 275 W.m⁻² as 07h00min para os três destiladores com os valores de temperatura: com a temperatura ambiente de 26,14 °C, a temperatura da água da placa 35,1 °C, posteriormente atingiu próximo às 12h30min com 1003 W.m⁻², os perfis de temperatura da água da placa 61,8 °C e a do vidro apresentando 51°C aconteceu sempre inferior dos outros perfis de temperatura da água da placa. Madiouli *et al.* (2021) descrevem o fato das temperaturas da cobertura de vidro juntamente com a temperatura da água da bandeja que aumentam do início da manhã as 07h00min até às 14h00min e depois diminuem com o tempo, conforme ilustrado na Figura 45.

Apresentou maior incidência de radiação, contribuindo para se ter aumento das temperaturas consequentemente um maior aquecimento da água, entre os três destiladores a temperatura da água na placa absorvedora no horário das 13h00min manteve temperatura máxima. Nota-se como aconteceu na pesquisa de Fathy; Hassan e Ahmed (2018) que os valores máximos destas temperaturas perto das 13h00min acontecem por motivos da entrada de energia solar no destilador que demora algum tempo na parte da manhã para transmitir a sua energia ao sistema do destilador solar neste horário.

Figura 45: Perfis de Temperatura, sem matérias fototérmicos (14/11/2022)



Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

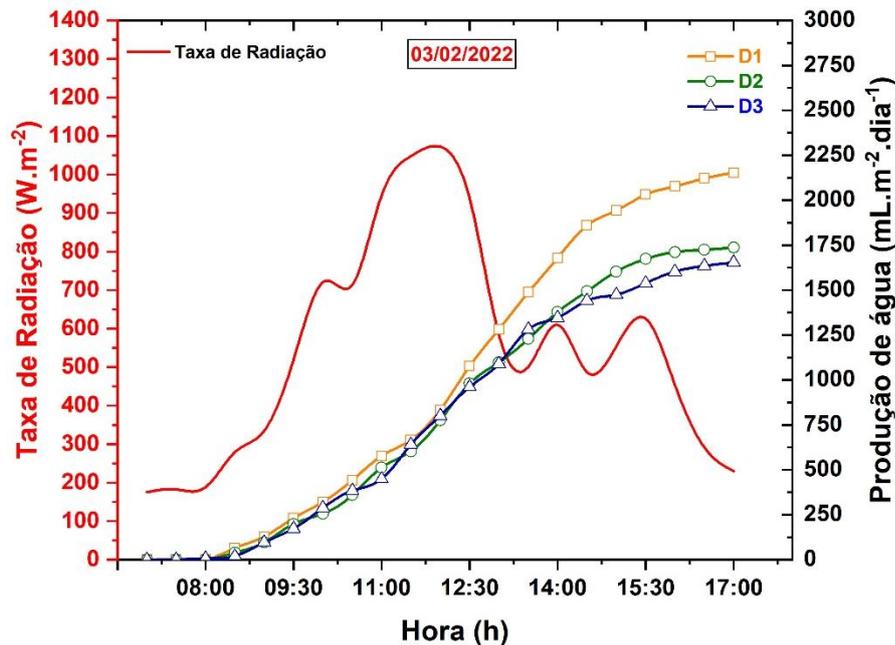
7.2 TESTES DE PRODUÇÃO DOS DESTILADORES SEM MATERIAIS FOTOTÉRMICOS

A seguir demonstrados através das Figuras (46, 47, 48 e 49) os experimentos realizados apresentando os valores da produção de água destilada acumulada em função da radiação solar dos três destiladores solar de forma simultânea sem materiais fototérmicos. Esse parâmetro de produção dos destiladores é de fundamental importância para o sistema, visto que os níveis de radiação solar incidentes sobre os destiladores provocam a evaporação da água contaminada, dando início ao processo de destilação.

Na Figura 46, observando a produção de água em função da radiação solar monitoradas do experimento A, verifica-se que o maior valor da intensidade de radiação foi de 1095 W.m^{-2} por volta das 12h00min, produzindo cerca de 833 mL.m^{-2} de água destilada do Destilado D1, no Destilador D2 apresentando 775 mL.m^{-2} de água destilada, já no D3 com 801 mL.m^{-2} de água destilada. Porém, durante o tempo de operação, a produção total no final do dia do experimento com a radiação de 230 W.m^{-2} foi de 2153 mL m^{-2} para o D1, 1737 mL.m^{-2} para o D2 e 1653 mL.m^{-2} para o D3, observa-se que neste dia de experimento para os destiladores foi o dia que teve menor produtividade entre os outros dias de experimento, pelo fato do dia está nublado, mas neste dia destacando o Destilador D1 que apresentou maior produção ao final do

dia entre os três destiladores. Pode-se observar resultados melhores que Cardoso *et al.* (2020) no experimento com o dessalinizador solar que constatou a maior produção acumulada de água de $1.153 \text{ mL.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, devido a influência direta das condições climáticas principalmente da insolação, pois o experimento foi realizado em um dia parcialmente nublado. Na pesquisa de Gawande e Bhuyar (2013) com dessalinizador tipo cascata conseguiram resultado do destilado $1370 \text{ mL.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, resultado inferior ao do experimento realizado.

Figura 46: Produção de água em função da radiação solar monitoradas do experimento sem materiais fototérmicos (03/02/2022).

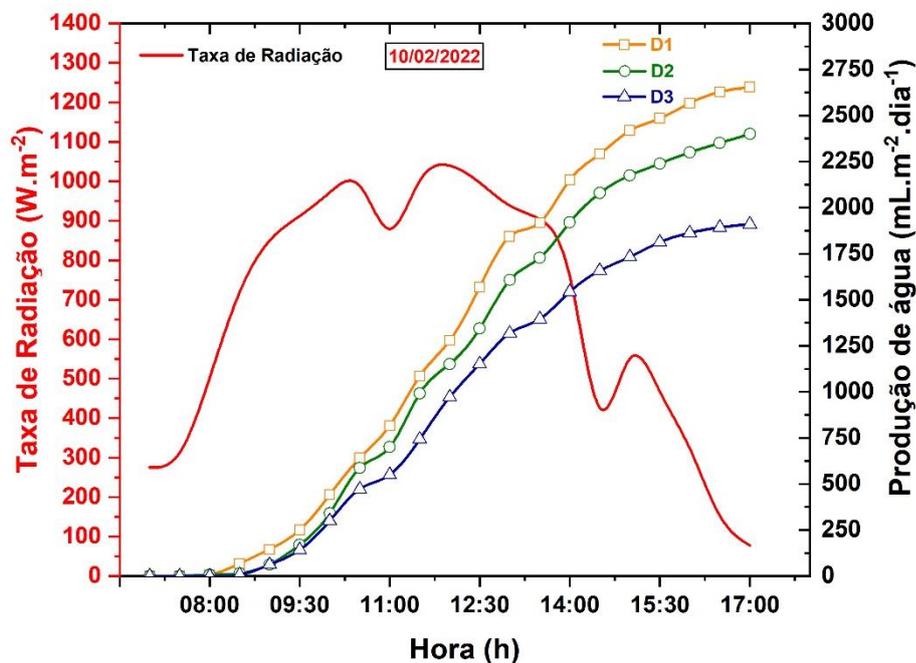


Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

A Figura 47 mostra que os índices de radiação a que o sistema foi exposto, foram satisfatórios, juntamente com a produção comportando-se de maneira crescente. Até as 12h00min a radiação apresentou para ambos destiladores 1050 W.m^{-2} , com a produção neste horário crescente de 1279 mL.m^{-2} no D1, no D2 1150 mL.m^{-2} e no D3 972 mL.m^{-2} . Observa-se que a variação da produção de água destilada e com a variação da radiação solar, atingiu no final do dia a produção de 2654 mL.m^{-2} no D1, no D2 2399 mL.m^{-2} e no D3 1909 mL.m^{-2} , e isso ocorreu pelo fato da placa absorvedora que estava superaquecida devido o tempo de exposição à radiação solar, e conseqüentemente aquecendo a água para o processo de evaporação.

O momento de maior intensidade de radiação solar ocorreu por volta das 10h30min e 12h00min, hora em que foi registrado o valor de radiação solar com 1050 W.m^{-2} . Em seguida, houve uma redução da radiação solar e conseqüentemente a produção de água não ficou mais crescente. Neste ensaio, comparando com os outros dias de experimento os destiladores apresentaram maior produção de água destilada, Khechekhouche *et al.*(2020) destaca na sua pesquisa que a produtividade dos destiladores solares aumenta com o aumento da radiação solar e da temperatura ambiente, por motivo da placa absorvedora que estava superaquecida.

Figura 47: Produção de água em função da radiação solar monitoradas do experimento sem materiais fototérmicos (10/02/2022).

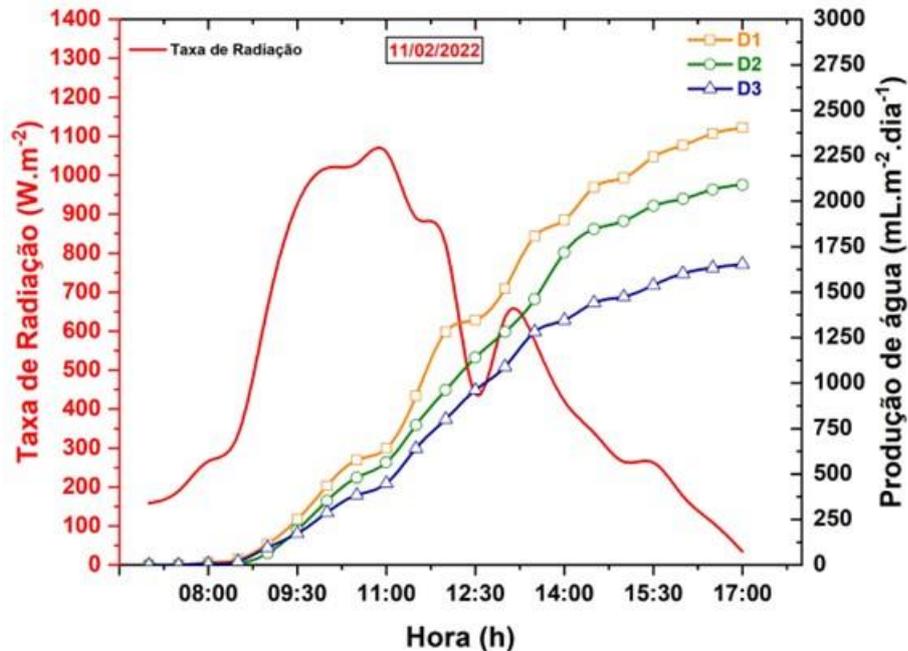


Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

A Figura 48 observa-se neste dia de experimento às 11h00min, a intensidade de radiação solar esteve no valor máximo deste dia de 1137 W.m^{-2} para os três destiladores, já depois deste horário apresentou nebulosidade, baixando a intensidade de radiação solar juntamente com a produção de água. De acordo com Manokar, Murugavel e Esakkimuthu (2014) a taxa de evaporação depende da temperatura da água na bandeja e principalmente da disponibilidade de radiação solar, desta forma, a taxa de evaporação desempenha um papel importante na produção de água destilada. No final do dia do experimento, a produção de água destilada atingiu o valor máximo horário de 2403 mL.m^{-2} no D1, no D2 2089 mL.m^{-2} e no D3 1653 mL.m^{-2} . Resultados semelhante foram constatados por Brito *et al.* (2020) que utilizou um dessalinizador de dupla

inclinação na região de Campina grande, foi observado uma produção média de água potável de $1583,3 \text{ mL.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ para um índice de radiação solar média de $1.005,4 \text{ W.m}^{-2}$.

Figura 48: Produção de água em função da radiação solar monitoradas do experimento sem materiais fototérmicos (11/02/2022).



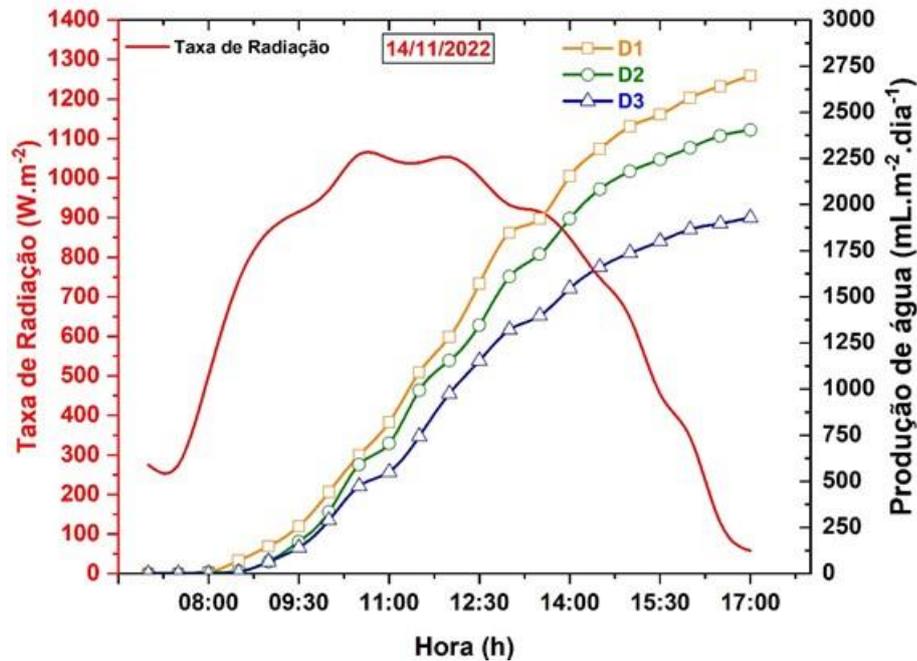
Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

A Figura 49 percebe-se que os índices de intensidade de radiação solar a que o sistema foi operado, apresentou resultados positivos. As 10h30min apresentou a maior incidência para ambos destiladores 1060 W.m^{-2} , no horário das 12h00min à radiação apresentou 1053 W.m^{-2} , com a produção neste horário crescente de 1283 mL.m^{-2} no D1, no D2 1153 mL.m^{-2} e no D3 974 mL.m^{-2} . Neste experimento ocorreu variação da produção de água destilada conforme a variação da radiação solar e registrou a produção final de 2698 mL.m^{-2} no D1, no D2 2400 mL.m^{-2} e no D3 1929 mL.m^{-2} . Portanto o D1 produziu 11% a mais que o D2 e 29% a mais do que o D3. Segundo Gnanadason *et al.* (2011) afirma que a taxa de evaporação no interior do destilador é diretamente proporcional a temperatura da água da bandeja.

A maior intensidade de radiação solar ocorreu por volta das 12h00min, registrou 1060 W.m^{-2} . Neste ensaio, os destiladores apresentaram uma boa produção de água destilada, Silva *et al.* (2019) destacam na sua pesquisa que a produtividade dos destiladores solares aumenta com o aumento da radiação solar e da temperatura ambiente.

A Tabela 6 apresenta os resultados da comparação entre os diferentes dias de experimento, considerando a ausência de materiais fototérmicos nos destiladores.

Figura 49: Produção de água em função da radiação solar monitoradas do experimento sem materiais fototérmicos (14/11/2022).



Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Tabela 6: Resultados comparativos dos experimentos sobre a produtividade de água sem a utilização de materiais fototérmicos.

EXPERIMENTOS	D1	D2	D3
<i>Dia 03/02/2022</i>	2153 mL. m ⁻²	1737 mL.m ⁻²	1653 mL.m ⁻²
<i>Dia 10/02/2022</i>	2654 mL. m ⁻²	2399 mL.m ⁻²	1909 mL.m ⁻²
<i>Dia 11/02/2022</i>	2403 mL. m ⁻²	2089 mL.m ⁻²	1653 mL.m ⁻²
<i>Dia 14/02/2022</i>	2698 mL. m ⁻²	2400 mL.m ⁻²	1929 mL.m ⁻²

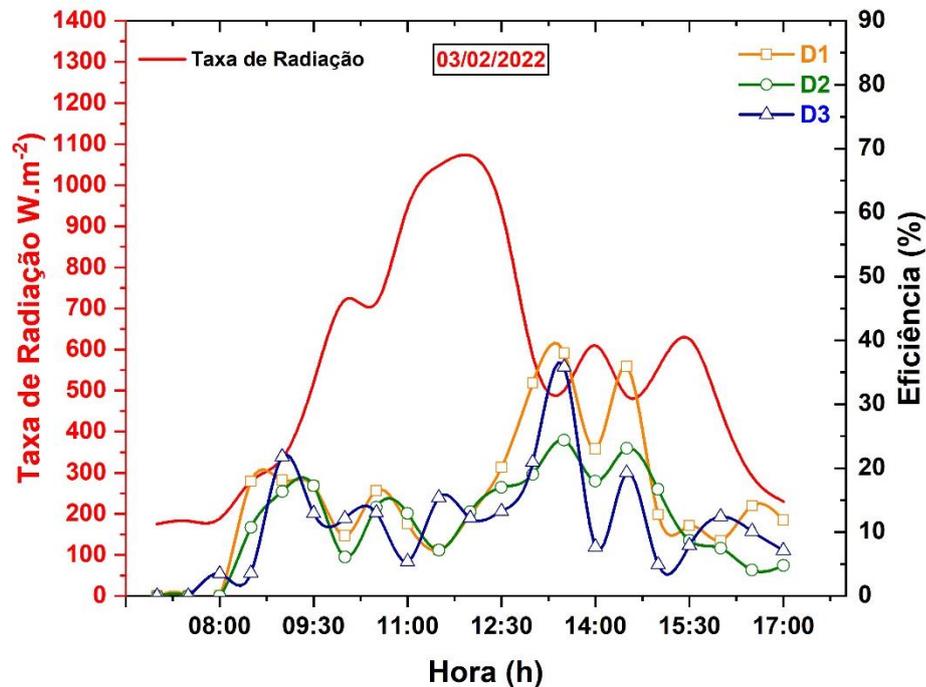
Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

7.3 EFICIÊNCIA DOS DESTILADORES SEM MATERIAIS FOTOTÉRMICOS

Foram realizados e destacados nas Figuras (50, 51, 52 e 53) as eficiências térmicas horária em função da radiação solar nos destiladores D1, D2 e D3 sem os materiais fototérmicos. Para efeito de estudo da eficiência térmica, mostrando os testes executados dos três destiladores de forma simultânea (D1, D2, D3). Aos quais foram medidos parâmetros predeterminados a cada 30 minutos, iniciando às 07h00min e finalizando às 17h00min.

Na Figura 50 demonstra as eficiências térmica dos destiladores e a radiação solar incidente, sem os materiais fototérmicos, observa-se que as eficiências térmicas acompanham o desempenho da radiação solar, as eficiências máximas apresentadas nesta figura foram alcançadas às 13h30min no valor para os destiladores (D1, D2, D3) de 38,01%; 24,37%; e 35,83% respectivamente, visto que 1h antes destas maiores medições das eficiências, a radiação solar apresentava o valor de 1095 W.m^{-2} . Sendo essas eficiências maiores do que registrada na pesquisa de Elashmawy (2020), com o uso de destilador solar do tipo tubular, conseguiu uma eficiência energética de 36,34%.

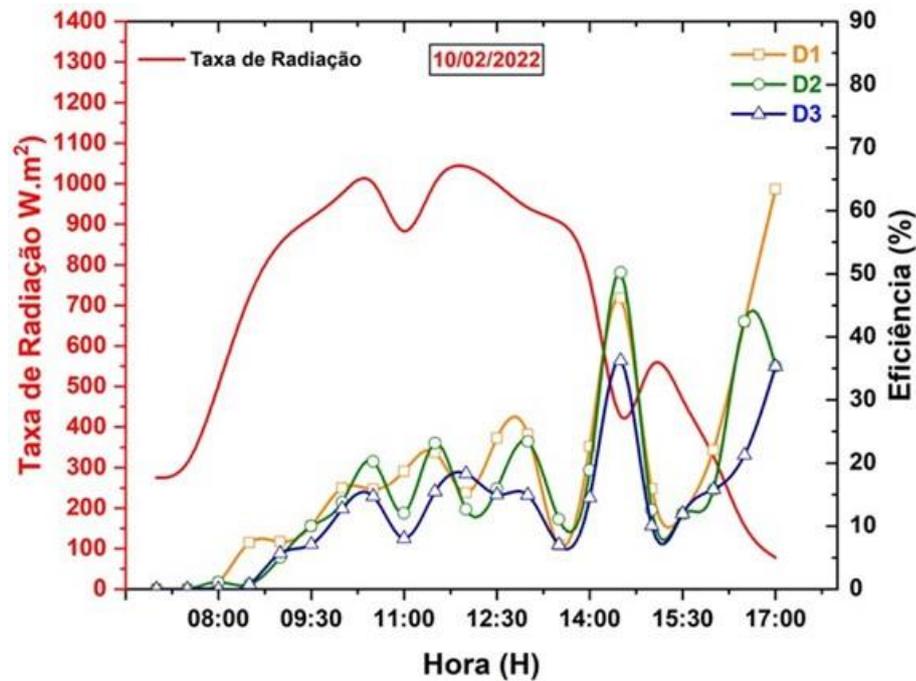
Figura 50: Eficiência dos destiladores sem os materiais fototérmicos. (03/02/2022)



Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Na Figura 51 são mostradas as eficiências térmicas horária em virtude da incidência de radiação solar do dia 10/02/2022. Neste experimento conseguiu apresentar uma excelente eficiência no final do dia apresentando valores de eficiência para os destiladores acima de 30%, devido uma excelente incidência de radiação solar apresentada neste dia, com média de radiação solar de 800 W.m^{-2} , conforme no experimento de Sharshir *et al.* (2018) que conseguiram obter eficiência horária de 35,56% com destiladores convencionais.

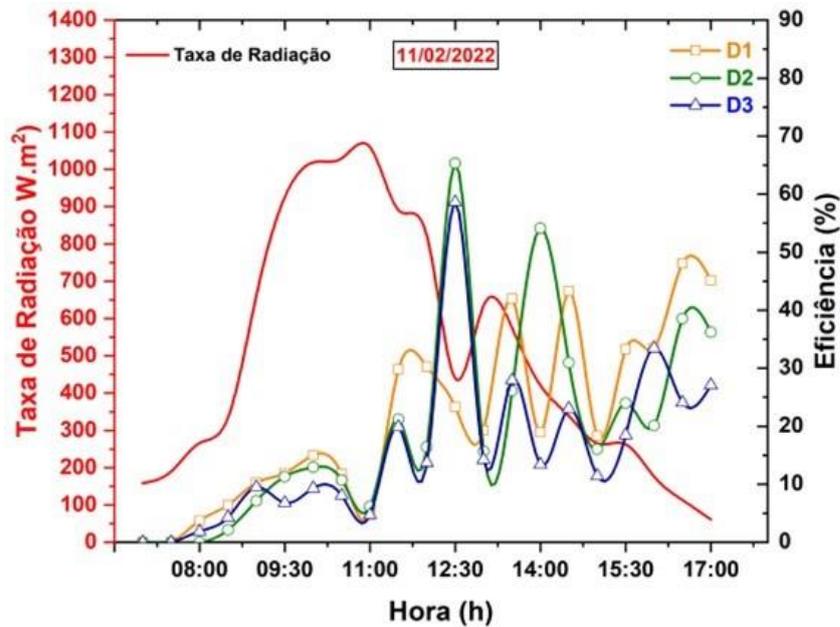
Figura 51: Eficiência dos destiladores sem os materiais fototérmicos (10/02/2022)



Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Na figura 52 estão apresentadas as eficiências térmicas horária em função da radiação solar no dessalinizador para o experimento do dia 11/02/2022. A eficiência térmica horária atingiu um valor máximo acima de 30%, para os destiladores, por volta das 12h30min durante o tempo de operação do experimento. Resultado próximo desse estudo foi encontrado por Rabhi *et al.* (2017) que destacou uma eficiência térmica máxima de 25,39% para seu destilador com modificações.

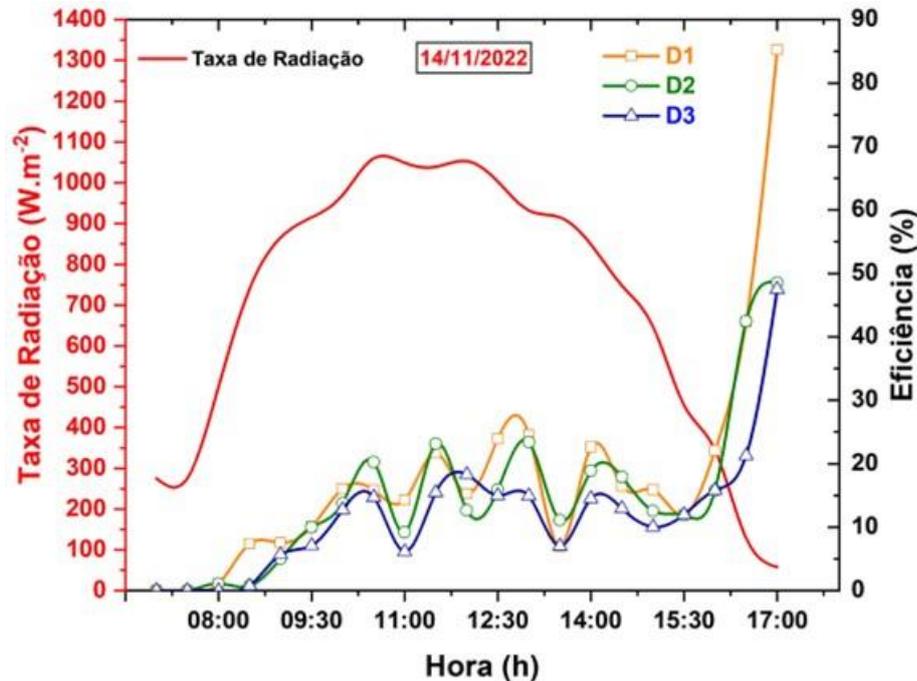
Figura 52: Eficiência dos destiladores sem os materiais fototérmicos (11/02/2022)



Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Na Figura 53 demonstra as eficiências térmica horária em função da radiação solar nos destiladores D1, D2 e D3 sem os materiais fototérmicos, observa-se que as eficiências térmicas horária acompanham o desempenho da radiação solar. Abad *et al.* (2013) conseguiram ter uma eficiência térmica máxima do destilador de 17%. Younes *et al.* (2022) com destilador convencional sem materiais de armazenamento conseguiram eficiência de 34,5%. Já nestes destiladores estudados no final da tarde com o declínio da radiação solar, nota-se que obteve eficiências máximas de 85,27% no D1, 47,51% no D2 e no D3 47,52%, pelo fato da capacidade térmica armazenada da água contida nos destiladores.

Os resultados da eficiência dos destiladores solares, sem a utilização de materiais fototérmicos, podem ser observados na Tabela 7, com base nos dias de experimento realizados.

Figura 53: Eficiência dos destiladores sem os materiais fototérmicos (14/11/2022)

Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Tabela 7: Resultados comparativos da eficiência máxima dos destiladores solares sem a utilização de materiais fototérmicos.

