



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL
MESTRADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL

CAMYLLA BARBOSA SILVA

**REMOÇÃO DE OXITETRACICLINA DE ÁGUAS CONTAMINADAS VIA
DESTILAÇÃO SOLAR**

CAMPINA GRANDE - PB

2024

CAMYLLA BARBOSA SILVA

**REMOÇÃO DE OXITETRACICLINA DE ÁGUAS CONTAMINADAS VIA
DESTILAÇÃO SOLAR**

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

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

Orientador: Prof. Dr. Carlos Antônio Pereira de Lima

Coorientadora: Profa. Dra. Keila Machado de Medeiros

CAMPINA GRANDE - PB

2024

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

S586r Silva, Camylla Barbosa.
Remoção de oxitetraciclina de águas contaminadas via destilação solar [manuscrito] / Camylla Barbosa Silva. - 2024.
96 p. : il. colorido.

Digitado.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2024.

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

"Coorientação: Profa. Dra. Keila Machado de Medeiros , . "

1. Antibiótico. 2. Água contaminada. 3. Destilação solar. 4. Qualidade da água. I. Título

21. ed. CDD 628

CAMYLLA BARBOSA SILVA

**REMOÇÃO DE OXITETRACICLINA DE ÁGUAS CONTAMINADAS VIA
DESTILAÇÃO SOLAR**

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

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

Aprovada em: 05/02/2024.

BANCA EXAMINADORA



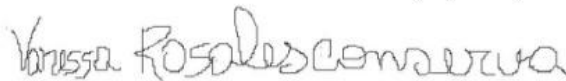
Prof. Dr. Carlos Antônio Pereira de Lima (Orientador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



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



Prof. Dr. Ricardo Chacartegui Ramirez (Examinador Externo)
Universidad de Sevilla – US (Espanha)



Dr^ª. Vanessa Rosales Conserva (Examinador Externo)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dr. Rui de Oliveira (Examinador Interno)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

AGRADECIMENTOS

A Deus que, sempre presente, me guiou para os melhores caminhos.

Aos meus pais, Cicera Eliane Barbosa e Severino Ramos da Silva, que nunca mediram esforços para me ver feliz e realizada. Serei eternamente grata por todo amor, dedicação e confiança depositada em mim.

Aos meus irmãos e a todos os familiares que sempre acreditaram em mim e se fizeram presentes durante essa conquista.

Ao meu esposo, Rayan Hercuhergues, por todos os momentos felizes, dando-me força pra chegar até aqui. Sem você tudo seria mais difícil.

À minha amiga e companheira de vida, Karyna, que foi fundamental nessa caminhada da carreira acadêmica, compartilhando inúmeros desafios ao longo desses anos, tornando tudo mais leve.

Ao meu orientador, Carlos Antônio Pereira de Lima, e coorientadora, Keila Machado de Medeiros, por todo ensinamento e experiência transmitida acerca dessa pesquisa. Agradeço por toda ajuda e incentivo.

Ao grupo GRUTAA por todo conhecimento compartilhado.

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

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

Todos vocês são parte dessa conquista.

RESUMO

Os produtos farmacêuticos são uma das fontes mais importantes responsáveis pela contaminação da água, com ênfase aos antibióticos veterinários pois seu uso aumentou significativamente nos últimos anos. A oxitetraciclina (OTC) veterinária é um dos antibióticos mais consumidos e com importante inserção no meio ambiente, contudo é uma substância persistente aos tratamentos convencionais de água e esgoto. Logo, o presente estudo visa remover a OTC de águas contaminadas através de uma tecnologia alternativa que é a destilação via energia solar, essa tecnologia consiste em um sistema de baixo custo e fácil operação. Um destilador solar do tipo cascata foi utilizado para tratar a água contaminada, essa água foi coletada em poço artesiano na cidade de Barra de Santana/PB e combinada com o antibiótico em concentração de 30 mg.L⁻¹, 45 mg.L⁻¹ e 60 mg.L⁻¹. A caracterização da água foi realizada antes e após o processo de destilação, em virtude da quantificação de OTC na água e das análises físico-químicas. Além disso, foram monitoradas as temperaturas da água e temperaturas do vidro, assim como os dados de temperatura ambiente, incidência de radiação solar, velocidade do vento, umidade relativa do ar e a produção de destilado. Os coeficientes de transferência de calor interno e externo foram determinados. Após o processo de destilação, o sistema foi capaz de remover a OTC em uma faixa de 89,84% a mais de 99,67% e a produção de água chegou a 3.025,40 mL.m⁻².dia⁻¹, nesse dia a incidência de radiação solar média foi de 628,38 W.m⁻², em seguimento disso, a eficiência térmica diária máxima obtida foi de 48,71%. Ademais, considerando as análises físico-químicas das águas contaminada e destilada foram alcançadas reduções máximas no teor de cloretos de 99,74%, de condutividade elétrica de 99,87% e nível máximo de redução de 100% para dureza total, sódio e potássio na água destilada, atingindo valores de acordo com os padrões de potabilidade exigidos pela Portaria do Ministério da Saúde vigente. O custo unitário anual de água potável é estimado em 0,11 R\$.L⁻¹.m². Conclui-se que o sistema de destilação solar utilizado possui capacidade real de remoção de OTC e de produção de água para atender pequenas comunidades em localidades que existam alta incidência de radiação solar.

Palavras-chave: antibiótico; água contaminada; destilação solar; qualidade da água.

ABSTRACT

Pharmaceutical products are one of the most important sources responsible for water contamination, with an emphasis on veterinary antibiotics as their use has increased significantly in recent years. Veterinary oxytetracycline (OTC) is one of the most consumed antibiotics and has an important impact on the environment, however it is a persistent substance in conventional water and sewage treatments. Therefore, the present study aims to remove OTC from contaminated waters through an alternative technology that is distillation via solar energy, this technology consists of a low-cost and easy-to-operate system. A waterfall-type solar distiller was used to treat the contaminated water, this water was collected from an artesian well in the city of Barra de Santana/PB and combined with the antibiotic at a concentration of 30 mg.L⁻¹, 45 mg.L⁻¹ and 60 mg.L⁻¹. Water characterization was carried out before and after the distillation process, due to the quantification of OTC in the water and physical-chemical analyses. In addition, water temperatures and glass temperatures were monitored, as well as data on ambient temperature, incidence of solar radiation, wind speed, relative humidity and distillate production. The internal and external heat transfer coefficients were determined. After the distillation process, the system was able to remove OTC in a range from 89.84% to more than 99.67% and water production reached 3,025.40 mL.m⁻².day⁻¹, in this day the incidence of average solar radiation was 628.38 W.m⁻², following this, the maximum daily thermal efficiency obtained was 48.71%. Furthermore, considering the physical-chemical analyzes of contaminated and distilled water, maximum reductions in chloride content of 99.74%, electrical conductivity of 99.87% and maximum reduction level of 100% for total hardness, sodium and potassium were achieved. in distilled water, reaching values in accordance with the potability standards required by the current Ministry of Health Ordinance. The annual unit cost of drinking water is estimated at 0.11 R\$.L⁻¹.m². It is concluded that the solar distillation system used has a real capacity to remove OTC and produce water to serve small communities in locations where there is a high incidence of solar radiation.

Keywords: antibiotic; contaminated water; solar distillation; water quality.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - Estrutura química da oxitetraciclina.	15
FIGURA 2 - Principais fontes de contaminação do meio ambiente por medicamentos de uso veterinário.	17
FIGURA 3 - Espectro eletromagnético destacando componentes da região visível.	22
FIGURA 4 - Irradiação solar.	22
FIGURA 5 - Princípio de funcionamento da destilação solar.	26
FIGURA 6 - Vista esquemática de um destilador solar simples.	27
FIGURA 7 - Sistema de destilação solar com destilador do tipo cascata	28
FIGURA 8 - Balanço térmico total.	36
FIGURA 9 - Balanço térmico de energia da cobertura de vidro.	37
FIGURA 10 - Balanço térmico de energia da água.	38
FIGURA 11 - Balanço térmico de energia da bandeja.	39
FIGURA 12 - Balanço térmico de energia do isolante.	40
FIGURA 13 – Destilador solar do tipo cascata com placa absorvedora ondular.	48
FIGURA 14 - Componentes do destilador solar ondular	49
FIGURA 15 - Sistema multianálise de medição dos parâmetros experimentais.	52
FIGURA 16 - Fluxograma da quantificação de OTC.	55
FIGURA 17 - Parâmetros meteorológicos do dia 30/08/2023.	58
FIGURA 18 - Parâmetros meteorológicos do dia 15/09/2023.	58
FIGURA 19 - Parâmetros meteorológicos do dia 21/09/2023.	59
FIGURA 20 - Perfis de temperatura e incidência de radiação solar do dia 30/08/2023.	60
FIGURA 21 - Perfis de temperatura e incidência de radiação solar do dia 15/09/2023.	61
FIGURA 22 - Perfis de temperatura e incidência de radiação solar do dia 21/09/2023.	62
FIGURA 23 - Produtividade de água e incidência de radiação solar do dia 30/08/2023.	62
FIGURA 24 - Produtividade de água e incidência de radiação solar do dia 15/09/2023.	63
FIGURA 25 - Produtividade de água e incidência de radiação solar do dia 21/09/2023.	64
FIGURA 26 - Eficiência térmica horária e incidência de radiação solar do dia 30/08/2023. .	65
FIGURA 27 - Eficiência térmica horária e incidência de radiação solar do dia 15/09/2023. .	65
FIGURA 28 - Eficiência térmica horária e incidência de radiação solar do dia 21/09/2023. .	66
FIGURA 29 - Coeficientes de transferência interna de calor do dia 30/08/2023.	68
FIGURA 30 - Coeficientes de transferência interna de calor do dia 15/09/2023.	69

FIGURA 31 - Coeficientes de transferência interna de calor do dia 21/09/2023.....	69
FIGURA 32 - Coeficientes de transferência externa de calor do dia 30/08/2023.	70
FIGURA 33 - Coeficientes de transferência externa de calor do dia 15/09/2023.	71
FIGURA 34 - Coeficientes de transferência externa de calor do dia 21/09/2023.	71
FIGURA 35 - Soluções para a curva de calibração.	72
FIGURA 36 - Curva de calibração para determinação da concentração de OTC.	73

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Relatos sobre a existência da OTC nas matrizes ambientais.....	15
TABELA 2 - Parâmetros físico-químicos de potabilidade.....	20
TABELA 3 - Tecnologias dos processos térmicos de destilação.	23
TABELA 4 - Dados operacionais do destilador.	50
TABELA 5 – Faixa, precisão e incerteza de cada aparelho de medição.	53
TABELA 6 - Soluções padrões de OTC.....	54
TABELA 7 - Parâmetros físico-químicos realizados	56
TABELA 8 - Radiação solar e eficiência.	67
TABELA 9 – Absorbâncias das soluções da curva de calibração da OTC	72
TABELA 10 - Concentração de OTC e eficiência de remoção para cada experimento.....	74
TABELA 11 - Tecnologias para remoção de OTC.	75
TABELA 12 - Resultado dos parâmetros físico-químicos.	77
TABELA 13 - Lista dos custos de matéria-prima e mão de obra.....	80
TABELA 14 - Análise do custo unitário da água para o destilador solar.....	80

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	OBJETIVOS	13
2.1	Objetivo geral.....	13
2.2	Objetivos específicos.....	13
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
3.1	Oxitetraciclina (OTC)	14
3.1.1	<i>Fontes de contaminação do ambiente pela OTC</i>	16
3.1.2	<i>Efeitos nocivos da OTC em plantas e animais</i>	18
3.1.3	<i>Efeitos nocivos da OTC nos seres humanos</i>	19
3.2	Potabilidade da água	20
3.3	Energia e radiação solar.....	21
3.4	Processos de tratamento de água por destilação.....	23
3.5	Destilação solar	26
3.5.1	<i>Tipos de destiladores solar</i>	27
3.5.2	<i>Eficiência dos destiladores solar</i>	30
3.6	Transferência de calor no processo de destilação solar	31
3.6.1	<i>Transferência interna de calor</i>	32
3.6.2	<i>Transferência externa de calor</i>	34
3.7	Balanço térmico no processo de destilação solar	35
3.7.1	<i>Balanço térmico da cobertura de vidro</i>	37
3.7.2	<i>Balanço térmico da água</i>	38
3.7.3	<i>Balanço térmico da bandeja absorvedora de calor</i>	38
3.7.4	<i>Balanço térmico do isolante</i>	39
3.8	Análise de custos de produção de água tratada	40
3.9	Estado da arte	42
4	METODOLOGIA.....	47
4.1	Local de estudo	47
4.2	Água contaminada.....	47
4.3	Protótipo do destilador solar	48
4.4	Modo operacional do destilador.....	50
4.5	Procedimento de coleta de dados	51

4.6	Cálculo da eficiência.....	53
4.7	Cálculo dos coeficientes de transferência de calor	53
4.8	Caracterização da OTC na água.....	53
4.9	Caracterização físico-química da água.....	55
4.10	Custos de produção de água tratada	56
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	57
5.1	Parâmetros meteorológicos.....	57
5.2	Perfis de temperatura e incidência de radiação solar	59
5.3	Produtividade de água destilada	62
5.4	Eficiência térmica do destilador	64
5.5	Coeficientes de transferência de calor na destilação solar.....	67
5.5.1	<i>Coeficientes de transferência interna de calor</i>	<i>67</i>
5.5.2	<i>Coeficientes de transferência externa de calor</i>	<i>70</i>
5.6	Remoção de OTC da água contaminada	72
5.7	Qualidade físico-química da água.....	76
5.8	Custos de produção de água tratada	79
6	CONCLUSÕES.....	81
	REFERÊNCIAS.....	82
	APÊNDICE A - DADOS OPERACIONAIS COLETADOS.....	92

1 INTRODUÇÃO

Os compostos farmacêuticos estão sendo apontados como um dos mais preocupantes contaminantes ambientais da atualidade, pois sua utilização está cada vez mais frequente. Assim, os fármacos são definidos como compostos químicos utilizados no tratamento e prevenção de enfermidades. No entanto, o uso expressivo dessas substâncias gera efeitos significativos como a contaminação do meio ambiente, principalmente nas matrizes água e solo (Wu *et al.*, 2020).

O grupo farmacêutico mais detectado nas águas subterrâneas e superficiais são os antibióticos. A dispersão dessas substâncias é abrangente, chegando a promover a propagação de bactérias resistentes, que podem contaminar lavouras localizadas próximas dos pontos de contaminação e que sejam irrigadas por essas águas contaminadas (Bai *et al.*, 2019; Ozarabaci; Palas; Ersoz, 2022). Conforme Siedlewicz *et al.* (2020) a persistência e o contínuo lançamento de antibióticos no meio ambiente conferem alto potencial de toxicidade aos organismos que constituem os ecossistemas, mesmo em baixos níveis de concentração.

Além disso, as águas subterrâneas que são captadas apresentam grandes quantidades de sais dissolvidos, tais como salinidade, ferro, manganês, metais pesados e resíduos agrícolas como agrotóxicos, tornando essa água imprópria para o consumo humano. Portanto, é relevante considerar a importância da remoção desses poluentes em geral e consequente redução dos impactos ambientais causados (Alves *et al.*, 2015).

Dentre os medicamentos veterinários destaca-se o antibiótico oxitetraciclina (OTC) que é um composto pertencente ao grupo das tetraciclinas, amplamente utilizadas para prevenção e o tratamento de uma variedade de infecções bacterianas em animais produtores de alimentos. Os níveis de antibióticos tetraciclínicos encontrados variam de uma escala muito baixa (ng.L^{-1} a $\mu\text{g.L}^{-1}$) presentes em águas tratadas a uma faixa de concentração mais alta (100 mg.L^{-1} a 500 mg.L^{-1}) em efluentes hospitalares e efluentes de indústrias farmacêuticas (Ozarabaci; Palas; Ersoz, 2022).

A poluição por OTC tornou-se uma importante questão ambiental, já que possui uma ampla gama de aplicabilidades, estimando-se o seu alto potencial poluidor. Cerca de 20 a 90% da quantidade administrada dessa substância não é utilizada pelo organismo, sendo excretada de forma inalterada através das fezes e da urina (Zhang *et al.*, 2014; Zhou *et al.*, 2023). Logo, é particularmente importante tratar as águas contendo esse antibiótico. No entanto, no Brasil,

não existem normativas técnicas de órgãos fiscalizadores oficiais que estabeleçam limites de concentrações de OTC em mananciais destinados ao consumo humano. Assim, os resíduos de OTC podem representar uma ameaça significativa tanto ao meio ambiente quanto à saúde humana, por meio da cadeia alimentar (Wang, C. *et al*, 2022).

Com isso, se faz necessário o uso de sistemas que garantam a potabilidade da água para consumo humano. Para a produção de água potável uma tecnologia que se destaca é a destilação solar térmica (DST) que é renovável, pois utiliza a energia solar como fonte de energia, sendo de fácil operação, baixa manutenção e de simples tecnologia, podendo ser considerada como uma solução para os problemas de escassez de água (Alsagri; Chiasson; Gadalla, 2019). Um destilador solar utiliza radiação natural livre para purificar a água contaminada em água destilada usando o processo de transferência de energia. Os destiladores são considerados de baixo custo e sua eficiência está diretamente relacionada às condições climáticas (Prakash; Velmurugan, 2015).

Nas zonas rurais, principalmente nas áreas mais afastadas dos centros urbanos, não existe sistema de tratamento de água coletivo, com isso uma solução alternativa é a população adotar de forma individualizada o tratamento da água que será consumida (Instituto Trata Brasil, 2018). Ihsanullah *et al.* (2021) enfatiza que a destilação desempenha um papel significativo diante do abastecimento de água de várias regiões que sofrem com a questão da escassez hídrica. Dessa forma, destaca-se o sistema composto por um destilador solar térmico que é capaz de remover poluentes em geral, representando uma tentativa de solução para o abastecimento de água em zonas rurais.

Diante do contexto o presente estudo analisou o potencial de remoção do antibiótico OTC de águas contaminadas, para que seja possível garantir a potabilidade dessa água para consumo humano, através do destilador solar do tipo cascata com placa absorvedora de calor ondular, avaliando os benefícios ambientais e como esta tecnologia pode atender às necessidades das zonas rurais.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a viabilidade técnica da utilização de um destilador solar do tipo cascata com placa absorvedora de calor ondular para a remoção do antibiótico OTC de águas contaminadas.

2.2 Objetivos específicos

- Acompanhar o desempenho térmico do destilador solar tipo cascata, verificando a influência da incidência de radiação solar e das temperaturas.
- Avaliar a produtividade de água e a eficiência térmica do destilador proposto.
- Averiguar os modos de transferência de calor no processo de destilação solar, por meio do cálculo dos coeficientes de transferência internos e externos.
- Verificar a remoção de OTC e a qualidade físico-química da água antes e após o processo de destilação.
- Analisar o custo unitário de água potável.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A descoberta e evolução de antibióticos estão entre os marcos mais significativos do Século XX. No entanto, os antibióticos desempenham um papel expressivo na indução e dispersão de genes de resistência a antibióticos em águas subterrâneas que recentemente se tornaram a principal preocupação ambiental. Essas substâncias são aplicadas em larga escala e persistentes no meio ambiente. Os impactos de longo prazo dos antibióticos nas matrizes ambientais ainda não estão claramente compreendidos, e sua ocorrência e consequências tornaram-se um importante objeto de pesquisa a nível mundial (Zainab *et al.*, 2020).

Evidenciando uma relação custo-benefício destacam-se as tetraciclina que são substâncias classificadas como antibióticos e apresentam custo acessível e alta eficácia no tratamento de infecções causadas por uma ampla variedade de bactérias. Todavia, a persistência e a acumulação de antibióticos no meio ambiente podem produzir efeitos negativos no ecossistema, mesmo a baixos níveis de concentração, podendo chegar a diminuir a disponibilidade de água de qualidade. Ainda, é importante destacar que este grupo de substâncias não necessitam persistir nos sistemas ambientais por longos períodos para causar efeitos nocivos (Da Rocha *et al.*, 2018; Ozarabaci; Palas; Ersoz, 2022).

Dentre o grupo de antibióticos tetraciclínicos, o cloridrato de oxitetraciclina (OTC-HCl) se destaca por possuir um amplo espectro de utilização no tratamento de doenças causadas por diversas bactérias em animais.

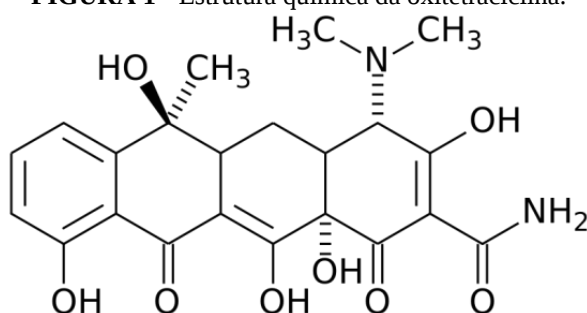
3.1 Oxitetraciclina (OTC)

As OTCs possuem representativo uso no setor produtivo de alimentos, sendo empregadas fórmulas veterinárias que possuem aplicabilidade no tratamento de infecções com doses terapêuticas do medicamento ou como promotores de crescimento. Para a promoção do crescimento o antibiótico é utilizado em doses subterapêuticas, funcionando como um aditivo alimentar, pois os aditivos alimentares são substâncias utilizadas nas rações para modificar as características físico-químicas da mesma objetivando uma maior conversão alimentar, crescimento celular e tecidual e como resultado será possível verificar um aumento nos lucros de venda do animal ou de seus produtos (Torres; Dreher; Simioni, 2015; Cardinal; Kipper; Ribeiro, 2019).

O antibiótico OTC é a principal tetraciclina da medicina veterinária, podendo ser utilizada em vários gêneros animais como em aves, suínos, gado e na criação de peixes (aquicultura) como bactericidas nas infecções e como promotores de crescimento dos animais. Sendo possível verificar seu uso no manejo de alimentos vegetais para otimização de crescimento e produtividade (Zhao-Jun *et al.*, 2019).

A fórmula química da OTC é $C_{22}H_{24}N_2O_9$ e sua estrutura química é mostrada na Figura 1, formada por quatro anéis daí originando sua denominação.

FIGURA 1 - Estrutura química da oxitetraciclina.



Fonte: Bi; Wu; Dong (2020).

A contaminação das matrizes ambientais pela presença de OTC é confirmada a partir de diversos trabalhos científicos desenvolvidos em diferentes localidades. A Tabela 1 contém uma síntese de relatos sobre a existência do antibiótico em questão.

TABELA 1 - Relatos sobre a existência da OTC nas matrizes ambientais.

Matriz	Local	Quantidade	Autores
Água de córrego	Dourados, MS, Brasil	89 $\mu\text{g.L}^{-1}$	Da Rocha <i>et al.</i> (2018)
Águas e sedimento do rio Weihe	Província de Gansu, China	1,56 à 87,89 ng.L^{-1}	Li <i>et al.</i> (2018)
Águas do sistema de drenagem	Cidade de Lahore, Paquistão	374 ng.L^{-1}	Ashfaq <i>et al.</i> (2019)
Afluentes e efluentes de aquiculturas costeiras	Coréia	116 ng.L^{-1}	Choi <i>et al.</i> (2020)
Águas superficiais	China	326 ng.L^{-1}	Lyu <i>et al.</i> (2020)
Ecossistema de aquicultura	Mar Amarelo, norte da China	1478,29 ng.g^{-1}	Han <i>et al.</i> (2020)
Águas superficiais e subterrâneas	Lago Chenhu, China	10 à 50 ng.L^{-1}	Ma <i>et al.</i> (2022)
Águas de maricultura costeira	China	39,5 à 1930 ng.L^{-1}	He <i>et al.</i> (2023)

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

A contaminação de fontes de água com medicamentos veterinários, a exemplo da OTC, é uma preocupação emergente para a saúde humana e o meio ambiente, dado que essas substâncias estão entre os principais contaminantes ambientais da atualidade. A busca por processos de tratamento capazes de retirar os medicamentos da água é uma necessidade urgente, principalmente nas zonas rurais que carecem de estações de tratamento de efluentes (Hoff *et al.*, 2021). Sendo assim, é notório o aumento da preocupação e do interesse da comunidade acadêmica em face aos efeitos adversos dos medicamentos no ambiente.

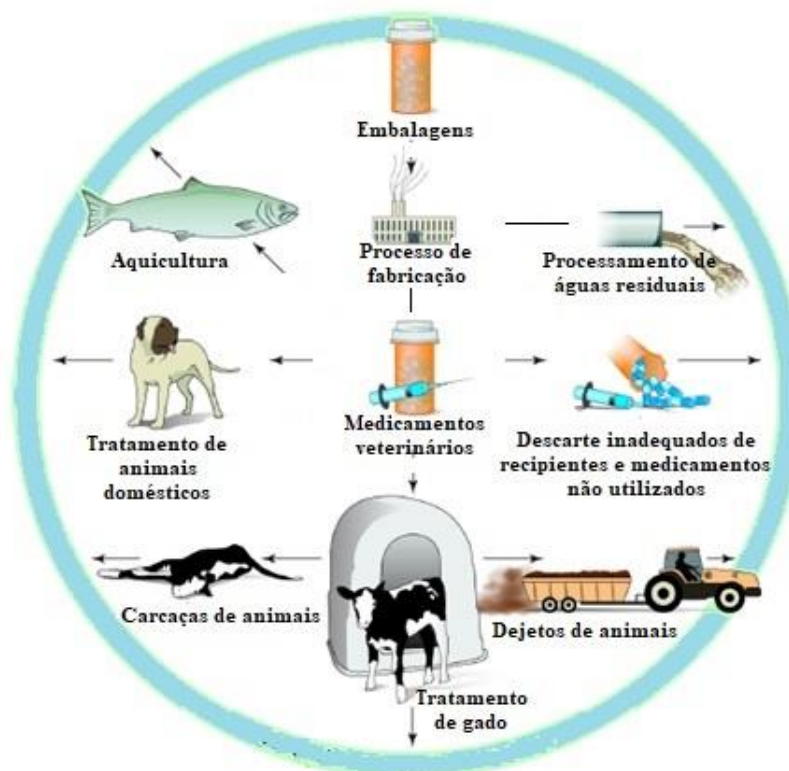
3.1.1 Fontes de contaminação do ambiente pela OTC

Em geral, a introdução dos antibióticos tetracilínicos no ambiente pode ocorrer através da contaminação de efluentes industriais e domésticos, por meio da fabricação dos produtos, pelas más condições de armazenagem das substâncias não utilizadas ou com prazo de validade expirado, através de tratamentos administrados na aquicultura, por meio dos excrementos dos animais e ainda é necessário considerar a possibilidade da liberação de medicamentos no ambiente através da decomposição de carcaças de animais que estavam sob tratamento (Pereira *et al.*, 2012; Margalida *et al.*, 2014).

Assim, por causa dessas fontes de contaminação acontece a lixiviação e o escoamento superficial, em que os antibióticos obtêm livre acesso ao solo, às águas superficiais e às águas subterrâneas, podendo atingir os lençóis freáticos e serem escoados para os corpos hídricos (Ajiboye *et al.*, 2023). Os antibióticos são amplamente distribuídos em rios, sedimentos do solo e lodo ativado devido à remoção incompleta e águas residuais não tratadas corretamente (Zhang *et al.*, 2023).

Conforme ilustrado na Figura 2, os resíduos de medicamentos veterinários podem atingir o meio ambiente através de diversas vias de contaminação.

FIGURA 2 - Principais fontes de contaminação do meio ambiente por medicamentos de uso veterinário.



Fonte: Adaptado de Margalida *et al.*, 2014.

Dentre essas fontes de contaminação apresentadas na Figura 2, os dejetos dos animais, a exemplo das fezes e da urina, são as maiores fontes de contaminação, já que o esterco é muitas vezes lançado diretamente no pasto ou empregado como fertilizante em terras cultiváveis sem nenhum cuidado prévio. A maioria dos antibióticos ingeridos nos animais não são totalmente absorvidos e metabolizados, assim, usualmente podem entrar no ambiente de forma inalterada através dos dejetos, com isso essas substâncias podem acumular-se e exercer sua ação sobre os organismos vivos presentes no ambiente (Siedlewicz *et al.*, 2020).

Outra forma de contaminação é a aquicultura, pois é considerada como uma das fontes dominantes de entrada de antibióticos na água, dentre eles a OTC. Esse antibiótico é despejado diretamente na água junto com a ração dos peixes. Contudo, apenas de 20 a 30% são consumidos pelos peixes e o restante persiste no meio aquático e é descarregado nas águas circundantes, ou depositado nos sedimentos de lagos ou lagoas utilizadas para a aquicultura (Vilca *et al.*, 2021). Os peixes podem bioacumular os antibióticos da água, como também do ambiente circundante ou da ração e isso acarreta altas concentrações dessas substâncias nos tecidos dos peixes (Chen *et al.*, 2018).

Também pode ocorrer contaminação por meio do descarte inadequado de embalagens e medicamentos provenientes de indústrias farmacêuticas durante o processo de fabricação das substâncias, ou por motivos de sobras de medicamentos, que ocorrem por meio da interrupção ou da mudança de tratamento, como também medicamentos que estejam vencidos (Margalida *et al.*, 2014).

Ainda é possível ressaltar a contaminação por meio da avicultura, já que a OTC é utilizada no tratamento de controle das infecções das aves comerciais causadas por germes sensíveis a esse antibiótico. Nas aves o medicamento é ingerido de forma oral, sendo diluído na água ou na ração para que seja fornecido aos animais, isso acontece devido à capacidade do antibiótico em prevenir doenças. A OTC remanescente no solo será ainda mais dispersa nas águas subterrâneas através dos ciclos da água (Wang, Y. *et al.*, 2022).

3.1.2 Efeitos nocivos da OTC em plantas e animais

A OTC é um antibiótico que representa uma parcela significativa na participação em diversos setores de produção: gado de corte, suínos, aves e peixes. Devido sua ampla utilização o nível de contaminação ambiental é cada vez mais elevado, considerando que em ambientes contaminados com a OTC existe a possibilidade de desequilíbrio trófico, sendo essa uma grande preocupação no âmbito ambiental (Siedlewicz *et al.*, 2020).

A presença de OTC no ambiente causa diferentes efeitos nocivos nas plantas e nos animais. Esse efeito pode atingir qualquer nível de hierarquia biológica, sejam eles nas células, nos órgãos, no organismo, na população ou no ecossistema. A presença desses compostos pode influenciar na fisiologia, no metabolismo e no comportamento das espécies, além de causar efeitos secundários, podendo alterar a defesa imunológica do organismo tornando-o mais susceptível a parasitas e doenças diversas. Foi relatado que a permeabilidade das células de algas em água doce é impactada negativamente pela presença de antibióticos tetraciclínicos nas águas (Ajiboye *et al.*, 2023).

Os efeitos da presença de OTC em diferentes plantas têm sido investigados. A OTC foi encontrada nas raízes e folhas de pepino, tomate e alface causando impactos negativos no crescimento dessas plantas (Ahmed *et al.*, 2015). O acúmulo de OTC foi detectado nas raízes, caules e folhas de *Zea mays* em concentração de 15 mg.L^{-1} , inibindo assim o crescimento dessa planta (Migliore *et al.*, 2010).

Os efeitos negativos da presença de OTC nos animais também foram investigados. Animais terrestres e aquáticos sofrem as consequências do uso dessa substância. Em animais terrestres, verificou-se que a espécie masculina apresentava uma viabilidade espermática reduzida, na espécie *Cordylochernes scorpioides* (Ajiboye *et al.*, 2023). Em animais aquáticos, foi observado que a população de organismos como peixes, zooplâncton, macrófitas e micrófitas foi impactada negativamente devido à presença de substâncias tetraciclínicas nas águas (Kovalakova *et al.*, 2020).

3.1.3 Efeitos nocivos da OTC nos seres humanos

A presença de resíduos de antibióticos no meio ambiente e nos alimentos de origem animal, como leite, vegetais, carnes e ovos, ocorre devido à baixa biodisponibilidade dessas substâncias no organismo e a dificuldade de degradação no ambiente (Wang, C. *et al.*, 2022). Desse modo, o problema ultrapassa a questão ambiental, tornando-se um problema de saúde pública, visto que os antibióticos são eventualmente enriquecidos no corpo humano através da cadeia alimentar. É recorrente que o consumo de alimentos, a exemplo dos peixes, contaminados com antibióticos pode representar riscos à saúde humana (Chen *et al.*, 2018).

A exposição indevida e prolongada, tem sido associada a seleção e disseminação de bactérias resistentes a antibióticos e genes de resistência a antibióticos, representando uma ameaça potencial à saúde humana, visto que aumenta os riscos e os custos com tratamento. A classe das tetraciclínas representa 35,3% das classes de fármacos mais utilizados em animais (Zhang *et al.*, 2023).

Os resíduos de antibióticos em amostras de alimentos podem produzir efeitos nocivos significativos, como reações alérgicas, danos ao fígado, toxicidade acumulativa, amarelamento dos dentes e distúrbios gastrointestinais (Zhao *et al.*, 2019). Mesmo uma pequena quantidade deles pode ter efeitos adversos no corpo humano, incluindo toxicidade de órgãos e surdez (Miao; Wang; Yang, 2018).

Devido a esses efeitos colaterais e com a finalidade de garantir a segurança alimentar humana, alguns países adotaram um limite máximo de resíduos (LMR) de antibióticos em alimentos. A União Europeia (UE) e a República Popular da China adotaram um LMR para antibióticos tetraciclínicos em alimentos de origem animal de 100 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ em leite e músculo, 200 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ em ovos, 300 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ no fígado e 600 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ no rim (Zhao *et al.*, 2019). No Brasil,

existe a Instrução Normativa Técnica nº 51, de dezembro de 2019 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) que estabelece limite de concentração em alimentos, podendo-se destacar o limite máximo de resíduos para OTC de $200 \mu\text{g.kg}^{-1}$ no tecido dos peixes (músculos e pele).

As organizações internacionais de saúde incentivam todos os países a reduzir o uso de antibióticos veterinários, pois qualquer redução no consumo dessas substâncias levaria a uma redução proporcional nos antibióticos que são liberados constantemente nas águas residuais. O que reduziria comprovadamente seus diversos efeitos nocivos (Kovalakova *et al.*, 2020).

3.2 Potabilidade da água

A água obtida a partir de um destilador solar para ser considerada potável precisa estar de acordo com o padrão de potabilidade de água. O padrão de potabilidade da água está inserido na Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021 do Ministério da Saúde, que dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano (Brasil, 2021). O termo água potável é definido pela portaria como a água que atenda ao padrão de potabilidade estabelecido e que não ofereça riscos à saúde.

A portaria em questão estabelece os valores máximos permitidos para parâmetros físicos, químicos e biológicos que possam garantir a potabilidade da água. Todos os parâmetros presentes na portaria se aplicam à água destinada ao consumo humano, podendo ser resultante de sistema de abastecimento, de carro-pipa ou de solução alternativa de abastecimento de água, sejam elas coletivas ou individuais.

Na Tabela 2 estão apresentados alguns dos parâmetros físico-químicos de potabilidade e seus respectivos valores máximos permitidos.

TABELA 2 - Parâmetros físico-químicos de potabilidade.

Parâmetros	Valores máximos permitidos
Cor aparente	15 uH
Cloretos	250 mg.L^{-1}
Dureza total	300 mg.L^{-1}
pH	6,0-9,0
Sódio	200 mg.L^{-1}
Sólidos dissolvidos totais (SDT)	500 mg.L^{-1}
Turbidez	5 NTU

Fonte: Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021 do Ministério da Saúde.

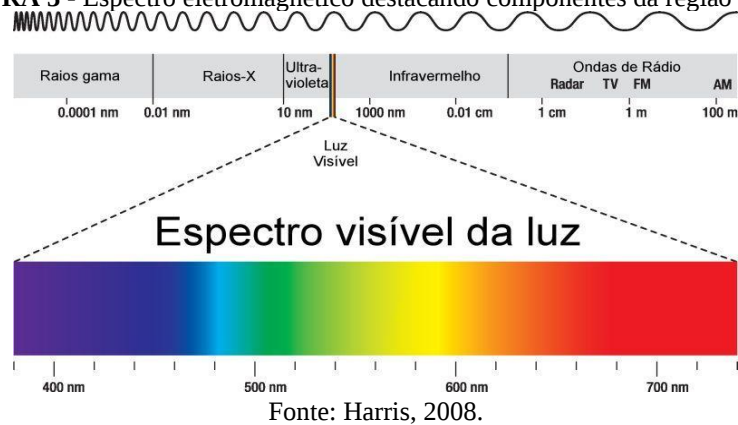
3.3 Energia e radiação solar

A radiação solar é o termo utilizado quando se refere à energia resultante do calor ou luz do sol, essa energia desempenha um importante papel em muitos processos ambientais. Fonte de energia que se apresenta na natureza de forma uniforme, sendo o sol a variável de entrada principal e contínua. A energia solar, constitui-se, numa forma ideal de energia para proteção do meio ambiente, com ênfase à sustentabilidade. O sol é constituído predominantemente pelos mais leves elementos químicos, o hidrogênio (70%) e o hélio (27%), e o restante da matéria solar é formada por elementos desconhecidos (Sen, 2004; Ajarostaghi; Mousavi, 2022).

Segundo Sen (2004) a radiação da energia solar é normalmente expressa em termos de densidade de fluxo de energia através de uma área horizontal, que é a irradiância, e a insolação solar diária, através de um valor integrado ao longo de um dia. Ao incidir no topo da atmosfera, a radiação solar se propaga até atingir a superfície terrestre, passando durante esse percurso pelos processos de reflexão, absorção e espalhamento, que não são suficientes para reter todo o espectro da radiação solar.