<i>EXPERIMENTOS</i>	<i>D1</i>	<i>D2</i>	<i>D3</i>
<i>Dia 03/02/2022</i>	11,85%	4,75%	7,13%
<i>Dia 10/02/2022</i>	63,40%	35,32%	35,33%
<i>Dia 11/02/2022</i>	45,13%	36,18%	27,10%
<i>Dia 14/02/2022</i>	85,26%	48,50%	47,51%

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

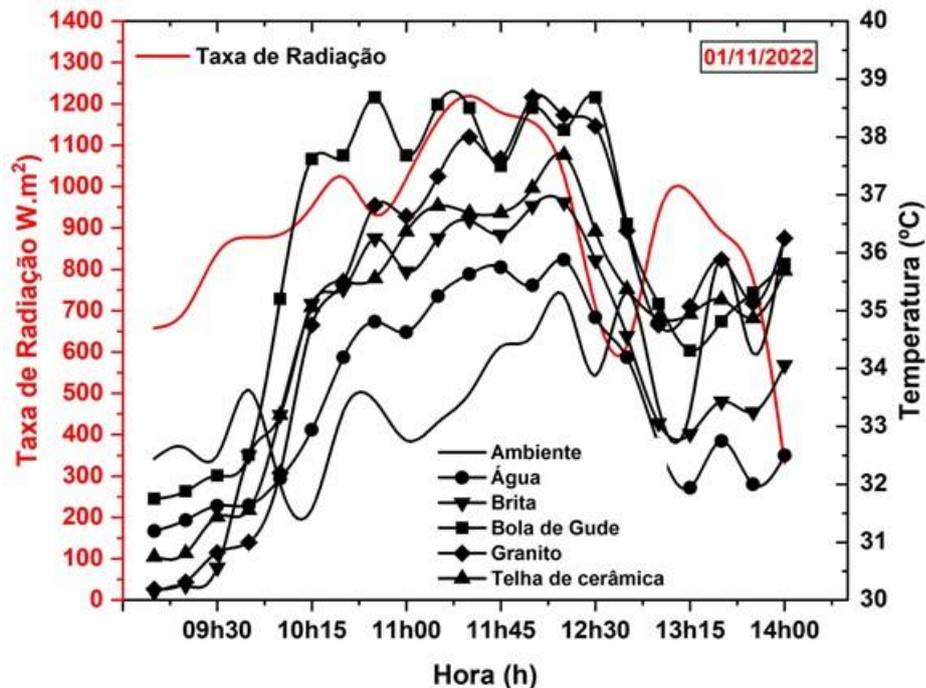
7.4 TESTES DE ABSORÇÃO DE CALOR DOS MATERIAIS FOTOTÉRMICOS

Os experimentos com os materiais fototérmicos estão divididos e apresentados a seguir mostrando a taxa de irradiação e os perfis de temperatura de cada material fototérmico, que foram realizados em dois dias, sendo em um dia utilizando esses materiais sem pintura e no outro dia pintados. Na pesquisa por materiais fototérmicos, procurou-se fazer os experimentos com aqueles que não liberassem odor e nem gosto à água.

No experimento sem pintura visto na Figura 54, pode-se ver os materiais com maiores temperaturas destacados que foram: o granito registrou a maior temperatura apresentado 38,69

°C no horário de 12h00min e dando continuidade de maior temperatura no período da tarde. Conforme Panchal (2015) que utilizou um destilador solar com diferentes condições para determinar o desempenho, em um dos experimentos utilizou cascalho de granito para aumentar a eficiência nas condições climáticas, durante o experimento da evaporação conseguiu aumentar a ação capilar tendo maior armazenamento de calor no final do dia. A segunda maior temperatura registrada é da bola de gude apresentado bem próximo ao granito com 38,68 °C nos horários de 10h45min e 12h30min, apresentando 1h antes maior incidência de radiação do experimento 1244 W.m^{-2} . O terceiro material foi à telha de cerâmica com a mesma incidência da taxa de radiação dos outros materiais apresentou 37,12 °C no horário de 12h00min com incidência de 1173 W.m^{-2} , registrando por último a brita com 36,81 °C. De acordo com Gnanaraj e Velmurugan (2022) que tinham o intuito de aumentar a produtividade do dessalinizador espalharam materiais de armazenamento de calor na bandeja como: telha de cerâmica e tijolo vermelho constatou que o calor manteve uma maior taxa de temperatura da água e taxa de produção durante o declínio das horas.

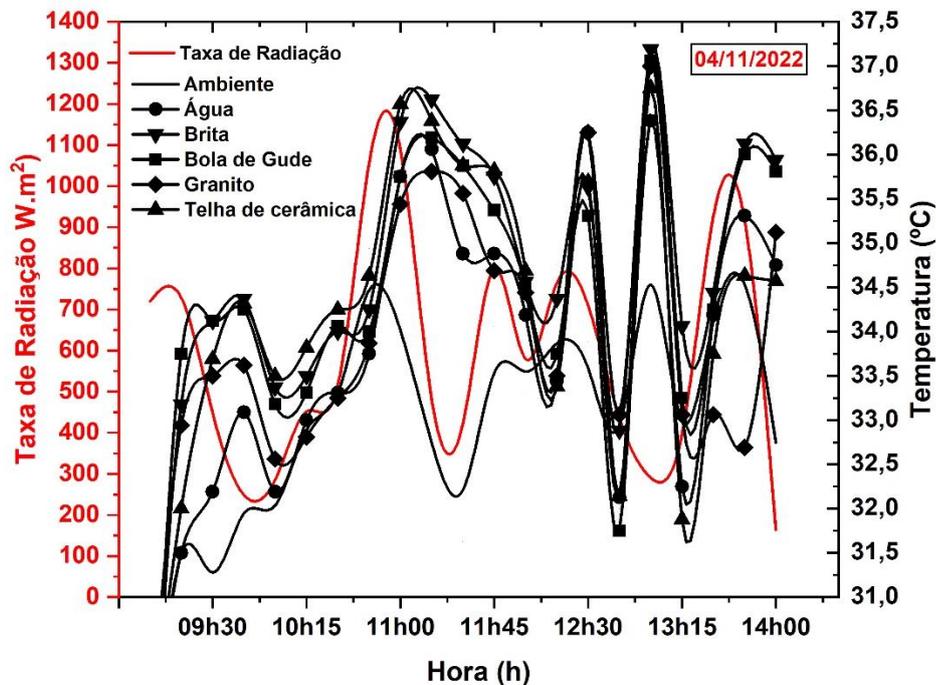
Figura 54: Perfis de temperatura dos materiais fototérmicos sem pintura



Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

No experimento com os materiais e bandejas pintados de tinta preta fosca mostrado na Figura 55, os materiais com maiores temperaturas foram: no começo da manhã no horário de 09h30min a temperatura ambiente registrou 30,75 °C, a temperatura da água sem materiais 32,19 °C e da água com os materiais iniciaram para brita 34,12 °C, Bola de Gude 34,11 °C, Granito 33,5 °C, e Telha cerâmica 33,69 °C, com taxa de radiação 420 W.m⁻². Por volta das 13:45 com taxa de radiação 1072 W.m⁻² a brita registrou a maior temperatura da água 36,12 °C, em seguida a bola de gude com 36 °C, depois a telha cerâmica com 34,63 e o granito com 32,69 °C. Observou-se que no final do experimento a brita registrou 35,94 °C, a bola de gude em segundo com 35,81 °C, o granito com 35,12 °C e a telha cerâmica 34,57 °C. Neste experimento a brita e a bola de gude registraram as maiores temperaturas no final do experimento, portanto os mesmos foram selecionados para serem introduzidos nos destiladores. Resultados semelhantes de temperaturas aconteceram na pesquisa de Suraparaju, Ramasamy e Natarajan, (2021) fizeram um estudo do desempenho energético e econômico com destilador solar usando bolas de gude onde foram investigados os resultados e perceberam que a temperatura da água com as bolas de gude aumentou, devido à energia térmica sensível armazenada.

Figura 55: Perfis de temperatura dos materiais fototérmicos com pintura

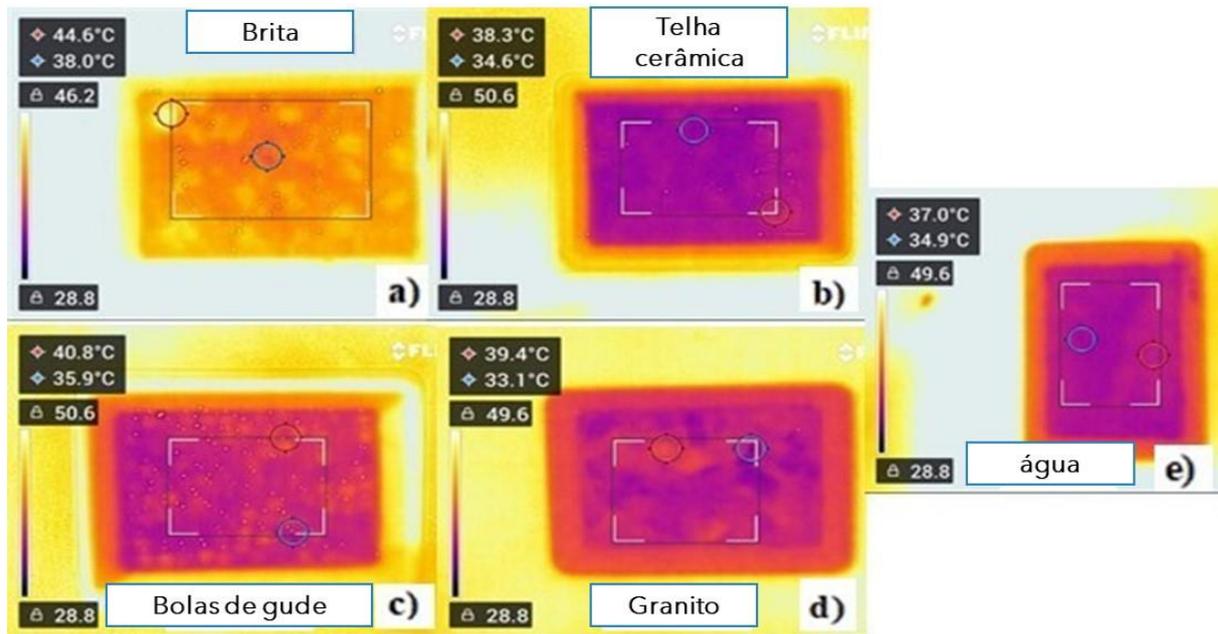


Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

As imagens térmicas apresentadas na Figura 56 mostra as leituras das temperaturas da água contendo os materiais fototérmicos e comparadas com a água sem material fototérmico, essas imagens foram feitas por volta das 14h00min com temperatura ambiente registrada no valor de 28,8°C. Observa-se claramente nas imagens variações de temperatura dos materiais, sendo essencial para a escolha do material e melhoria dos destiladores solares, observando os materiais com alta e baixa capacidade de absorção e retenção de calor. A Figuras 62 apresenta (a) a imagem térmica da água com brita (b) telha cerâmica (c) bola de gude, (d) granito e (e) água sem material fototérmico. A brita e bola de gude apresentaram maiores temperaturas, com temperaturas máximas de 44,6°C e 40,8°C e temperaturas mínimas de 38°C e 35,9°C, respectivamente, mostrando um maior desempenho quando comparados com os outros materiais fototérmicos e a água que registrou temperatura máxima de 37°C. Essas temperaturas mais altas podem ser justificadas pela capacidade dos materiais de armazenar calor. O granito e a telha cerâmica demonstraram também bom desempenho quando comparados com a água, registrando-se temperaturas máximas de 39,4°C e 38,3°C e mínimas de 33,1°C e 34,6°C, respectivamente.

As bandejas contendo à água com os materiais fototérmicos apresentaram temperaturas mais altas, destacando-se a brita e bola de gude mais eficientes em absorver e reter calor em relação aos outros materiais e à água sem material fototérmico, sendo de extrema importância para inativação de microrganismos. As imagens de câmera infravermelha é uma ferramenta poderosa para visualizar variações de temperatura porque detectam a radiação infravermelha emitida conseguindo representar temperaturas visualmente, quando se aproxima da cor azul mostra-se temperaturas menores e aproximado do amarelo temperaturas maiores (Dhaoui *et al.*, 2024). Na Tabela 8, são apresentados os resultados da comparação entre os valores das temperaturas máximas e mínimas da água, com a inserção de materiais fototérmicos na bandeja, registrados pela imagem da câmera infravermelha.

Figura 56: Imagens térmicas dos materiais fototérmicos e da água.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Tabela 8: Comparação dos resultados do teste de absorção de calor dos materiais fototérmicos.

<i>EXPERIMENTOS</i>	<i>TEMPERATURAS</i>	
	Máxima	Mínima
<i>Brita</i>	44,6 °C	38,0 °C
<i>Bolas de gude</i>	40,8 °C	35,9 °C
<i>Granito</i>	39,4 °C	33,1 °C
<i>Telha cerâmica</i>	38,3 °C	34,6 °C
<i>Água</i>	37,0 °C	34,9 °C

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

7.5 TESTES TÉRMICOS DOS DESTILADORES COM MATERIAIS FOTOTÉRMICOS

A Figura 57 apresenta-se as variações de temperatura da água na placa absorvedora de calor, a temperatura do vidro externo e a temperatura ambiente em função da taxa de radiação solar incidente nos destiladores (D1, D2 e D3) representada por cores para cada destilador, que foram monitoradas. Neste experimento foram utilizados materiais de armazenamento de calor

que obteve maior registro de temperatura dos materiais pintados para introdução nos destiladores, D2 com a brita e o D3 com a bola de gude.

Neste dia os valores da temperatura do vidro externo se mantiveram inferior à temperatura da água na placa dos destiladores, a taxa de radiação iniciou com 104 W.m^{-2} as 07h00min e temperatura ambiente de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ e tendo a maior incidência de taxa de radiação solar neste dia foi 1210 W.m^{-2} , de acordo com Manokar, Murugavel e Esakkimuthu (2014), na pesquisa mencionaram que para ter maior eficiência das temperaturas da água na placa absorvedora que é um dos fatores importantes para um maior desempenho do destilador solar é necessário uma melhor taxa de radiação bem como de evaporação.

No destilador D1 constatou-se nas curvas representada na cor amarela ao longo do experimento que a temperatura da água da placa do destilador apresentou aumento gradativo, destacando-se as temperaturas no horário das 12h30min às 13h00min alcançou $68,31^\circ\text{C}$ para temperatura da água na placa e a temperatura do vidro externo $52,06 \text{ }^\circ\text{C}$, quando a taxa de radiação começou a diminuir no horário de 14h30min com a taxa de radiação de 944 W.m^{-2} apresentou $57,59^\circ\text{C}$ na água da placa e no vidro externo $48,19 \text{ }^\circ\text{C}$.

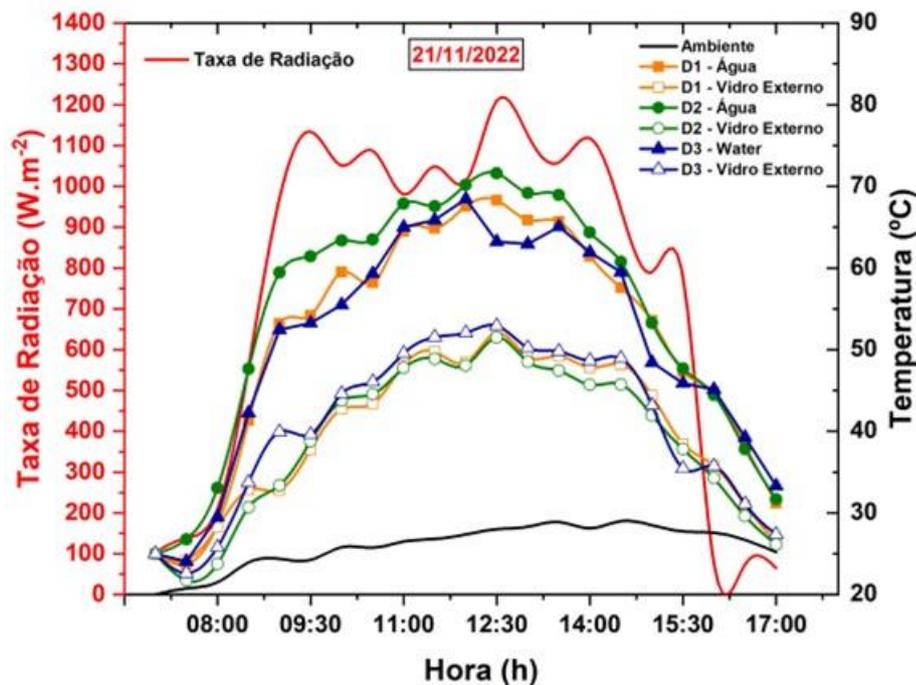
No destilador (D2) representado pela cor verde, neste ensaio inserido a brita como material fototérmico, às 10h30min a taxa de radiação quando atingiu 1087 W.m^{-2} , a temperatura da água na placa conseguiu logo em seguida às 11h00min ter um aumento gradativo, chegando à temperatura da água às 12h30min $71,62 \text{ }^\circ\text{C}$, e a temperatura do vidro externo $51,5^\circ\text{C}$.

No horário das 14h30min a incidência da radiação começou a diminuir para ambos destiladores apresentando neste horário 944 W.m^{-2} e conseqüentemente os valores das temperaturas da água e do vidro, mas mesmo com a menor incidência neste período o destilador apresentou maior temperatura da água da placa do que no destilador D1 e D3 apresentando $60,75^\circ\text{C}$, desta forma tendo maior eficiência térmica, isso se deve ao fato de possuir o material de armazenamento dentro do destilador, onde a energia térmica absorvida será liberada no final da tarde com menor incidência de radiação no destilador, fazendo com que aconteça maior produção de água destilada fato que aconteceu com os pesquisadores Attia *et al.* (2020) que fizeram experimentos com um dessalinizador solar com materiais de armazenamento e constataram que os resultados mostraram que aumentaram a eficiência térmica e a destilação.

No destilador (D3) representado pelas curvas na cor azul com o experimento com o material fototérmico sendo a bola de gude, ainda na Figura 57 demonstra que a temperatura da água da placa absorvedora aconteceu variações nos perfis de temperaturas, iniciou às 07h00min com a temperatura ambiente de $20 \text{ }^\circ\text{C}$, a temperatura da água da placa absorvedora $25 \text{ }^\circ\text{C}$, conseguindo posteriormente atingir próximo a 12h00min a temperatura da água $68,44^\circ\text{C}$, a

temperatura ambiente $27,37^{\circ}\text{C}$ e do vidro $52,94^{\circ}\text{C}$ aconteceu sempre inferior do perfil de temperatura da água da placa, nota-se que no período da tarde depois das 14h30min a incidência de radiação começou a diminuir juntamente com os pontos de temperatura em todos os perfis, da mesma forma que aconteceu para o D2 com a introdução do material fototérmico, sendo neste a bola de gude, mesmo com menor incidência conseguiu ter maior temperatura do que o D1, apresentando $59,5^{\circ}\text{C}$ e do vidro $48,94^{\circ}\text{C}$. Fato semelhante foi observado por Madiouli *et al.* (2021) que apresentaram uma comparação de desempenho experimental de três casos de destiladores e perceberam aumento de armazenamento térmico das bolas de vidro que utilizaram em um dos destiladores para melhoria da transferência de calor. Outros estudos dos pesquisadores Ranjan, Kaushik e Panwar, 2016; Abdelgaied *et al.* (2021); Alsehli *et al.* (2022) relataram que a utilização de materiais de armazenamento de calor proporcionou melhor eficiência dos destiladores influenciando para uma boa produtividade.

Figura 57: Perfis de Temperatura, com materiais fototérmicos (21/11/2022)

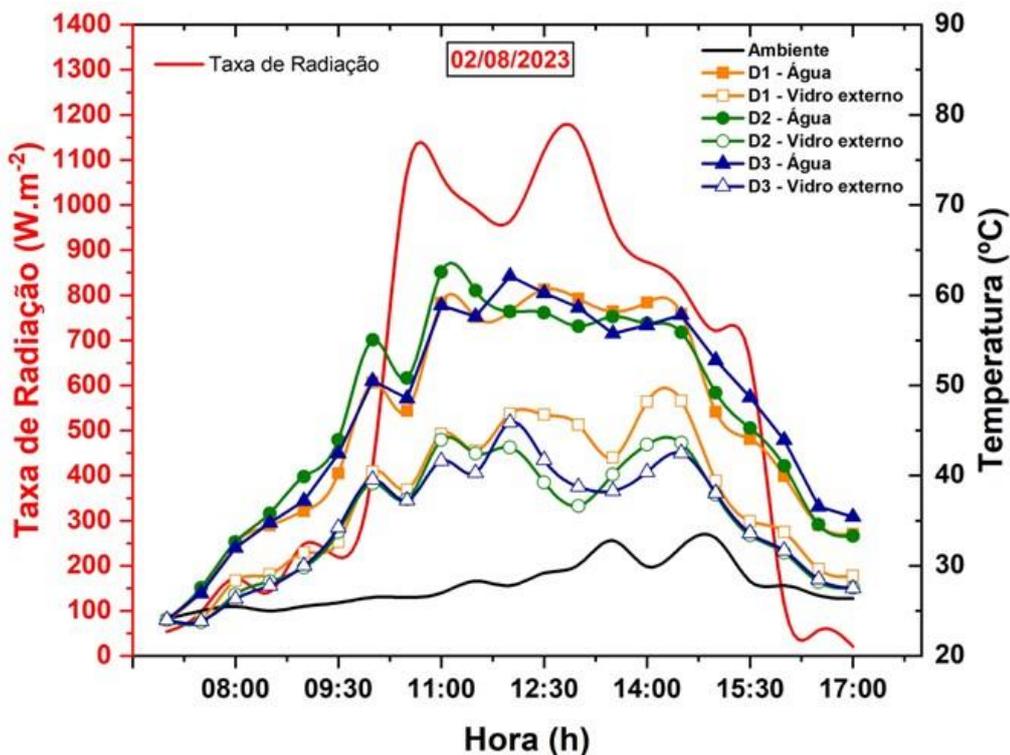


Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

A Figura 58 exibe as variações de temperatura da água na placa absorvedora de calor, a temperatura do vidro externo e a temperatura ambiente em função da taxa de radiação solar incidente nos destiladores (D1, D2 e D3) monitoradas do dia 02/08/2023. Ao longo do experimento, a temperatura da água sofre variações, iniciou as 07h00min com a temperatura de $24,1^{\circ}\text{C}$, observa-se que a temperatura da água da placa absorvedora atinge maior temperatura

para o D1 sem materiais fototérmicos 60,63 °C, D2 com a brita atingiu a temperatura de 62,56 °C, D3 com a bola de gude de 62,13 °C, tendo a maior incidência de radiação solar durante o experimento registrou 1120 W m⁻². Devido à sua densidade e capacidade térmica, a brita pode armazenar grandes quantidades de calor ao longo do dia, liberando-o gradualmente conforme a radiação solar diminui. Isso resulta em uma maior estabilidade térmica no destilador, prolongando o processo de evaporação e condensação da água. Dhivagar *et al.* (2023), estudaram um dessalinizador convencional e outro com o uso da concha como material de armazenamento de energia, e a temperatura mais alta do destilador convencional registrou cerca de 55,4 °C, já com a concha registrou 60,7 °C, valores estes, menores aos obtidos neste estudo que foi 62,56 com a brita e 62,13 com a bola de gude.

Figura 58: Perfis de Temperatura, com materiais fototérmicos 02/08/2023



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

A Figura 59 representa-se as variações de temperatura da água na placa absorvedora de calor, a temperatura do vidro externo e a temperatura ambiente em função da taxa de radiação solar incidente nos destiladores (D1, D2 e D3). Neste experimento os valores da temperatura do vidro externo se mantiveram inferior à temperatura da água na placa dos destiladores, a taxa

de radiação iniciou com 118 W.m^{-2} às 07h00min e temperatura ambiente de $24,8 \text{ }^\circ\text{C}$ e tendo a maior incidência de taxa de radiação solar neste dia foi 1220 W.m^{-2} .

No experimento com o destilador (D1), representado pela cor amarela nas curvas, observou-se um aumento gradativo na temperatura da água na placa ao longo do tempo. Entre 11h00min e 15h00min, a temperatura da água na placa atingiu $69,3 \text{ }^\circ\text{C}$, enquanto a temperatura do vidro externo chegou a $48,01 \text{ }^\circ\text{C}$. A partir das 15h00min, quando a taxa de radiação começou a diminuir, registrando 854 W.m^{-2} , a temperatura da água na placa foi de $57,12 \text{ }^\circ\text{C}$, e a do vidro externo, $42,89 \text{ }^\circ\text{C}$.

No experimento com o destilador (D2), identificado pela cor verde e utilizando brita como material fototérmico, observou-se um comportamento significativo em relação à temperatura da água na placa absorvedora. Quando a taxa de radiação atingiu 1000 W.m^{-2} às 09h, a temperatura da água começou a subir gradualmente, alcançando $60,02 \text{ }^\circ\text{C}$ às 12h00min, conforme ilustrado na Figura 59, enquanto a temperatura do vidro externo atingiu $45,19 \text{ }^\circ\text{C}$. O pico máximo de temperatura foi registrado às 14h00min, com $70 \text{ }^\circ\text{C}$. Às 16h00min, apesar da queda na incidência de radiação para 290 W.m^{-2} , o destilador D2 manteve-se uma temperatura da água na placa, superior aos destiladores D1 e D3, registrando $37,24 \text{ }^\circ\text{C}$. Esse desempenho superior pode ser atribuído ao uso da brita como material de armazenamento de energia, cuja superfície porosa é eficiente na absorção e retenção de radiação solar. Conforme descrito por Rufuss et al. (2022), materiais de armazenamento em destiladores solares contribuem para a absorção de energia térmica solar e sua liberação gradual, especialmente ao final do dia, quando a intensidade solar diminui.