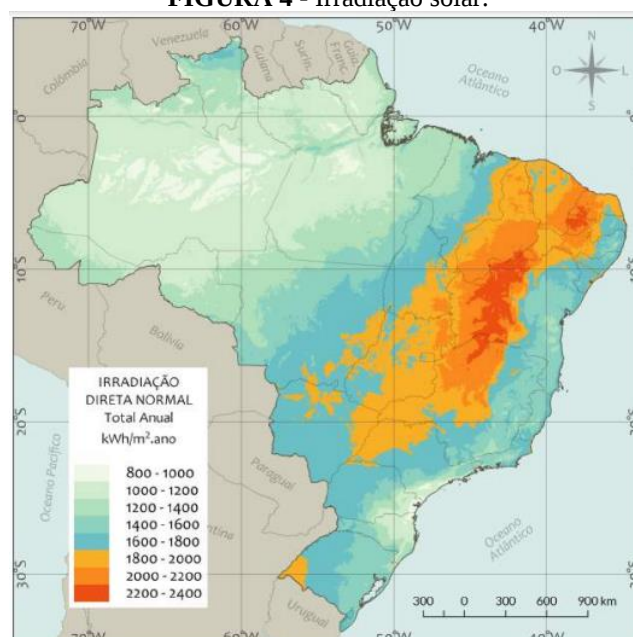
Pereira *et al.* (2017) afirmam que a irradiância solar (W.m^{-2}) que incide em uma superfície é composta por suas componentes: direta e difusa. A irradiância solar direta apresenta direção de incidência na linha imaginária entre a superfície e o sol e representa a parcela que não sofreu os processos de absorção e espalhamento que ocorrem na atmosfera. A irradiância solar difusa engloba a radiação que atinge a superfície proveniente de todas as demais direções que são decorrentes dos processos de espalhamento pelos gases e particulados presentes na atmosfera. Para o processo de destilação solar, a principal radiação incidente para o aproveitamento da energia solar é a radiação direta, quanto maior essa radiação melhor para o processo.

O espectro de radiação solar corresponde ao conjunto de radiações visíveis e não visíveis a olho nu, esse espectro transporta energia que pode ser captada por meio de calor ou de energia elétrica. Tendo em vista que a energia irradiada pelo sol cobre uma ampla faixa do espectro eletromagnético, de acordo com a Figura 3, tem-se que dessa energia cerca de 81% que chegam ao sistema Terra/Atmosfera estão em uma faixa de comprimento de onda que vai do visível ao infravermelho, de acordo com Pereira *et al.* (2017). Sabe-se que a radiação visível está compreendida entre de 380 e 780 nm, já a maior parte da energia solar radiante está entre a luz ultravioleta e a luz infravermelha (Harris, 2008).

FIGURA 3 - Espectro eletromagnético destacando componentes da região visível.

A energia irradiada alimenta todos os processos naturais e artificiais, sejam eles processos térmicos, dinâmicos ou químicos, tendo como aplicabilidade o conhecimento científico e tecnológico produzido pela sociedade, visto que a interação com energia solar ocorre de forma rotineira (Pereira et al., 2017). É nítido que o desenvolvimento da tecnologia da energia solar tem como finalidade suprir as necessidades energéticas do dia a dia da vida humana.

Ainda com os dados reportados no Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017), o Brasil está entre os países com os maiores índices de irradiação solar global, com médias anuais relativamente altas em todo seu território e com boa uniformidade durante todo o ano. Na Figura 4 são apresentadas as regiões com maiores potenciais de aproveitamento da energia solar. A região que apresenta os mais elevados níveis de insolação é a semiárida nordestina.

FIGURA 4 - Irradiação solar.

A região Nordeste apresenta um bom potencial de desenvolvimento para exploração da energia solar, pois é designada como uma fonte de energia abundante, livre de carbono e não tóxica. Entre as regiões do Brasil, a que possui maior média de irradiação solar global é a região Nordeste, apresentando diversas vantagens técnicas e econômicas nos sistemas instalados nesta região e que empregam a energia solar como fonte de energia.

Diversas tecnologias e projetos podem empregar a energia solar através de equipamentos como: coletores, concentradores parabólicos, placas fotovoltaicas e destiladores solar. Geralmente, esses projetos podem ser classificados em: diretos e indiretos. Usando tecnologias diretas, o calor solar e a eletricidade podem ser fornecidos usando coletores solar térmicos e módulos fotovoltaicos, respectivamente, enquanto emprega tecnologias indiretas, a eletricidade é gerada em grande escala usando ciclos de energia movidos através da energia solar (Ajarostaghi; Mousavi, 2022).

3.4 Processos de tratamento de água por destilação

A destilação da água que contém poluentes usando energia solar gratuita é uma das técnicas de purificação de água que fornece água destilada (Diab *et al.*, 2021). Essa técnica consiste em tratar a água, transformando-a em água adequada para o abastecimento. Suas principais tecnologias são amplamente utilizadas e podem ser classificadas com base no seu processo de acordo com o tipo de fonte de energia utilizada, sendo esses chamados de processos térmicos que utilizam energia térmica para gerar um mecanismo de mudança de fase para destilar a água. Essas tecnologias já vêm sendo utilizadas durante anos, nesse tempo foi possível aperfeiçoar o sistema, resultando em um método mais eficiente, confiável e menos dispendioso (Tan *et al.*, 2022).

Na Tabela 3 estão apresentadas as tecnologias mais relevantes dos processos de destilação.

TABELA 3 - Tecnologias dos processos térmicos de destilação.

Processos Térmicos	Destilação Flash de Multiestágios (DFM)
	Destilação de Múltiplo Efeito (DME)
	Destilação por Compressão de Vapor (DCV)
	Congelamento
	Destilação Solar Térmica (DST)

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

De acordo com Siqueira, Martins e Viana (2022) os processos térmicos separam a água em duas correntes aquosas de saída, que consistem em uma com baixa concentração de sais (água destilada) e outra altamente concentrada (sais retidos). A energia térmica utilizada nos processos térmicos é fornecida a partir de combustíveis fósseis ou fontes de energia renováveis, como a energia solar. Sendo a energia solar capaz de fornecer alta densidade de potência e ruído muito menor, exigindo menos manutenção do que outras fontes alternativas de energia, isso tornou a energia solar como o tipo mais popular de energia renovável e sua utilização é uma das maneiras mais confiáveis e energeticamente mais eficientes de remover sais de água contaminada com a utilização de destiladores solar (Sohani; Hoseinzadeh; Berenjkari, 2021).

Diferentes arranjos caracterizam os processos térmicos de destilação, sendo eles: Flash de Multiestágios, Múltiplo Efeito, Compressão de Vapor, Congelamento e a Destilação Solar, esses sistemas são discutidos a seguir.

Destilação flash de multiestágios (DFM)

No processo DFM ocorre vaporização instantânea ou flash, sendo utilizados um conjunto de câmaras sucessivas. O processo é iniciado quando a água salgada fria começa a circular por um sistema de tubos que se encontram envoltos em vapor quente, aquecendo a água salgada. A entrada da água aquecida acontece de forma brusca nos tubos, fazendo com que essa água ferva rapidamente, provocando quase uma explosão ou transformação rápida em vapor, esse vapor então é condensado ao trocar calor com a água fria, e coletado numa calha contida dentro do estágio, para assim conduzir a água doce para fora do sistema. A salmoura restante segue para o segundo estágio, onde a temperatura de operação será sempre inferior à anterior, essa diminuição ocorre devido à diminuição da pressão entre fases consecutivas. As fases posteriores ocorrem de forma semelhante até que a salmoura atinja valores de concentração de sais muito elevados, sendo enviada para o meio receptor (Choi, 2016; Siqueira; Martins; Viana, 2022).

Destilação de múltiplo efeito (DME)

O processo DME utiliza o princípio de redução de pressão interna que ocorre nos vários recipientes do sistema, esses recipientes são chamados de efeitos. O início do processo acontece com a aspersão da água salgada fria sobre um conjunto de tubos quentes, em que parte da água

evapora e segue para fornecer calor para o segundo efeito, esses tubos são aquecidos pelos vapores do primeiro efeito por meio de um aquecedor que é condensado durante o processo de transferência de calor. A água condensada é captada, tratada e comercializada como água doce. No entanto, a água que não evapora é bombeada para o segundo efeito, onde novamente será aquecida e parcialmente evaporada e assim sucessivamente, iniciando o segundo ciclo do processo de DME (Choi, 2016; Siqueira; Martins; Viana, 2022).

Destilação por compressão de vapor (DCV)

A DCV tem seu princípio de funcionamento análogo ao DME, contudo esse caso baseia-se na compressão do vapor de água produzida com altas pressões. Esse é um processo que pode ser único ou com presença de vários efeitos, em que o destilado e o rejeito são descarregados através de um trocador de calor. Nesta técnica existem duas configurações de operação distintas, na primeira tem-se que a compressão do vapor é feita por meio de um compressor mecânico utilizando eletricidade, enquanto na segunda são adicionadas pequenas quantidades de vapor a alta pressão por meio de um ejetor. Esse sistema pode ser utilizado em média e larga escalas, e é geralmente desenvolvido com o intuito de tirar vantagem do princípio de redução da temperatura do ponto de ebulição, através da redução de pressão (Siqueira; Martins; Viana, 2022).

Destilação por congelamento

Na destilação por congelamento acontece a formação dos cristais de gelo, onde os sais dissolvidos são excluídos naturalmente, com isso, antes de toda a matéria ser descongelada é necessário a remoção dos sais, esse gelo é derretido para produção da água doce. Essa técnica por congelamento pode acontecer de forma direta ou indireta. No congelamento direto a água é seu próprio combustível, mas para a forma indireta é utilizado um líquido volátil insolúvel em água. Esse processo se diferencia dos outros por ter como vantagem o potencial mínimo para corrosão e pouca incrustação, no entanto apresenta elevado custo energético para conseguir manter a água congelada, por isso, esse é o processo menos requerido entre os processos térmicos já citados (Siqueira; Martins; Viana, 2022).

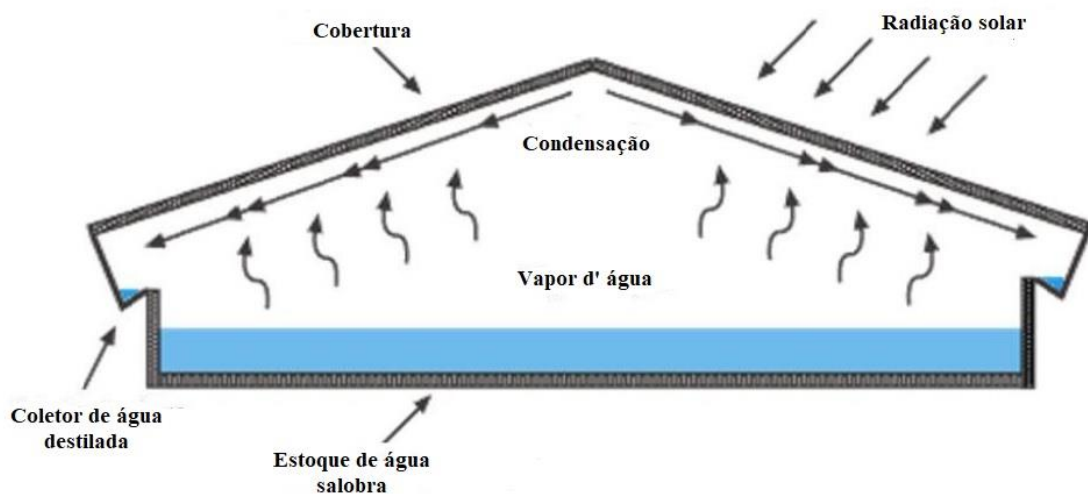
3.5 Destilação solar

A destilação solar funciona através de um processo térmico, sendo considerada uma tecnologia simples, de fácil aplicação e baixo custo, que emprega energia solar como fonte de energia ampla e renovável que pode garantir a remoção de poluentes da água. Esse sistema procura imitar o ciclo natural da água, ou seja, através da energia solar a água em estado líquido é aquecida, o processo de evaporação transforma a água de estado líquido para gasoso e as partículas sólidas ficam retidas, enquanto o vapor de água é captado pelo sistema de resfriamento e ao ser submetido a temperaturas mais baixas, o vapor d'água condensa e escoar na forma de destilado (Ibrahim; Allam; Elshamarka, 2015; Brito *et al.*, 2020).

Em um sistema de destilação solar, como mostrado na Figura 5, o princípio de funcionamento consiste em preencher o sistema com água contaminada que será aquecida pela radiação solar direta que penetra a uma cobertura de condensação e aquece a massa de água até a evaporação. O vapor de água gerado é separado dos contaminantes e impurezas e consequentemente resfriado e condensado na cobertura de condensação inclinada. Por gravidade, as gotas de água destilada seguem em direção a um canal de coleta e são recolhidas na parte inferior (Silva *et al.*, 2020).

A radiação solar que incide na superfície do destilador é convertida em energia térmica, sendo considerada o principal parâmetro ambiental que afeta a taxa de produtividade desse sistema.

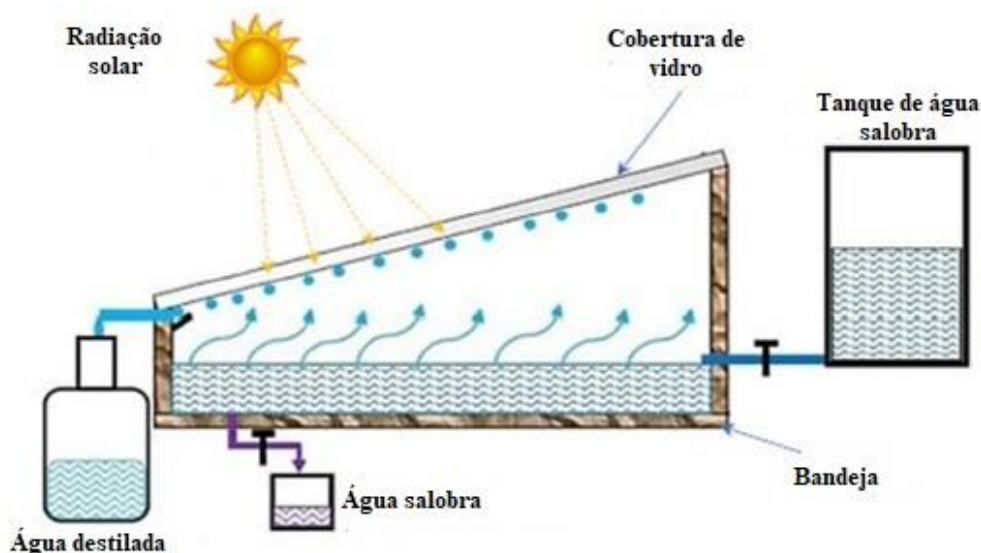
FIGURA 5 - Princípio de funcionamento da destilação solar.



Fonte: Adaptado de Jesus *et al.*, 2015.

De acordo com Tan *et al.* (2022) os sistemas de destilação apresentam uma perspectiva positiva, possuindo como vantagens o baixo custo de investimento, a baixa manutenção, o baixo consumo de energia e menores quantidades de emissões de CO₂. Na Figura 6 é apresentada uma vista esquemática de um destilador solar simples.

FIGURA 6 - Vista esquemática de um destilador solar simples.



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

3.5.1 Tipos de destiladores solar

Os destiladores solar podem ser de diversos modelos, desde os convencionais que também são chamados de destiladores simples, como também modelos mais elaborados e aprimorados desenvolvidos a partir desses, com o intuito de aperfeiçoar o processo e aumentar o rendimento visando à diminuição dos custos. Esses equipamentos são como recipientes fechados de água que possuem área relativamente grande e altura pequena, com cobertura de vidro que permite a passagem da radiação solar, gerando vapor, que se condensa transformando-se em água doce. Desse modo, surgiram alguns destiladores solar: do tipo bandeja, do tipo pirâmide, do tipo filme capilar, do tipo mecha, e do tipo cascata.

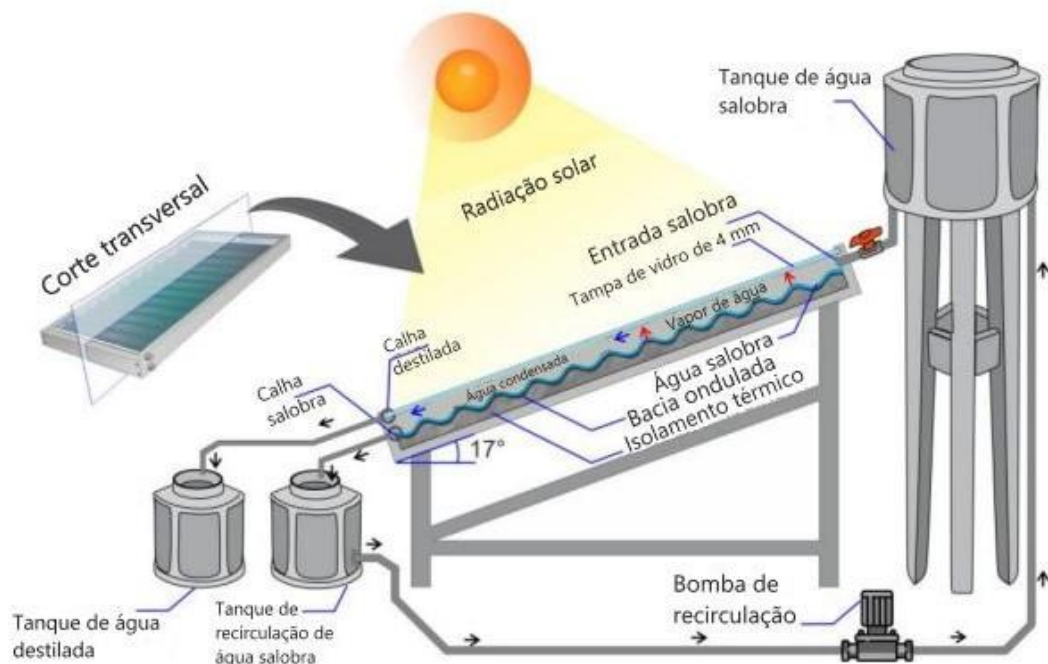
O destilador do tipo cascata foi o destilador utilizado na pesquisa e discutido a seguir.

Destilador do tipo cascata

Os destiladores do tipo cascata é atualmente um dos projetos mais prevalentes e usualmente mais reconhecidos para destiladores solar devido ao seu alto potencial de remoção de sais da água (Al-Harashseh *et al.*, 2018). Segundo Bouzaid *et al.* (2019) os destiladores cascata apresentam maior produtividade e eficiência se comparados com outros modelos, pois existe uma pequena distância entre o vidro de condensação de água destilada e a placa absorvedora de calor, fazendo com que o processo de saturação da água seja acelerado e consequentemente, a sua produtividade.

O sistema de destilação solar composto por destilador tipo cascata com placa absorvedora de calor ondular possui algumas qualidades significativas, ou seja, a inclinação da estrutura, a bandeja escalonada e por possuir um único canal de condensado para obter o rendimento do destilado. A inclinação da cobertura de vidro facilita a transmissão de radiação, como também a condensação da água destilada, essa inclinação é escolhida de acordo com a latitude do local onde será instalado o equipamento. Já a bandeja escalonada vai permitir que a água permaneça por mais tempo no sistema (Arunkumar *et al.*, 2019). A representação desse sistema é mostrada na Figura 7.

FIGURA 7 - Sistema de destilação solar com destilador do tipo cascata.



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

Sobre a placa absorvedora ondular, Sharshir *et al.* (2023) afirmam que essa forma ondular aumenta a área de superfície exposta ao sol permitindo maior absorção de energia, como também causam várias reflexões solar o que permite aumentar as chances de absorção solar antes de sua reflexão final. As perdas de calor por condução e radiação dentro do destilador cascata são pequenas e a maior transferência de calor da placa ondular para a superfície de condensação acontece por meio do vapor (Kaviti; Yadav; Shukla, 2016).

Cardoso *et al.* (2020) por meio de um destilador solar do tipo cascata analisou águas de poços artesianos, localizados nos municípios de Caturité (PB) e Juazeirinho (PB) com o objetivo de obter água para o consumo humano. O sistema foi operado em batelada e a água obtida foi analisada através de análises físico-químicas. Como resultado confirmou-se que a água produzida poderia ser utilizada para o consumo humano, tendo em vista que os parâmetros analisados se encontravam dentro dos limites permitidos pelo padrão de potabilidade.

Silva *et al.* (2020) desenvolveram um destilador solar portátil do tipo cascata com refletores de radiação integrados com a finalidade de remover sais da água e obter um maior volume de água destilada de acordo com os padrões de potabilidade. Assim, foi analisado o desempenho térmico do equipamento e a qualidade físico-química da água antes e após o processo de destilação. O protótipo foi desenvolvido em Campina Grande (PB) e foi utilizada uma água salobra proveniente de um sítio da região. Assim, observaram uma produção máxima de água potável de $2730,8 \text{ mL.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ para um índice de radiação solar médio de $660,42 \text{ W.m}^{-2}$. Essa pesquisa trouxe como resultados das análises físico-químicas das águas salobra e destilada reduções no teor de cloreto de 99,72%, de sódio de 99,88% e de sólidos totais de 99,73%.

Cardoso *et al.* (2022) analisaram o desempenho de um destilador solar do tipo cascata com placa absorvedora ondulada para tratar água salobra. Como resultado concluíram que as temperaturas e a produtividade da água destilada foram diretamente proporcionais à radiação solar. Com isso, os autores obtiveram perfis de temperaturas que chegaram a valores máximos de 90°C , $87,3^\circ\text{C}$ e 72°C sendo eles para a bandeja, água e vidro, respectivamente. Ainda foi obtida uma produtividade máxima de $1971 \text{ mL.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. Os parâmetros físico-químicos analisados apontam uma redução para todas as análises realizadas, o que confirma que a água produzida se encontrava dentro dos valores exigidos pela portaria de potabilidade vigente.

3.5.2 Eficiência dos destiladores solar

A eficiência de um destilador solar é o mais importante parâmetro adimensional do sistema, estando relacionada à sua capacidade de utilizar a energia inserida no sistema para realizar o processo de destilação da água (Sohani; Hoseinzadeh; Berenjkari, 2021).

No que se refere à eficiência, esse critério pode ser de dois tipos: horária e diária. A eficiência horária reflete a relação entre o calor latente médio gerado pela água produzida de hora em hora e a quantidade total de energia solar absorvida. A variação da irradiância solar durante o dia gera, obviamente, uma variação horária da eficiência da energia solar (Rabhi *et al.*, 2017). As eficiências horária e diária foram calculadas pelas Equações (1) e (2), respectivamente (El-Agouz, 2014):

$$\eta_h = \frac{(M_a \times \lambda_a) / 3600}{(A_p \times I)} * 100 \quad (1)$$

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

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

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

Dentro deste contexto, os sistemas são mais eficientes quando conseguem produzir maior quantidade de água destilada, utilizando menos energia. Logo, alguns fatores podem afetar a produtividade do destilador solar e por conseguinte a qualidade da água destilada. Os parâmetros podem ser divididos em: meteorológicos e construtivos.

Os parâmetros meteorológicos são aqueles que não podem ser controlados ou alterados, que são: radiação solar, temperatura ambiente, velocidade dos ventos e umidade relativa do ar. A radiação solar influencia a produção de água de forma condicional a eficiência térmica, pois sem radiação solar não há como emitir energia suficiente para aquecer a água bruta. A temperatura ambiente influencia diretamente na temperatura do material de cobertura. Logo,

quanto menor for a temperatura do ambiente, maior será a taxa de transferência de calor, para que assim se condense, em virtude da cobertura de vidro perder calor para o ambiente. Esse mesmo efeito acontece com a velocidade dos ventos e com a umidade relativa do ar já que contribuem com a taxa de transferência de calor (Velmurugan; Srithar, 2011; Kabeel *et al.*, 2020).

No que tange à maximização da eficiência de um destilador solar é importante salientar a relevância dos parâmetros construtivos e sua relação com as condições do local, dado que esses parâmetros podem ser alterados com a finalidade de proporcionar um aumento da produtividade do equipamento. Os parâmetros em questão são: ângulo de inclinação da cobertura de vidro, orientação do destilador com relação ao sol, altura da lâmina de água na bandeja, área útil do equipamento, temperatura de entrada da água e materiais utilizados na construção do destilador (Carmo; Soares, 2022).

3.6 Transferência de calor no processo de destilação solar

O processo através do qual a energia é transferida é conhecido como transferência de calor, pois sempre que há um gradiente de temperatura no interior de um sistema ou quando há contato de dois sistemas com temperaturas diferentes há um processo de transferência de energia. As formas de transferência de calor podem ser categorizadas como transitórias ou permanentes, no destilador a transferência de calor é transitória devido à sua diferença de temperatura em relação ao tempo (Toosi *et al.*, 2023).

A transferência de calor no processo de destilação solar, de acordo com Sharshir *et al.* (2018) é classificada como interna e externa, com base na energia que flui para dentro e para fora do espaço fechado. O processo interno equivale à transferência de calor que ocorre pelo aquecimento e evaporação da água, como também pela circulação de ar no interior do equipamento, essa transferência interna de calor ocorre entre a cobertura interna do vidro e a superfície da água. O processo externo é aquele responsável pela condensação do vapor gerado no interior do equipamento que logo se deposita na superfície interior do vidro e escoar após a troca térmica com a superfície mais fria, entretanto isso só ocorre devido à troca de calor entre a cobertura de vidro e o ambiente (Toosi *et al.*, 2023). É possível quantificar os processos de transferência de calor com base em equações de taxa apropriadas. Os principais mecanismos de troca de calor são: convecção, radiação e evaporação, essas formas de transferência de calor são consideradas a seguir.

3.6.1 Transferência interna de calor

A transferência interna de calor está relacionada com a troca de calor entre a superfície da água e a superfície interna da cobertura de vidro. De acordo com Elango, Gunasekaran e Sampathkumar (2015) existem três modos de troca interna de calor que regem os destiladores solar, ou seja, processos de convecção, radiação e evaporação. Logo, os coeficientes de transferência interna no destilador solar podem ser estimados conforme mostrado nas seções a seguir.

Troca de calor por convecção

A transferência de calor por convecção é um fenômeno complexo, visto que diversos fatores podem influenciar na convecção, como as propriedades do fluido, do escoamento e a geometria, bem como a orientação e a rugosidade da parede do destilador (Toosi *et al.*, 2023). Em um destilador solar a transferência de calor por convecção se deve ao efeito da diferença de temperatura entre a cobertura de condensação e a superfície da água via vapor de água. A taxa de transferência de calor por convecção entre a superfície da água e a cobertura de vidro de condensação é expressa pela Equação (4) (Elango, Gunasekaran; Sampathkumar, 2015):

$$q_{C,a-vi} = h_{C,a-vi} \cdot A_a \cdot (T_a - T_{vi}) \quad (4)$$

Onde, T_a (°C) corresponde a temperatura da água e T_{vi} (°C) é a temperatura do vidro interno. Ainda com a expressão acima, $h_{C,a-vi}$ (W.m⁻².K⁻¹) é o coeficiente de transferência de calor convectivo entre a superfície da água e a superfície interna da cobertura de vidro e pode ser calculado conforme a Equação (5):

$$h_{C,a-vi} = 0,884[(T_a - T_{vi}) + \frac{(P_a - P_{vi})(T_a + 273,15)}{268,9 \times 10^3 - P_a}]^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

Onde, P_a e P_{vi} são a pressão parcial do vapor de água na superfície da água e na superfície interna da cobertura de vidro, respectivamente, expressas pelas Equações (6) e (7):

$$P_a = \exp(25,317 - \frac{5144}{T_a + 273,15}) \quad (6)$$

$$P_{vi} = \exp \left(25,317 - \frac{5144}{T_{vi} + 273,15} \right) \quad (7)$$

Troca de calor por radiação

A transferência de calor radiativo ocorre através de um mecanismo que contém a emissão de energia interna do objeto. Este método de transferência térmica pode ocorrer em sólidos, líquidos e gases. No destilador solar, a radiação se materializa devido à presença de um meio mais frio entre a água e o exterior do equipamento. A taxa de transferência de calor por radiação ocorre entre a superfície da água e a superfície interna do vidro, sendo obtida pela Equação (8) (Elango, Gunasekaran; Sampathkumar, 2015):

$$q_{R,a-vi} = h_{R,a-vi} \cdot A_a \cdot (T_a - T_{vi}) \quad (8)$$

Onde, $h_{R,a-vi}$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) corresponde ao coeficiente de transferência radiativo entre a superfície da água e a superfície interna do vidro, que pode ser calculado através da Equação (9):

$$h_{R,a-vi} = \varepsilon_{ef} \cdot \sigma [(T_a + 273,15)^2 + (T_{vi} + 273,15)^2] \cdot (T_a + T_{vi} + 546,3) \quad (9)$$

Onde, σ corresponde a uma constante com valor definido de $5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ e é chamada de Stefan-Boltzmann e a ε_{ef} trata-se da emissividade efetiva entre a água e a superfície interna do vidro, encontrada através da Equação (10):

$$\varepsilon_{ef} = \left(\frac{1}{\varepsilon_a} + \frac{1}{\varepsilon_v} - 1 \right)^{-1} \quad (10)$$

Onde, ε_a e ε_v corresponde a emissividade da água e a emissividade da cobertura de vidro, respectivamente.

Troca de calor por evaporação

A troca de calor por evaporação no destilador solar ocorre entre a água e o vapor de água na interface do vidro. A taxa de transferência de calor evaporativo ocorre entre a interface

da água e o vapor de água. A taxa entre a água e a superfície interna do vidro é dada pela Equação (11) (Elango, Gunasekaran; Sampathkumar, 2015):

$$q_{E,a-vi} = h_{E,a-vi} \cdot A_a \cdot (T_a - T_{vi}) \quad (11)$$

Onde, $h_{E,a-vi}$ ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) é o coeficiente de transferência de calor evaporativo entre a água e a cobertura de vidro interna, obtido por meio da Equação (12):

$$h_{E,a-vi} = 16,273 \times 10^{-3} \cdot h_{C,a-vi} \frac{(P_a - P_{vi})}{(T_a - T_{vi})} \quad (12)$$

Portanto, o coeficiente total de transferência de calor ($h_{T,a-vi}$) entre a massa de água e a superfície interna do vidro é estimado através do somatório dos coeficientes convectivo, radiativo e evaporativo, conforme a Equação (13) (Sharshir *et al.*, 2018):

$$h_{T,a-vi} = h_{C,a-vi} + h_{R,a-vi} + h_{E,a-vi} \quad (13)$$

3.6.2 Transferência externa de calor

A energia térmica que sai do destilador para o ambiente externo é considerada perda. Assim, a transferência externa de calor consiste em convecção e processos de radiação que são independentes uns dos outros. O calor perdido no destilador solar da superfície externa da cobertura de vidro para o ar ambiente é chamado de processo de transferência de calor superior (Elango, Gunasekaran; Sampathkumar, 2015). Assim, os coeficientes convectivo e radiativo de transferência externa de calor podem ser calculados conforme mostrado a seguir:

A taxa de perda de calor por convecção da superfície externa do vidro do destilador para o ambiente é fornecida por meio da Equação (14) fornecida por Velmurugan *et al.* (2008):

$$q_{C,ve-am} = h_{C,ve-am} \cdot A_v \cdot (T_{ve} - T_{am}) \quad (14)$$

Onde, T_{ve} ($^{\circ}\text{C}$) corresponde a temperatura do vidro externo, T_{am} ($^{\circ}\text{C}$) é a temperatura ambiente e $h_{C,ve-am}$ ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) é o coeficiente convectivo de transferência de calor entre a cobertura de vidro externa e o ambiente, apresentado como uma função da velocidade média do vento (v) expressa em m.s^{-1} , mostrada na Equação (15):

$$h_{C,ve-am} = 2,8 + (3,0 \times v) \quad (15)$$

A taxa de perda de calor por radiação da superfície externa do vidro e do ambiente é estimada através da Equação (16):

$$q_{R,ve-am} = h_{R,ve-am} \cdot A_v \cdot (T_{ve} - T_{am}) \quad (16)$$

Onde, $h_{R,ve-am}$ ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) trata-se do coeficiente radiativo de transferência de calor entre a superfície externa da cobertura de vidro e o ambiente, que é calculado pela Equação (17) apresentada por Elango, Gunasekaran e Sampathkumar (2015):

$$h_{R,ve-am} = \varepsilon_v \sigma \left[\frac{(T_{ve}+273,15)^4 - (T_{vz}+273,15)^4}{(T_{ve}-T_{am})} \right] \quad (17)$$

Onde, T_{vz} ($^{\circ}\text{C}$) corresponde a temperatura das vizinhanças, obtido através da Equação (18):

$$T_{vz} = T_{am} - 6 \quad (18)$$

Dessa forma, o coeficiente total de transferência de calor ($h_{T,ve-am}$) perdido entre a superfície externa da cobertura de vidro e o ambiente pode ser obtido pelo somatório do coeficiente convectivo e radiativo, como mostrado na Equação (19):

$$h_{T,ve-am} = h_{C,ve-am} + h_{R,ve-am} \quad (19)$$

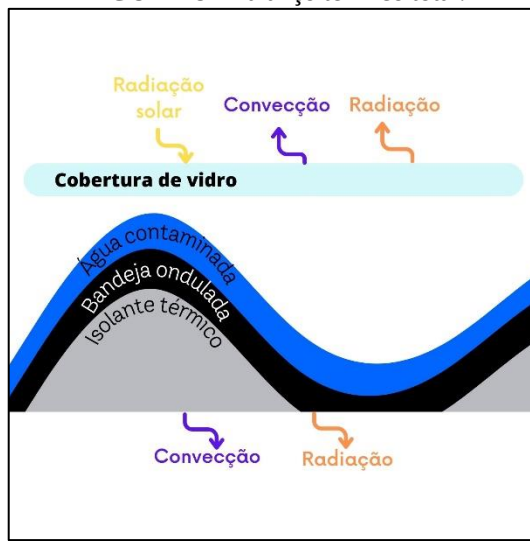
3.7 Balanço térmico no processo de destilação solar

Para execução do balanço térmico foram admitidas as seguintes suposições:

- O destilador solar é à prova de vazamentos.
- O nível de água na bandeja é mantido constante.
- A inclinação da cobertura de vidro é pequena.
- O calor perdido através do isolamento e por perda lateral (fundo e laterais) é insignificante.
- A condensação do vapor ocorre na cobertura de vidro.

Logo, o balanço térmico total de energia do sistema de destilação solar é calculado pela diferença entre a energia que está entrando (irradiação) e a energia que está saindo (convecção e radiação) do sistema. A energia é absorvida pela cobertura de vidro e é perdida pelo vidro e pelo isolante térmico, conforme mostrado na Figura 8 e calculado pela Equação (20). Nas equações a seguir, T_a , T_{vi} , T_{ve} , T_b , T_{am} , T_{iso} e T_{vz} são as temperaturas da água, temperatura do vidro interno, temperatura do vidro externo, temperatura da bandeja, temperatura ambiente, temperatura do isolante e temperatura das vizinhanças, respectivamente, todas medidas em °C.

FIGURA 8 - Balanço térmico total.



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

$$m_a \cdot C_a \cdot \frac{dT_a}{dt} = \alpha_v \cdot I(t) \cdot A_v - [h_{C,ve-am} \cdot A_v \cdot (T_{ve} - T_{am}) + h_{R,ve-am} \cdot A_v \cdot (T_{ve} - T_{am})] - [h_{C,iso-am} \cdot A_v \cdot (T_{iso} - T_{am}) + h_{R,iso-am} \cdot A_v \cdot (T_{iso} - T_{am})] \quad (20)$$

Onde, m_a (kg) é massa de água, C_a (J.kg⁻¹.K) é o calor específico da água, $\frac{dT_a}{dt}$ (K.s⁻¹) é a variação de temperatura em relação ao tempo, α_v é a absorvidade do vidro, $I(t)$ (W.m⁻²) é a intensidade de radiação solar, A_v (m²) é a área do vidro, $h_{C,ve-am}$ e $h_{R,ve-am}$ (W.m⁻².K⁻¹) são os coeficientes convectivo e radiativo entre o vidro externo e o ambiente, respectivamente, $h_{C,iso-am}$ e $h_{R,iso-am}$ são os coeficientes convectivo e radiativo entre o isolante e o ambiente, respectivamente.

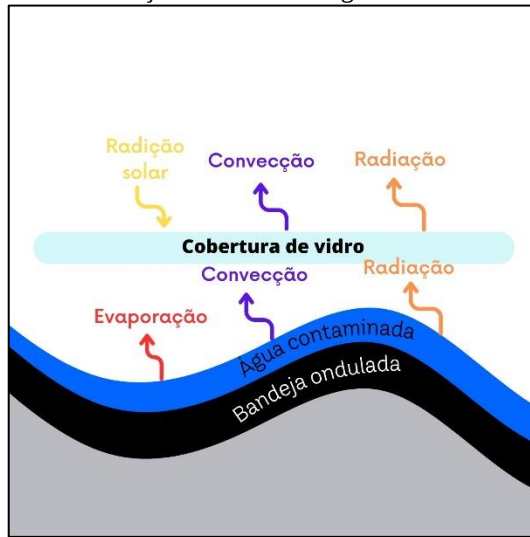
As equações do balanço térmico de energia são utilizadas para determinar a modelagem térmica de um sistema de destilação solar. Haja vista que um destilador solar possui diversos

componentes e seu desempenho térmico pode ser previsto por meio do balanço de energia de cada componente. Dessa forma, os resultados numéricos são obtidos resolvendo as equações de balanço de energia para a cobertura de vidro, a água, a bandeja e o isolante térmico.

3.7.1 Balanço térmico da cobertura de vidro

A cobertura de vidro é atingida pela irradiação, evaporação, convecção e radiação. Dessa forma, o balanço térmico de energia da cobertura de vidro é apresentado na Figura 9 e calculado conforme a Equação (21).

FIGURA 9 - Balanço térmico de energia da cobertura de vidro.