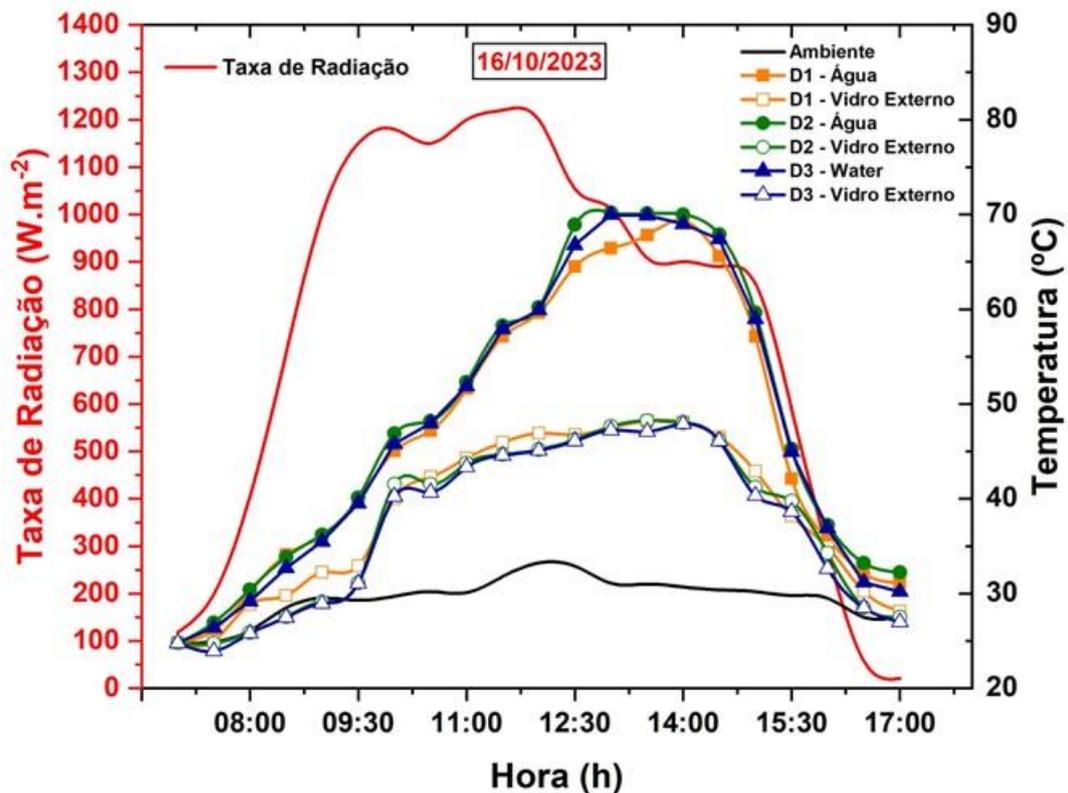
No destilador (D3) representado pelas curvas na cor azul com o experimento com o material fototérmico sendo a bola de gude, na Figura 59 verifica-se os perfis de temperatura que acompanham a radiação solar iniciando às 7h com o registro da temperatura ambiente de $24,8 \text{ }^\circ\text{C}$ e a velocidade do vento $1,5 \text{ (m/s)}$, a temperatura da água da placa absorvedora $24,8 \text{ }^\circ\text{C}$, atingindo após o pico máximo de incidência de radiação de 1220 W.m^{-2} , para $69,9 \text{ }^\circ\text{C}$.

Percebe-se depois das 13h a incidência de radiação começou a diminuir juntamente com os pontos de temperatura em todos os perfis, da mesma forma que aconteceu para o D2 com a introdução do material fototérmico, conseguindo da mesma forma do experimento realizado anteriormente manter a temperatura da água da placa absorvedora maior que o destilador D1, apresentando às 16h, $36,89 \text{ }^\circ\text{C}$ e no D1 e D2 respectivamente apresentaram nesse mesmo horário, $35,8 \text{ }^\circ\text{C}$ e $37,24 \text{ }^\circ\text{C}$.

Khatod; Katekar e Deshmukh (2022) apresentaram estudos sobre o uso de materiais de armazenamento de calor, destacando o aumento das temperaturas, neste caso destaca-se o vidro

como uma boa alternativa para serem utilizados nos destiladores por possuir uma boa condutividade térmica de $0,7 - 0,9 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), e neste presente estudo utilizou-se bola de gude, devido à sua capacidade de absorver e armazenar energia térmica. Sua superfície lisa e transparente permite uma distribuição uniforme da radiação solar, facilitando a retenção de calor na água da placa absorvedora. Esse material se mostrou eficaz em aumentar a temperatura da água durante os períodos de maior incidência solar, contribuindo para a manutenção do calor mesmo com a redução da radiação ao longo do dia, conseguindo também o êxito de inativar os coliformes termotolerantes na água destiladas dos destiladores, conseguindo de forma mais rápida nos destiladores que estavam inseridos os materiais de armazenamento térmico isso se deve, pelo aumento da temperatura dentro dos destiladores. Possuir materiais de armazenamento térmico e pintados de preto aumentam a absorção da radiação solar e acelerando a inativação dos microrganismos, os autores Pichel, Vivar e Fuentes (2019) afirmam que em relação aos mecanismos de inativação de patógenos, a radiação UV solar pode causar danos por meio de inativação direta, com fótons UV atuando diretamente no DNA dos microrganismos.

Figura 59: Perfis de Temperatura, com materiais fototérmicos 16/10/2023



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Com o Experimento do dia 22/05/2024 mostrado na Figura 60, têm-se a representação das variações de temperatura da água na placa absorvedora de calor, a temperatura do vidro externo e a temperatura ambiente em função da taxa de radiação solar incidente nos destiladores (D1, D2 e D3), verifica-se que nas horas iniciais de cada experimento apresentaram valores equiparados, a taxa de radiação iniciou-se às 07h00min com 199 W.m^{-2} e temperatura da água da placa absorvedora dos três destiladores de $25 \text{ }^\circ\text{C}$, com maior nível de taxa de radiação de 1360 W.m^{-2} no horário das 10h30min.

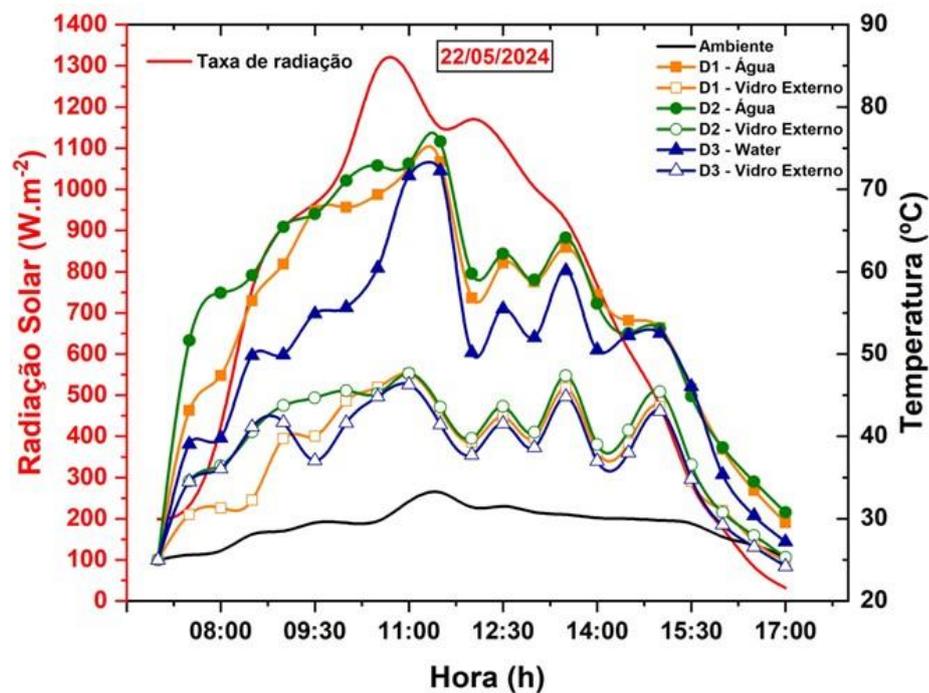
No destilador (D1), durante o experimento, a temperatura da água na placa absorvedora variou, atingindo seu pico às 11h30min, com $73,37 \text{ }^\circ\text{C}$, enquanto a temperatura do vidro externo chegou a $43,19 \text{ }^\circ\text{C}$. Às 13h00min, a taxa de radiação começou a diminuir gradativamente, registrando 990 W.m^{-2} . Nesse mesmo momento, a temperatura da água na placa era de $58,75 \text{ }^\circ\text{C}$ e a do vidro externo, $39,81 \text{ }^\circ\text{C}$. Às 17h00min, a temperatura foi de $29,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Neste destilador não se utilizou material de armazenamento de calor.

No destilador (D2), exibido pela curva verde na Figura 60, foi utilizada brita como material de armazenamento térmico para aumentar a absorção da temperatura da água. Em comparação com o destilador (D1), observa-se que no mesmo horário de pico, às 11h30min, o destilador (D2) atingiu uma temperatura da água de $75,81 \text{ }^\circ\text{C}$. No final do experimento, às 17h00min, a temperatura registrada foi de $30,75 \text{ }^\circ\text{C}$. Esse comportamento pode ser atribuído à presença da brita na placa absorvedora, que atuou como material de armazenamento térmico, influenciando os resultados de forma significativa, mesmo sob as mesmas condições de radiação para ambos os destiladores. A brita foi empregada no destilador (D2) como material de armazenamento térmico, aproveitando sua alta capacidade de absorção e retenção de calor. Com sua superfície porosa, a brita facilita a captura da radiação solar, promovendo uma transferência eficiente de energia para a água da placa absorvedora. Este material se demonstrou especialmente eficaz em prolongar a liberação de calor, garantindo temperaturas mais elevadas durante o experimento, mesmo após a diminuição da incidência solar. Os pesquisadores Sampathkumar, Suraparaju e Natarajan (2023), utilizaram diferentes sistemas de armazenamento sensíveis para o destilador solar e perceberam que o rendimento geral dos destiladores solares com armazenamento de energia é significativamente melhorado.

No destilador (D3), identificado pelas curvas na cor azul na Figura 60, utilizou-se bolas de gude como material fototérmico. Os perfis de temperatura ao longo do experimento refletem a variação da radiação solar. O experimento começou às 7h00min, com a temperatura ambiente em $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e a velocidade do vento a $1,8 \text{ m/s}$. Às 07h30min, a temperatura da água na placa absorvedora alcançou $39,6 \text{ }^\circ\text{C}$, com uma incidência de radiação de 203 W.m^{-2} , condição

observada em ambos os destiladores. O maior pico de temperatura da água na placa absorvedora foi registrado às 11h30min, atingindo 72,25 °C, as bolas de gude, geralmente feitas de vidro, possuem uma superfície lisa e transparente, essa propriedade contribui para a rápida elevação da temperatura no início do dia. Ao final do experimento, às 17h00min, a temperatura foi de 27,19 °C. As bolas de gude, com suas propriedades de refração, podem criar pontos focais de alta temperatura, enquanto a brita proporciona uma distribuição mais uniforme do calor na placa absorvedora. Como explica a pesquisa dos colaboradores Mevada *et al.* (2022), que utilizaram brita e bola de gude pintadas de preto e perceberam que este fato acontece devido aos materiais de armazenamento de calor serem adicionados na placa absorvedora de calor, o que dá a capacidade de aumentar a temperatura da água.

Figura 60: Perfis de Temperatura, com materiais fototérmicos 22/05/2024



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

No experimento realizado em 07/10/2024, foram registradas as variações de temperatura da água na placa absorvedora de calor, a temperatura do vidro externo e a temperatura ambiente, em função da taxa de radiação solar incidente nos destiladores D1, D2 e D3, de forma comparativa. A radiação solar iniciou-se às 07h00min com uma intensidade de 110 W.m⁻² e a temperatura da água na placa absorvedora dos três destiladores era de 24.7 °C e velocidade do vento 1,5 (m/s).

A Figura 61, refere-se aos resultados obtidos experimentalmente para o destilador (D1), têm-se que a temperatura da água na placa absorvedora, sem a presença de material de armazenamento térmico, no horário entre 07h00min às 12h00min aumentou gradativamente conforme a incidência da radiação solar no destilador, chegando ao pico maior de registro de temperatura às 12h00min de 58,44 °C, com a maior taxa de radiação registrada neste dia foi de 1222 W.m⁻².

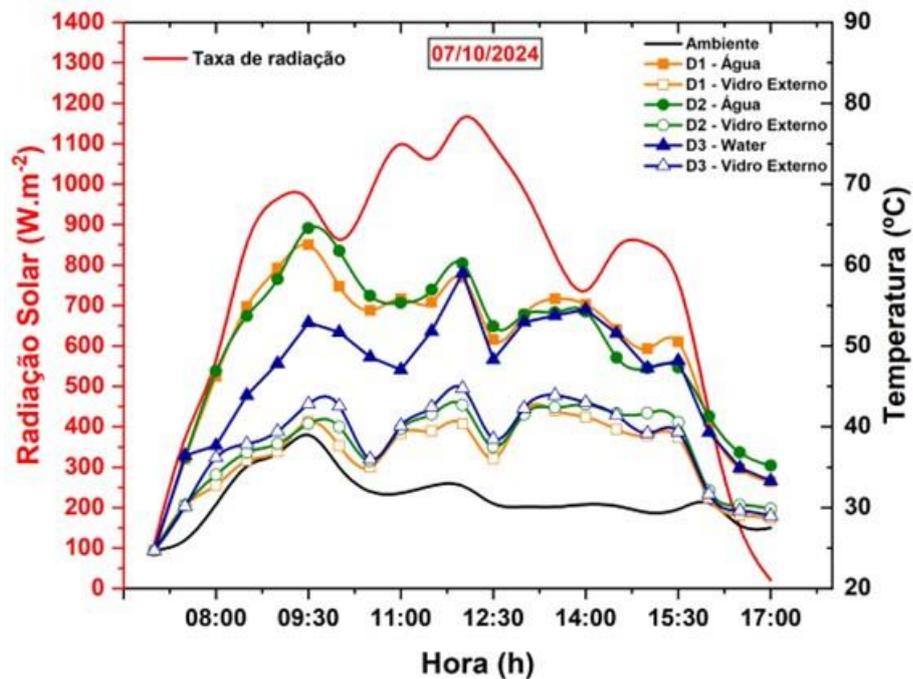
Os dados experimentais para o destilador D2, evidenciando que a temperatura da água na placa absorvedora, equipada com material de armazenamento térmico, especificamente brita, aumentou gradativamente de 24,7 °C para 60,19 °C. O maior pico de temperatura foi registrado às 12h00min, coincidente com a maior incidência solar. Nota-se que a temperatura da água aumenta gradualmente seguindo o perfil de intensidade solar, fato que justifica na pesquisa dos autores (El-Said; Elshamy; Kabeel, 2020). Ainda na Figura 61, no final da tarde, com a taxa de radiação solar reduzida para 21 W.m⁻², a temperatura da água ainda se manteve em 35,19 °C, o que se deve à densidade e à alta capacidade térmica da brita que pode armazenar grandes quantidades de calor ao longo do dia, liberando-o gradualmente conforme a radiação solar diminui. Isso resulta em uma maior estabilidade térmica no destilador, prolongando o processo de evaporação e condensação da água. A brita é resistente a variações extremas de temperatura, o que a torna um material ideal para aplicações a longo prazo em destiladores solares. De acordo com Palacios et al. (2020) a brita possui propriedade termofísica de alta confiabilidade térmica e estabilidade a longo prazo, mesmo após vários ciclos de operação. Conforme Mahala e Sharma (2024) relatou aumento de temperatura nos seus experimentos realizados, desta forma comprova esse resultado do presente estudo do aumento de temperatura da água na placa absorvedora e na produtividade com a introdução de materiais de armazenamento de calor.

No Destilador (D3) integrado com as bolas de gudes, a temperatura da água na placa absorvedora, às 12h00min apresentou 59,01 °C, sendo o horário de maior incidência e conseqüentemente o pico maior de temperatura da água, os destiladores dão resposta térmica rápida, com a radiação solar alta, maximizando a temperatura da água, durante o pico de incidência solar. Em comparação com a brita, as bolas de gude têm uma menor capacidade de armazenamento térmico, o que significa que elas aquecem e esfriam mais rapidamente. Esses resultados corroboram com Nasri *et al.* (2018) afirmam que os materiais de armazenamento de calor são de grande importância para melhoria do sistema.

Neste experimento, as temperaturas da água da placa absorvedora dos destiladores conseguiram atingir acima de 50°C. Os materiais de armazenamento de calor desempenharam um papel fundamental na inativação de coliformes totais, a capacidade de reter e liberar calor

ao longo do tempo é essencial para inativação. Estudos demonstram que esses microrganismos são progressivamente inativados quando expostos a temperaturas superiores a 55-60°C. Acredita-se que os raios ultravioletas (UV) do sol, geralmente entre 100–400 nm, destroem o mapa genético das bactérias presentes na água de alimentação, atacando seu DNA. O UV requer apenas menos de 10s para inativar patógenos na água potável (Isah *et al.*, 2024).

Figura 61: Perfis de Temperatura, com materiais fototérmicos 07/10/2024



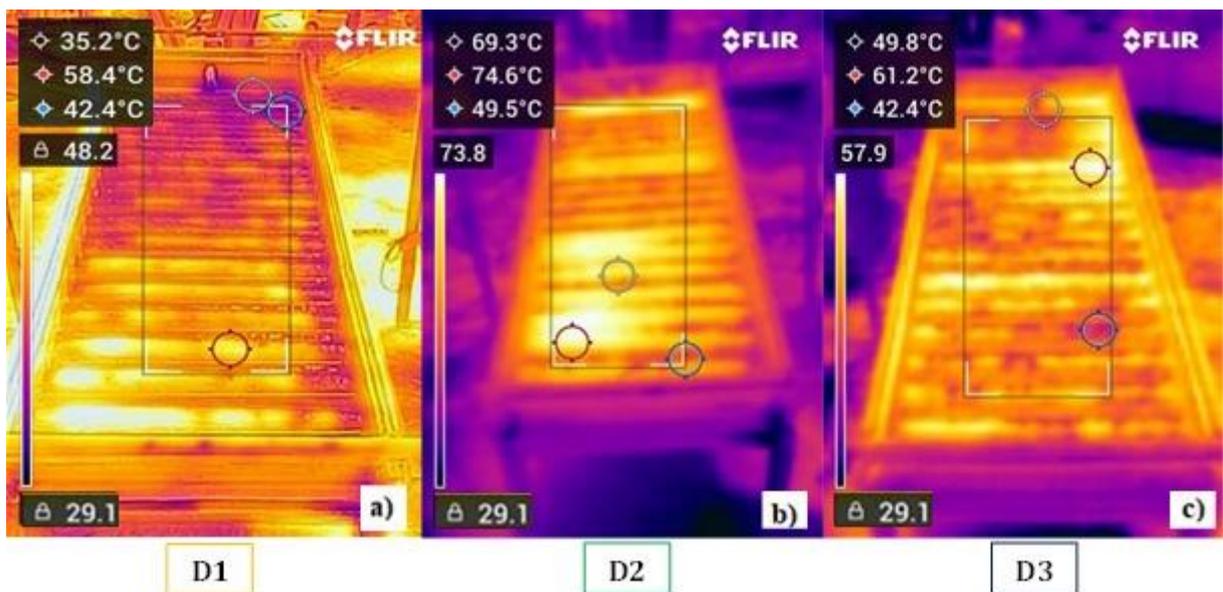
Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

As leituras das distribuições das temperaturas nos destiladores abertos (sem a cobertura de vidro) podem ser vistas na Figura 62. Observa-se na Figura 62(a) o D1 sem material adicional, mostrando-se temperaturas menores da placa absorvedora de calor, quando comparado com os outros destiladores (D2 e D3), apresentou temperatura mínima de 35,2 °C, média 58,4 °C e máxima de 42,4 °C. Na Figura 62(b) o D2 destaca temperaturas mais altas, esse fato pode ser justificado pelo uso da brita na placa absorvedora de calor, pois a brita possui capacidade de armazenar e liberar calor, mantendo a superfície da placa absorvedora aquecida por mais tempo, registrou mínima, média e máxima de 69,3 °C, 74,6 °C, 49,5 °C, respectivamente. Na Figura 62(c) visualiza o D3, com bolas de gude, apresentando temperaturas intermediárias sendo mínima, média e máxima nos valores de 49,8 °C, 61,2 °C,

42,4 °C, respectivamente, com temperaturas superiores ao D1, isso pode ser explicado pela bola de gude possuir menor condutividade térmica em comparação à brita.

A análise térmica exibe através da Figura 62 (a, b e c) que o uso de materiais de armazenamento de calor na placa absorvedora como brita (D2) e bolas de gude (D3) melhora significativamente o desempenho térmico de destiladores solares. Destaca-se a brita por ser um material poroso e mais eficiente do que a bola de gude, sendo uma boa estratégia para contribuir no aumento da eficiência do sistema de destilação, e eliminando microrganismos presentes nas águas, por conta das altas temperaturas registradas. De acordo com Egiza *et al.* (2024) os materiais porosos e com superfícies irregulares podem absorver energia solar e consequentemente elevar as temperaturas da água e taxa de evaporação.

Figura 62: Imagens térmicas dos destiladores abertos. (a) (D1) sem material fototérmico. (b) (D2) com brita. (c) (D3) com bola de gude.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

7.6 TESTES DE PRODUÇÃO DOS DESTILADORES COM OS MATERIAIS FOTOTÉRMICOS

A Figura 63 apresenta uma comparação da produção de água destilada horária em função da radiação solar dos três destiladores sendo, o D2 e D3 com os materiais fototérmicos. Iniciou-se com a taxa de radiação de 104 W.m^{-2} de 07h00min de forma crescente aumentando essa incidência solar nos destiladores ao passar de horas. Desta forma ao mesmo tempo que a radiação solar atua como fonte de energia para o processo de aumentar as temperaturas dos destiladores, elevam também a produtividade.

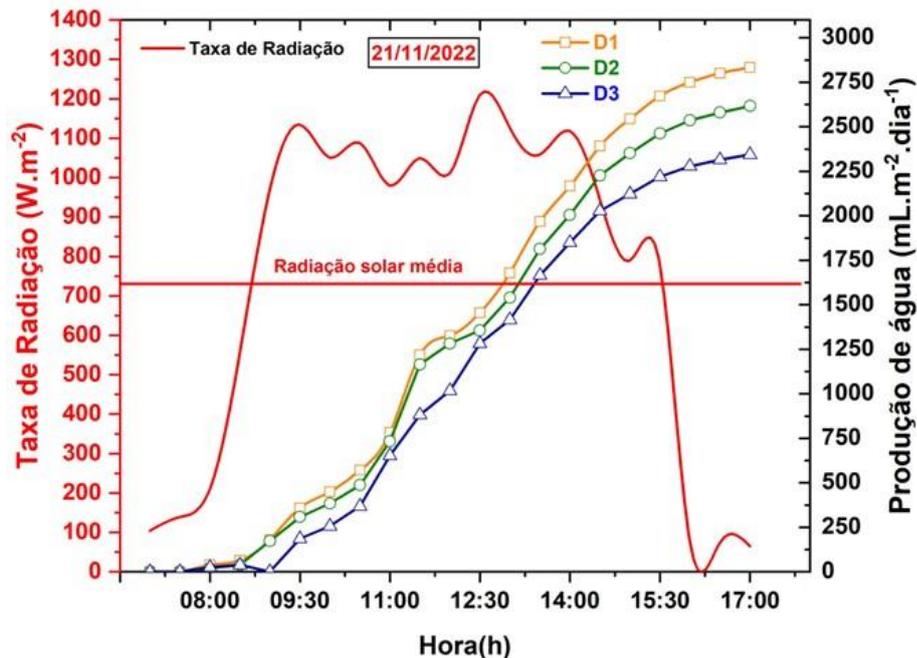
A produtividade do destilador solar aumentou conforme o tempo foi passando e a taxa de radiação incidente. A radiação solar máxima para ambos os destiladores foi de 1210 W.m^{-2} no horário de 12h30min, com a produção neste horário crescente de 1455 mL.m^{-2} no D1, no D2 1356 mL.m^{-2} e no D3 1282 mL.m^{-2} .

Conforme relatado por vários pesquisadores o uso de materiais fototérmicos aplicado na destilação solar consegue ter um rendimento maior por armazenar calor (Negi *et al.*, 2021; Khatod; Katekar; Deshmukh, 2022; Shah *et al.*, 2023). Neste dia observa-se na figura que a taxa de radiação e a produção de água foram eficientes, apesar de alguns momentos de sombreamento os destiladores conseguiram resultados satisfatórios.

O destilador D1 conseguiu ter maior produtividade de água do que os outros dois destiladores com os materiais fototérmicos, mas comparando os destiladores com os materiais de armazenamento de calor com o outro dia de experimento no mesmo horário e com a mesma taxa de radiação incidente eles conseguiram ter maior produtividade do que os experimentos sem materiais fototérmicos, fato que explica Manokar, Murugavel e Esakkimuthu, 2014, que utilizar materiais de armazenamento térmico faz com que se tenha um aumento na produtividade, por conta da dificuldade de perder o calor do Dessalinizador.

Para a produção de água destilada acumulada dos destiladores no final do dia apresentaram no D1 2833 mL.m⁻², no D2 com a brita 2616 mL.m⁻² e no D3 com a bola de gude 2344 mL.m⁻², para uma radiação média diária de 731,71 W.m⁻². Portanto o D1 produziu 8% a mais que o D2 e 18% a mais do que o D3. Conseguindo ter maior produtividade com a introdução destes materiais neste experimento do que nas pesquisas dos autores (Arunkumar; Kabeel, 2017; Kumar *et al.*, 2022) que também utilizaram outros tipos de materiais de armazenamento de calor. Nota-se que a colocação dos materiais fototérmicos aumentou a eficiência dos destiladores quando comparados sem a presença dos materiais fototérmicos. Portanto comparando os destiladores (D2 e D3) que foram incorporados os materiais fototérmicos os mesmos tiveram um acréscimo na produção de água de 3 e 11% respectivamente.

Figura 63: Produção de água, com materiais fototérmicos 21/11/2022



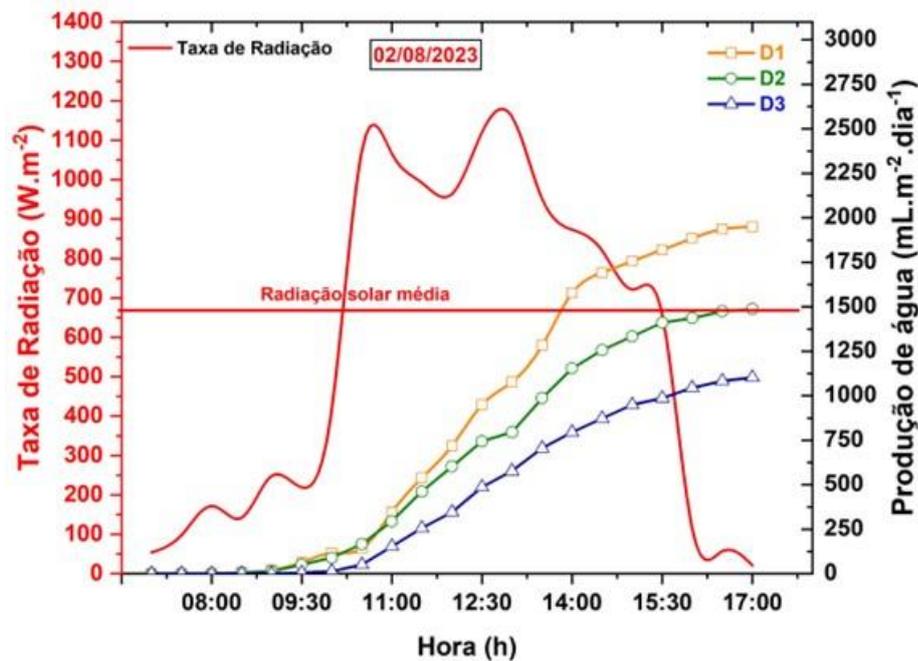
Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

A Figura 64 corresponde a um comparativo da produção de água destilada horária em função da radiação solar dos três destiladores sendo que dois deles contendo materiais fototérmicos. O volume de água produzido acompanha as variações de temperaturas, em que há o acúmulo gradativo da quantidade de água destilada. O rendimento de água destilada iniciou-se a partir das 8h30min, neste experimento a radiação solar máxima para ambos os

destiladores foi de 1160 W.m^{-2} no horário de 13h00min, com a produção neste horário crescente de 1077 mL.m^{-2} no D1, no D2 795 mL.m^{-2} e no D3 577 mL.m^{-2} . A produtividade do destilador solar aumentou conforme o tempo foi passando e a incidência da radiação solar. Para a produção de água destilada acumulada dos destiladores no final do dia, considerando uma radiação solar média diária de 657 W.m^{-2} , apresentaram no D1 1948 mL.m^{-2} , no D2 com a brita 1487 mL.m^{-2} e no D3 com a bola de gude 1102 mL.m^{-2} .