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

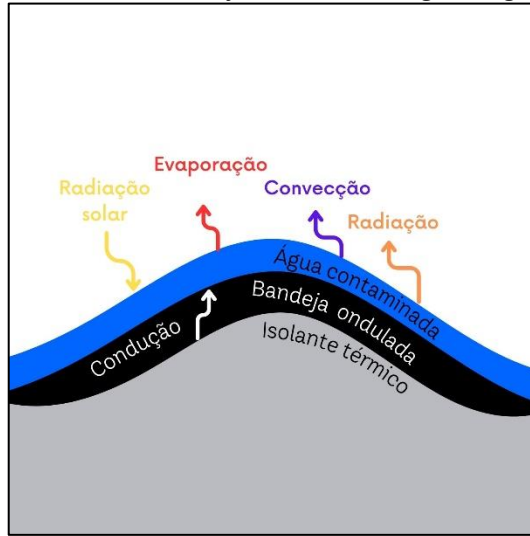
$$m_v \cdot C_v \cdot \frac{dT_v}{dt} = \left[\alpha_v \cdot I(t) \cdot A_v + h_{E,a-vi} \cdot A_v \cdot (T_a - T_{vi}) + h_{C,a-vi} \cdot A_v \cdot (T_a - T_{vi}) + \right. \\ \left. h_{R,a-v} \cdot A_v \cdot (T_a - T_{vi}) \right] - [h_{C,ve-am} \cdot A_v \cdot (T_{ve} - T_{am}) + h_{R,ve-iso} \cdot A_v \cdot (T_{ve} - T_{vz})] \quad (21)$$

Onde, m_v (kg) é massa do vidro, C_v (J.kg⁻¹.K) é o calor específico do vidro, $\frac{dT_v}{dt}$ (K.s⁻¹) é a variação de temperatura em relação ao tempo, α_v é a absorvidade do vidro, $I(t)$ (W.m⁻²) é a intensidade de radiação solar, A_v (m²) é a área da cobertura de vidro, $h_{E,a-vi}$, $h_{C,a-vi}$ e $h_{R,a-vi}$ (W.m⁻².K⁻¹) são os coeficientes evaporativo, convectivo e radiativo entre a água e o vidro interno, respectivamente, $h_{C,ve-am}$ e $h_{R,ve-am}$ são os coeficientes convectivo e radiativo entre o vidro externo e o ambiente, respectivamente.

3.7.2 Balanço térmico da água

A água recebe a energia radiativa e a energia por meio da condução entre a bandeja e a água e perde calor por evaporação, convecção e radiação. Analisando a variação de energia que ocorre neste sistema, a diferença entre a energia que chega e a energia que sai é apresentado o balanço térmico de energia da água na Figura 10 e calculada de acordo com a Equação (22).

FIGURA 10 - Balanço térmico de energia da água.



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

$$m_a \cdot c_a \cdot \frac{dT_a}{dt} = \left[\tau_v \cdot \alpha_a \cdot I(t) \cdot A_a + \frac{K_b}{L_b} \cdot A_a \cdot (T_b - T_a) \right] - \left[h_{E,a-vi} \cdot A_v \cdot (T_a - T_{vi}) + h_{C,a-vi} \cdot A_v \cdot (T_a - T_{vi}) + h_{R,a-vi} \cdot A_v \cdot (T_a - T_{vi}) \right] \quad (22)$$

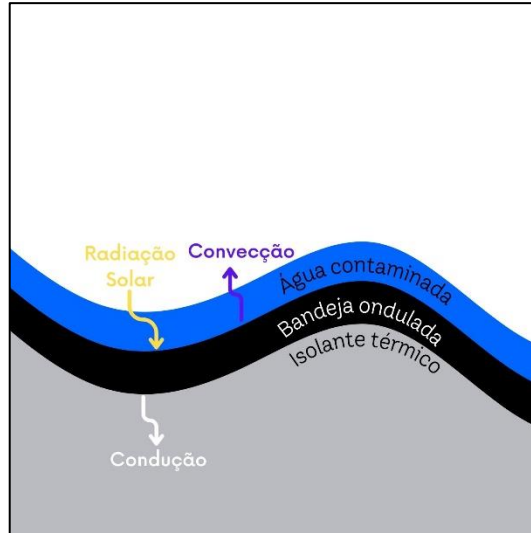
Onde, m_a (kg) é massa de água, c_a (J.kg⁻¹.K) é o calor específico da água, $\frac{dT_a}{dt}$ (K.s⁻¹) é a variação de temperatura em relação ao tempo, τ_v é a transmitância do vidro, α_a é a absorvidade da água, $I(t)$ (W.m⁻²) é a intensidade de radiação solar, A_a (m²) é a área da água, K_b (W.m⁻¹.K⁻¹) é a condutividade térmica da bandeja, L_b (m) é a espessura da bandeja, $h_{E,a-vi}$, $h_{C,a-vi}$ e $h_{R,a-vi}$ (W.m⁻².K⁻¹) são os coeficientes evaporativo, convectivo e radiativo entre a água e o vidro interno, respectivamente.

3.7.3 Balanço térmico da bandeja absorvedora de calor

A entrada de energia na bandeja é proveniente da irradiação, que passa pelo vidro e pela água. E as saídas de energia da bandeja são provenientes da convecção que ocorre com a água

e a condução entre a bandeja ondulada de absorção de calor e o isolante, conforme expresso na Figura 11 e calculada pela Equação (23).

FIGURA 11 - Balanço térmico de energia da bandeja.



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

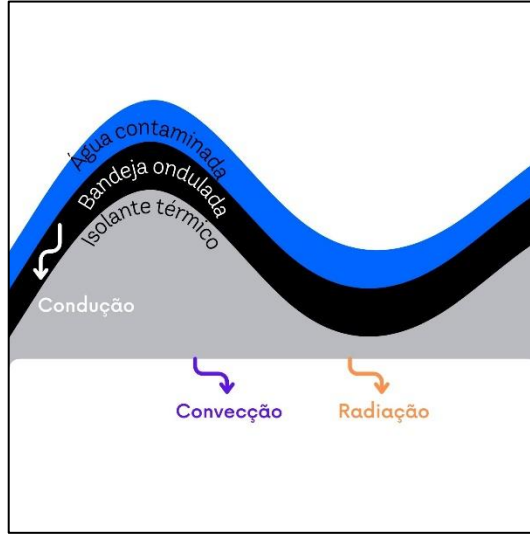
$$m_b \cdot C_b \cdot \frac{dT_b}{dt} = [\tau_v \cdot \tau_a \cdot \alpha_b \cdot I(t) \cdot A_b] - \left[h_{c,b-a} \cdot A_a \cdot (T_b - T_a) + \frac{K_{iso}}{L_{iso}} \cdot A_{iso} \cdot (T_b - T_{iso}) \right] \quad (23)$$

Onde, m_b (kg) é massa da bandeja, C_b ($J \cdot kg^{-1} \cdot K$) é o calor específico da bandeja, $\frac{dT_b}{dt}$ ($K \cdot s^{-1}$) é a variação de temperatura em relação ao tempo, τ_v é a transmitância do vidro, τ_a é a transmitância da água, α_b é a absorvidade da bandeja, $I(t)$ ($W \cdot m^{-2}$) é a intensidade de radiação solar, A_b (m^2) é a área da bandeja, $h_{c,b-a}$ ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$) é o coeficiente convectivo entre a bandeja e a água, A_a (m^2) é a área da água, K_{iso} ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) é a condutividade térmica do isolante, L_{iso} (m) é a espessura do isolante, A_{iso} (m^2) é a área do isolante.

3.7.4 Balanço térmico do isolante

O isolante térmico recebe energia por meio do processo de condução, entre a bandeja e o isolante, e perde energia por meio do processo de convecção, entre o isolante e o ambiente externo. O balanço térmico de energia do isolante é apresentado na Figura 12 e pela Equação (24).

FIGURA 12 - Balanço térmico de energia do isolante



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

$$m_{iso} \cdot C_{iso} \cdot \frac{dT_{iso}}{dt} = \frac{K_{iso}}{L_{iso}} \cdot A_b \cdot (T_{iso} - T_b) - [h_{C,iso-am} \cdot A_{iso} \cdot (T_{iso} - T_{am}) + h_{R,iso-am} \cdot A_{iso} \cdot (T_{iso} - T_{am})] \quad (24)$$

Onde, m_{iso} (kg) é massa do isolante, C_{iso} ($J \cdot kg^{-1} \cdot K$) é o calor específico do isolante, $\frac{dT_{iso}}{dt}$ ($K \cdot s^{-1}$) é a variação de temperatura em relação ao tempo, K_{iso} ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) é a condutividade térmica do isolante, L_{iso} (m) é a espessura do isolante, A_b (m^2) é a área da bandeja, $h_{C,iso-am}$ e $h_{R,iso-am}$ ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$) são os coeficientes convectivo e radiativo entre o isolante e o ambiente, respectivamente, A_{iso} (m^2) é a área do isolante.

3.8 Análise de custos de produção de água tratada

Na análise de custos de um sistema de destilação solar, é necessário considerar que as estruturas e os itens utilizados devem apresentar resistência suficiente e boa qualidade, como também esse sistema deve ser rentável. Logo, a análise do custo por litro de água desempenha um papel importante para a avaliação da economia de um destilador solar (Nazari; Safarzadeh; Bahrarai, 2019). O custo anual total de um sistema de destilação é constituído pelos custos fixos existentes. Dessa forma, o primeiro custo anual (PCA) de operação a ser considerado é dado pela Equação (25) (Rahbar; Gharaiian; Rashidi, 2017).

$$PCA = P * FRC \quad (25)$$

Onde, P corresponde ao custo de capital do sistema de destilação e FRC é o fator de recuperação de capital, calculado a partir da Equação (26) (Rahbar; Gharaiian; Rashidi, 2017).

$$FRC = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (26)$$

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 admitido como 10 anos nesta pesquisa.

À medida que a vida útil do sistema passa, a manutenção também aumenta. Portanto, o custo médio anual (CMA) de operação e manutenção, que inclui os gastos com a coleta de água destilada, limpeza da bandeja e da cobertura de vidro, como também de tudo que for relacionado à conservação do equipamento, é equivalente a 10% do primeiro custo anual e é obtido a partir da Equação (27) (Shoeibi *et al.*, 2021).

$$CMA = 0,10 * PCA \quad (27)$$

O valor residual anual (VRA) em energia solar é calculado a partir da Equação (28) (Saini *et al.*, 2019).

$$VRA = R * FFA \quad (28)$$

Onde, R demonstra o valor residual do destilador solar e é geralmente considerado igual a 20% do custo de capital ($R = 0,2P$). O valor residual está relacionado à depreciação de peças do equipamento e à capacidade de implantação no futuro. Em geral, nesse valor de 20% todas as depreciações são levadas em consideração (Nazari; Safarzadeh; Bahiraei, 2019). Já o fator de fundo de amortização (FFA) é calculado pela Equação (29).

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

Portanto, o custo anual total (CAT) do destilador solar é calculado através da Equação (30) (El-Sebaai; El-Naggar, 2017).

$$CAT = PCA + CMA - VRA \quad (30)$$

Assim, o custo anual (*CPL*) da produtividade por litro de água destilada é dado pela Equação (31) (El-Sebaili; El-Naggar, 2017).

$$CPL = \frac{CAT}{M} \quad (31)$$

Onde, *CAT* é o custo anual total do destilador solar e *M* é a produtividade média anual.

3.9 Estado da arte

Na literatura estão disponíveis inúmeros trabalhos desenvolvidos para promover a remoção e/ou degradação da OTC, no entanto, o tratamento utilizando destiladores solar ainda é escasso. Esta seção irá apresentar pesquisas que fazem uso de métodos diversos para remoção desse antibiótico de águas contaminadas, inclusive empregando como fonte de energia a radiação solar.

Pereira *et al.* (2013) desenvolveram experimentos fotocatalíticos heterogêneos assistidos por dióxido de titânio (TiO₂) e acionados por energia solar em uma planta piloto com coletores parabólicos compostos (CPCs) para estudar a degradação de dois antibióticos, ácido oxolínico (AXO) e oxitetraciclina (OTC). Avaliando os antibióticos individuais (20 mg.L⁻¹) e em solução mista. Os perfis de remoção de cada antibiótico, tanto como componente único ou em mistura foram semelhantes, sendo necessários 2,5 kJ.L⁻¹ de energia solar para remove-los totalmente, e 18 kJ_{UV}.L⁻¹ para atingir 73% e 81% de mineralização, para AXO e OTC, respectivamente. Dentro das condições operacionais estudadas, a eficiência do reator solar fotocatalítico CPC mostrou-se consistente, dessa forma esse tratamento pode ser proposto como uma alternativa viável para tratar efluentes resultantes de atividades com uso elevado de antibióticos.

O estudo realizado por Leal, Esteves e Santos (2016) investigou o uso da fotodegradação solar para degradar a OTC em águas da aquicultura marinha. Para isso, foram coletadas amostras de duas empresas em diferentes locais do circuito de tratamento de água. Inicialmente, as amostras de água foram caracterizadas quanto ao pH, salinidade, sólidos em suspensão totais (SST), carbono orgânico e características espectroscópicas UV e Vis. Logo após, foi adicionada a OTC e aplicada a irradiação com luz solar simulada. Os experimentos foram realizados com concentração de 4 mg.L⁻¹ de OTC. Os efeitos do pH e da salinidade na fotodegradação da OTC foram avaliados e foi possível constatar que valores elevados de pH e a presença de sal marinho

aumentam a fotodegradação da OTC em águas de aquicultura. A fotodegradação solar de OTC em água salobra foi maior do que na água destilada. Os resultados foram muito promissores e essa metodologia apresenta eficácia na remoção de OTC em águas da aquicultura, como ponto positivo têm-se que é uma técnica de baixo custo e de grande facilidade de operação.

A pesquisa desenvolvida por Rahmah, Harimurti e Murugesan (2017) avaliou a remoção de OTC dissolvido em diferentes tipos de matriz hídrica (água destilada, encanada, do abastecimento municipal, de tanque primário de sedimentação no tratamento de esgoto e de tanque de biodegradação de tratamento de esgoto). Foram realizados experimentos de mineralização de OTC em soluções aquosas utilizando o sistema $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$. O processo de mineralização foi monitorado e medido em função da remoção de carbono orgânico total (COT). A concentração inicial de OTC foi de 250 mg.L^{-1} e a remoção máxima alcançada em água destilada foi no valor de 94,65%, adotando-se como configuração ideal pH de 6,3, concentração de H_2O_2 de 375 mg.L^{-1} , temperatura de 30°C , uma lâmpada UV de mercúrio com potência de 8W e tempo de operação de 180 minutos.

Leal, Esteves e Santos (2019) investigaram os efeitos dos principais cátions (Ca^{2+} e Mg^{2+}) na fotodegradação solar de OTC usando concentrações desses cátions, bem como a salinidade e valores de pH, típicos de águas salobras de aquicultura. Com os resultados obtidos foi demonstrado que o Mg^{2+} inibe a formação de alguns fotoprodutos de OTC observados na presença de Ca^{2+} , enquanto pelo menos dois novos fotoprodutos OTC são formados na presença de Mg^{2+} . Também ficou constatado que o Ca^{2+} e o Mg^{2+} induzem diferentes mecanismos de fotodegradação do antibiótico, afetando a cinética de alguns produtos. Por fim, é importante destacar que o Ca^{2+} aumenta significativamente a constante da taxa cinética de degradação da OTC, no entanto, quando o Mg^{2+} também está na solução, ocorre uma inibição do efeito acelerador do Ca^{2+} . Contudo, os autores concluem que é importante ser prudente quanto às conclusões sobre a identificação dos subprodutos de OTC formados em matrizes sintéticas, sendo necessário mais estudos acerca do assunto.

O estudo desenvolvido por Bi, Wu e Dong (2020) verificou a degradação de OTC com Cu^{2+}/PS sob luz solar simulada. A condição ótima de $\text{OTC}/\text{Cu}^{2+}/\text{PS}$ sob luz solar simulada foi ($\text{OTC}:\text{Cu}^{2+}:\text{PS} = 1:1,5:1,75$) por metodologia de superfície de resposta e a taxa de remoção de OTC pode chegar a 93,5% após 1 h de irradiação. Portanto, a energia solar pode desempenhar um papel importante na degradação do OTC.

Tran *et al.* (2020) utilizaram nanocompósitos de ferro de valência zero suportados por montmorilonita otimizados para remover a OTC da água. Resultados experimentais mostraram que 99% de 100 mg.L⁻¹ de OTC em pH 5,0 foram removidos usando 0,6 g.L⁻¹ do compósito 2Mt-nZVI e a mineralização atingiu 70% após 20 minutos de reação. Com isso, os produtos de transformação e intermediários foram detectados e identificados por espectrometria de massa de cromatografia líquida de alta resolução (LC-MS) e as vias foram propostas durante a degradação da OTC sobre o compósito 2Mt-nZVI.

Hong *et al.* (2021) desenvolveram uma pesquisa para a preparação de compósitos ocoss amorfos de Co/C para a geração eficiente de oxigênio singlete (¹O₂) para degradar a OTC seletivamente no sistema tipo Fenton. As amostras otimizadas de Co/C (Co/C⁻³) obtiveram o melhor desempenho de degradação do OTC próximo a 100 % em condições neutras, juntamente com reusabilidade e estabilidade satisfatórias. Os resultados forneceram uma ajuda significativa na exploração de vias de degradação e riscos ecológicos de OTC e seus intermediários.

A equipe de pesquisadores composta por Senasu *et al.* (2021) monitorou a fotoatividade do fotocatalisador molibdato de bismuto (BiVO₄) para a fotodegradação do antibiótico OTC, atingindo uma eficiência aprimorada de 83% sob luz solar após 240 minutos. O BiVO₄ possui alta propriedade de resposta à luz solar e uma promissora eficiência de separação de portadores de carga. Os radicais hidroxila desempenharam um papel importante na degradação da OTC. Portanto, esta pesquisa mostra um alto potencial do fotocatalisador para desintoxicação do antibiótico OTC em águas contaminadas.

Hoff *et al.* (2021) utilizaram um sistema de destilação solar, composto por um destilador solar do tipo pirâmide, para a remoção e degradação de uma mistura de vários antibióticos veterinários, entre eles a OTC, amplamente usado na produção intensiva de aves e suínos. Amostras de água de 10 litros contendo os antibióticos dentro do intervalo de concentração de 20 mg.L⁻¹ a 500 mg.L⁻¹ foram processados no sistema. Sendo esse sistema capaz de remover antibióticos em uma faixa de 99,73% a mais de 99,99%. Para a OTC foi obtida uma remoção na faixa de ~100% (pelo menos 99,99%). Segundo os autores, até onde se sabe, este é o primeiro estudo a aplicar um destilador solar piramidal para promover a remoção de antibióticos da água, incluindo a OTC.

Wang, Y. *et al.* (2022) estudaram a degradação da OTC de efluentes de aquicultura através da oxidação avançada com persulfato de sódio (PS) catalisado por Schwertmannite (Sch) sob luz solar e irradiação UV-254. Os resultados mostraram que a luz melhorou a

eficiência de degradação da OTC e acelerou a remoção do COT, pois as taxas de remoção de OTC no sistema Sch + PS + OTC foram de 96,8% e 99,1% após 3 h e 6 h de reações sob irradiação UV-254, respectivamente. Enquanto no sistema no qual tanto o PS quanto a luz solar participaram removeu 84,7% do OTC após 6h e nesse mesmo tempo de operação o sistema Sch + PS + OTC + luz solar removeu 90,3%. Já em condições escuras a taxa de remoção de OTC (40 $\mu\text{mol/L}$) foi de 89,8% e 92,3% após 3 h e 6 h, respectivamente. As taxas de remoção de COT após 3 h e 6 h sob UV-254 no sistema Sch + PS + OTC foram 49,8% e 69,7%, respectivamente. Conclui-se que este método tem uma boa perspectiva de aplicação para o tratamento de águas residuais de aquicultura.

A pesquisa executada por You *et al.* (2022) consistiu em um novo método de tratamento de água usando o processo de plasma em fase líquida (PPL) que pode decompor OTC remanescente no ambiente aquático, utilizando um fotocatalisador (TiO_2) precipitado com ferro (Fe). Dois experimentos foram realizados usando o processo PPL. Primeiro, o Fe foi precipitado em pó de TiO_2 através do processo PPL para diminuir a energia do band gap do TiO_2 e fornecer um fotocatalisador capaz de responder à luz visível. Segundo, foi utilizado o processo PPL e o (Fe/ TiO_2) para decompor o antibiótico OTC presente na água. Desse modo, a eficiência de decomposição da OTC pelo processo PPL melhorou em mais de 10% com o uso do Fe/ TiO_2 em relação ao experimento com o uso apenas do TiO_2 . Portanto, este estudo, integrou uma nova preparação de fotocatalisador que pode ser usado em luz visível, e um novo processo foi desenvolvido para poder efetivamente remover a OTC que permanece no meio ambiente e causa danos ao ser humano.

Zhou *et al.* (2023) estudaram o desempenho de um adsorvente de carbono à base de lignina para degradação da OTC por meio do processo de adsorção. Nos resultados encontrados têm-se que a taxa de remoção de OTC excede 98% em uma ampla faixa de valores de pH que variam de 3 a 10, permitindo uma alta seletividade para cátions concorrentes na água, com taxa de remoção superior a 86,7% de OTC de águas residuais hospitalares. Foram realizados ciclos consecutivos de adsorção-dessorção, de forma que após o sétimo ciclo, a taxa de remoção de OTC permaneceu tão alta quanto 91%. Portanto, conclui-se que existe um alto potencial de utilização do adsorvente para aplicações em efluentes industriais, visto que houve uma taxa eficiente de remoção do antibiótico.

Portanto, considerando as discussões apresentadas no estado da arte é notório que para a destilação solar de antibióticos só existe uma pesquisa até o presente momento e com uso de um destilador solar do tipo pirâmide, o que confirma a relevância de novas pesquisas de

destilação de águas contaminadas com antibióticos. Nesse contexto, fica evidente a inovação desta pesquisa que está relacionada a utilização de um destilador solar do tipo cascata para remoção do antibiótico OTC, já que a energia solar, como vista nos artigos sobre a fotodegradação do antibiótico, é capaz de desempenhar um importante papel para a degradação em questão. Além disso, é possível comprovar a boa variabilidade de utilização do equipamento em águas contaminadas.

4 METODOLOGIA

A metodologia utilizada consistiu no levantamento bibliográfico sobre o sistema de destilação solar e os antibióticos em águas, na realização de experimentos, na caracterização da água e na análise dos dados obtidos. Inicialmente, foi feito testes de desempenho para adequar o equipamento a sua função e ajustes necessários foram efetuados. Os experimentos executados tiveram como propósito maximizar dois fatores: eficiência e potabilidade. A eficiência é fundamental, pois analisa a relação entre a quantidade de radiação solar que o equipamento recebe pela produtividade de água destilada em tempo determinado, e a potabilidade da água agrega valor à capacidade do equipamento em remover a OTC e sais presentes.

4.1 Local de estudo

Os ensaios experimentais com o destilador solar foram realizados no entorno do Prédio do Centro de Ciências e Tecnologia (CCT) da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB) - Campus I, localizado na cidade de Campina Grande (PB), a uma latitude 7°13'11" sul e longitude 35°52'31" oeste, no bairro de Bodocongó. O local escolhido garantiu a incidência de radiação solar durante todo o período de sol pleno.

As análises laboratoriais para garantir a remoção do contaminante (OTC) e a potabilidade da água foram desenvolvidas no Laboratório de Pesquisa em Ciências Ambientais (LAPECA) do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, também situado na UEPB.

4.2 Água contaminada

Na água contaminada que foi tratada havia a combinação de água salobra com o antibiótico veterinário OTC, a mesma coletada em um poço tubular localizado no sítio Umbuzeiro Preto que fica na cidade de Barra de Santana/PB.

A OTC empregada apresenta-se na forma sólida, como um pó cristalino amarelo, inodoro, higroscópico e de sabor amargo. O produto veterinário comercial utilizado se apresenta na forma de pó solúvel, sendo do fabricante Desvet com composição de 82,5 g de OTC (cloridrato) em 100 g de massa do produto.

4.3 Protótipo do destilador solar

No sistema de destilação solar foi utilizado um destilador solar de fácil operação e baixa perda de calor, contendo uma placa absorvedora de calor ondular. O equipamento possui comprimento de 1,40 m, largura de 0,50 m e 0,15 m de espessura, possuindo uma área útil para destilação de 0,78 m² e foi operado com uma inclinação de 17° orientado para o norte, o que facilita a máxima absorção de calor e promove o escoamento da água. A cobertura de vidro tem 4 mm de espessura e a distância entre o vidro de condensação e a placa absorvedora ondular é de 4 cm. O equipamento é envolvido por uma estrutura de madeira, pois apresenta baixa condutividade térmica o que facilita o isolamento do calor e consequentemente contribui para o aumento da temperatura e aquecimento da água.

Na Figura 13 é apresentado o sistema de destilação solar utilizado na pesquisa contendo o destilador do tipo cascata com placa absorvedora ondular.

FIGURA 13 – Destilador solar do tipo cascata com placa absorvedora ondular.

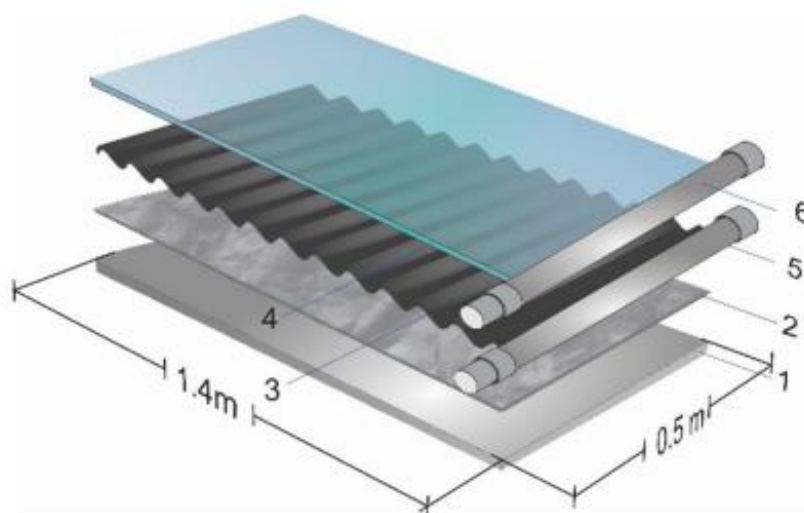


Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

O destilador apresentado foi produzido com materiais de baixo custo, visando um maior custo-benefício, sendo constituído internamente pelos componentes mostrados na Figura 14. De acordo com Cardoso *et al.* (2022) o destilador consiste em seis partes: a placa de zinco (1),

o sistema de isolamento térmico de fibra de vidro (2), a placa absorvedora ondular de calor de fibrocimento (3), o vidro de condensação de água destilada (4), as calhas coletoras de água contaminada (5) e destilada (6), em tubos de cloreto de polivinila (PVC).

FIGURA 14 - Componentes do destilador solar ondular.



Fonte: Cardoso *et al.*, 2022.

A placa de zinco fica localizada no fundo do destilador para que haja a vedação do equipamento. O sistema de isolamento térmico de fibra de vidro serve para reduzir as perdas de calor devido à convecção com o meio ambiente. A placa absorvedora ondular de calor em fibrocimento que apresenta uma difusividade térmica ideal para esta operação, sendo a propriedade térmica capaz de caracterizar a rapidez com que o calor se difunde através desse material, assim a maior parte do calor é absorvida pela placa, que contém 15 ondulações, aumentando o tempo de permanência da água no sistema, foi pintada de preto fosco para aumentar a absorção de calor. O vidro de condensação de água destilada ficou em angulação adequada que permitiu o escoamento da água pela ação da gravidade.

Na Tabela 4 é possível observar os parâmetros operacionais do destilador e seus componentes, são dados referentes à água, cobertura de vidro, placa absorvedora ondular e isolante. Esses dados são utilizados para calcular os balanços térmicos e a transferência de calor no processo de destilação solar.

TABELA 4 - Dados operacionais do destilador.

Descrição	Unidade	Nomenclatura	Valor	Autores
Absorvidade da água	-	α_a	0,05	Dumka; Mishra (2020)
Absorvidade do vidro	-	α_v	0,05	Sarhaddi <i>et al.</i> (2017)
Área da água	m ²	A_a	0,78	-
Área do vidro	m ²	A_v	0,77	-
Área da placa	m ²	A_b	0,78	-
Área do isolante	m ²	A_{iso}	0,79	-
Calor específico da água	J.kg ⁻¹ .K	C_a	4190	Sarhaddi <i>et al.</i> (2017)
Calor específico do vidro	J.kg ⁻¹ .K	C_v	800	Sarhaddi <i>et al.</i> (2017)
Condutividade térmica da água	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	K_a	0,58	Sarhaddi <i>et al.</i> (2017)
Condutividade térmica do vidro	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	K_v	0,80	Dumka; Mishra (2020)
Condutividade térmica do isolante	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	K_{iso}	0,045	Dumka; Mishra (2020)
Emissividade da água	-	ε_a	0,96	Dumka; Mishra (2020)
Emissividade do vidro	-	ε_v	0,92	Dumka; Mishra (2020)
Transmitância da água	-	τ_a	0,95	Sarhaddi <i>et al.</i> (2017)
Transmitância do vidro	-	τ_v	0,90	Sarhaddi <i>et al.</i> (2017)

4.4 Modo operacional do destilador

Os experimentos foram monitorados no intervalo de 10h (07h00min às 17h00min), desenvolvidos durante o mês de dezembro de 2022 e nos meses de maio, agosto, setembro e outubro de 2023. Antes de cada experimento, foi preparada uma solução estoque aquosa (1000 mg.L⁻¹) de OTC para a retirada da alíquota necessária para se preparar a solução de OTC veterinária, de acordo com a concentração desejada. Foi realizado um experimento utilizando água destilada em concentração de 30 mg.L⁻¹. Contudo, os outros experimentos foram realizados em água salobra com concentração de 30 mg.L⁻¹, 45 mg.L⁻¹ e 60 mg.L⁻¹.

Um volume de 7 litros de água contaminada foi disposto inicialmente em um recipiente alojado na parte superior do equipamento, com vazão de 30 mL.min⁻¹, dessa forma a água percorreu a placa absorvedora de calor no sentido descendente e com o escoamento preenchendo toda a extensão da placa. Com isso, a água foi aquecida pela energia solar, que ao

absorver o calor é evaporada e condensada no lado interno do vidro, devido à temperatura do vapor de água estar superior à temperatura do vidro. Por fim, a água destilada foi recolhida no canal de coleta do equipamento.

Após cada experimento a placa absorvedora ondular e o destilador foram higienizados para que não exista riscos de o equipamento modificar a qualidade da água que é colocada, evitar erros nos próximos experimentos e assim manter o equipamento sempre limpo. A placa foi limpa utilizando água corrente.

Ao longo dos experimentos, a cada 30 minutos, foram realizadas as medições das variáveis. As variáveis definidas para serem analisadas foram: volume de destilado, velocidade do vento, incidência de radiação solar, temperatura ambiente, temperatura da água e temperatura do vidro (externo e interno).

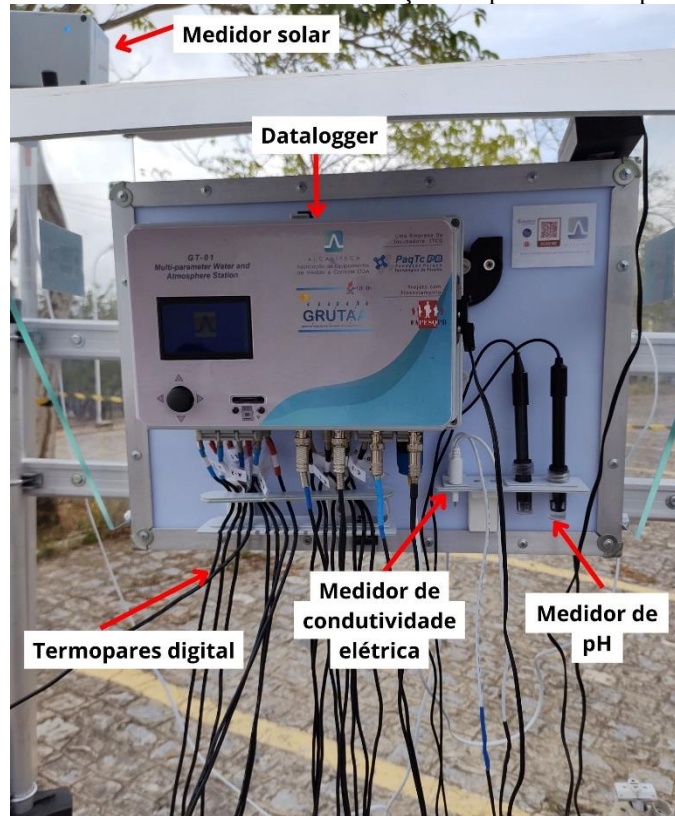
4.5 Procedimento de coleta de dados

O volume de destilado e a velocidade do vento são variáveis que foram coletadas manualmente. O volume do destilado foi medido utilizando uma proveta graduada. Já a velocidade do vento foi verificada em equipamento digital chamado de Anemômetro modelo Incoterm TAN 100, essa é uma variável importante pois influencia diretamente no resfriamento da cobertura de vidro.

Para as variáveis meteorológicas (radiação solar, umidade relativa do ar e temperatura ambiente), bem como as temperaturas da água e do vidro, foi realizada a coleta de dados por meio de monitoramento mediante o Sistema Integrado Multianálise com Conectividade e Função Datalogger para Monitoramento de Estações de Dessalinização Solar e Outros Sistemas de Tratamento de Águas e Efluentes, desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Tratamentos Avançados de Águas (GRUTAA) em conjunto com a ALCALITECH – Fabricação de Aparelhos e Equipamentos de Medida e Controle Ltda (Ramos *et al.*, 2021), que faz leituras ininterruptas durante todo o período de funcionamento do destilador. Esse sistema fornece os dados através de um software que pode ser acompanhado remotamente em smartphones ou computadores com conexão via bluetooth. Também é importante destacar que os parâmetros de pH e condutividade elétrica foram acompanhados pelo equipamento em questão.

Na Figura 15 é mostrado o equipamento de medição Sistema Multianálise utilizado.

FIGURA 15 - Sistema multianálise de medição dos parâmetros experimentais.



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Considerando os aparelhos utilizados para a coleta de dados foi realizada a análise de incerteza nos seguintes equipamentos: recipiente coletor (proveta graduada), anemômetro, medidor solar e termopares. A proveta graduada (0 mL a 1000 mL) utilizada para medir o volume de água produzida apresentava precisão de ± 10 mL. O anemômetro digital ($0,1 \text{ m.s}^{-1}$ a 30 m.s^{-1}) que coleta os dados da velocidade do vento aponta precisão de $\pm 0,1 \text{ m.s}^{-1}$. O medidor solar (1 W.m^{-2} a 1300 W.m^{-2}) coleta os dados referentes à incidência de energia solar e indica precisão de $\pm 10 \text{ W.m}^{-2}$. O termopar ($-50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$) empregado para medir as temperaturas foi do tipo-K com precisão de $\pm 1,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Nos experimentos assume-se que as incertezas são consideradas do Tipo B, visto que estão relacionadas a erros sistemáticos e podem ser calculados através de outros recursos como: certificados de calibração e especificações do fabricante. Logo, a análise de incerteza de cada dispositivo foi calculada conforme a Equação (32) (Dumka; Mishra, 2020):

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}} \quad (32)$$

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

As especificações dos instrumentos usados neste estudo estão listadas na Tabela 5, contendo faixa, precisão e incerteza.

TABELA 5 – Faixa, precisão e incerteza de cada aparelho de medição.

Instrumento	Faixa	Precisão	Incerteza
Proveta graduada (mL)	0 a 1000	$\pm 10,0$	5,77
Anemômetro (m.s^{-1})	0,1 a 30	$\pm 0,1$	0,06
Medidor solar (W.m^{-2})	1 a 1300	$\pm 10,0$	5,77
Termopar digital ($^{\circ}\text{C}$)	-50 a 300	$\pm 0,1$	0,06

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

4.6 Cálculo da eficiência

A eficiência térmica foi calculada de forma horária e diária, para isso foram utilizadas as Equações de (1) a (3) presentes no tópico da eficiência dos destiladores solar. No cálculo da eficiência foram utilizados os valores coletados referente a incidência de radiação solar, temperatura e produtividade de água destilada, como também a área da placa e o calor latente da água. As Equações foram resolvidas utilizando o software de planilha Microsoft Excel.

4.7 Cálculo dos coeficientes de transferência de calor

Os coeficientes de transferência de calor foram calculados mediante as Equações de (4) a (19) descritas no tópico da transferência de calor no processo de destilação solar, para esses cálculos são utilizadas as temperaturas obtidas ao longo dos experimentos. Assim, na troca de calor interna é utilizada a temperatura da cobertura de vidro interna e a temperatura da superfície da água, já na troca de calor externa é utilizada a temperatura da cobertura de vidro externa e a temperatura do ambiente. Essas variações de temperatura influenciam diretamente os coeficientes convectivos, radiativos e evaporativos. As equações foram resolvidas usando o software de planilha Microsoft Excel.

4.8 Caracterização da OTC na água

A caracterização da OTC é de fundamental importância na pesquisa para verificar a eficiência do destilador para a sua remoção.

O método espectrofotométrico é um método colorimétrico normalmente aplicado para a mensuração da Tetraciclina, com isso foi empregada a metodologia proposta por Rufino *et al.*

(2010) para estabelecer a medição da concentração de OTC das amostras, cuja metodologia utiliza o Na_2CO_3 (1% m/v) e a cloramina-T (6% m/v). Contudo, é necessária uma curva de calibração padrão obtida a partir da determinação da absorbância de soluções contendo quantidades conhecidas do antibiótico, em um comprimento de onda que permita a absorbância máxima da amostra.