Sungcad e Loretero (2019) conduziram um experimento utilizando água salobra, onde obteve dos destiladores solares com areia como meio de armazenamento de calor, uma média diária do rendimento de água de 395 mL.m^{-2} , diante do exposto o sistema de destilação desse estudo obteve maior rendimento de água ao dia, com a brita e a bola de gude como meio de armazenamento de calor.

Figura 64: Produção de água, com materiais fototérmicos 02/08/2023

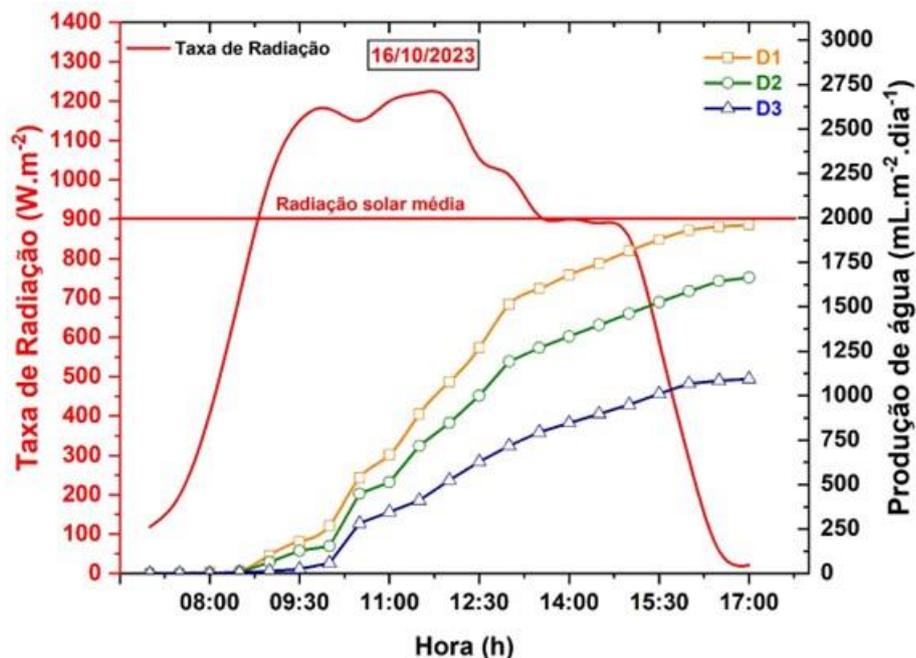


Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

No experimento demonstrado na Figura 65, foi registrada uma média de radiação solar incidente de 900 W.m^{-2} para ambos os destiladores, com uma taxa inicial de 118 W.m^{-2} às 07h00min, aumentando gradualmente ao longo do tempo. A produtividade dos destiladores solares cresceu em função da radiação solar e ao longo do dia, atingindo um pico de incidência de 1210 W.m^{-2} às 11h30min, nesse horário, a produtividade horária foi de 897 mL.m^{-2} no D1, 717 mL.m^{-2} no D2 e 410 mL.m^{-2} no D3. Devido à boa taxa de radiação registrada, os

destiladores apresentaram uma produtividade final significativa, alcançando 1961 mL.m^{-2} no D1, 1664 mL.m^{-2} no D2 e 1093 mL.m^{-2} no D3. Ao comparar esses resultados com os de outros estudos que utilizaram diferentes materiais de armazenamento de calor, observou-se que, apesar de D2 que utilizou a brita e D3 a bola de gude, normalmente apresentarem menor produtividade em comparação com o D1, em outros dias de experimentos com a média da taxa de radiação solar semelhante mostrou neste experimento que atingiram bons resultados, destacando a brita como um excelente material fototérmico. As propriedades dos materiais de calor sensível são especialmente adequadas para a destilação solar, tendo resultados satisfatórios na inativação de coliformes termotolerantes e *Escherichia coli* entre esses materiais, a brita se sobressai por sua boa capacidade calorífica volumétrica, permitindo que a água na placa absorvedora de calor seja aquecida de 40 a $80 \text{ }^\circ\text{C}$ durante os períodos de maior incidência de radiação solar, resultando em um excelente desempenho na produtividade. (Chauhan; Shukla; Rathoredestaca, 2022).

Figura 65: Produção de água, com materiais fototérmicos 16/10/2023

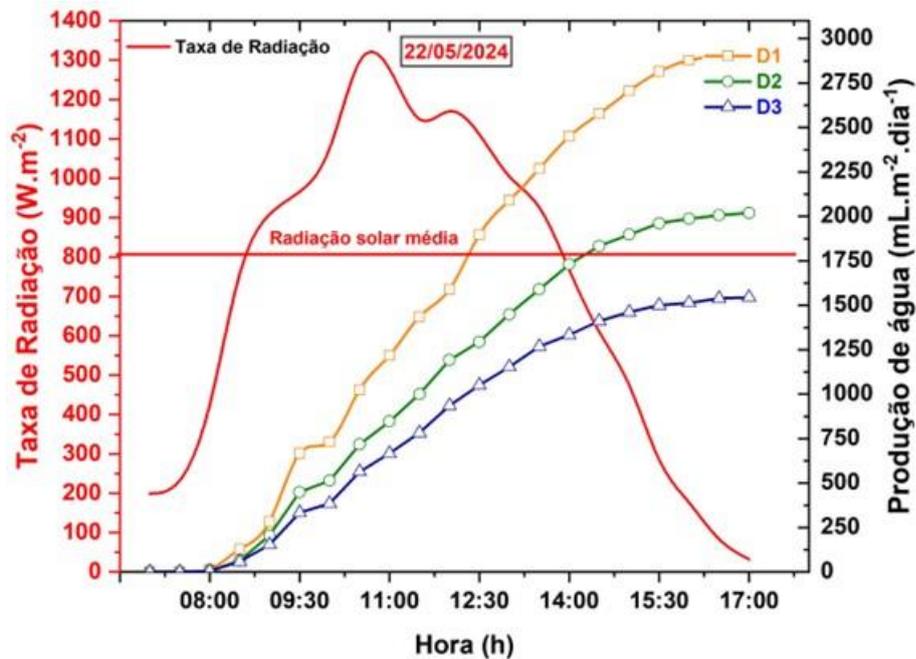


Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

A Figura 66 nota-se o volume de água destilada produzido ao longo do experimento acompanhou as variações de temperatura, resultando em um acúmulo gradual da quantidade de água coletada. O experimento começou às 07h00min com uma taxa de radiação de 199 W.m^{-2} , que foi aumentando progressivamente à medida que as horas avançavam. A produção de água

destilada iniciou-se às 08h30min, com valores de 128,20 mL.m⁻² no D1, 64,10 mL.m⁻² no D2 e 57,69 mL.m⁻² no D3, aumentando de forma contínua até o final do experimento, às 17h00min. A radiação solar máxima para ambos os destiladores foi registrada às 10h30min, de 1360 W.m⁻², momento em que a produção de água destilada alcançou 1025,64 mL.m⁻² no D1, 717,94 mL.m⁻² no D2 e 564,10 mL.m⁻² no D3. Com média da radiação solar de 809 W.m⁻². No final do experimento, a produtividade acumulada foi de 2929 mL.m⁻² no D1, 2019 mL.m⁻² no D2 e 1544 mL.m⁻² no D3. Verifica-se que a incorporação de materiais fototérmicos nos destiladores D2 e D3, elevou significativamente sua eficiência. Observa-se no D2 com a inserção da brita que a capacidade térmica pode armazenar grandes quantidades de calor ao longo do dia, liberando-o gradualmente conforme a radiação solar diminui, resultando uma maior estabilidade térmica no destilador que prolonga o processo da água de evaporar e condensar. A brita possui alto porosidade e este fato os pesquisadores Katekar, Rao e Sardeshpande, (2023) relataram que os materiais com estruturas porosas conseguem maximizar a área de contato com a radiação solar, que de forma benéfica aumenta a temperatura da água, consequentemente, prolongam as horas de trabalho aumentando a eficácia junto com a eficiência e inativando os microrganismos na água destilada pelo o aumento da temperatura.

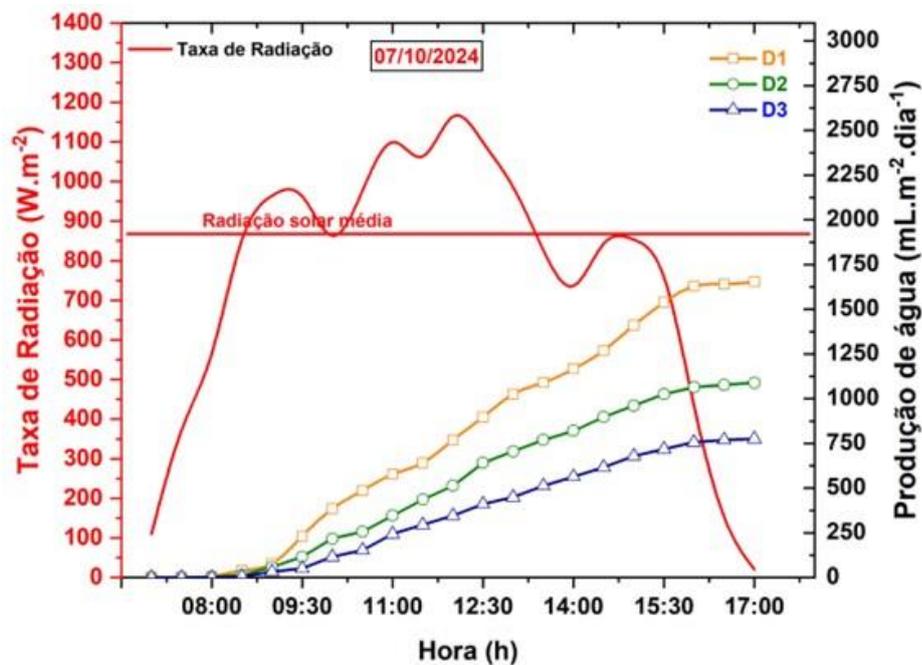
Figura 66: Produção de água, com materiais fototérmicos 22/05/2024



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Observa-se na Figura 67 uma comparação da produção horária de água destilada em relação à radiação solar para os três destiladores, sendo que o D2 e o D3 utilizam materiais fototérmicos. A radiação solar iniciou-se em 110 W.m^{-2} às 07h00min e aumentou gradualmente ao longo das horas, intensificando a incidência solar nos destiladores. Assim, pode-se observar que a intensidade da radiação solar máxima foi de 1222 W.m^{-2} , medida às 12h00min com a produção neste horário crescente de 769 mL.m^{-2} no D1, no D2 512 mL.m^{-2} e no D3 346 mL.m^{-2} . A intensidade solar média foi calculada como 855 W.m^{-2} para todo o período experimental, conseguindo inativar os microrganismos, conforme a pesquisa de Nascimento *et al.* (2018) com um destilador em escala piloto, que também conseguiu inativar os microrganismos, através da radiação solar. A temperatura ambiente variou de $24,7 \text{ }^\circ\text{C}$ a $39,1 \text{ }^\circ\text{C}$, apresentou sombreamento em alguns momentos durante o experimento, mas a produção acumulada de água destilada ao final do dia foi de 1654 mL.m^{-2} no D1, 1090 mL.m^{-2} no D2 com brita, e 776 mL.m^{-2} no D3 com bola de gude, o volume produzido de água acompanhou as variações de temperaturas, juntamente com a taxa de radiação solar, onde ocorreu o acúmulo gradativo da quantidade de água destilada dos destiladores.

Figura 67: Produção de água, com materiais fototérmicos 07/10/2024



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Na Tabela 9, são apresentados os resultados dos dias de experimento sobre a produtividade dos destiladores solares, com a inserção de materiais fototérmicos nos destiladores D2 (Brita) e D3 (Bola de Gude), para fins comparativos.

Tabela 9: Resultados comparativos da produtividade de água dos destiladores com materiais fototérmicos no D2 (Brita) e D3 (Bola de Gude).

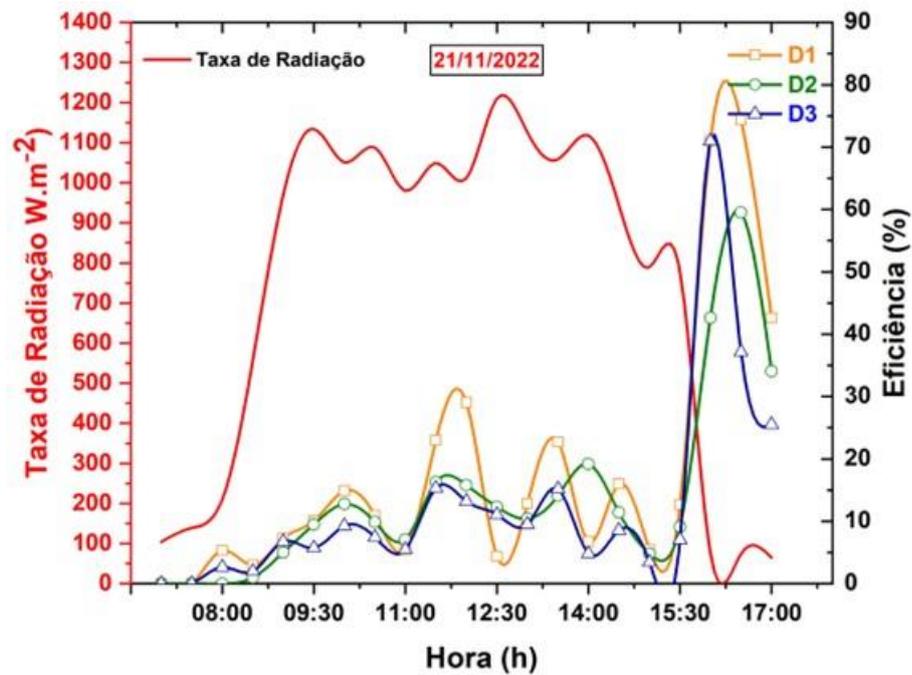
<i>EXPERIMENTOS</i>	<i>D1</i>	<i>D2</i>	<i>D3</i>
<i>Dia 21/11/2022</i>	2833 mL. m ⁻²	2616 mL.m ⁻²	2344 mL.m ⁻²
<i>Dia 02/08/2023</i>	1948 mL. m ⁻²	1487 mL.m ⁻²	1102 mL.m ⁻²
<i>Dia 16/10/2023</i>	1961 mL. m ⁻²	1664 mL.m ⁻²	1093 mL.m ⁻²
<i>Dia 22/05/2024</i>	2929 mL. m ⁻²	2019 mL.m ⁻²	1544 mL.m ⁻²
<i>Dia 07/10/2024</i>	1653 mL. m ⁻²	1089 mL.m ⁻²	775 mL. m ⁻²

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

7.7 EFICIÊNCIA DOS DESTILADORES COM MATERIAIS FOTOTÉRMICOS

Temos na Figura 68 a variação da eficiência horária dos D1, D2 e D3 com os materiais fototérmicos inseridos nos destiladores D2 e D3, em relação ao horário de operação e radiação solar constata-se que as eficiências por volta das 16h30min apresentaram um pico maior de eficiência neste horário, apresentando 74,36% para o D1, enquanto o D2 e D3 apresentaram valores máximos de eficiência diária 58,10% e 58,01% respectivamente, esses valores apresentaram mesmo com a menor taxa de incidência solar de 74 W.m⁻² ao fim da coleta de dados. O uso dos materiais fototérmicos inseridos nos destiladores, sendo a brita e a bola de gude, observa-se um aumento na eficiência do D2 e D3 comparados com a etapa sem uso de materiais de armazenamento de calor, isso acontecendo pelo fato da energia térmica acumulada no interior dos destiladores. Na pesquisa de Shafii *et al.* (2016), conseguiram uma eficiência com materiais de armazenar calor de 52%. Younes *et al.* (2022) com materiais de armazenamento de energia térmica conseguiram obter de eficiência 56,5% e sem materiais 34,5%. Com material de mudança de fase Katekar e Deshmukh, (2020) conseguiram eficiência térmica de 40%. Elashmawy e Ahmed (2021) utilizaram materiais de armazenamento térmico e alcançaram 20,06% de eficiência térmica.

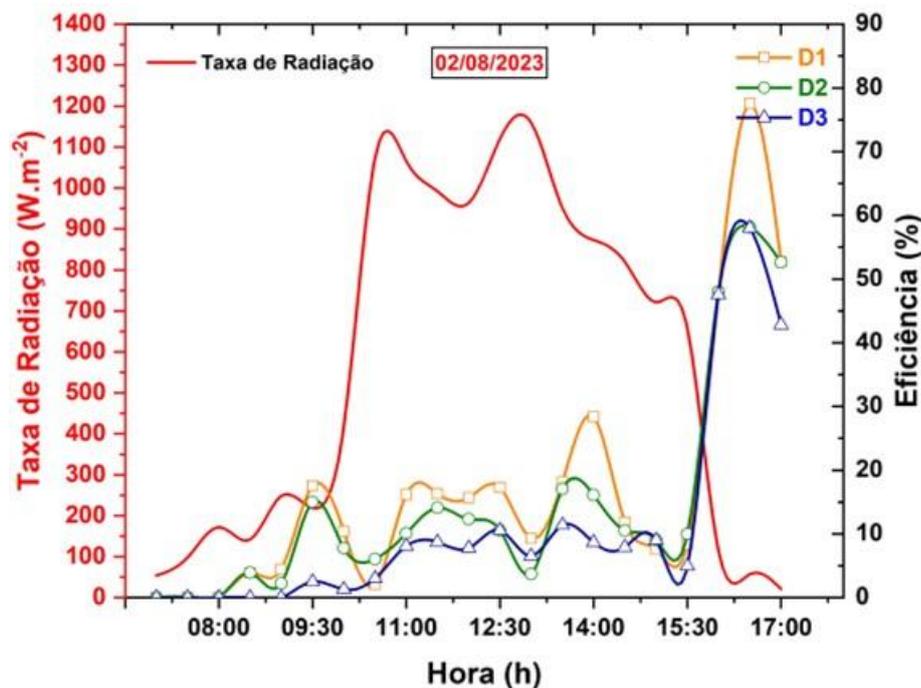
Figura 68: Eficiência dos destiladores com os materiais fototérmicos (21/11/2022).



Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Percebe-se na Figura 69 a variação da eficiência horária dos destiladores D1, D2 e D3, considerando os materiais fototérmicos utilizados nos destiladores D2 e D3, em função do horário de operação e da radiação solar. Observa-se que, por volta das 16h30min, com a taxa de radiação de 57 W.m^{-2} no final do experimento, as eficiências atingiram seu pico, com o D1 registrando 77,52% e os destiladores D2 e D3 alcançando eficiências máximas diárias de 58,14% e 58,02%, respectivamente. A eficiência de materiais fototérmicos, como brita e bola de gude, dentro de um destilador de água solar é fundamental para entender a dinâmica de armazenamento e transferência de calor, que aumenta a eficiência do destilador. A eficiência do presente estudo é maior do que o relatado por Ebrahimpour e Shafii (2022) que registrou 44,2% com a utilização de matérias de armazenamento de calor.

Figura 69: Eficiência dos destiladores com os materiais fototérmicos (02/08/2023)

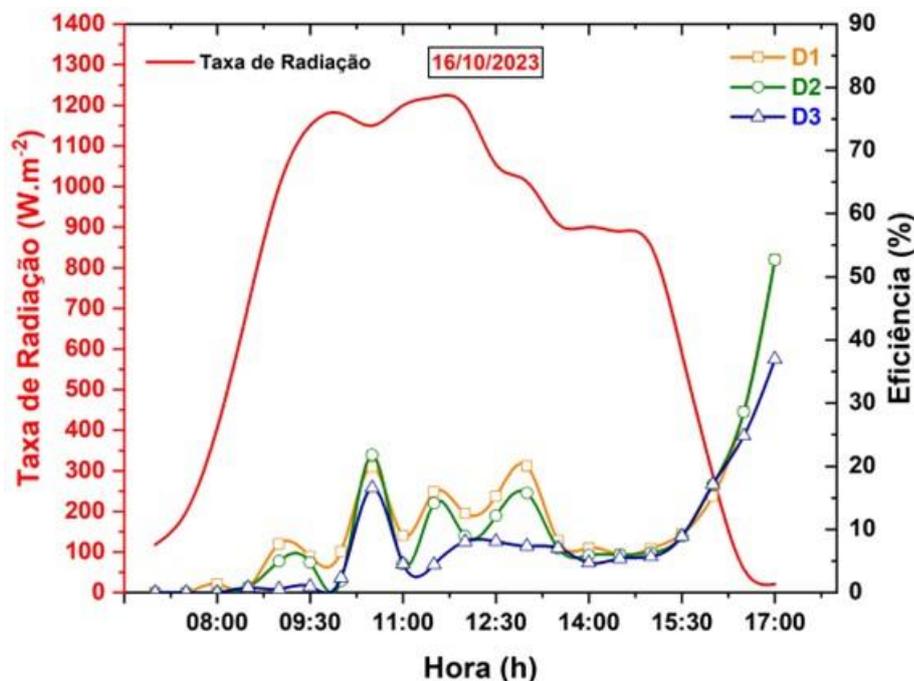


Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

A eficiência inferida na Figura 70, com a variação da eficiência horária dos destiladores D1, D2 e D3, considerando a utilização dos materiais fototérmicos nos destiladores D2 e D3, acompanhados pela taxa de radiação solar e em função do horário. Neste experimento iniciando com a temperatura ambiente de $24,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, e taxa de radiação solar nesta mesma medição de $118\text{ }W.m^{-2}$ para ambos destiladores. Nota-se às 10h30min o registro da eficiência para os destiladores, apresentando 19,92% para o D1, enquanto o D2 e D3 apresentaram 21,79% e 16,58% respectivamente. Às 17h00min, foi alcançada a eficiência máxima ao final do experimento, na última medição, com um valor de 52,78% para o D1, enquanto o D2 e D3 apresentaram 52,72% e 36,98% respectivamente, mesmo com a diminuição da incidência de radiação solar que apresentava $21\text{ }W.m^{-2}$. Isso ocorreu devido à capacidade térmica da água, que proporcionou uma taxa constante de evaporação, auxiliada pela energia térmica acumulada anteriormente no interior do destilador, principalmente dos destiladores D2 e D3 que continham materiais de armazenamento térmico distribuídos na placa absorvedora de calor e pelo excelente isolamento dos destiladores.

Neste experimento destaca-se a eficiência do D2 que estava inserido a brita, conseguiu ter maior aumento de temperatura e conseqüentemente uma boa eficiência e produtividade, acontecendo pelo fato da brita possuir maior capacidade de retenção de calor e capacidade calorífica volumétrica maior, desta forma tende a manter o calor por mais tempo dentro do destilador, liberando-o gradualmente. Isso pode ser benéfico durante períodos de baixa radiação solar, como no final da tarde, prolongando a evaporação da água. Contudo, a taxa de aquecimento inicial pode ser mais lenta devido à maior inércia térmica da brita, como aconteceu neste experimento. Balaji *et al.* (2019) destacaram o aumento da eficiência e a importância do uso de materiais de armazenamento de calor sensível em destiladores, como brita, basalto, granito e mármore. Segundo os autores Thoai *et al.* (2021) e Sibagariang *et al.* (2023), essa eficácia decorre das elevadas propriedades de armazenamento de energia térmica desses materiais, que possuem alta capacidade calorífica e rápida resposta no armazenamento de calor. Além da utilização da sustentabilidade, em relação aos materiais de armazenamento térmico para o processo térmico usado, conforme relatado por Atalay (2019) a relevância do uso sustentável.

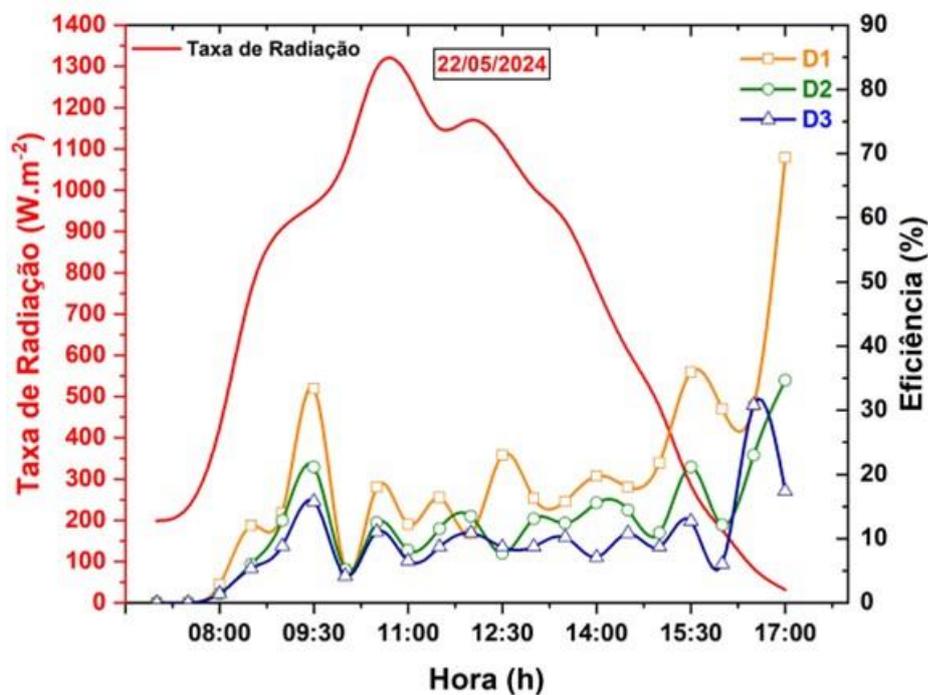
Figura 70: Eficiência dos destiladores com os materiais fototérmicos (16/10/2023)



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

É possível observar na Figura 71 a eficiência térmica horária com a taxa de radiação monitoradas durante o dia 22/05/2024. Os valores de pico maior de eficiência dos destiladores foram alcançados às 17h com 69,38% para o D1, enquanto o D2 e D3 apresentaram 34,65% e 17,38% respectivamente. A incidência de radiação média neste experimento apresentou 809 $W.m^{-2}$ para todo o período experimental, para ambos destiladores. Em relação a eficiência dos destiladores, D2 com a brita e D3 com bola de gude, nota-se evolução principalmente o D2, pois a brita possui maior calor específico em comparação ao D3 que estava com a bola de gude, pois as bolas de gude, possuem uma menor capacidade calorífica volumétrica em comparação à brita, conseguem aquecer mais rápido, o que pode resultar em uma elevação da temperatura do destilador rapidamente principalmente durante os picos de radiação solar. No entanto, sua capacidade de armazenamento de calor é menor, o que pode levar a uma queda mais rápida na eficiência do destilador à medida que a radiação solar diminui, por esse motivo explica a eficiência ser menor do que a brita.