A partir da solução estoque (1000 mg.L^{-1}) também foi obtida uma solução intermediária de 100 mg.L^{-1} para preparar as soluções padrões, utilizadas na curva de calibração, essas soluções foram preparadas imediatamente antes das análises por diluição da solução intermediária. Portanto, de acordo com a Tabela 6 foram preparadas em balões volumétricos de 25 mL soluções padrões com concentrações de 0, 10, 20, 30, 40, 50 e 60, 70, 80 (mg.L^{-1}), adicionando em cada balão 0,7 mL de Na_2CO_3 e 2,5 mL de cloramina – T e em seguida o balão foi avolumado com água destilada. Os reagentes utilizados foram preparados mediante metodologia empregada. Assim, para cada solução o valor da absorbância foi registrado no comprimento de onda de 363 nm, conforme o estudo de Pascoal *et al.* (2022), contra um branco tratado de forma semelhante.

TABELA 6 - Soluções padrões de OTC.

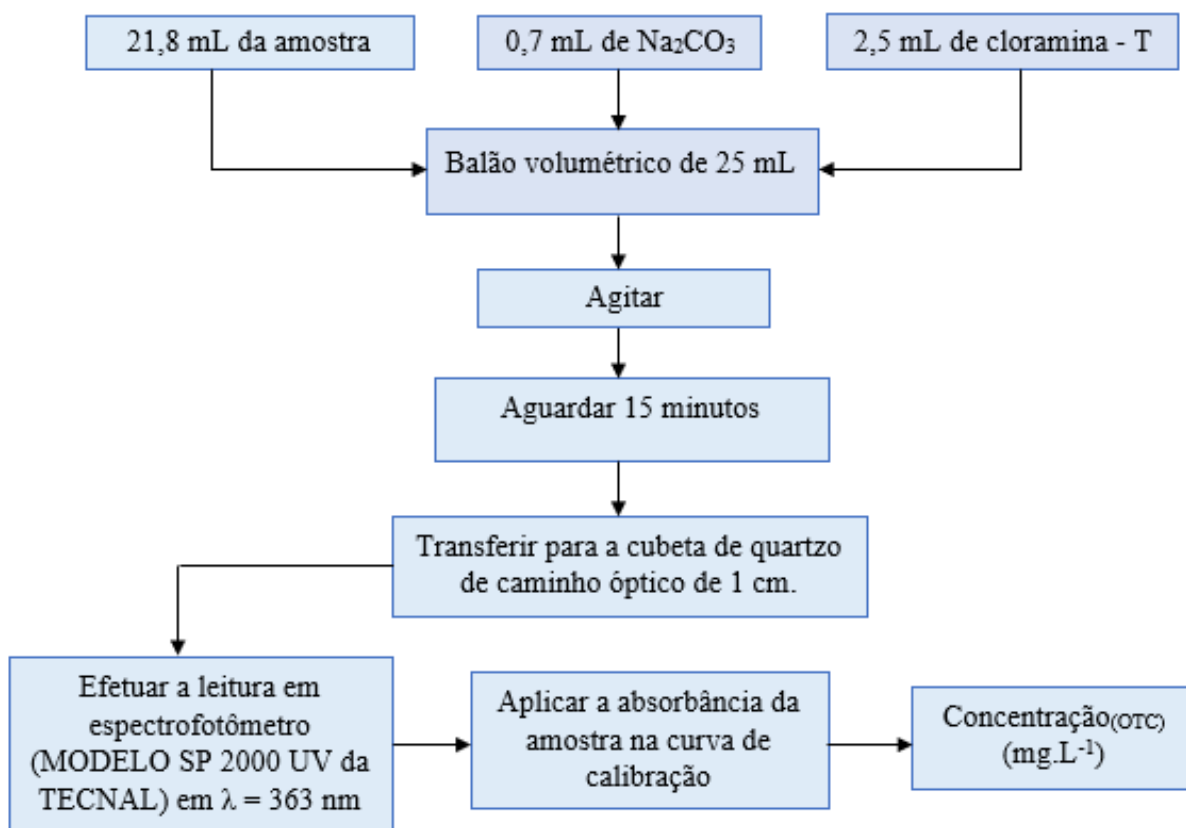
Concentração (mg.L^{-1})	0	10	20	30	40	50	60	70	80
Volume da solução intermediária (mL)	0,0	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

A curva foi realizada com valor acima da concentração utilizada inicialmente no tanque, com o intuito de quantificar a água contaminada que sai do destilador, pela absorbância apresentada no espectrofotômetro, utilizando o mesmo comprimento de onda e seguindo os mesmos procedimentos.

Portanto, para a verificação da concentração residual do antibiótico nas amostras de água que saem do destilador é apresentado na Figura 16 um fluxograma sobre a análise da quantificação de OTC.

FIGURA 16 - Fluxograma da quantificação de OTC.



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

4.9 Caracterização físico-química da água

A análise da água foi feita antes e após o processo de destilação, por meio de análises físico-químicas que consistem em: pH, condutividade elétrica, alcalinidade, turbidez, cor aparente, cloretos, dureza, sódio, potássio e sólidos dissolvidos totais (SDT). Como referência aos valores máximos permitidos das análises em questão temos a Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021). As metodologias das análises estão preconizadas no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (BAIRD; EATON; RICE, 2017). Na Tabela 7 estão apresentados os parâmetros físico-químicos e a metodologia utilizada.

TABELA 7 - Parâmetros físico-químicos realizados.

Parâmetros	Unidade	Método
pH	adimensional	Potenciométrico
Condutividade elétrica	$\mu\text{S.cm}^{-1}$	Conduímetro
Alcalinidade	$\text{mg CaCO}_3.\text{L}^{-1}$	Titulométrico
Turbidez	NTU	Nefelométrico
Cor aparente	uH	Colorimétrico
Cloretos	$\text{mg Cl}^{-}.\text{L}^{-1}$	Mohr
Dureza total	$\text{mg CaCO}_3.\text{L}^{-1}$	Titulométrico
Sódio	$\text{mg Na}^{+}.\text{L}^{-1}$	Fotométrico
Potássio	$\text{mg K}^{+}.\text{L}^{-1}$	Fotométrico
SDT	mg.L^{-1}	Instrumental

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

SDT = Sólidos Dissolvidos Totais

Na descrição dos resultados há dados de remoção percentual dos parâmetros cujo valores foram calculados utilizando-se a Equação (33).

$$\text{Remoção (\%)} = \left(\frac{C_{\text{inicial}} - C_{\text{final}}}{C_{\text{inicial}}} \right) * 100 \quad (33)$$

Onde, C (mg.L^{-1}) corresponde a concentração de cada parâmetro.

4.10 Custos de produção de água tratada

A análise de custos foi realizada e calculada mediante as Equações de (25) a (31) presentes no tópico da análise de custos. Esses cálculos envolve os custos com a construção do destilador, o tempo de vida útil do equipamento, taxa de juros bancária, custos relacionados a operação e manutenção, como também a produtividade de água destilada pelo equipamento. As equações foram resolvidas usando o software de planilha Microsoft Excel.

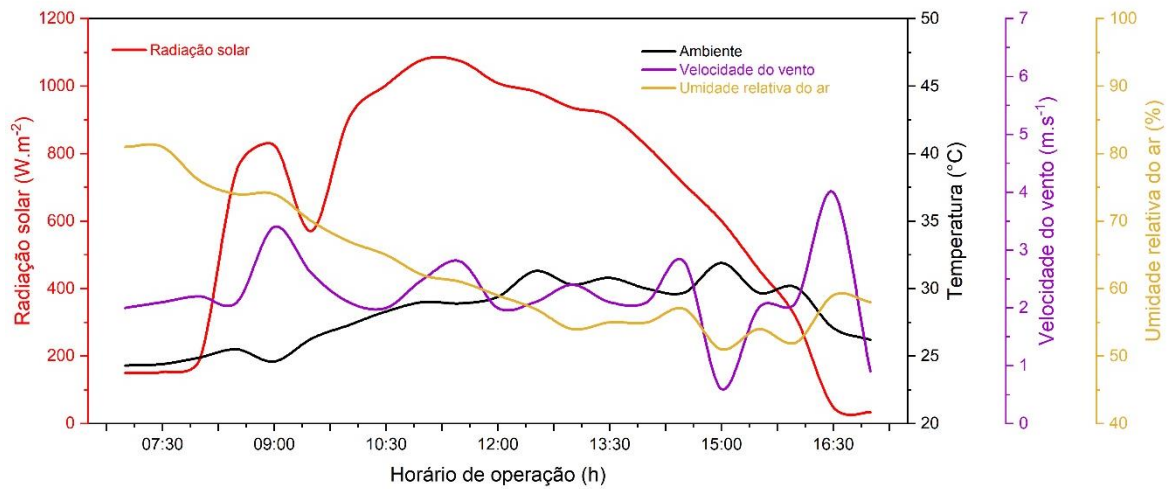
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos e apresentados nesta seção estão divididos em: parâmetros meteorológicos, apresentação dos perfis de temperatura e incidência de radiação solar, produtividade de água destilada, eficiência térmica do destilador, coeficientes de transferência de calor na destilação solar, remoção de OTC da água, estudo sobre a qualidade físico-química da água e a análise de custos por litro de água.

No Apêndice A estão reportados os resultados de todos os experimentos realizados durante a pesquisa. Para efeito de estudo foi selecionado um experimento de cada concentração em água salobra. A seguir estão exibidos os resultados da pesquisa para os dias 30/08/2023, 15/09/2023 e 21/09/2023, esses dias se apresentaram propícios à realização dos ensaios, apresentando níveis de incidência de radiação solar favoráveis ao processo de destilação.

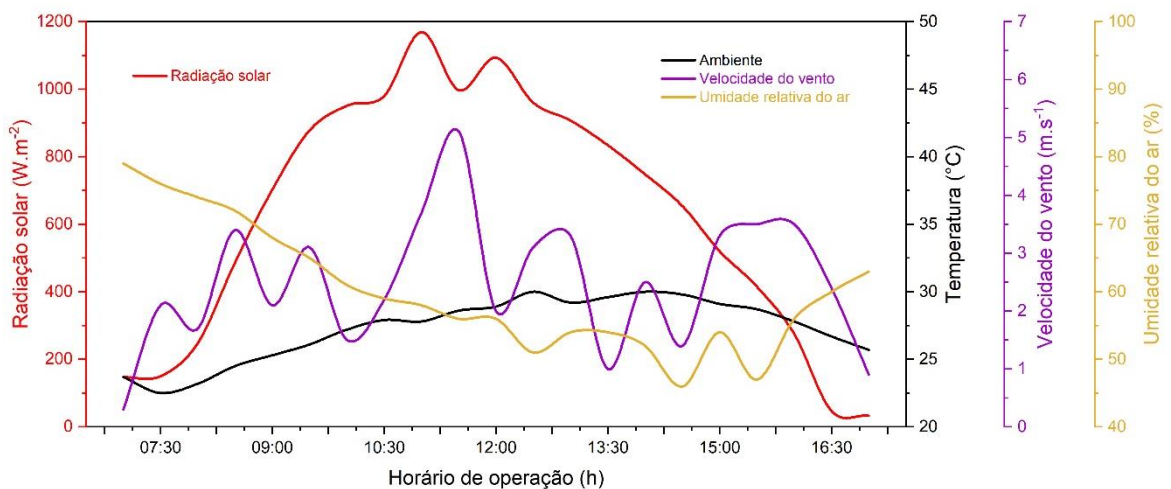
5.1 Parâmetros meteorológicos

Os parâmetros meteorológicos registrados das 07h00min às 17h00min do dia 30/08/2023 são plotados na Figura 17, incluindo incidência de radiação solar, temperatura ambiente, velocidade do vento e umidade relativa do ar. É necessário avaliar a influência desses parâmetros mediante a produtividade de água, por isso a necessidade de monitoramento. A radiação solar é o parâmetro que apresenta maior impacto na destilação, pois a alta radiação faz com que as temperaturas dentro do destilador aumentem e consequentemente a produtividade de água será elevada. A aproximação média da intensidade solar para o dia 30/08/2023 foi de $644,52 \text{ W.m}^{-2}$. No início do experimento às 07h00min a incidência de radiação solar registrada foi de 150 W.m^{-2} , depois de 30 minutos apresentava praticamente a mesma radiação com o valor de 153 W.m^{-2} . Durante esse dia a temperatura ambiente variou de $24,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $31,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$, apresentando temperatura ambiente média de $28,09 \text{ }^{\circ}\text{C}$. A temperatura ambiente média da região Nordeste é de $31 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (Inmet, 2019).

FIGURA 17 - Parâmetros meteorológicos do dia 30/08/2023.

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

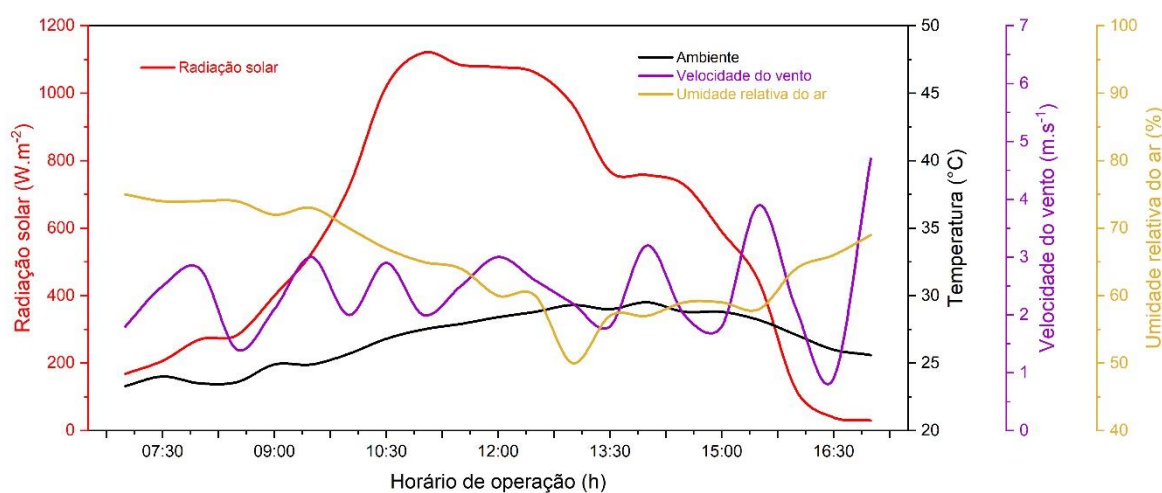
Na Figura 18 são apresentados os parâmetros meteorológicos registrados durante o dia 15/09/2023. Levando em consideração a média da velocidade do vento foi obtido o valor de $2,5 \text{ m.s}^{-1}$. Seu pico foi observado às 11h30min com valor de $5,1 \text{ m.s}^{-1}$ e seu valor mínimo foi registrado no início do experimento (07h00min) com valor de $0,3 \text{ m.s}^{-1}$, logo o vento se apresentou relativamente forte em alguns momentos ao longo do dia. A velocidade do vento favorece o resfriamento da cobertura de vidro e, conseqüentemente, aumenta a transferência de calor por convecção. No estudo de Carmo e Soares (2022) que analisou um destilador solar piramidal, a velocidade do vento se apresentou mais intensa nas horas finais do experimento (15h00min às 17h00min), mesmo horário em que há o decaimento da produção de destilado.

FIGURA 18 - Parâmetros meteorológicos do dia 15/09/2023.

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

A Figura 19 mostra as curvas registradas para cada parâmetro meteorológico analisado durante o dia 21/09/2023. A umidade relativa do ar apresentou índices mais elevados nas primeiras horas do experimento, seu valor mais alto foi verificado às 07h00min com 75%. Assim, ocorre um decréscimo na umidade em função do aumento da radiação solar e da temperatura ambiente. O pico mais baixo da umidade relativa foi registrado às 13h00min com 50%, após isso ocorre um aumento na umidade em função da diminuição da radiação solar e da temperatura ambiente. Quando a umidade relativa do ar está alta a produtividade é baixa, isso pode ser atribuído tanto ao baixo coeficiente de convecção quanto às baixas temperaturas de saturação do vapor dentro do destilador (Hammoodi *et al.*, 2023).

FIGURA 19 - Parâmetros meteorológicos do dia 21/09/2023.



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

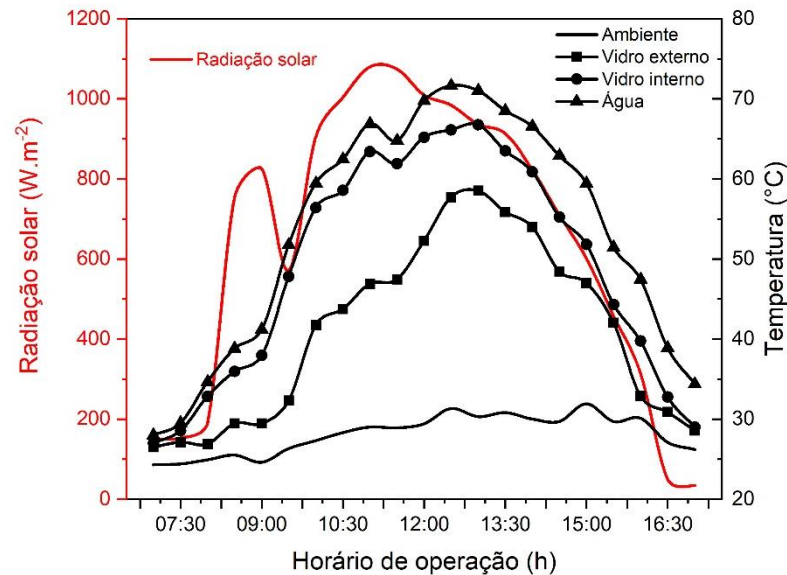
O estudo de Sharshir *et al.* (2017) avaliou o desempenho de três destiladores solar (convencional e modificados com nanofluidos), que dependendo das condições climáticas em diferentes dias, a temperatura ambiente variou de 26 °C à 36 °C, a velocidade do vento variou de 0,1 m.s⁻¹ à 6,5 m.s⁻¹ e a intensidade de radiação solar variou de 45 W.m⁻² à 895 W.m⁻².

5.2 Perfis de temperatura e incidência de radiação solar

A Figura 20 apresenta as variações de temperatura da água, temperatura do vidro e temperatura ambiente de acordo com a radiação solar durante o dia 30/08/2023. As variações de temperatura estão diretamente relacionadas com a radiação solar incidente no destilador, assim ao longo desse experimento a temperatura da água sofre alterações. Ao iniciar o monitoramento (07h00min) a temperatura da água encontrava-se em 28 °C, com radiação solar

incidente de 150 W.m^{-2} , a qual representa uma parcela da energia envolvida no processo de destilação solar da água contaminada. A radiação solar é um dos parâmetros que podem variar de forma brusca e em seguida ser elevada rapidamente, esse pico de variação ocorreu às 09h30min com a radiação chegando ao valor de 571 W.m^{-2} .

FIGURA 20 - Perfis de temperatura e incidência de radiação solar do dia 30/08/2023.