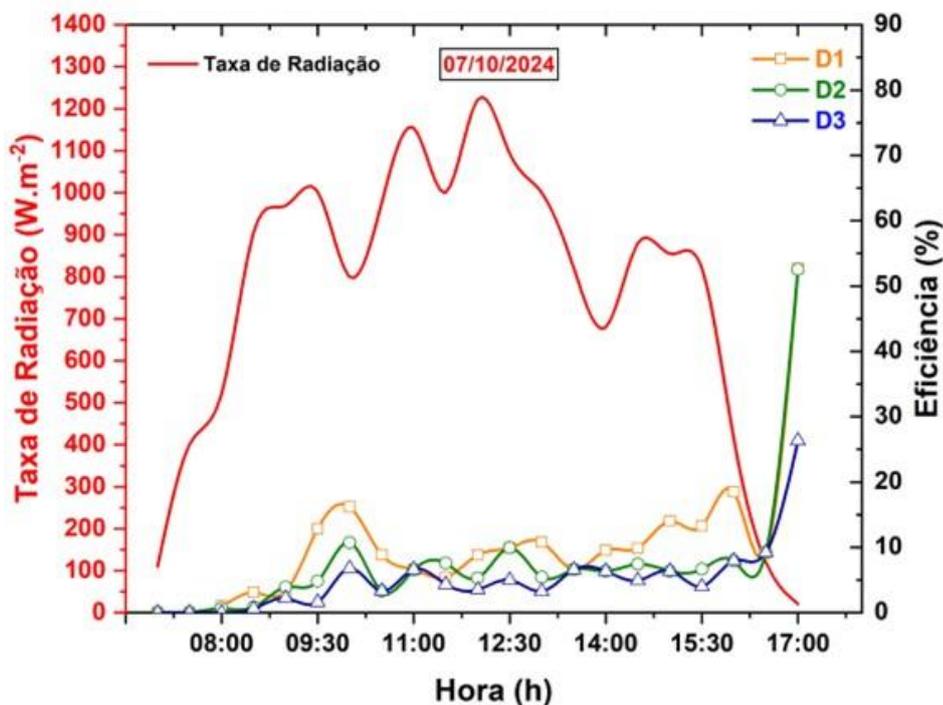
Figura 71: Eficiência dos destiladores com os materiais fototérmicos (22/05/2024)



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Constata-se na Figura 72 a variação horária da eficiência térmica dos destiladores, bem como a taxa de radiação solar registrada ao longo do dia 07/10/2024. Durante o experimento, a radiação solar atingiu um valor mínimo de 21 W.m^{-2} , observado às 17h00min, momento em que se registrou a maior eficiência térmica para o destilador D1 (52,67%). Na mesma faixa de horário, o destilador D2, com brita, apresentou eficiência de 52,57%, enquanto o destilador D3, contendo bolas de gude como material fototérmico, obteve uma eficiência de 26,33%.

Para o período experimental, a taxa média de radiação solar foi calculada em 855 W.m^{-2} . Observou-se que, entre os destiladores avaliados, o D2, utilizando brita como armazenamento térmico, apresentou uma evolução significativa na eficiência térmica em comparação ao D3, que utilizava bolas de gude. Essa diferença sugere que a brita pode melhorar a absorção e retenção de calor, contribuindo para maior eficiência do sistema de destilação solar. A brita é eficaz na retenção e transferência de calor em sistemas de destilação solar, a brita, por ser um material poroso e de alta capacidade calorífica volumétrica, permite uma maior absorção de calor, promovendo uma elevação na temperatura interna do destilador e, conseqüentemente, melhorando a evaporação da água e inativação de coliformes termotolerantes. Vários autores explicam que a eficiência da inativação está relacionada ao poder da radiação UV e da luz visível, que fazem parte do espectro solar, e à temperatura que a água atinge durante o processo, além de afirmarem que o efeito sinérgico da temperatura e a luz visível ocorre próximo a 50°C (Nascimento *et al.*, 2018). A bola de gude, tende a ser menor na eficiência em relação ao uso da brita para reter calor, pelo fato de possuir uma superfície mais lisa em comparação à brita, sendo importante considerar o perfil de radiação solar ao longo do dia e as necessidades específicas do processo de destilação balanceando entre a capacidade de aquecimento rápido e a manutenção prolongada da temperatura.

Figura 72: Eficiência dos destiladores com os materiais fototérmicos (07/10/2024)

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

A Tabela 10 apresenta uma comparação dos resultados avaliativos da eficiência máxima dos destiladores com materiais fototérmicos nos dias de experimento, nos destiladores D2 (Brita) e D3 (Bola de Gude).

Tabela 10: Resultados comparativos dos experimentos da eficiência máxima alcançada dos destiladores com materiais fototérmicos no D2 (Brita) e D3 (Bola de Gude).

<i>EXPERIMENTOS</i>	<i>D1</i>	<i>D2</i>	<i>D3</i>
<i>Dia 21/11/2022</i>	74,36%	58,10%	58,01%
<i>Dia 02/08/2023</i>	77,52%	58,14%	58,02 %
<i>Dia 16/10/2023</i>	52,78%	52,72%	36,98%
<i>Dia 22/05/2024</i>	69,38%	34,65%	17,38%
<i>Dia 07/10/2024</i>	52,67%	52,57%	26,33%

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Com o intuito de avaliar a eficiência térmica deste presente estudo que utilizou bolas de gude e britas, foi realizada uma análise comparativa com estes e diversos outros materiais fototérmicos de baixo custo realizados por alguns autores, para compreender a capacidade de desempenho térmico dessas tecnologias, onde se destacam os seguintes trabalhos, com seus

respectivos materiais fototérmicos, modelos de destiladores e locais de realização dos estudos, conforme apresentados na Tabela 11. Isso demonstra que o uso de diversos materiais fototérmicos combinados com alguns modelos de destiladores contribuem com o aumento considerável da eficiência dos sistemas de destilação via energia solar. Isso constatou que a utilização de uma nova placa absorvedora de calor fabricada em fibrocimento em conjunto com materiais fototérmicos de baixo custo nos forneceu uma excelente eficiência quando comparado a outros trabalhos.

Tabela 11: Resumo de materiais de armazenamento de energia em diferentes dispositivos solar.

Modelos de destiladores solar	Materiais fototérmicos	País	Eficiência %	Referências
Cascata	Brita	Brasil	58,14	Presente pesquisa
Cascata	Bola de gude	Brasil	58,02	Presente pesquisa
Tubular	Brita	Egito	36,34	Elashmawy, 2020
Tubular	Granito preto	Índia	21,90	Sambare <i>et al.</i> , 2022
Convencional	Esponjas	Índia	22,27	Samuel <i>et al.</i> , 2016
Convencional	Esferas de aluminio	Argélia	33,60	Attia <i>et al.</i> , 2020
Convencional	Brita	Índia	23,08	Gnanaraj; Velmurugan, 2022
Convencional	Areia	Índia	13,20	Madhu <i>et al.</i> , 2018
Convencional	Brita	Argélia	30,20	Nasri <i>et al.</i> , 2019
Convencional	Colóide à base de café	Egito	35,14	Essa <i>et al.</i> , 2020
Integrado com painel	Fibras de lã de aço preto	Egito	38,07	Abd Elbar; Hassan, 2020
Convencional	Brita	Índia	34,40	Dhivagar; Mohanraj e Belyayev, 2021.
Convencional	Bolsas de algodão com fosfato	Argélia	38,87	Attia <i>et al.</i> , 2021
Convencional	Areia e fibras de lã preta	Egito	40,70	Hassan; Abo-Elfadl, 2021
Convencional	Cilindros de carvão	Argélia	22,04	Vembu; Attia, 2023
Convencional	Bola de vidro, granito e mármore	Índia	12,55	Mevada <i>et al.</i> , 2022
Convencional	Esponjas	Iraque	23,51	Hussein <i>et al.</i> , 2023

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

7.8 MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA

7.8.1 Parâmetros Físicos – químicos

Depois de alguns testes realizados dos destiladores e ter executado a verificação da produtividade de água destilada, foi feito o levantamento dos resultados dos parâmetros físico-químicos descritos na análise da água destilada obtidas são apresentados na Tabela 12, com um comparativo entre a água Bruta e a água destilada sem os materiais fototérmicos e com os materiais, com relação aos parâmetros de potabilidade mencionados na seção 3.5. Além disso, também são apresentados os valores máximos permitidos pela legislação atual da Portaria GM/MS nº 888/2021 do Ministério da Saúde (Brasil, 2021).

Entretanto, ao analisar a água após o processo de destilação, foram obtidos resultados compatíveis com os parâmetros de potabilidade, o que confirma a eficiência dos destiladores, visto que, a condutividade elétrica, alcalinidade, cloretos, dureza total, turbidez, pH (potencial de hidrogênio iônico) e sódio não ultrapassaram os padrões de potabilidade após a destilação. Na Tabela 13 e 14, estão expostos os resultados e os parâmetros físico-químicos da água bruta e destilada dos destiladores D1, D2 e D3, bem como os valores máximos permitidos, para os três experimentos A, B e C.

Tabela 12: Resultado da análise físico-química das amostras de água bruta e destilada dos experimentos iniciais sem materiais fototérmicos nos experimentos A.

Parâmetros de controle	Água bruta	Água destilada			V.M.P.*
		D1	D2	D3	
pH	7,78	6,65	6,75	7,46	6,0 – 9,0
Condutividade elétrica (μScm^{-1})	164,0	3,15	4,33	5,66	–
Cor aparente (uH)	46,4	3,97	6,7	5,0	15,0
Cloreto ($\text{mg Cl}^{-1} \text{L}^{-1}$)	163,89	4,73	4,73	4,14	250,0
Dureza ($\text{mg CaCO}_3 \text{L}^{-1}$)	259,54	0,0	0,0	0,0	300,0
Alcalinidade ($\text{mg CaCO}_3 \text{L}^{-1}$)	923,0	11,01	12	12,71	–
Turbidez (NTU)	8,0	3,0	2,0	3,0	5,0
Sódio ($\text{mg Na}^{+} \text{L}^{-1}$)	300,0	1,0	0,0	0,0	200,0
Potássio ($\text{mg K}^{+} \text{L}^{-1}$)	31,0	0,0	0,0	0,0	–
STD (mgL^{-1})	843,34	6,67	10	3,67	500,0

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Tabela 13: Resultado da análise físico-química das amostras de água bruta e destilada sem materiais fototérmicos nos experimentos B.

Parâmetro de controle	Água bruta	Água destilada			V.M.P.*
		D1	D2	D3	
pH	7,78	6,59	6,69	6,62	6,0 – 9,0
Condutividade elétrica (μScm^{-1})	164,0	2,03	3,21	3,72	–
Cor aparente (uH)	46,4	4,57	5,77	8,47	15,0
Cloreto ($\text{mg Cl}^{-1} \text{L}^{-1}$)	163,89	4,14	5,33	4,14	250,0
Dureza ($\text{mg CaCO}_3 \text{L}^{-1}$)	259,54	0,0	0,0	0,0	300,0
Alcalinidade ($\text{mg CaCO}_3 \text{L}^{-1}$)	923,0	12,77	12,47	11,47	–
Turbidez (NTU)	8,0	3,0	2,0	2,0	5,0
Sódio ($\text{mg Na}^{+} \text{L}^{-1}$)	300,0	0,0	0,0	3,0	200,0
Potássio ($\text{mg K}^{+} \text{L}^{-1}$)	31,0	0,0	0,0	0,0	–
STD (mgL^{-1})	843,34	2,34	2,67	9,0	500,0

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

O potencial hidrogeniônico (pH) corresponde à concentração dos íons H^{+} nas águas e representa a intensidade das condições ácidas ou alcalinas da água. Desta forma os valores de pH encontrado na amostra para a água bruta foi 7,78, e após o processo de dessalinização o pH diminuiu para os três destiladores do experimento A, ficou de 6,65, 6,75 e 7,46 respectivamente, do B de 6,59, 6,69 e 6,62, do C com os valores 6,59, 6,69 e 6,62. Comparando esses dados com a Portaria GM/MS nº 888/2021 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021), que estabelece os índices ideais de pH entre 6,0 e 9,0, observa-se que as amostras apresentaram valores dentro do padrão de potabilidade. Segundo Neto (2016), o consumo de uma água muito ácida, pode causar doenças como gastrite e câncer gástrico. Resultado semelhante do estudo de Tabrizi; Dashtban e Moghaddam (2010) que obteve na análise de pH 6,5.

A condutividade elétrica está relacionada com a capacidade da água em conduzir corrente elétrica, em consequência da quantidade de sais dissolvidos na água. Quando as concentrações ultrapassarem $100 \mu\text{S/cm}$, o ambiente pode estar impactado por ações antrópicas além de que valores elevados de Condutividade elétrica podem indicar características corrosivas da água (Buzelli; Cunha-Santino, 2013). O valor encontrado para a água Bruta foi $164,0 (\mu\text{S.cm}^{-1})$, foi possível observar uma baixa condutividade elétrica nas águas após o processo de dessalinização, atingindo uma redução nos três destiladores, apresentou no experimento A do (D1) 3,15, (D2) 4,33 e (D3) 5,46 respectivamente, no experimento B, 2,03, 3,21 e 3,72 e no experimento C, 2,03, 3,21 e 3,72 respectivamente. De acordo com dados da CETESB (2020) a baixa condutividade inferior a $200 \mu\text{S.cm}^{-1}$ pode indicar água potável por

apresentar concentrações baixas de sais dissolvidos. No presente estudo a água obtida no processo de dessalinização apresentou nível inferior de $200 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ de condutividade elétrica, sendo aceitável a qualidade da água para consumo humano para este parâmetro.

A cor indica a presença de substâncias dissolvidas na água, podendo ser oriunda da decomposição da matéria orgânica e presença de ferro e manganês. A Portaria GM/MS nº 888/2021 do Ministério da Saúde estabelece para o parâmetro de cor aparente o valor máximo permitido de 15 uH (unidade de Hazen) como padrão de aceitação para o consumo humano. Na água bruta constatou-se 46,4 uH, após a destilação do presente estudo, todas encontram-se dentro dos padrões estabelecidos pela Portaria.

Os parâmetros da amostra bruta apresentaram de Dureza $259,54 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ e Alcalinidade $923,0 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$. A dureza está relacionada com a presença de sais de cálcio e magnésio na água (Xavier; Quadros; Silva, 2022). Levando em consideração a alcalinidade após o processo de dessalinização, deram valores inferiores a um estudo feito pelos autores Vinaga *et al.* (2015), realizado próximo ao Assentamento Vão Grande, que encontraram valores variando de 2,06 a $56,32 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Nesse estudo após a destilação as amostras das águas destiladas apresentaram-se dentro dos padrões de potabilidade de acordo com Portaria GM/MS nº 888/2021 do Ministério da Saúde (Brasil, 2021).

A turbidez é um parâmetro que está relacionado com a presença de sólidos em suspensão na água, que são os sólidos não dissolvidos. Conforme as exigências da portaria para a garantia da qualidade microbiológica da água, em complementação às exigências relativas aos indicadores microbiológicos, deve ser atendido o padrão de turbidez expresso no Capítulo V - do Padrão de Potabilidade do Art. 28, do Anexo 2. Com isso, a amostra bruta apresentou de turbidez 8 NTU, e após o processo de destilação, apresentaram uma redução total ficando inferiores aos limites estabelecidos pela Portaria de Consolidação, conforme no estudo Eltawil e Zhengming (2009), verificou-se o resultado de turbidez de 0.204 uT após o processo de dessalinização.

Os valores de sódio e cloreto estão de acordo com o máximo permissível pela portaria GM/MS nº 888/2021 do Ministério da Saúde. Para os cloretos foram encontrados valores abaixo do VMP que é de $250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Após passar o processo de destilação, para D1 foi obtido um valor de $4,73 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ e para D2 $4,73 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ e D3 $4,14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Além disso, um dos parâmetros mais significativo foi o sódio, que apresentou na amostra de água Bruta, no valor de $300,0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, após a destilação os destiladores apresentaram uma redução quase total do sódio na

água, apresentaram valores dentro do padrão de potabilidade. No estudo de Cardoso *et al.* (2020), um dessalinizador tipo cascata foi desenvolvido, e que também analisaram águas de poços no município de Juazeirinho – PB com valores de sódio na água salobra de $520,0 \text{ mg.L}^{-1}$. Com relação ao parâmetro potássio, a Portaria GM/MS nº 888/2021 do Ministério da Saúde não estabelece limites em água de abastecimento para consumo humano. O potássio foi encontrado nas amostras de água bruta com concentrações de $31,0 \text{ mg.L}^{-1}$. O potássio é um elemento importante para o corpo humano e, juntamente com o sódio, participam de trocas intracelulares (Queiroz; Oliveira, 2018). Após a destilação as águas destiladas do estudo encontram-se dentro do padrão esperado conseguindo uma redução total para todos os destiladores.

O valor obtido na análise de sólidos totais dissolvidos (STD) na água Bruta foi $843,34 \text{ mg.L}^{-1}$, na qual encontraram-se fora dos padrões exigidos pela legislação brasileira, que delimita valor máximo de 500 mg.L^{-1} para água potável. A concentração em excesso de STD pode oferecer risco, tornando a água desagradável ao paladar e o seu consumo pode causar o acúmulo de sais na corrente sanguínea, possibilitando a formação de cálculos renais (Buzelli; Cunha-Santino, 2013). Quanto ao valor obtido de STD da água destilada, teve uma redução de quase 100% de STD que estavam presentes, e, portanto, o parâmetro atendeu o valor determinado pela legislação vigente.

Os parâmetros físico-químicos de potabilidade obtidos na etapa do experimento C com os materiais fototérmicos são apresentados na Tabela 14, com um comparativo entre a água bruta e as águas destiladas. Na amostra de água bruta, observou-se elevados níveis dos parâmetros, e a água após o processo de destilação, foram obtidos resultados compatíveis com os parâmetros de potabilidade de acordo com a Portaria GM/MS nº 888/2021 do Ministério da Saúde. O que confirma a eficiência dos destiladores, visto que o pH, condutividade elétrica, cloretos, dureza total, alcalinidade, turbidez, sódio, potássio, STD e a cor não ultrapassaram os padrões de potabilidade após a destilação.

A salinidade mede a quantidade de sais dissolvidos nas águas, geralmente ocasionada por sais de sódio, dureza e cloretos. Para cloretos, na amostra bruta apresentou $163,89 \text{ mg Cl}^{-}\text{L}^{-1}$ e após a destilação foram reduzidos para valores menores $6,0 \text{ mg Cl}^{-}\text{L}^{-1}$.

Em relação ao sódio na amostra da água bruta apresentou alto teor, de $300,00 \text{ mg Na}^{+}\text{L}^{-1}$ e, após o experimento de destilação solar, obteve-se redução de 100%. Praticamente todos os parâmetros analisados da água bruta estavam fora dos padrões de potabilidade, o valor obtido na análise de STD foi de $843,34 \text{ mg L}^{-1}$, a cor na amostra bruta apresentou $46,4 \text{ uH}$ já nos

valores obtidos pela água destilada nos destiladores apresentando com menor valor de 8,0 uH. Da mesma forma os parâmetros que estavam com valores acima do permitido como a condutividade elétrica, alcalinidade e turbidez destaca-se para os valores após a destilação com os materiais fototérmicos apresentou abaixo de 0.5 NTU dentro dos níveis toleráveis exigidos.

Tabela 14: Resultado da análise físico-química das amostras de água bruta e destilada com materiais fototérmicos nos experimentos C.

Parâmetro de controle	Água bruta	Água destilada			V.M.P.*
		D1	D2	D3	
pH	7,78	6,59	6,69	6,62	6,0 – 9,0
Condutividade elétrica (μScm^{-1})	164,0	2,03	3,21	3,72	–
Cor aparente (uH)	46,4	8,8	8,6	8,0	15,0
Cloreto ($\text{mg Cl}^{-1} \text{L}^{-1}$)	163,89	4,73	5,91	5,92	250,0
Dureza ($\text{mg CaCO}_3 \text{L}^{-1}$)	259,54	10,6	9,34	8,01	300,0
Alcalinidade ($\text{mg CaCO}_3 \text{L}^{-1}$)	923,0	9,07	11,6	12,9	–
Turbidez (NTU)	8,0	0,23	0,59	0,59	5,0
Sódio ($\text{mg Na}^{+} \text{L}^{-1}$)	300,0	1,0	0,0	0,0	200,0
Potássio ($\text{mg K}^{+} \text{L}^{-1}$)	31,0	0,0	0,0	0,0	–
STD (mgL^{-1})	843,34	0,00	2,0	0,00	500,0

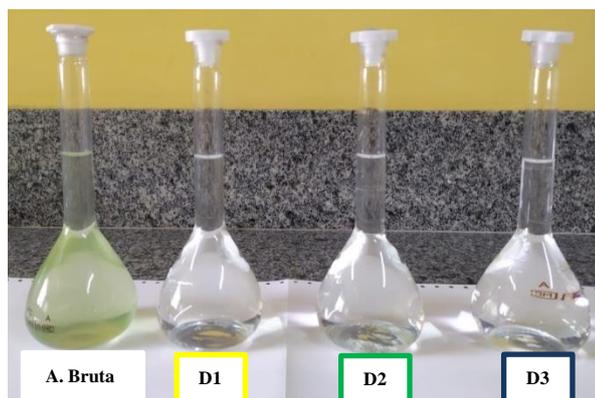
Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Água potável é aquela que não oferece riscos à saúde e que atende ao padrão de potabilidade. Analisando a amostra de água bruta, observou-se elevados níveis dos parâmetros, não estando de acordo com os valores permissíveis pela Portaria GM/MS nº 888/2021 do Ministério da Saúde (Brasil, 2021).

7.8.2 Análise visual da água destilada

Muitos fatores podem influenciar para a presença de cor na água, a análise visual prévia feita dos experimentos realizados, percebe-se nas amostras na Figura 73, que após o processo de destilação dos destiladores (D1, D2 e D3) apresentaram cor límpida, diferenciando da água bruta que apresentou cor verde.

Figura 73: Água bruta e as destiladas.



Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

7.8.3 Análises bacteriológicas

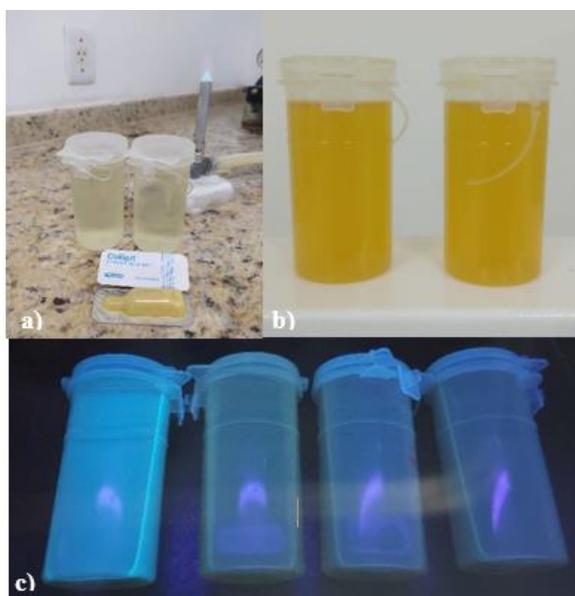
7.8.3.1 Coliformes Totais; Coliformes Termotolerantes (*Escherichia coli*)

O destilador solar destinado à água potável deve ter eficiência de remoção de 100% para coliformes totais e ausência de *Escherichia coli*. Ao analisar a qualidade microbiológica das águas bruta e destiladas por diferentes métodos, tais como no teste presença/ausência, na técnica da membrana filtrante e no método quantitativo da cartela, constatou-se que as amostras brutas apresentaram resultados positivo para coliformes totais e *Escherichia coli*, e após o processo de destilação dos três destiladores, todos os métodos realizados, apresentaram 100% de remoção de coliformes totais e *Escherichia coli*.

7.8.3.2 Teste de Presença - Ausência (P/A)

No teste de (P/A) as amostras positivas para coliformes totais apresentaram com amarelo turvo nas células. Na presença de *Escherichia coli* formou-se uma fluorescência azul na câmara escuro sob a luz UV (365 nm). Conforme mostrado na Figura 74 e a tabela 15 com os resultados referentes as análises bacteriológicas das amostras de água bruta e destiladas de presença/ausência. As amostras destiladas apresentaram 100% de inativação de coliformes totais e *Escherichia coli*.

Figura 74: Teste de P/A para identificação de coliformes totais e *Escherichia coli* da amostra bruta e destilada. (a) inserido o teste para P/A. (b) positivo para coliformes totais (c) positivo para *Escherichia coli* na amostra bruta e negativo para destiladas sob câmera UV (366 nm).



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Tabela 15: Resultados referentes as análises bacteriológicas das amostras de água bruta e destiladas de presença/ausência de coliformes totais e *Escherichia coli* em 100ml de água.

Experimentos	Água Bruta	Água destilada		
		D1	D2	D3
	Microrganismo			
	Coliformes totais/ <i>Escherichia coli</i>			
Experimento 1	Presente/Presente	Ausente /Ausente	Ausente /Ausente	Ausente /Ausente
Experimento 2	Presente/Presente	Ausente /Ausente	Ausente /Ausente	Ausente /Ausente
Experimento 3	Presente/Presente	Ausente /Ausente	Ausente /Ausente	Ausente /Ausente
Experimento 4	Presente/Presente	Ausente /Ausente	Ausente /Ausente	Ausente /Ausente

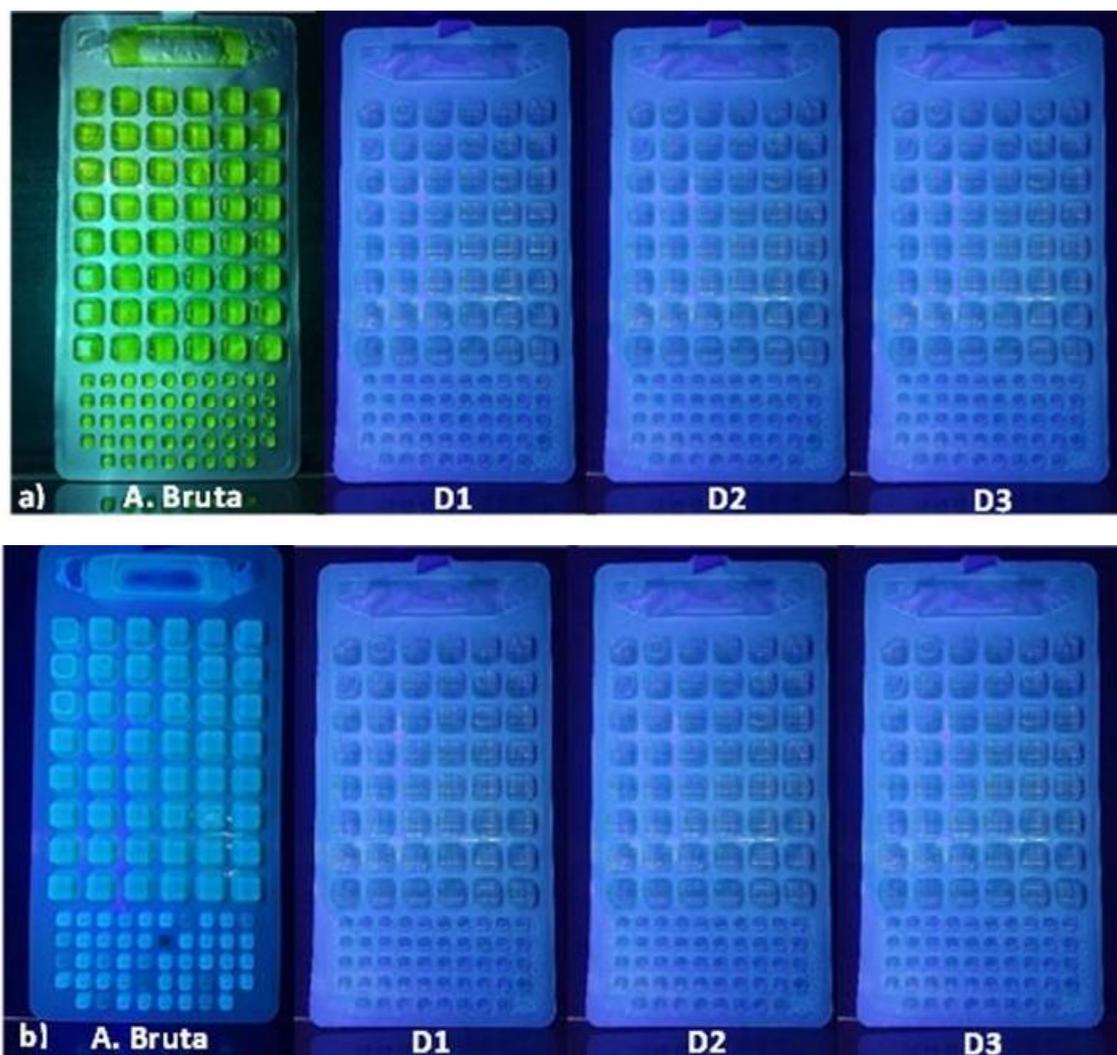
Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

7.8.3.3 Técnica em cartelas (quantitativo e qualitativo - NMP)

Após incubação, observou-se o qualitativo da água bruta e destilada, primeiro se houve mudança da cor do meio para amarelo turvo nas células, o que significa coliformes totais positivos e depois verificou-se a mesma cartela sob câmera UV (366 nm), a presença de fluorescência azul confirma *Escherichia coli*. A Figura 75 (a e b) apresentam as cartelas, com

células positivas para coliformes totais e *Escherichia coli* nas amostras brutas, e ausente nas destiladas.

Figura 75: a) amostra de água bruta e destilada com teste positivo para coliformes e negativa nas destiladas dos (D1; D2 e D3); b) amostra de água bruta e destilada sob luz UV, com teste positivo na bruta e negativo nas destiladas dos (D1; D2 e D3) para *Escherichia coli*.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

No resultado quantitativo de coliformes totais e *Escherichia coli* em 100ml de água, realizou a contagem dos positivos de coliformes e positivos de *Escherichia coli* o resultado da contagem é demonstrado na Tabela 16). A partir dos resultados analisados, pode-se concluir que os destiladores solares foram eficientes e capazes para inativar completamente coliformes totais e *Escherichia coli*.

Tabela 16: Resultados quantitativos referentes as análises bacteriológicas das amostras de água bruta e destiladas de coliformes totais e *Escherichia coli* em 100ml de água.

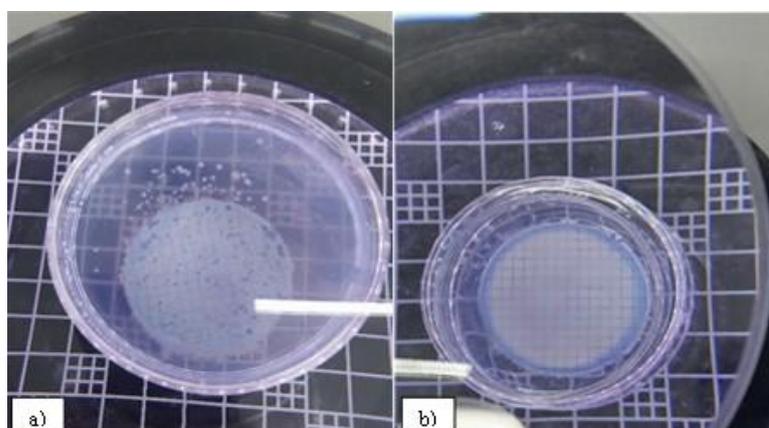
Experimentos	Água Bruta		Água destilada					
	Coliformes totais	<i>Escherichia coli</i>	Microrganismo					
			D1		D2		D3	
		Coliformes totais/ <i>Escherichia coli</i>						
Experimento 1	1732.9 NMP/100ml	1553.1 NMP/100ml	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Experimento 2	1986,30 NMP/100ml	1986,3 NMP/100ml	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Experimento 3	>2419.6 NMP/100ml	1986,3 NMP/100ml	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Experimento 4	>2419.6 NMP/100ml	2419,6 NMP/100ml	<1	<1	<1	<1	<1	<1

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

7.8.3.4 Técnica da Membrana filtrante

As placas contendo amostras da água destilada dos destiladores não apresentaram crescimento bacteriano na presença em meio ágar nutriente, verificou-se 100% de remoção de coliformes totais e de *Escherichia coli* visto na Tabela 17, e as amostras brutas apresentaram, com isso foram submetidas a contagem de unidades formadoras de colônia (UFC) mostrado na Figura 76 a e b), com resultado expresso em maior que 500 UFC/mL para a amostra bruta, onde foi necessário diluições da amostra bruta em (10^{-2} , 10^{-3} e 10^{-4}).

Figura 76: Contagem de unidades formadoras de colônia (UFC) **a)** apresentou colônias na amostra bruta **b)** sem colônias na destilada



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

As amostras destiladas dos três destiladores (D1, D2, D3) analisadas estão em conformidade com a regulamentação, uma vez que não foi detectada a presença de coliformes totais, nem *Escherichia coli*, em nenhuma delas, visto a presença na amostra bruta de coliformes totais e *Escherichia coli*. Desta forma, o modelo do destilador neste presente estudo é eficaz no tratamento de água para consumo humano.

Tabela 17: Resultados referentes as análises bacteriológicas das amostras de água bruta e destiladas da técnica da membrana filtrante da contagem viáveis de colônias de coliformes totais e *Escherichia coli*

Experimentos (UFC/100mL)	Água Bruta (UFC/100mL)			Água destilada		
				D1	D2	D3
Microrganismos						
Coliformes totais/<i>Escherichia coli</i>						
	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}
Experimento 1	$1,2 \times 10^4$	6×10^4	3×10^5	< 1 (Ausente)	< 1 (Ausente)	< 1 (Ausente)
Experimento 2	$1,2 \times 10^4$	6×10^4	2×10^5	< 1 (Ausente)	< 1 (Ausente)	< 1 (Ausente)
Experimento 3	$1,6 \times 10^4$	8×10^4	3×10^5	< 1 (Ausente)	< 1 (Ausente)	< 1 (Ausente)

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

De acordo com a legislação, no Anexo 1 do Anexo XX, a ÁGUA TRATADA (Sistemas ou soluções alternativas coletivas), com abastecimento inferior de 20.000 habitantes, apenas uma amostra, entre as amostras examinadas no mês pelo responsável pelo sistema ou por solução alternativa coletiva de abastecimento de água, poderá apresentar resultado positivo, neste estudo apenas a água bruta apresentou coliformes totais, e nas amostras de água destilada dos três destiladores não apresentaram coliformes totais.

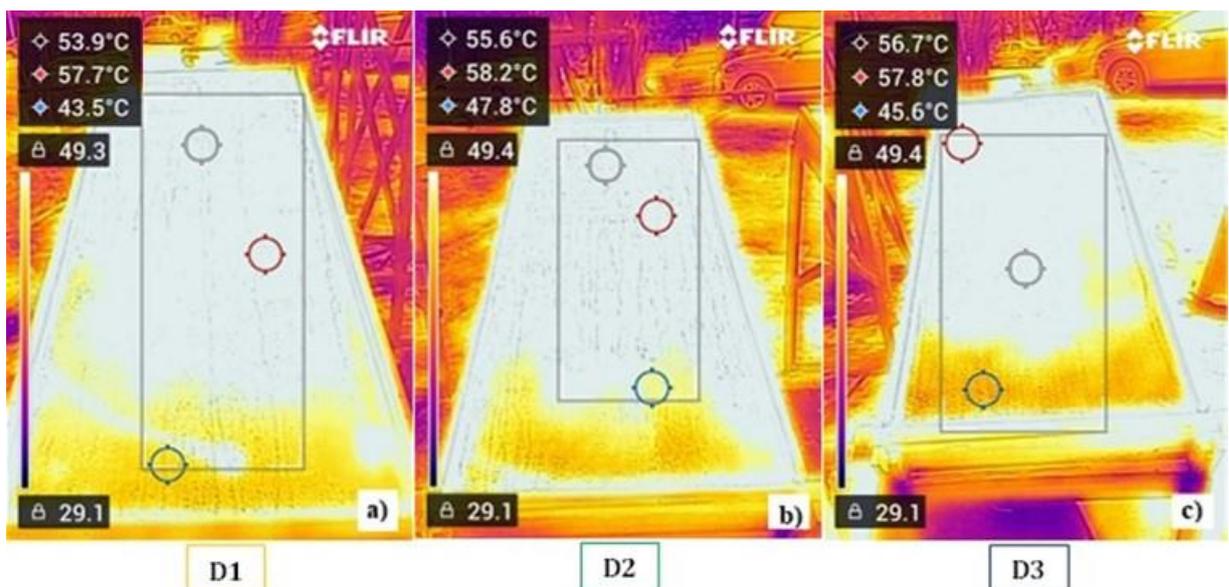
Conforme analisada a água antes e após o processo de destilação, é notório observar a relevância do uso dos materiais fototérmicos no sistema de destilação, comprovando nas Figuras 77(a, b e c) das imagens térmicas dos destiladores com o aumento da temperatura da água na placa absorvedora de calor, justificando a inativação de microrganismos. As leituras das distribuições das temperaturas na superfície do vidro dos Destiladores D1, D2 e D3 podem ser vistas na Figura 77.

A distribuição térmica revela o local com temperatura máxima no horário das 11h00min, visto que são essenciais para o processo de destilação. Na Figura 77(a) do D1 (sem material fototérmico), observa-se a temperatura mínima e máxima de 43,5 °C a 57,7 °C,

respectivamente. Na Figura 77(b) destaca-se a distribuição de temperatura do D2, com mínima de 47,8 °C e máxima de 58,2 °C. Na Figura 77(c) destaca-se a distribuição de temperatura para o D3, com mínima de 45,6 °C e máxima de 57,8°C. Dessa forma, os materiais fototérmicos mostraram-se eficientes no aumento das temperaturas, que conseqüentemente acelera o processo de evaporação da água e a eliminação de microrganismos.

A placa absorvedora equipada com materiais fototérmicos contribui positivamente, pois a água contaminada, ao ser aquecida, passa por um processo de destilação que não apenas remove impurezas físicas e químicas, mas também elimina microrganismos devido às altas temperaturas alcançadas. A inativação de microrganismos foi eficiente nesta pesquisa com os destiladores solares, uma vez que a exposição prolongada a temperaturas acima de 50°C, como mostrado nas imagens (pontos com temperaturas de até 58,2 °C), foi suficiente para destruir patógenos. Assim, o uso de materiais fototérmicos na placa absorvedora é um avanço importante, pois potencializa o desempenho do sistema ao maximizar a absorção do calor, isso garante um fluxo constante de água destilada e potável, especialmente em regiões com altos índices de radiação solar. Em comparação com o uso de brita, as bolas de gude possuem uma menor massa específica e um formato esférico, o calor específico das bolas de gude é inferior ao da brita, o que explica a diferença nas temperaturas máximas observadas no D2.

Figura 77: Imagens térmicas dos destiladores fechados. (a) (D1) sem material fototérmico. (b) (D2) com brita. (c) (D3) com bola de gude.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

8 ANÁLISE DE CUSTOS E ESTUDO ECONÔMICO

A lista de custos de cada componente do destilador solar é apresentada na Tabela 18. O custo do destilador sem material fototérmico é de R\$ 579,94, enquanto o destilador com brita é de R\$ 601,40 e o destilador com bola de gude é de R\$ 633,64. A análise de custo de água produzida e apresentado na Tabela 20.

Tabela 18: Lista dos custos de matéria-prima e mão de obra

Componentes	Especificações	Custo (R\$)
Vidro de condensação	4 mm de espessura	128,89
Placa absorvedora de calor	Telha de fibrocimento	57,97
Estrutura	Gabinete de madeira	91,26
Isolante térmico	Lã de vidro	16,12
Placa de zinco	1 mm de espessura	93,43
Vedação do sistema	Colas, silicones e impermeabilizantes.	91,26
Calhas coletoras de água	Tubos de Policloreto de Vinila (PVC)	53,79
Trabalho	8 horas (taxa de R\$ 5,89 por hora)	47,22
	Custo total (D1) =	579,94
Brita (D2)		+ 21,46
Bola de gude (D3)		+ 53,70

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Tabela 19: Análise do custo unitário da água para os destiladores

Parâmetro	D1	D2	D3
Custo de capital (<i>P</i>)(R\$)	579,94	601,40	633,64
Fator de recuperação de capital (<i>FRC</i>)	0,16	0,16	0,16
Primeiro Custo anual total (<i>PCA</i>) (R\$.ano ⁻¹)	92,79	96,22	101,38
Custo médio anual (<i>CMA</i>) (R\$.ano ⁻¹)	9,27	9,62	10,31
Fator de fundo de amortização (<i>FFA</i>)	0,06	0,06	0,06
Valor residual anual (<i>VRA</i>) (R\$.ano ⁻¹)	6,95	7,21	7,60
Custo anual total de água (<i>CAT</i>) (R\$.ano ⁻¹)	95,11	100,25	104,09
Média anual de água produzida (<i>M</i>)(L) (média diária*365) (L.m ⁻² .ano ⁻¹)	908,12	647,87	500,41
Custo da produção de água p. litro (<i>CPL</i>) (R\$.L ⁻¹ .m ²)	0,10	0,15	0,21

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

A análise de custos foi realizada para a configuração do destilador (D1), para os outros destiladores (D2 e D3) foi feita a análise de custos para o aumento da produção com o uso dos materiais fototérmicos conforme é mostrado na Tabela 21 visto que o custo de capital (P) possui

praticamente o mesmo valor. Logo, o custo de 1 L de água destilada para o D1 foi obtido com valor de R\$0,10. Esse valor obtido do custo por litro de água destilada foi bastante satisfatório, visto que no estudo de El-Sebaii e El-Naggar (2017) o valor foi de 0,28 e 0,31 para destilador com aletas de cobre e para destilador convencional, respectivamente. Um aspecto que influencia o custo por litro de água é a produção anual de água destilada produzida, para o custo de R\$0,10 a média anual de água foi 908,12L.

O estudo econômico sobre quanto se deve pagar a mais para melhorar a produtividade dos destiladores com o uso dos materiais fototérmicos é mostrado na Tabela 21, para isso foi adicionado o custo da brita e das bolas de gude nos destiladores D2 e D3 respectivamente. O uso dos materiais fototérmicos aumenta a produção de água destilada em 27,70% para o destilador D2 e de 14,26% para o D3, enquanto os custos de produção de água diminuem em 33,33% no D2 e 8,33% no D3, pois mesmo adicionando os materiais fototérmicos ocorreu à diminuição do custo final da produtividade de água em sistemas de destilação, demonstrando que o uso destes materiais em destiladores tem um excelente custo-benefício.

Tabela 20: Análise do custo para o aumento da produção da água com uso dos materiais fototérmicos

Parâmetros	Destilador D2 (brita)			Destilador D3 (bola de gude)		
	Sem materiais	Com materiais	Variação (%)	Sem materiais	Com materiais	Variação (%)
CAT (R\$)	96,53	100,13	+ 3,59	96,53	105,46	+ 8,46
M média (L)	634,07	877,09	+ 27,70	603,66	704,08	+ 14,26
CPL (R\$)	0,15	0,11	- 33,33	0,15	0,14	- 8,33

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

9 CONCLUSÕES

O estudo realizado sobre o dessalinizador solar tipo cascata com placa absorvedora de calor e materiais fototérmicos oferece contribuições relevantes para o avanço das tecnologias de dessalinização. A seguir, os principais pontos de destaque e conclusões do trabalho:

- O sistema de destilação com armazenamento de energia solar térmica, faz parte das tecnologias de baixo impacto ambiental, conforme a ODS 6 e 7;
- Os perfis de temperatura dos destiladores com materiais fototérmicos apresentaram valores superiores em comparação ao D1, que não utilizava materiais fototérmicos. Entre 11h00min e 15h00min, observou-se, de forma comparativa, o aumento da temperatura nos destiladores solares com a introdução dos materiais fototérmicos. Durante esse período, o D1 atingiu 69,3 °C, enquanto o D2 e o D3 alcançaram 70 °C e 69,5 °C, respectivamente.
- O uso dos materiais fototérmicos aumentou a produtividade de água destilada em 16% para o destilador D2 e de 3% para o D3, quando comparado com o D1.
- Os valores de eficiência dos destiladores com materiais fototermicos foram excelentes, atingindo ao final do dia 58,14% e 58,02% para o D2 e D3, respectivamente.
- Com as imagens térmicas foi possível observar as distribuições de temperatura nos materiais fototérmicos, na superfície do vidro e na placa absorvedora permitindo comparações entre as temperaturas analisadas, destacou-se o destilador D2, que utilizava brita como material fototérmico, alcançando a maior temperatura registrada de 74,6 °C.
- Os resultados obtidos da água após o processo de destilação foram compatíveis com os parâmetros de potabilidade, confirmando a eficiência dos destiladores, uma vez que os parâmetros físico-químicos da água não ultrapassaram os valores máximos permissíveis estabelecidos pela legislação nacional e internacional. Além disso, os destiladores foram eficazes na inativação de coliformes totais e *Escherichia coli*.
- Portanto, o desenvolvimento e a implementação de destiladores solares equipados com materiais fototérmicos representam uma solução viável, sustentável e de baixo custo para suprir as necessidades de água potável para comunidades isoladas, em que a demanda de água não é elevada, e onde existe alta incidência de radiação solar. promovendo saúde e bem-estar em comunidades vulneráveis.

REFERÊNCIAS

- ASGEDOM A.A; REDAE G.H.; GEBRETN SAE H.; TEQUARE M.H.; HIDRU H.D.; GEBREKIDAN G.B.; TSADIK M. Post-war status of water supply, sanitation, hygiene and related reported diseases in Tigray, Ethiopia: A community-based cross-sectional study. **International Journal of Hygiene and Environmental Health**, v. 263, p. 114460, 2025.
- ALUM, E. U.; OBEAGU, E. I.; UGWU, O. P. C. Enhancing quality water, good sanitation, and proper hygiene is the panacea to diarrhea control and the attainment of some related sustainable development goals: A review. **Medicine**, v. 103, n. 38, p. e39578, 2024.
- ABDELGAIED M.; ZAKARIA Y.; KABEEL A. E. ESSA F. A. Improving the tubular solar still performance using square and circular hollow fins with phase change materials. **J. Energy Storage**, v. 38, p. 102564, 2021.
- ALSEHLI M., ESSA F. A., OMARA Z. M., OTHMAN M. M., ELSHEIKH A. H., ALWETAISHI M., SALEH B. Improving the performance of a hybrid solar desalination system under various operating conditions. **Process Saf. Environ. Prot.**, v. 162, p. 706-720, 2022.
- ABDULLAH A. S.; OMARA Z. M.; ESSA F. A.; ALARJANI A.; MANSIR I. B.; AMRO M. I. Enhancing the solar still performance using reflectors and sliding-wick belt. **Sol. Energy**, v. 214, p. 268-279, 2021.
- ATALAY, H. Performance analysis of a solar dryer integrated with the packed bed thermal energy storage (TES) system. **Energy**, v. 172, p. 1037-1052, 2019.
- ABDENACER, K.; RYM, R.; YACINE K. Efficiency of Multi-Stage Solar Still with Capillary Film: Effect of Certain Thermophysical Parameters, **the 3rd International Conference on Water Resources and Arid Environment sand the 1st Arab Water Forum University of Mentouri**, Algeria, 2008.
- ABD ELBAR A. R.; HASSAN H. Enhancement of hybrid solar desalination system composed of solar panel and solar still by using porous material and saline water preheating. **Sol. Energy**, 204, 382-394, 2020.
- ABAD H. K. S.; GHIASI M.; MAMOURI S. J.; SHAFII M. B. A novel integrated solar desalination system with a pulsating heat pipe. **Desalination**, v. 311, p. 206-210, 2013.
- ALQSAIR, U. F. Enhancement the production of trays solar still via nano phase change material and preheating feed-water. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 53, p. 103822, 2024.
- ATTIA, M. E. H.; DRISS, Z.; MANOKAR, A. M.; SATHYAMURTHY, R. Effect of aluminum balls on the productivity of solar distillate. **Journal of Energy Storage**, v. 30, p. 101466, 2020.
- ARUNKUMAR T.; KABEEL A. E. Effect of phase change material on concentric circular tubular solar still-Integration meets enhancement. **Desalination**, v. 414, p. 46-50, 2017.

- ATTIA M. E. H.; DRISS Z.; KABEEL A. E.; AFZAL A. E.; MANOKAR A. M.; SATHYAMURTHY R. Phosphate bags as energy storage materials for enhancement of solar still performance. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 21540-21552, 2021.
- ABU AMRA, S. S.; YASSIN, M. M. Microbial contamination of the drinking water distribution system and its impact on human health in Khan Yuns Governorate, Gaza Strip: Seven years of monitoring (2000-2006). *Public Health*, v. 122, p. 1275-1283, 2008.
- ADEYANJU, A. A. Thermal energy storage techniques. *Sci-Afric Journal of Scientific Issues, Research and Essays*, v. 3, n. 5, p. 726-736, 2015.
- AZOOZ, A. A.; YOUNIS, G. G. Effect of glass inclination angle on solar still performance. *Journal of renewable and sustainable energy*, v. 8, n. 3, 2016.
- ABUJAZAR, M. S. S.; FATIHAH, S.; IBRAHIM, I. A.; KABEEL, A. E.; SHARIL, S. Productivity modeling of a developed inclined stepped solar still system based on actual performance and using a cascade and forward neural network model. *Journal of Cleaner Production*, v. 170, p. 147-159, 2018.
- ACRA, A.; JURDI, M.; MU'ALLEM, H.; KARAHAGOPIAN, Y.; RAFFOUL, Z. *Water Disinfection by Solar Radiation: Assessment and Application*. 79p. First edition. Canada: IDRC, 1990.
- AHMAD, A.; PRAKASH, O. Performance evaluation of a solar greenhouse dryer at different bed conditions under passive mode. *Journal of Solar Energy Engineering*, v. 142, n. 1, p. 011006, 2020.
- AGRAWAL, A.; RANA, R. S.; SRIVASTAVA, P. Heat transfer coefficients and productivity of a single slope single basin solar still in Indian climatic condition: Experimental and theoretical comparison, *Resource-Efficient Technologies*, v. 3, p. 466-482, 2017.
- ALEGBELEYE, O. O.; SANT'ANA, A. S. Manure-borne pathogens as an important source of water contamination: An update on the dynamics of pathogen survival/transport as well as practical risk mitigation strategies. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, v. 227, p. 1-20, 2020.
- AL-HASSAN, G. A.; ALGARNI, S. Exploring of water distillation by single solar still basins. *American Journal of Climate Change*, v. 2, p. 57-61, 2013.
- ALIREZA, B.; MOHAMMADI, S.; MOWLAVI, A.; PARVARESH, P. Measurement of heavy radioactive pollution: radon and radium in drinking water samples in Mashhad. *International Journal of Current Research*, v. 10, p. 54-58, 2010.
- ALMEIDA, R. A. S. *Índices de Qualidade de Água*. 114 p., 1ª Edição, Cruz das Almas: Editora UFRB, 2021.
- ANA. Agência Nacional de Águas (Brasil). *Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil/Agência Nacional de Águas*. 75 p., Brasília, 2019.

ABDEL-REHIM, Z. S.; LASHEEN, A. Improving the performance of solar desalination systems. **Renewable Energy**, v. 30, n. 13, p. 1955-1971, 2005.

ANA. Panorama do enquadramento dos corpos d'água do Brasil, e Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil. **Caderno de Recursos Hídricos**, 5. p. 124. Brasília, 2007.

ASADI, R. Z.; SUJA, F.; RUSLAN, M. H.; JALIL, N. A. The application of a solar still in domestic and industrial waste water treatment. **Solar Energy**, v. 93, p. 63-71, 2013.

AYOUB, G. M.; MALAEB, L. Solar Water Disinfection: UV Radiation Transmittance of Various Solar Reactor Tubes. **Energy Procedia**, v. 157, p. 498-511, 2019.

AL-BADAI, F.; HALIM, A. A. Potential Risk Assessment of Drinking Water Source Exposed to Contamination Using Microbial Indicators and Multiple Antibiotic Resistance Index. **Iranian (Iranica) Journal of Energy & Environment**, v. 12, n. 1, p. 81-92, 2021.

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

BALAJI, R.; ARAVINDH, V.; BABURANGAN, J.; KOUSHIK, S.; MAHENDRAN, P. Performance analysis of single slope solar still using sensible heat storage material. **Applied Innovative Research**, Vol. 1, p. 120-127, 2019.

BISWAS, A. K.; TORTAJADA, C. Avaliando as megatendências globais da água. In: **Avaliando as megatendências globais da água**. Springer, Cingapura, 2018. p. 1-26.

BANSAL, G.; SINGH, D. B.; KISHORE, C.; DOGRA, V. Effect of absorbing material on the performance of solar still: a mini review. **Materials Today: Proceedings**, v. 26, p. 1884-1887, 2020.

BOER, D.; SEGARRA, M.; FERNÁNDEZ, A. I.; VALLÈS, M.; MATEU, C.; CABEZA, L. F. Approach for the analysis of TES technologies aiming towards a circular economy: Case study of building-like cubicles. **Renewable energy**, v. 150, p. 589-597, 2020.

BILAL, A.; JAMIL, B.; HAQUE, N. U.; ANSARI, M. A. Investigating the effect of pumice stones sensible heat storage on the performance of a solar still. **Groundwater for sustainable development**, v. 9, p. 100228, 2019.

BRITO, Y. J. V.; CARDOSO, M. K. B.; DA SILVA, K. S.; SILVA, C. B.; DE 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.

BUZELLI, Giovanna Moreti; CUNHA-SANTINO, Marcela Bianchessi da. Análise e diagnóstico da qualidade da água e estado trófico do reservatório de Barra Bonita, SP. **Revista Ambiente & Água**, v. 8, p. 186-205, 2013.

BARBOSA, M. C.; CARVALHO, A. M.; IKEMATSU, P.; FILHO, J. L. A.; CAVANI, A. C. M. Avaliação do perigo de contaminação do sistema aquífero Guarani em sua área de afloramento do estado de São Paulo decorrente das atividades agrícolas. **Revista Águas Subterrâneas**, v. 25, n.1, p.1-14, 2011.

BERTOLO, R. A.; HIRATA, R.; JUNIOR, O. A. Método de valoração da água subterrânea impactada por atividades contaminantes no Estado de São Paulo. **Revista Águas Subterrâneas**, v. 33, n. 3, p.303-313, 2019.

BHATACHARYYA, A. Solar still for desalination of water in rural household. **International Journal of Environment and Sustain ability**, v. 2, n. 1, p. 21-30, 2013.

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

BERTOGLI, G.; AVILA-MERINO, A.; BOCCI, E.; NASO, V.; ROTELLA, R. **Renewable Energy Technologies: Wind, Mini-hydro, Thermal, Photovoltaic Biomass and Waste**. First Edition, International Centre for Science and High Technology, 2008.

BEZERRA, A. M. **Aplicações Práticas da Energia Solar**. 1ª. Edição, Editora: Nobel, 1990.

BRASIL. **Resolução CONAMA 357**, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação de corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, n. 53, 18 de março de 2005. Seção 1, p. 58-63, 2005.

BHARADWAJ G. V.; ASHOK B. C.; KRISHNA S. A. M.; JAYASHANKAR, N.; DIXIT, A. C. An experimental investigation and performance assessment of a solar water purifier. **International Journal of Mechanical and Production**, v. 9, n. 5, p. 403-414, 2019.

BLASCHKE, A. P.; DERX, J.; ZESSNER, M.; KIRNBAUER, R.; KAVKA, G.; STRELEC, H.; FARNLEITNER, A. H.; PANG, L. Setback distances between small biological waste water treatment systems and drinking water wells against virus contamination in alluvial aquifers. **Science of the Total Environment**, v. 573, p. 278-289, 2016.

BOUCHEKIMA, B. A solar desalination plant for domestic water needs in arid areas of South Algeria. **Desalination**, v. 153, p. 65-69, 2002.

BOUZAID, M; ANSARI, O; TAHA-JANAN, M; MOUHSIN, N; OUBREK, M. Numerical analysis of thermals performances for a novel cascade solar desalination design, **Energy Procedia**, v. 157, p. 071-1082, 2019.

BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J. C. L.; MIERZWA, J. C.; BARROS, M. T. L.; SPENCER, M.; PORTO, M.; NUCCI, N.; JULIANO, N.; EIGER, S. **Introdução à Engenharia Ambiental: O Desafio do Desenvolvimento Sustentável**. 318p., 2ª Edição, São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

BRASIL. Fundação Nacional de Saúde. **Manual prático de análise de água**. 150 p, 4a. Edição, Brasília: Funasa, 2013.

BRASIL. **Ministério da Saúde**. Secretaria de Vigilância em Saúde. Vigilância e controle da qualidade da água para consumo humano/ Ministério da Saúde, Secretaria de Vigilância em Saúde. – Brasília: Ministério da Saúde, p. 206, 2006.

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.

BHAGWATI, A.; SHAH, M.; PRAJAPATI, M. Emerging Technologies to Sustainability: A Comprehensive Study on Solar Desalination for Sustainable Development. **Sustainable Manufacturing and Service Economics**, p. 100007, 2023.

BENAISSA, C.; BOUHADI, B.; ROSSI, A. An assessment of the physicochemical, bacteriological quality of groundwater and the water quality index (WQI) used GIS in Ghis Nekor, Northern Morocco. **Scientific African**, v. 20, p. e01623, 2023.

CEBALLOS, B. S. O. D.; DINIZ, C. R. Técnicas de microbiologia sanitária e ambiental. Campina Grande: **EDUEPB**, v. 324, 2017.

CONSTANTINE, K.; MASSOUD, M.; ALAMEDDINE, I.; EL-FADEL, M. The role of the water tankers market in water stressed semi-arid urban areas: Implications on water quality and economic burden. **Journal of Environmental Management**, v. 188, p. 85-94, 2017.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo. São Paulo: **CETESB**. 44 p. 2020.

CANEPARI, P.; PRUZZO, C. Human pathogens in water: insights into their biology and detection. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 19, n. 3, p. 241-243, 2008.

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

CARDOSO, M., DA SILVA, K., SILVA, C. Low-cost solar still with corrugated absorber basin for water desalination. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering**. 44, 214, 2022.

IDEXX. Um teste simples de 24 horas para coliformes e *E. coli*. 2002. Disponível em: https://www.idexx.com/en/pdf/en_us/water/64063001.pdf/ Acesso em: 20 out. 2024.

COLILERT. Um teste simples de 24 horas para coliformes e *E. coli*. 2002. Disponível em: https://www.idexx.com/en/pdf/en_us/water/64063001.pdf/ Acesso em: 20 out. 2024.

CASTRO-ALFÉREZ M.; POLO-LÓPEZ, M. I.; MARUGÁN J.; FERNÁNDEZ-IBÁÑEZ P. Mechanistic model of the *Escherichia coli* inactivation by solar disinfection based on the photo-generation of internal ROS and the photo-inactivation of enzymes: CAT and SOD. **Chemical Engineering Journal**, 318, 214-223, 2016.

CHEN, B.; WANG, M.; DUAN, M.; MA, X.; HONG, J.; XIE, F.; ZHANG, R.; LI, X. In search of key: Protecting human health and the ecosystem from water pollution in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 228, p. 101-111, 2019.

CHU C.; RYBERG E. C.; LOEB S. K.; SUH MIN-JEONG, AND KIM JAE-HONG. **Water Disinfection in Rural Areas Demands Unconventional Solar Technologies**. Accounts of Chemical Research, 2019.

CONNOR, R.; COATES, D.; UHLENBROOK, S.; KONCAGÜL, E. **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2019: Não deixar ninguém para trás**. Recuperado de World Water Assessment Program me WWAP, UN-Water.

CROXEN, M.A.; FINLAY, B. B. Molecular mechanisms of *Escherichia coli* pathogenicity. **Nature Reviews Microbiology**, v. 8, n° 1, p. 26-38, 2010.

CATÃO, R. L. C. M do R.; OLIVEIRA, R. de.; FEITOSA, P. H. C.; RODRIGUES, A. C. L.; SILVA, Cia da.; BEZERRA, E. B. N.; CATÃO, W. V.; GUEDES, M. T de J. C. Avaliação da contaminação das águas subterrâneas e dos riscos associados a esses usos em uma micro bacia urbana em Campina Grande-PB **Research, Society and Development**, v. 10, n. 14, pág. e164101420168, 2021.

COSTA, F. X.; MENDONÇA, A. M. G. D.; FERREIRA, W. B.; MEDEIROS, S. DE S. Alternativas de disponibilidade e uso dos recursos hídricos para o desenvolvimento sustentável do semiárido, **eduepb**, Campina Grande –pb, v.1, p.360, 2021.

CHAUHAN, V. K.; SHUKLA, S. K.; TIRKEY, J. V.; RATHORE, P. K. S. A comprehensive review of direct solar desalination techniques and its advancements. **Journal of Cleaner Production**, v. 284, p. 124719, 2021.

CHAUHAN, V. K.; SHUKLA, S. K.; RATHORE, P. K. S. A systematic review for performance augmentation of solar still with heat storage materials: A state of art. **Journal of Energy Storage**, v. 47, p. 103578, 2022.

CHANDEL, S. S.; AGARWAL, T. Review of current state of research on energy storage, toxicity, health hazards and commercialization of phase changing materials. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 67, p. 581-596, 2017.

DHAOUI, S.; CHOUBANI, K.; HAMDI, F.; GHRIS, O.; BOUABIDI, A.; ALASIRI, A.; ATTIA, M. E. H. 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**, 2024.

DAJOZ, R. **Princípios de Ecologia**. 7ª Edição. Porto Alegre: Artmed, 2005.

DUMKA P.; MISHRA D. R. Performance evaluation of single slope solar still augmented with the ultrasonic fogger. *Energy*, v. 190, 116398, 2020.

DHIVAGAR, R.; SHOEIBI, S.; PARSA, S. M.; HOSEINZADEH, S.; KARGARSHARIFABAD, H.; KHIADANI, M. Performance evaluation of solar still using

energy storage biomaterial with porous surface: An experimental study and environmental analysis. **Renewable Energy**, v. 206, p. 879-889, 2023.

DHIVAGAR R.; MOHANRAJ M., BELYAYEV Y. Performance analysis of crushed gravel sand heat storage and biomass evaporator-assisted single slope solar still. **Environ. Sci. Pollut. Res.**, 28, 65610-65620, 2021.

DINCER, I. Thermal energy storage systems as a key technology in energy conservation. **International journal of energy research**, v. 26, n. 7, p. 567-588, 2002.

DINCER, I.; ROSEN, M. A. Armazenamento de energia térmica: sistemas e aplicações. **John Wiley & Filhos**, 2021.

DAMALAS, C. A.; ELEFTHEROHORINOS, I. G. Pesticide exposure, safety issues, and risk assessment indicators. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 8, p. 1402-1419, 2011.

DESSIE, A.; ALEMAYEHU, E.; MEKONEN, S.; LEGESSE, W.; KLOOS, H.; AMBELU, A. Solar disinfection: an approach for low-cost house hold water treatment technology in South western Ethiopia. **Journal of Environmental Health Sciences & Engineering**, v. 12, n. 25, p. 1-6, 2014.

DOMÉNECH. J. *Cryptosporidium y Giardia*, Problemas emergentes em e água de consumo humano. **Sanidad Ambiental**, v. 22, p. 112-116, 2003.

DORNFELD, C. B.; TALAMONI, A. C. B.; QUEIROZ, T. V. **O Jogo Digital em Sala de Aula - Água, Ação e Reflexão: Elaboração de Jogo Digital para Educação Básica**. 95 p. 1ª Edição, São Vicente. 2019.

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

DELAIRE, C.; POULIN, C.; LAPWORTH, D.; SMEDLEY, P.; KLINGBEIL, R., WAGNER, F., E BOVING, T. **Assessing ground water quality: a global perspective: importance, methods and potential data sources**. 2021.

ELASHMAWY, M. Improving the performance of a parabolic concentrator solar tracking-tubular solar still (PCST-TSS) using gravel as a sensible heat storage material. **Desalination**, v. 473, p. 114182, 2020.

EBRAHIMPOUR, B.; SHAFII, M. B. Experimental evaluation of the effect of boulders and fines in biodegradable organic materials on the improvement of solar stills. **Solar Energy**, v. 247, p. 453-467, 2022.

ELASHMAWY M.; AHMED M. M. Enhancing tubular solar still productivity using composite aluminum/copper/sand sensible energy storage tubes. **Sol. Energy Mater. Sol. Cells**, 221, 110882, 2021.

ESSA F. A.; ELSHEIKH A. H.; ALGAZZAR A. A.; SATHYAMURTHY R.; ALI M. K. A.; ABD ELAZIZ M.; SALMAN K. H. Eco-friendly coffee-based colloid for performance augmentation of solar stills. **Process Saf. Environ. Prot.**, 136, 259-267, 2020.

ELANGO, C.; GUNASEKARAN N.; SAMPATHKUMAR K. Thermal models of solar still. A comprehensive review. **Renew able and Sustain able Energy Reviews** 47856–911, 2015.

EGIZA M; DIAB M.R.; FAISAL N. ELSHEIKH A.H. Natural fibers for enhanced efficiency and sustainability in solar desalination: A review. **Solar Energy**. 2024; v. 282, p. 112963.

ELTAWIL, M. A.; ZHENGMING, Z. Wind turbine-inclined still collector integration with solar still for brackish water desalination. **Desalination**, v. 249, n. 2, p. 490-497, 2009.

EL-SEBAIL, A.A.; AL-GHAMDI A.A.; AL-HAZMI F.S.; FAIDAH A. S.; Thermal performance of a single basin solar still with PCM as a storage medium. **Applied Energy** v. 86, p. 1187–1195, 2009.

EL-SEBAIL A.A; EL-NAGGAR M. Year-round performance and cost analysis of a finned single basin solar still. *Applied Thermal Engineering*, v. 110, p. 787-794, 2017

EL-SAID, E. M.; ELSHAMY, S. M.; KABEEL, A. E. Performance enhancement of a tubular solar still by utilizing wire mesh packing under harmonic motion. *Desalination*, v. 474, p. 114165, 2020.

FADHE, H.; ABED, Q. A.; AL-SHAMKHA, D. M.A review on improvement techniques of fresh water productivity for solar distillation systems. **Al-Furat Journal of Innovations in Mechanical and Sustainable Energy**.v.1, 2021.

FAISAL, Z. A., HAMEE, H. G. Solar still productivity improvement techniques and recent advancements: review study. **Al-Furat Journal of Innovations in Mechanical and Sustainable Energy**, v.1, 2021.

FELLENBERG, G. **Introdução aos Problemas da Poluição Ambiental**. 196p., São Paulo: EPU-Gen, 2012.

FIGUEREDO-FERNÁNDEZ, M.; GUTIÉRREZ-ALFARO, S.; ACEVEDO-MERINO, A.; MANZANO, M. A. Estimating lethal dose of solar radiation for *Enterococcus* inactivation through radiativ on reaching the water layer. Application to Solar Water Disinfection (SODIS). **Solar Energy**, v. 158, p. 303-310, 2017.

FRANCO, B. D. G. M.; LANDGRAF, M. **Microbiologia dos alimentos**. São Paulo: Editora Atheneu, p. 93-98, 2008.

FOCHEZATTO, A.; KORZENIEWICZ, M. B. DV; FOCHEZATTO, I. M. Existem spill overs espaciais na expansão da energia solar no Brasil. **Anais do XVIII ENABER, 2020, Brasil.**, 2020.

FERREIRA, R. M.; RIBEIRO, S. M. A. ESCASSEZ DE ÁGUA NO BRASIL COMO CONSEQUÊNCIA DO AGRONEGÓCIO. **SÉCULO XXI EM DIREITO E CIÊNCIAS JURÍDICAS**, p. 90, 2022.

GONÇALVES, R. F. **Desinfecção de Efluentes Sanitários**. 438p., Projeto PROSAB, Rio de Janeiro: ABES, 2003.

GAWANDE, J. S.; BHUYAR, L. B. Effect of shape of the absorber surface on the performance of stepped type solar still. 2013.

GOSWAMI, D. Y. **Principles of Solar Engineering**. Third edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015.

GNANADASON, M. K.; KUMAR, P. S.; SIVARAMAN, G.; DANIEL, J. E. S. Design and Performance Analysis of a Modified Vacuum Single Basin Solar Still. **Smart Grid and Renewable Energy**, 2(4), 388–395, 2011.

GELAIN, J. G.; ISTAKE, M. Exportação líquida de água virtual brasileira e estadual. **Revista Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos**, v. 9, n. 2, p. 150-168, 2015.

GLEESON, T.; WANG-ERLANDSSON, L.; PORKKA, M.; ZIPPER, S. C.; JARAMILLO, F.; GERTEN, D.; FAMIGLIETTI, J. S. Illuminating wáter cycle modifications and Earth system resilience in the Anthropocene. **Water Resources Research**, v. 56, n. 4, p. e2019WR024957, 2020.

GNANARAJ, S. J. P.; VELMURUGAN, V. Experimental investigation on the performance of modified single basin double slope solar stills. **International Journal of Ambient Energy**, v. 43, n. 1, p. 206-215, 2022.

GIL, A.; MEDRANO, M.; MARTORELL, I.; LÁZARO, A.; DOLADO, P.; ZALBA, B.; CABEZA, L. F. State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 14, n. 1, p. 31-55, 2010.

GIBSON, C. J.; MARITIM, A. K.; MARION, J. W. Comparison of the ColiPlate™ Kit with Two Common *E. Coli*. Enumeration Methods for Water. **Water**, v. 13, n. 13, p. 1804, 2021.

FIGLIORINI, C. H. U.; ANDRADE, D.; AGRIZZI, E. M.; TORRES, H. Análise preliminar dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos das águas do córrego paraíso – trecho urbano do distrito de Vieira Machado, em Muniz Freire-ES. **Agrarian Academy**. v. 6, n.11, p. 22-34. 2019.

FATHY M.; HASSAN H.; AHMED M. S. Experimental study on the effect of coupling parabolic trough collector with double slope solar still on its performance. *Sol. Energy*, 163:54–61, 2018.

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

HUSSAIN, C. M.; KEÇILI, L. Chapter. Environmental pollution and environmental analysis. **Modern Environmental Analysis Techniques for Pollutants**, v. 1, p. 1-36, 2020.

HUSSEIN A. K.; M. ATTIA E. H.; ABDUL-AMMER H. J.; ARICI M.; HAMIDA M. B. B.; YOUNIS, O.; ABIDI A. Experimental study of the impact of low-cost energy storage materials on the performance of solar distillers at different water depths. *Sol. Energy*, 257, 221-230, 2023.

HASSAN H.; ABO-ELFADL S. Investigation experimentally the impact of condensation rate on solar still performance at different thermal energy storages. *J. of Energy Storage*, 34, 102014, 2021.

HONG, Y., SHI, W., WANG, H., MA, D., REN, Y., WANG, Y; LI, Q. GAO, B. Mechanisms of *Escherichia coli* inactivation during solar-driven photothermal disinfection. **Environmental Science: Nano**, v. 9, n. 3, p. 1000-1010, 2022.

IBRAHIM, A. G. M.; ALLAM, E. E.; ELSHAMARKA, S. E. A modified basin type solar still: experimental performance and economic study. **Energy**, v. 93, p.335-342. 2015.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. 7ª Ed, **LTC Editora**, Rio de Janeiro, 2014.

ISAH, A. S.; BINT TAKAIJUDIN, H.; SINGH, B. S. M.; YUSOF, K. W.; ABIMBOLA, T. O.; JAGABA, A. H. Evaluation of distillate quality produced by using a hybrid solar desalination system. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 15, n. 7, p. 102879, 2024.

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

ISMAIL, S. O.; OJOLO, S. J.; ORISALEYE, J. I.; ALOGBO, A. O. Design and development of a dual solar water purifier. **International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology**, v. 2, n. 2, p. 8-17, 2013.

JANI, H.K.; MODI, K.V. A review on numerous means of enhancing heat transfer rate in solar-thermal based desalination devices. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 93, p. 302-317, 2018.

JATOBÁ, R.; LOSCHIAVO, R. **Atitudes Sustentáveis para Leigos**. Rio de Janeiro. Alta Books. 2019.

JOHNSON J. R.; RUSSO T. A. Molecular epidemiology of extra intestinal pathogenic (uropathogenic) *Escherichia coli*, 2005.

KABEEL, A.E.; HARBY, K.; ABDELGAIED, MOHAMED; EISA, A.M.R. A comprehensive review of tubular solar still designs, performance, and economic analysis. **Journal of Cleaner Production**, 2019.

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

KATEKAR V. P.; DESHMUKH S. S. A review of the use of phase change materials on performance of solar stills. **J. Energy Storage**, 30(), 101398, 2020.

KATEKAR, V. P.; RAO, A. B.; SARDESHPANDE V. R. An experimental investigation to optimise pebbles-based sensible heat storage system: An exploration to improve thermal efficiency of solar devices. *Journal of Energy Storage*, v. 73, p. 108964, 2023.

KARTHICK, M.; GNANARAJ, S. J. P.; APPADURAI, M.; JESHURUN, S. B. Productivity Enhancement of a Single Slope Solar Still with Energy Storage Medium. **Materials Today: Proceedings**, 2021.

KOÇAK, B.; FERNANDEZ, A. I.; PAKSOY, H. Review on sensible thermal energy storage for industrial solar applications and sustainability aspects. **Solar Energy**, v. 209, p. 135-169, 2020.

KABEEL, A. E.; SATHYAMURTHY, R.; MANOKAR, A. M.; SHARSHIR, S. W.; ESSA, F. A.; ELSHIEKH, A. H. Experimental study on tubular solar still using Graphene Oxide Nano particles in Phase Change Material (NPCM's) for fresh water production. **Journal of Energy Storage**, v. 28, p. 101204, 2020a.

KABEEL, A. E.; EL-AGOUZ, E. S.; ATHIKESAVAN, M. M.; DURAISAMY RAMALINGAM, R.; SATHYAMURTHY, R.; PRAKASH, N.; PRASAD, C. Comparative analysis on freshwater yield from conventional basin-type single slope solar still with cement-coated red bricks: an experimental approach. **Environmental science and pollution research**, v. 27, p. 32218-32228, 2020b.

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

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

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

KIM, S. H.; HEJAZI, M.; LIU, L.; CALVIN, K.; CLARKE, L.; EDMONDS, J.; DAVIES, E. Balancing global water availability and use at basin scale in an integrated assessment model. **Climatic Change**, v. 136, p. 217-231, 2016.

KVAM, E.; BENNER, K. Mechanistic insights into UV-A mediated bacterial disinfection via endogenous photo sensitizers. **Journal of Photochemistry & Photobiology, B: Biology**, v. 209, p. 1-10, 2020.

KHECHEKHOUCHE, A.; HAOUA, B. B.; KABEEL, A. E.; ATTIA, M.E.H.; ELMAGHLANY, W. M. Improvement of Solar Distiller Productivity by a Black Metallic Plate of Zinc as a Thermal Storage Material. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 27, p. 18-56, 2020.

- KUMAR R.; PANDEY A. K.; SAMYKANO M.; ALJAFARI B.; MA Z.; BHATTACHARYYA S.; TYAGI V. V. Phase change materials integrated solar desalination system: An innovative approach for sustainable and clean water production and storage. **Renewable Sustainable Energy Rev.**, v. 165, p. 112611, 2022.
- LUO, X.; HAO, B.; XIANG, H.; LI, H.; TAO, Z. A novel phase change materials used for direct photothermal conversion and efficient thermal storage. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 251, p. 112142, 2023.
- LIU, F.; LAI, Y.; ZHAO, B.; BRADLEY, R.; WU, W. Photothermal materials for efficient solar powered steam generation. **Frontiers of Chemical Science and Engineering**, v. 13, p. 636-653, 2019.
- LUND SCHLAMOVITZ, J.; BECKER, P. Differentiated vulnerabilities and capacities for adaptation to water shortage in Gaborone, Botswana. **International Journal of Water Resources Development**, v. 37, n. 2, p. 278-299, 2021.
- LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. São Paulo: Átomo; 2010.
- LÓPEZ-SABIRÓN, A. M.; ROYO, P.; FERREIRA, V. J.; ARANDA-USÓN, A.; FERREIRA, G. Carbon footprint of a thermal energy storage system using phase change materials for industrial energy recovery to reduce the fossil fuel consumption. **Applied energy**, v. 135, p. 616-624, 2014.
- LAUREANO, J. J.; MENDONÇA, A. G.; LOPES, D. DA S.; SOUSA, L. M.; LIMA, T. DE O.; ROSA A. L. D.; BASTOS, W. R. E NASCIMENTO, E. L. Análise da qualidade da água subterrânea. **Águas Subterrâneas - Seção Estudos de Caso e Notas Técnicas**, 2020.
- LUZI, S.; TOBLER, M.; SUTER F; MEIERHOFER, R. SODIS manual Guidance on solar water disinfection: A guide for the application of SODIS. **Dubendorf, Switzerland: Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology**, 2002.
- MAHALA, T.; SHARMA, N. Experimental investigations of a novel solar still with heat storage materials-energy, exergy, economic and environmental analyses. **Desalination**, v. 578, p. 117467, 2024.
- MORTADI, A.; LAASRI, S. Study on a new solar-powered desalination system to alleviate water scarcity using impedance spectroscopy. **Materials Today: Proceedings**, 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. 309-322, 2014.
- MEVADA D.; PANCHAL H.; AHMADEIN M.; ZAYED M. E.; ALSALEH N. A.; DJUANSJAH J.; SADASIVUNI K. K. Investigation and performance analysis of solar still with energy storage materials: An energy-exergy efficiency analysis. **Case Studies in Thermal Engineering**, 29, 101687, 2022.

MALATO, S.; FERNÁNDEZ-IBÁÑEZ, P.; MALDONADO, M.I.; BLANCO, J.; GERNJAK, W. Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: Recent overview and trends. **Catalysis Today**, v. 147, n. 1, p.1-59, 2009.

MALHEIROS, P. S.; SCHÄFER, D. F.; HERBERT, I. M.; CAPUANI, S. M.; SILVA, E. M.; SARDIGLIA, C. U.; SCAPIN, D.; ROSSI, E. M.; BRANDELLI, A. Contaminação bacteriológica de águas subterrâneas da região oeste de Santa Catarina, Brasil. **Revista Instituto Adolfo Lutz**, v. 68, n. 2, p. 305-308, 2009.

MAO, Y., GUO, D., YAO, W., WANG, X., YANG, H., XIE, Y., KOMARNENI, S., YU, G., WANG, Y. Effects of conventional ozonation and electro- peroxone pretreatment of surface water on disinfection by-product formation during subsequent chlorination. **Water Research**, v. 130, p. 322-332, 2018.

MAO, Y., WANG, X., YANG, H., WANG H., XIE, Y, F. Effects of ozonation on disinfection by product formation and speciation during subsequent chlorination. **Chemosphere**. v. 117, p. 515-520, 2014.

MARTÍNEZ-GARCÍA, A.; VINCENT, M.; RUBIOLO, V.; DOMINGOS, M.; CANELA, M. C.; OLLER, I.; FERNÁNDEZ-IBÁÑEZ, P.; POLO-LÓPEZ, M. I. Assessment of a pilot solar V-trough reactor for solar water disinfection. **Chemical Engineering Journal**, v. 399, p. 1-8, 2020.

MÁRQUEZ, J. M. A.; BOHÓRQUEZ, M. Á. M.; MELGAR, S. G. Ground thermal diffusivity calculation by direct soil temperature measurement. Application to very low enthalpy geothermal energy systems. **Sensors**, v. 16, n. 3, p. 306, 2016.

MCGUIGAN, K. G.; MÉNDEZ-HERMIDA, F.; CASTRO-HERMIDA, J. A.; ARES-MAZÁS, E.; KEHOE, S. C.; BOYLE, M.; SICHEL, C.; FERNÁNDEZ-IBÁÑEZ, P.; MEYER, B. P.; RAMALINGHAM, S.; MEYER, E. A. Batch solar disinfection inactivates oocysts of *Cryptosporidium parvum* and cysts of *Giardia muris* in drinking water. **Journal of Applied Microbiology**, v. 101, p. 453-463, 2006.

MEDRANO, M.; GIL, A.; MARTORELL, I.; POTAU, X.; CABEZA, L. F. State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation. Part 2—Case studies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 1, p. 56-72, 2010.

MURUGAVELA, K. K.; CHOCKALINGAMA, K. K. S. K.; SRITHARB, K. Modeling and verification of double slope single basin solar still using laboratory and actual solar conditions. **JJMIE**, v. 3, n. 3, p. 228-235, 2009.

MURUGAVEL, K. K.; SIVAKUMAR, S.; AHAMED, J. R.; CHOCKALINGAM, K. K.; SRITHAR, K. Single basin double slope solar still with minimum basin depth and energy storing materials. **Applied energy**, v. 87, n. 2, p. 514-523, 2010.

MURUGAVEL, K. Kalidasa; SRITHAR, K. J. R. E. Performance study on basin type double slope solar still with different wick materials and minimum mass of water. **Renewable energy**, v. 36, n. 2, p. 612-620, 2011.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE DOS RECURSOS HÍDRICOS E DA AMAZÔNIA
Legal. Lei n. 9.433: Política Nacional de Recursos Hídricos. Brasília: Secretaria de Recursos Hídricos, 1997. 72p.

MOTTA, J. G.; BECKHAUSER A.; FREITAG G.; PELISSERA M. R. **Qualidade da Água Subterrânea na Região do Médio Vale do Itajaí** – SC, 2014.

MEKONNEN, M.; HOEKSTRA, A.Y. Four billion people facing severe waters scarcity. **Science Advances**, v. 2, n. 2, p. 1-6. 2016.

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

MISHRA, B. K.; KUMAR, P.; SARASWAT, C.; CHAKRABORTY, S.; GAUTAM, A. Water security in a changing environment: Concept, challenges and solutions. **Water**, v. 13, n. 4, p. 490, 2021.

MADIOULI, J.; SALEEL, C. A.; LASHIN, A.; BADRUDD, I. A.; KESSENTINI, A. An experimental analysis of single slope solar still integrated with parabolic trough collector and packed layer of glass balls. **Journal Thermal Analytical Calorimetry** 146, 2655–2665, 2021.

MADHU B.; BALASUBRAMANIAN E.; SATHYAMURTHY R.; NAGARAJAN P. K.; MAGESHBABU D.; BHARATHWAAJ R.; MANOKAR A. M. Exergy analysis of solar still with sand heat energy storage. **Appl. Sol. Energy**, 54, 173-177, 2018.

MCGUIGAN, K. G. Elimination of water pathogens with solar radiation using an automated sequential batch CPR Reactor. **Journal of Hazardous Materials**, v. 196, p. 16-21, 2011.

MANOKAR A. M.; MURUGAVEL K. K.; ESAKKIMUTHU G. Different parameters affecting the rate of evaporation and condensation on passive solar still—A review. **Renewable Sustainable Energy Rev.**, v. 38, p. 309-322, 2014.

NASCIMENTO, F. T.; NASCIMENTO, C. A.; SPILKI, F. R.; STAGGEMEIER, R.; LAUER JÚNIOR, C. M. Efficacy of a solar still in destroying virus and indicator bacteria in water for human consumption. **Revista Ambiente & Água**, v. 13, n. 4, p. 1-12, 2018.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil (ODS)**. 2024. <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/7>.

NIENBORG, B.; GSCHWANDER, S.; MUNZ, G.; FRÖHLICH, D.; HELLING, T.; HORN, R.; SCHOSSIG, P. Life Cycle Assessment of thermal energy storage materials and components. **Energy Procedia**, v. 155, p. 111-120, 2018.

NETO C. F. B. Benefícios da água com pH alcalino: Saúde ou doença, você decide. **Revista E.T.C. Educação, tecnologia e cultura**, n. 14, 2016.

NAZARI S.; SAFARZADEH H.; BAHIRAEI, M. 2019. Experimental and analytical investigations of productivity, energy and exergy efficiency of a single slope solar still enhanced with thermoelectric channel and nanofluid. **Renewable Energy**, v. 135, p. 729-744.

NASRI B.; BENATIALLAH A.; KALLOUM S.; BENATIALLAH D. Improvement of glass solar still performance using locally available materials in the southern region of Algeria. **Groundwater for Sustainable Development**, 9, 100213, 2019.

NASRI, B.; BENATIALLAH, A.; KALLOUM, S.; BENATIALLAH, D. Experimental study of solar still using local material in south of Algeria, **AIP Conference Proceedings, technologies and materials for renewable energy, environment and sustainability: tmrees18**, v. 1968, p. 030024, 2018.

NAVNTOFT, C.; UBOMBA-JASWA, E.; MCGUIGAN, K. G.; FERNÁNDEZ-IBÁÑEZ P. Effectiveness of solar disinfection using batch reactors with non-imaging aluminium reflector under real conditions: Natural well-water and solar light. **Journal of Photo chemistry and Photobiology B: Biology**, v. 93, p. 155-161, 2008.

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

NEGI P.; DOBRIYAL R., SINGH D. B.; G. K. BADHOTIYA. A review on passive and active solar still using phase change materials. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, p. 10433-10438, 2021.

NATARAJAN, S. K.; SURAPARAJU, S. K.; ELAVARASAN, R. M.; PUGAZHENDHI, R.; HOSSAIN, E. An experimental study on eco-friendly and cost-effective natural materials for productivity enhancement of single slope solar still. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 2, p. 1917-1936, 2022.

OMS. ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. (1995) *Um relatório sobre saúde*.

OMARA Z. M.; ABDULLAH A. S; ESSA F. A.; YOUNES M. M. Performance evaluation of a vertical rotating wick solar still. **Process Saf. Environ. Prot.**, v. 148, p. 796-804, 2021.

ORIMOLOYE, I. R., BELLE, J. A., OLUSOLA, A. O., BUSAYO, E. T., & OLOLADE, O. O. Spatial assessment of drought disasters, vulnerability, severity and water shortages: a potential drought disaster mitigation strategy. **Natural Hazards**, v. 105, n. 3, p. 2735-2754, 2021.

OLIVEIRA, A. J.; SANTOS, M. C. H. G.; ITAYA, N. M.; CALIL, R. M. Coliformes Termotolerantes: bioindicadores da qualidade da água destinada ao consumo humano. **Atas de Saúde Ambiental-ASA** (ISSN 2357-7614), v. 3, n. 2, p. 24-29, 2016.

PALACIOS, A.; BARRENECHE, C.; NAVARRO, M. E.; DING, Y. Thermal energy storage technologies for concentrated solar power—A review from a materials perspective. **Renewable Energy**, v. 156, p. 1244-1265, 2020.

PEREIRA, M. A.; MARQUES, R. C. Sustainable water and sanitation for all: are we there yet. **Water Research**, v. 207, p. 117765, 2021.

PANCHAL, H. N. Enhancement of distillate output of double basin solar still with vacuum tubes. **Journal of King Saud University-Engineering Sciences**, v. 27, n. 2, p. 170-175, 2015.

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

PARSA, S. M.; RAHBAR, A.; KOLEINI, M. H.; JAVADI, Y. D.; AFRAND, M.; ROSTAMI, S.; AMIDPOUR, M. First approach on nanofluid-based solar still in high altitude for water desalination and solar water disinfection (SODIS). **Desalination**, v. 491, p. 1-20, 2020.

PRAJAPATI, M.; SHAH, M.; SONI, B.; PARIKH, S.; SIRCAR, A.; BALCHANDANI, S.; TALA, M. Geothermal-solar integrated groundwater desalination system: Current status and future perspective. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 12, p. 100506, 2021.

PICHEL, N.; VIVAR, M.; FUENTES, M. The problem of drinking water access: A review of disinfection technologies with an emphasis on solar treatment methods. **Chemosphere**, 2019.

PINHO, J.T.; GALDINO, M.A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. 1ª Edição. CEPTEL CRESESB: Rio de Janeiro, 2014.

PNQA. Programa Nacional de Avaliação da Qualidade das Águas. **Indicadores de Qualidade - Índice de Qualidade das Águas (IQA)**, 2021.

POLO-LOPEZ, M. I.; FERNANDEZ-IBANEZ, P.; UBOMBA-JASWA, E.; NAVNTOFT, C.; GARCIA-FERNANDEZ, I.; DUNLOP, P. S. M.; SCHMIDT, M.; BYRNE, J. A.;

PARRON, M.P.; MUNIZ, D.H.F.; PEREIRA, C.M. Manual de procedimentos de amostragem e análise físico-química de água. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Florestas**. ISSN 1980-3958, Documentos 232, Colombo – PR, 2011.

PRUSS, A.; KOMOROWSKA-KAUFMAN, M.; PRUSS, P. ł. Removal of organic matter from the underground water—a pilot scale technological research. **Applied Water Science**, v. 11, n. 9, p. 1-10, 2021.

QUEIROZ, T. M.; OLIVEIRA, L. C. P. Qualidade da água em comunidades quilombolas do Vão Grande, município de Barra do Bugres (MT). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, n. 1, p. 173-180, 2018.

RAHBAR N.; GHARAIAN A.; RASHIDI S. 2017. Exergy and economic analysis for a double slope solar still equipped by thermoelectric heating modules - an experimental investigation. **Desalination**, v. 420, p. 106–113.

RANJAN K. R., KAUSHIK S. C., PANWAR N. L. Energy and exergy analysis of passive solar distillation systems. *Int. J. Low-Carbon Technol.*, v. 11, n. 2, p. 211-221, 2016.

RAMOS, R. O.; LIMA, C.A.P.; CAVALCANTE, G.G.; MEDEIROS, K.M. Patente: Privilégio de Inovação. Número do registro: BR1020210075996, título: "Sistema Integrado

Multianálise com Conectividade e Função Datalogger para Monitoramento de Estações de Dessalinização Solar e Outros Sistemas de Tratamento de Águas e Efluentes", Instituição de registro: **INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial**. Depósito: 21/04/2021. 2021.

RABHI, K.; NCIRI, R.; NASRI, F.; ALI, C.; BACHA, H. B. Experimental performance analysis of a modified single-basin single-slope solar still with pin fins absorber and condenser. **Desalination** v. 416, p. 86–93, 2017.

RESENDE, A.V.; **Agricultura e qualidade da água: contaminação da água por nitrato**. Planaltina: Embrapa Cerrados, p. 29, 2002.

RAMZY, K.; ABDELGALEEL, M.; KABEEL, A. E.; MOSALAM, H. Performance of a single slope solar still using different porous absorbing materials: an experimental approach. **Environmental Science and Pollution Research**, p. 1-17, 2023.

ROSA, A. H.; FRACETO, L. F.; MOSCHINI-CARLOS, V. **Meio Ambiente e Sustentabilidade**. 412p., Porto Alegre: Bookman, 2012.

ROSA, M.; AFANASEVA, O.; FEDYUKHIN, A. V.; BIANCO, V. Prospects and characteristics of thermal and electrochemical energy storage systems. **Journal of Energy Storage**, v. 44, p. 103443, 2021.

ROSTAMPOUR, V.; JAXA-ROZEN, M.; BLOEMENDAL, M.; KWAKKEL, J.; KEVICZKY, T. Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) smart grids: Large-scale seasonal energy storage as a distributed energy management solution. *Applied Energy*, v. 242, p. 624-639, 2019.

REYES A.; GATICA E; HENRÍQUEZ-VARGAS L.; PAILAHUEQUE N.; VARGAS A. Experimental and numerical study of desalination using solar energy and phase change materials. **J. Environ. Chem. Eng.**, v. 11, n. 6, p. 111193, 2023.

RAINA, A.; ZHAO, J.; WU, X.; KUNWAR, L.; WHITTINGTON, D. The structure of water vending markets in Kathmandu, Nepal. *Water Policy*, v. 21, n. S1, p. 50-75, 2019.

SIBAGARIANG, Y. P.; NAPITUPULU, F. H.; KAWAI, H.; AMBARITA, H.; Study on the effect of oil palm shells on fresh water productivity of double slope solar still. *Journal of Energy Storage*, v. 70, 108000, 2023.

RUFUSS, D. D. W.; ARULVEL, S.; KUMAR, V. A.; DAVIES, P. A.; ARUNKUMAR, T.; SATHYAMURTHY, R.; HIWARKAR, V. V. Combined effects of composite thermal energy storage and magnetic field to enhance productivity in solar desalination. **Renewable Energy**, v. 181, p. 219-234, 2022.

SUNGCAD, K. S.; LORETERO, M. E. Design and Testing of a Single Basin Solar Still with Sensible Heat Storage Medium. In: **Proc. Int. Conf. Mech. Electr. Med. Intell. Syst.** 2019 Des. 2019.

SPROUSE, L.; LEBU, S.; NGUYEN, J.; MUOGHALU, C.; UWASE, A.; GUO, J.; MANGA, M. Shared sanitation in informal settlements: A systematic review and meta-

analysis of prevalence, preferences, and quality. **International Journal of Hygiene and Environmental Health**, v. 260, p. 114392, 2024.

SAMPATHKUMAR, A.; SURAPARAJU, S. K.; NATARAJAN, S. K. Enhancement of yield in single slope solar still by composite heat storage material—experimental and thermo-economic assessment. **Journal of Solar Energy Engineering**, v. 145, n. 2, p. 021005, 2023.

SALEHI, M., Global water shortage and potable water safety; Today's concern and tomorrow's crisis. **Environment International**, v. 158, p. 106936, 2022.

SELLAMI, M. H.; TOUAHIR, R.; GUEMARI, S.; LOUDIYI, K. Use of Portland cement as heat storage medium in solar desalination. **Desalination**, v. 398, p. 180-188, 2016.

SATHISH KUMAR T. R; JEGADHEESWARAN S; CHANDRAMOHAN P. Performance investigation on fin type solar still with paraffin wax as energy storage media. **J. Therm. Anal. Calorim.**, v. 136, p. 101-112, 2019.

SHARSHIR, S. W.; PENG, G.; ELSHEIKH A. H.; EDREIS, E. M. A.; ELTAWIL, M. A.; ABDELHAMID, T.; KABEEL, A. E.; ZANG, J.; YANG, N.; Energy and exergy analysis of solar stills with micro/nano particles: A comparative study. **Energy Conversion and Management**, v. 177, p. 363-375, 2018.

SPINKS, A. T; DUNSTAN, R. H.; HARRISON, T.; COOMBES, P.; KUCZERA, G. Thermal inactivation of water-borne pathogenic and indicator bacteria at sub-boiling temperatures. **Water Research**, v. 40, n. 6, p. 1326-1332, 2006.

SHAH R.; MAKWANA M.; MAKWANA N.; DESAI R. Performance analysis of black gravel solar still. **Mater. Today: Proc.**, v. 72, p. 1000-1006, 2023.

SURAPARAJU, S. K.; RAMASAMY, D.; NATARAJAN, S. K. Augmentation of freshwater productivity in a single-slope solar still using ball marbles. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 46, p. 65974-65986, 2021.

SHOEIBI S.; RAHBAR N.; ESFAHLANI A. A.; KARGARSHARIFABAD H. Improving the thermoelectric solar still performance by using nanofluids— Experimental study, thermodynamic modeling and energy matrices analysis. **Sustain. Energy Technol. Assess.**, v. 47, 101339, 2021.

SAXENA A.; CUCE E.; KABEEL A. E.; ABDELGAIED M.; GOEL V. A thermodynamic review on solar stills. **Solar Energy**, v. 237, p. 377-413, 2022.

SALEM, M. R.; SALEM, M. R.; HIGAZY, M. G.; ABDREBBO, M. F. Performance enhancement of a solar still distillation unit: A field investigation. **Solar Energy**, v. 202, p. 326-341, 2020.

SAINI V.; SAHOTA L.; JAIN V. K.; TIWARE G. N. Performance and cost analysis of a modified built-in-passive condenser and semitransparent photovoltaic module integrated passive solar distillation system. **J. Energy Storage**, v. 24, 100809, 2019.

SABINO, C. de V.S.; LOBATO, W.; COUTINHO, F. A.; ATAIDE, A.C.Z.; BUENO, A. P. Concepções de futuros professores sobre águas subterrâneas. **Ensino Pesquisa Educação Ciências**. Belo Horizonte, v.11, n.2, p. 318-334, 2009.

SANTOS, R. A. Hidrogeoquímica das Águas Subterrâneas do Município de Iraquara, Bahia. Dissertação de Mestrado – **Programa de Pós-graduação em Geologia**, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, 2011.

SANTOS, E.P.C.C. **Remoção de etinil estradiol no tratamento de água para consumo humano: estudo em escala piloto**. 150p. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2011.

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

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

SHANNON, M. A.; BOHN, P. W.; ELIMELECH, M.; GEORGIADIS, J. G.; MARINAS, B. J.; MAYES, A. M. Science and technology for water purification in the coming decades. **Nature**, v. 452, p. 301-310, 2008.

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

SHARMA, S.; BHATTACHARYA, A. Drinking water contamination and treatment techniques. **Applied Water Science**, v. 7, p. 1043-1067, 2017.

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

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

SHARSHIR, S. W. PENG, G.; WU, L.; YANG, N.; ESSA, F. A.; ELSHEIKH, A. H., KABEEL, A. E. Enhancing the solar still performance using nano fluids and glass cover cooling: experimental study. **Applied thermal engineering**, v. 113, p. 684-693, 2017.

SHEN M.; SONG B.; ZHU Y.; ZENG G.; ZHANG Y.; YANG Y.; WEN X.; CHEN M.; YI H. Removal of microplastics via drinking water treatment: Current know led geand future directions. **Chemosphere**, v. 251, p. 1-13, 2020.

SILVA, A. B.; BRITO, J. M.; DUARTE, J. S.; ALMEIDA, O. E. L. Análise microbiológica da água utilizada para consumo nas escolas de Esperança, Paraíba. **Revista Principia**, n. 37, p. 11-17, 2017.

SILVA, L. R. C.; RIBEIRO, M. B. M.; OLIVEIRA, A. D.; SILVA, C. S.; DE FARIA, É. V.; SANTOS, K. G. Destilação solar do solvente etanol proveniente da extração de óleo de coco. **Brazilian Journal of Development**, 5(12), 28964-28982, 2019.

SILVA, A. M. M. Efeito antimicrobiano do ozônio no processamento da tilápia do Nilo, *Oreochromis niloticus*. Dissertação de mestrado, (Programa de Pós-Graduação em Produção Animal) - Universidade Federal Rural do Semiárido, 2015.

SOARES, A. C. F. EVANGELISTA-BARRETO N. S.; MARBACH P. A. S. **Tópicos em microbiologia agrícola**, v. 8, 276 p., 1ª Edição, Cruz das Almas: Editora UFRB, 2021.

SOUZA, J. B., DANIEL, L, A. Inativação dos microrganismos indicadores *Escherichia coli*, *colifagos* e *Clostridium perfringens* empregando ozônio. **Ambiência - Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais**, v. 4, p.265-273, 2008.

SPIRO, T. G.; STIGLIANI, W. M.; **Química ambiental**. 2ª Edição. 352p., Pearson Universidades, 2008.

SHAFII M. B.; SHAHMOHAMADI M.; FAEGH M.; SADRHOSSEINI H. Examination of a novel solar still equipped with evacuated tube collectors and thermoelectric modules. **Desalination**, 382(), 21–27, 2016.

STRAUSS, A.; REYNEKE, B.; WASO, M.; KHAN, W. Compound parabolic collector solar disinfection system for the treatment of harvested rain water. **Environmental Science Water Research & Technology**, v. 4, p. 976-991, 2018.

SARAVANAN, N. M.; RAJAKUMAR, S.; MOSHI, A. A. M. Experimental investigation on the performance enhancement of single basin double slope solar still using kanchey marbles as sensible heat storage materials. **Materials Today: Proceedings**, v. 39, p. 1600-1604, 2021.

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

SETH, O. N.; TAGBOR, T. A.; BERNARD, O. Assessment of chemical quality of groundwater over some rock types in Ashanti Region, Ghana. **American Journal of Scientific and Industrial Research**, 5(1): 1-6, 2014.

SOUZA, C. D. O.; MELO, T. R. B.; MELO, C. D. S. B.; MENEZES, Ê. M.; CARVALHO, A. C. D.; MONTEIRO, L. C. R. *Escherichia coli* enteropatogênica: uma categoria diarreio gênica versátil. *Revista Pan-Amazônica de Saúde*, v. 7, n. 2, p. 79-91, 2016.

SAMBARE, R. K., JOSHI, S., KANOJIYA, N. C., Improving the freshwater production from tubular solar still using sensible heat storage materials. **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 38, p. 101676. 2023.

SAKTHIVEL M.; SHANMUGASUNDARAM S. Effect of energy storage medium, (black granite gravel) on the performance of a solar still. **Int. J. Energy Res.**, v. 32, n. 1, p. 68-82, 2008.

SARMENTO, K. K. F., SILVA, C. B., DE ABREU BENEDITO, D. S., CAVALCANTE, G. G., DE MEDEIROS, K. M., & DE 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.

SAMBARE, R. K., DEWANGAN, S. K., GUPTA, P. K., JOSHI, S. Augmenting the productivity of tubular solar still using low-cost energy storage materials. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 52, p. 78739-78756, 2022.

TRABULSI, L. R.; ALTERTHUM, F. **Microbiologia**. 760 p 5. Edição. São Paulo, SP: Atheneu, 2008.

TIWARE, S; RATHORE, P. K. S.; Performance enhancement of solar still for water desalination integrated with thermal energy storage. **Materials Today: Proceedings**, 2022

TRATA BRASIL. **Ranking do Saneamento do Instituto Trata Brasil de 2024** (SNIS 2022). Disponível em: Acesso em 16, Outubro de 2024.

THOAI, D. N.; TA, Q. T. H.; TRUONG, T. T.; VAN NAM, H.; VAN VO, G. Review on the recent development and applications of three dimensional (3D) photothermal materials for solar evaporators. **Journal of Cleaner Production**, v. 293, p. 126122, 2021.

TOOSI, S. S. A.; GOSHAYESHI, H. R.; HERIS, S. Z.; Experimental investigation of stepped solar still with phase change material and external condenser. **Journal of Energy Storage**, v. 40, 102681, 2021.

TEI E. A.; SHAHUL HAMEED R. M.; ATHIKESAVAN M. M.; SRINIVASAN A. Enhancing the performance of conventional solar still using sensible heat energy storage materials. **Environ. Sci. Pollut. Res.**, p. 1-10, 2023.

TUNDISI, J.G.; MATSUMURA-TUNDISI. **Recursos Hídricos no Século XXI**.: Oficina de Textos, 2011. 328 p.

TABRIZI, F. F.; DASHTBAN, M.; MOGHADDAM, H. Experimental investigation of a weir-type cascade solar still with built-in latent heat thermal energy storage system. **Desalination**, v. 260, n. 1-3, p. 248-253, 2010.

TIAN, Y.; ZHAO, C. A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. **Applied energy**, v. 104, p. 538-553, 2013.

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

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

VELMURUGAN, V.; DEENADAYALAN, C. K.; VINOD, H.; SRITHAR, K. Desalination of effluent using fin type solar still. **Energy**, v. 33, n. 11, p. 1719-1727, 2008.

VELMURUGAN, V.; KUMAR, K. N.; HAQ, T. N.; SRITHAR, K. Performance analysis in stepped solar still for effluent desalination. **Energy**, v. 34, n. 9, p. 1179-1186, 2009.

VEMBU S.; ATTIA M. E. H.; THANGAMUTHU M.; THANGAMUTHU G. Energy, exergy, and economic analysis of solar still using coal cylinder fins: an experimental study. **Environ. Sci. Pollut. Res.**, 30(2), 2597-2606. 2023.

VERMA, K.; GUPTA, A.; GUPTA A, B. Optimization of ozone disinfection and its effect on trihalome thanes. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 4, p. 3021-3032, 2016.

VIVAR, M.; PICHEL, N.; FUENTES, M.; LÓPEZ-VARGAS, A. Separating the UV and thermal components during real-time solar disinfection experiments: The effect of temperature. **Solar Energy**, v. 146, p. 334-341, 2017.

VAN VLIET, M. T.; JONES, E. R.; FLÖRKE, M.; FRANSSSEN, W. H.; HANASAKI, N.; WADA, Y.; E YEARSLEY, J. R. Global water scarcity including surface water quality and expansions of clean water technologies. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 2, p. 024020, 2021.

VAN PUIJENBROEK, P. J. T. M.; BEUSEN, A. H. W.; BOUWMAN, A. F.; AYERI, T.; STROKAL, M.; HOFSTRA, N. Quantifying future sanitation scenarios and progress towards SDG targets in the shared socioeconomic pathways. **Journal of Environmental Management**, v. 346, p. 118921, 2023.

VINAGA, L.; DE QUEIROZ, T. M.; FERREIRA, S. F.; DE SOUZA, J. F. Caracterização físico-química da água utilizada pela população do Assentamento Quilombola Vão Grande-MT. **Acta Iguazu**, v. 4, n. 2, p. 30-44, 2015.

WILSON, H. M.; SHAKEELUR RAHMAN, A.R.; ANKITA, E. P.; NEETU J. Ultra-low-cost cotton based solar evaporation device for sea water desalination and wastewater purification to produce drinkable water. **Desalination**, 2019.

WANG, J., BU, L., WU, Y., SUN, J., LI, G., & ZHOU, S. Junshu et al. Disinfection profiles and mechanisms of *E. coli*, *S. aureus*, and *B. subtilis* in UV365/chlorine process: Inactivation, reactivation, and DBP formation. **Separation and Purification Technology**, v. 287, p. 120584, 2022.

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

XAVIER, M. das V. S.; QUADROS, H. C.; SILVA, M. S. S. Parâmetros de potabilidade da água para o consumo humano: uma revisão integrativa. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, v. 11, n. 1, pág. e42511125118-e42511125118, 2022.

XIA, Y., WAN, Q., XU, X., CAO, R., LI, Y., WANG, J.; WEN, G. Solar disinfection of fungal spores in water: Kinetics, influencing factors, mechanisms and regrowth. **Chemical Engineering Journal**, v. 428, p. 132065, 2022.

YU, J.; WANG, C.; LIU, S.; YANG, S.; DU, X.; LIU, S.; LI, C. Solid waste-derived solar desalination devices: Enhanced efficiency in water vapor generation and diffusion. **Chemical Engineering Journal**, p. 149870, 2024.

YOUNES M. M.; ABDULLAH A. S.; OMARA Z. M.; ESSA F. A. Enhancement of discs' solar still performance using thermal energy storage unit and reflectors: an experimental approach. **Alexandria Eng. J.**, 61(10), 7477-7487, 2022.

ZHU, G.; XU, J.; ZHAO, W.; HUANG, F. Constructing black titania with unique nanocage structure for solar desalination. **ACS applied materials & interfaces**, v. 8, n. 46, p. 31716-31721, 2016.

ZHOU, L.; TAN, Y.; WANG, J.; XU, W.; YUAN, Y.; CAI, W.; ZHU, Z. 3D self-assembly of aluminium nanoparticles for plasmon-enhanced solar desalination. **Nature Photonics**, v. 10, n. 6, p. 393-398, 2016.

ZAINUDIN, F.; HASAN, H.; ABDULLAH, S, R. An overview of the technology used to remove trihalo methane (THM), trihalo methane precursors, and trihalo methane formation potential (THMFP) from water and waste water. **Journal of industrial and Engineering Chemistry**, v. 57, p. 1-14, 2018.

ZULUAGA-GOMEZ, J.; BONAVERI P.; ZULUAGA, D.; ÁLVAREZ-PEÑA C.; RAMÍREZ-ORTIZ, N. Techniques for Water Disinfection, Decontamination and Desalination: A Review. **Desalination and Water Treatment**, p. 47-63, 2020.

ZHANG X.; XU D.; WANG Z.; ZHANG Y. Balance of water supply and consumption during ecological restoration in arid regions of Inner Mongolia, China. **Journal of Arid Environments**, 186, 104406, 2021.