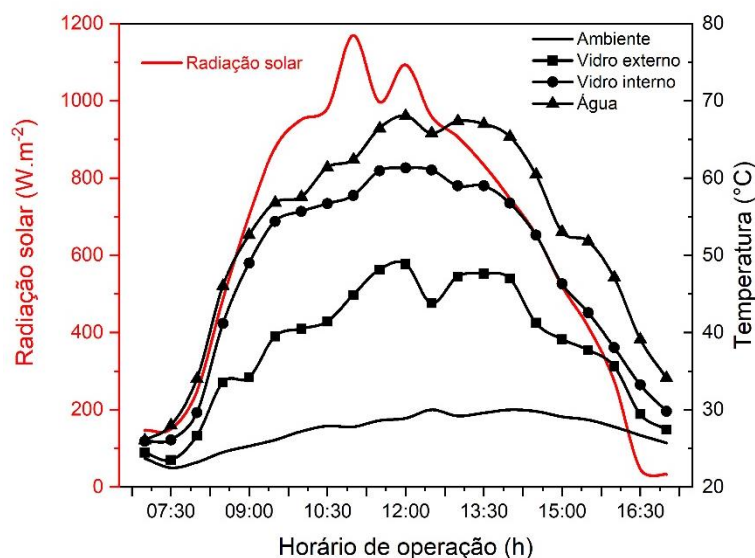


Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Ainda com a Figura 20, o pico de temperatura da água ocorre às 12h30min alcançando $71,62^{\circ}\text{C}$, com radiação de 984 W.m^{-2} . A variação da radiação incidente pode ser vista através da curva de intensidade de radiação solar que acompanha as condições climáticas do momento, portanto, considerando essa curva de distribuição a irradiação máxima registrada foi de 1079 W.m^{-2} às 11h00min. Esses resultados foram superiores ao estudo de Tiware e Rathore (2022) que apresentou temperatura máxima da água em destilador solar cascata de 58°C às 14h00min e a radiação solar era de 855 W.m^{-2} .

Para o dia 15/09/2023, a Figura 21 exhibe as variações de temperatura da água, do vidro e do ambiente com a radiação solar incidente no destilador durante o dia. É sabido que na destilação solar a diferença na temperatura da água e na temperatura do vidro leva ao aumento da transferência de calor por convecção natural, o que consequentemente leva ao aumento da produção de destilado (Angappan *et al.*, 2023). Arimi (2022) desenvolveu um estudo que comparou um destilador solar escalonado padrão com um destilador escalonado modificado com um condensador, os resultados mostraram que a temperatura do vidro no destilador padrão foi sempre maior que no destilador modificado, devido à maior temperatura do ar úmido.

FIGURA 21 - Perfis de temperatura e incidência de radiação solar do dia 15/09/2023.

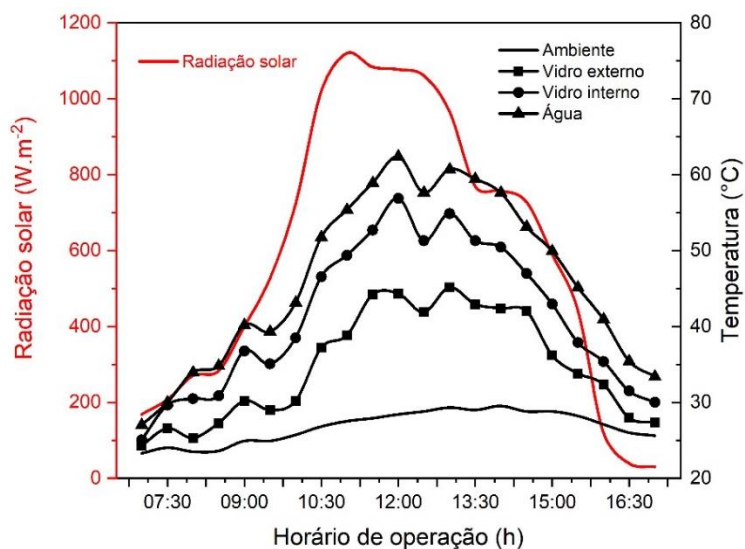


Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Com o experimento do dia 15/09/2023 mostrado ainda na Figura 21, têm-se que a cobertura de vidro atingiu as maiores temperaturas às 12h00min que foram de 48,88 °C e 61,31 °C para o vidro externo e interno, respectivamente. Além disso, a temperatura da água foi de 68,06 °C nesse mesmo horário. A incidência de radiação solar apresentou seu maior nível às 11h00min, com o valor máximo de 1169 $W.m^{-2}$, esse valor auxiliou no aumento da temperatura do vidro até chegar aos valores máximos. A temperatura do vidro foi medida na parte externa e interna da cobertura de vidro, em que foi observado que os valores de temperatura interna são sempre superiores aos valores da temperatura externa. O estudo de Toosi, Goshayeshi e Heris (2021) compara diferentes destiladores escalonados (simples e modificados), no destilador solar escalonado sem modificação a temperatura interna do vidro variou entre 30 °C e 48 °C, já a temperatura da água atingiu cerca de 54 °C, esses valores são inferiores aos valores encontrados no experimento do dia 15/09/2023.

Na Figura 22 verificam-se os perfis de temperatura que acompanham a radiação solar monitorada no dia 21/09/2023. Com a Figura é possível identificar que às 12h00min a temperatura da água atinge o maior valor de 62,38 °C, nesse mesmo horário a radiação solar apresentava o valor de 1077 $W.m^{-2}$. O maior valor para incidência de radiação solar foi de 1120 $W.m^{-2}$ sendo registrado às 11h00min. A temperatura máxima da água atingiu às 14h30min cerca de 60 °C no destilador solar escalonado simples do estudo de Toosi *et al.* (2023), os experimentos desse estudo foram realizados no mês de agosto de 2022, com radiação solar média de 950 $W.m^{-2}$, em uma Universidade do Irã

FIGURA 22 - Perfis de temperatura e incidência de radiação solar do dia 21/09/2023.

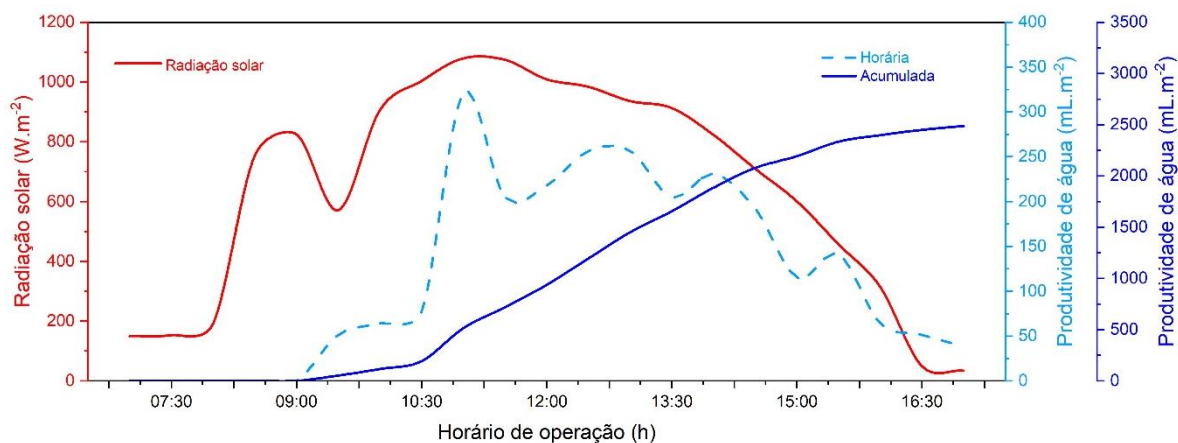


Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

5.3 Produtividade de água destilada

Ao longo de cada experimento é coletado o valor de água destilada horária e ao final faz-se o cálculo da produção de água destilada total acumulada, a fim de averiguar a eficiência do equipamento quanto à sua produtividade. A Figura 23 corresponde à produtividade de água destilada horária e acumulada que acompanha a incidência de radiação solar monitorada durante o dia 30/08/2023. O volume de água produzido acompanha as variações de temperaturas, em que há o acúmulo gradativo da quantidade de água destilada. A produtividade de água destilada acumulada durante o experimento foi de 2487,18 $mL.m^{-2}.dia^{-1}$. O rendimento de água destilada se iniciou a partir das 09h30min com valor de 51,28 $mL.m^{-2}$ e consequentemente, foi aumentando, sendo contínuo até o final do experimento às 17h00min.

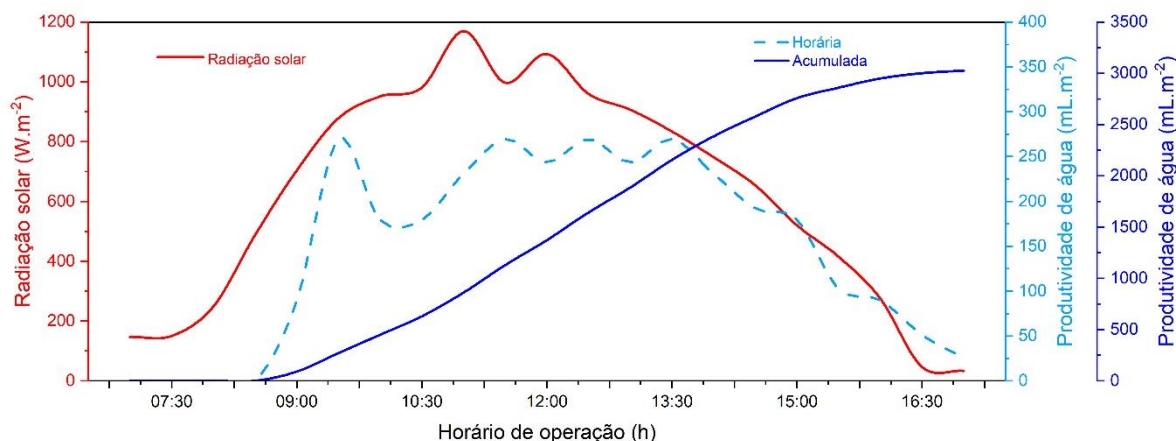
FIGURA 23 - Produtividade de água e incidência de radiação solar do dia 30/08/2023.



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

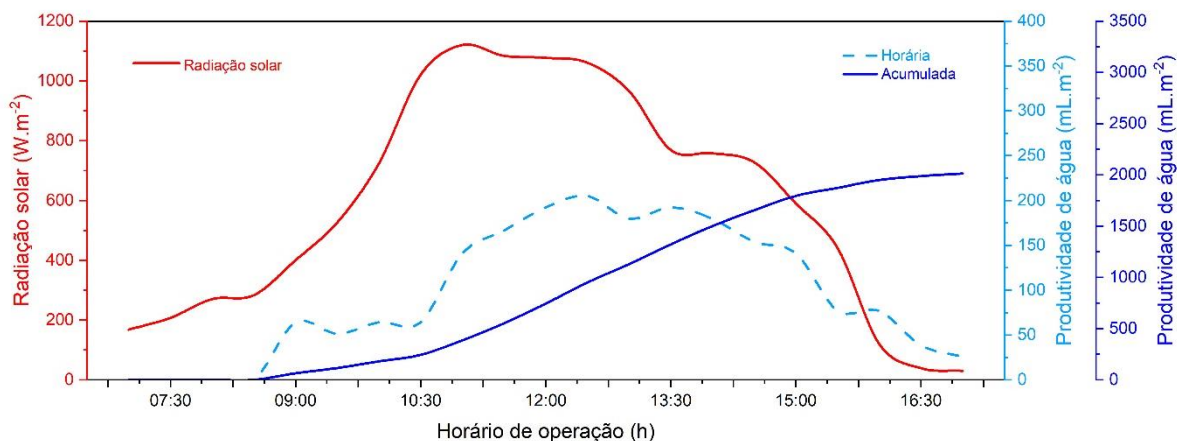
Para o dia 15/09/2023, pode-se observar na Figura 24 a produtividade de água destilada horária e acumulada em virtude da incidência de radiação solar. De acordo com os dados obtidos a maior produtividade horária de água foi no valor de 269,23 mL.m², essa produtividade ocorreu quatro vezes ao longo do dia. A radiação solar e as variações de temperatura ao longo do experimento acarretaram numa produtividade de água destilada acumulada por área de unidade de destilação de 3025,40 mL.m⁻².dia⁻¹. Alwan, Shcheklein e Ali (2021) alcançaram uma produtividade de água destilada acumulada em destilador solar convencional de 2800 mL.m⁻².dia⁻¹, no entanto os ensaios aconteciam ao longo de 12h (08h00min às 20h00min). Assim, essa diferença de produção de água é favorável ao experimento realizado no dia 15/09/2023 que ocorreu durante 10h.

FIGURA 24 - Produtividade de água e incidência de radiação solar do dia 15/09/2023.



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Com a Figura 25 é possível observar a produtividade de água e a incidência de radiação solar durante o dia 21/09/2023. Esse experimento foi o que obteve as menores temperaturas e a menor produtividade acumulada de água destilada, pois nesse dia o céu apresentava grande quantidade de nuvens o que influenciou diretamente nas temperaturas e consequentemente na produtividade. Ficou constatado que a produtividade de água destilada acumulada durante esse experimento foi de 2012,82 mL.m⁻².dia⁻¹. Durante o tempo de operação, a maior produtividade horária de água aconteceu às 12h30min, apresentando 205,13 mL.m² de água com radiação de 966 W.m², isso ocorre porque a placa absorvedora estava superaquecida devido ao tempo de exposição à radiação solar e, consequentemente, aquecendo a água contaminada até o processo de evaporação, podendo assim verificar um atraso no tempo de resposta do sistema, visto que a radiação solar máxima foi registrada às 11h00min (Khechekhouche *et al.*, 2020).

FIGURA 25 - Produtividade de água e incidência de radiação solar do dia 21/09/2023.

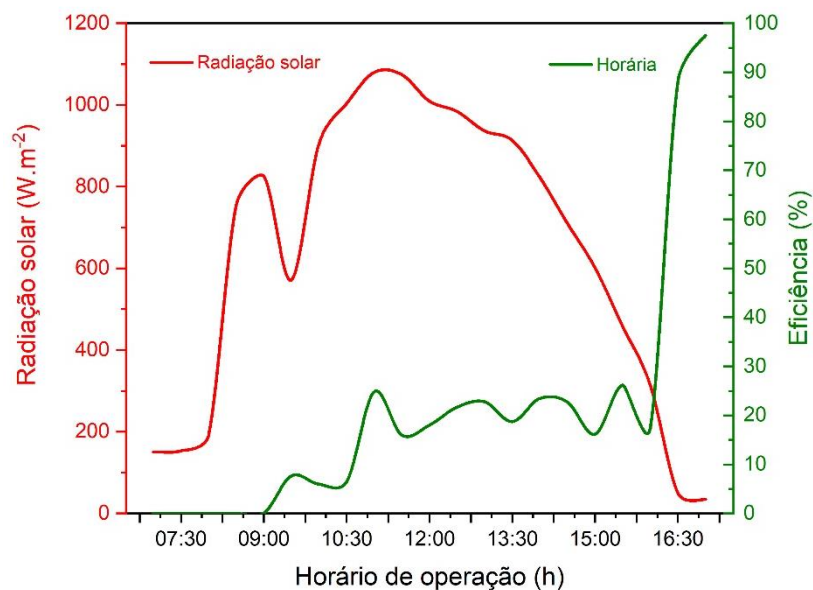
Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

5.4 Eficiência térmica do destilador

A eficiência do destilador acompanha o fluxo da incidência de radiação solar, por isso existe uma relação diretamente proporcional entre radiação e eficiência, fundamentada pelo aumento das temperaturas da água, pois ocorre uma maior evaporação. A eficiência de um destilador escalonado é maior que a de um destilador convencional, devido ao aumento da evaporação e condensação de água do destilador escalonado em relação ao convencional (El-Agouz, 2014).

A eficiência térmica horária do destilador e a radiação solar incidente para o dia 30/08/2023 é apresentada na Figura 26. Observa-se que às 16h30min o experimento já apresentava uma eficiência alta com o valor de 88%. Contudo, a eficiência máxima foi alcançada ao final do experimento, na última medição realizada, mesmo com o decaimento da incidência de radiação solar, com eficiência no valor de 97,49%. Esse fato ocorre devido a capacidade térmica da água originar em uma taxa constante de evaporação acompanhada da energia térmica acondicionada no interior do destilador anteriormente, ou seja, devido ao acúmulo de energia por parte da água e pelo bom isolamento do equipamento, visto que às 17h00min a radiação solar apresentava o valor de $34 W.m^{-2}$ e a produtividade de água foi de $38,46 mL.m^{-2}$. A radiação solar média desse experimento foi de $644,52 W.m^{-2}$ e a eficiência térmica diária foi de 48,10%, sendo essa eficiência maior do que a registrada no estudo de Sibagariang *et al.* (2023) que ao desenvolver 4 destiladores solar (1 destilador convencional e 3 destiladores modificados com adição de casca de dendê), os resultados mostraram que a eficiência média diária mais alta foi no valor de 41,71% no destilador com modificação.

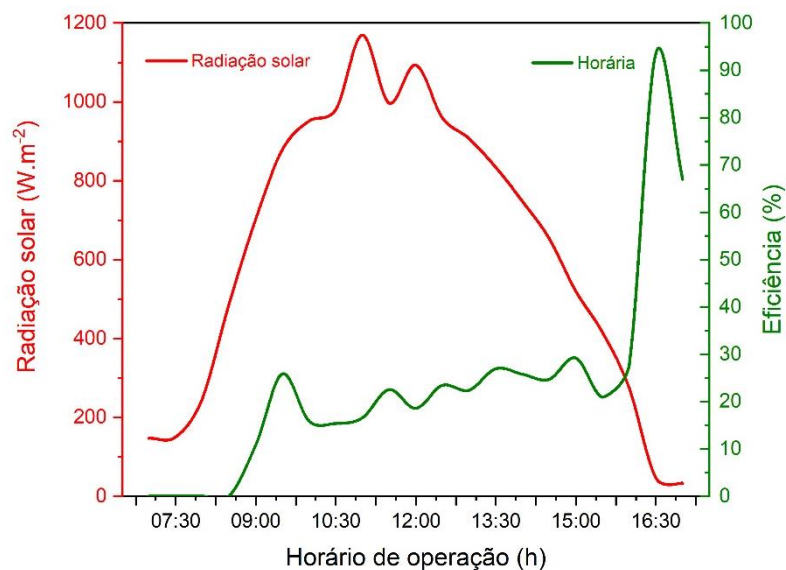
FIGURA 26 - Eficiência térmica horária e incidência de radiação solar do dia 30/08/2023.



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

A Figura 27 ilustra a eficiência térmica horária com a incidência de radiação monitoradas durante o dia 15/09/2023. Os maiores valores máximos de eficiência foram alcançados às 16h30min e às 17h00min com 93,59% e 66,98%, respectivamente. A eficiência foi melhorada à medida que a radiação diminuiu e consequentemente a produção de destilado ao longo do dia, no entanto o sistema apresentava uma alta capacidade térmica, gerada através do calor latente produzido entre a água e a energia absorvida pelo equipamento. Ao fim da coleta de dados desse experimento, obteve-se radiação solar média de 628,38 W.m⁻².

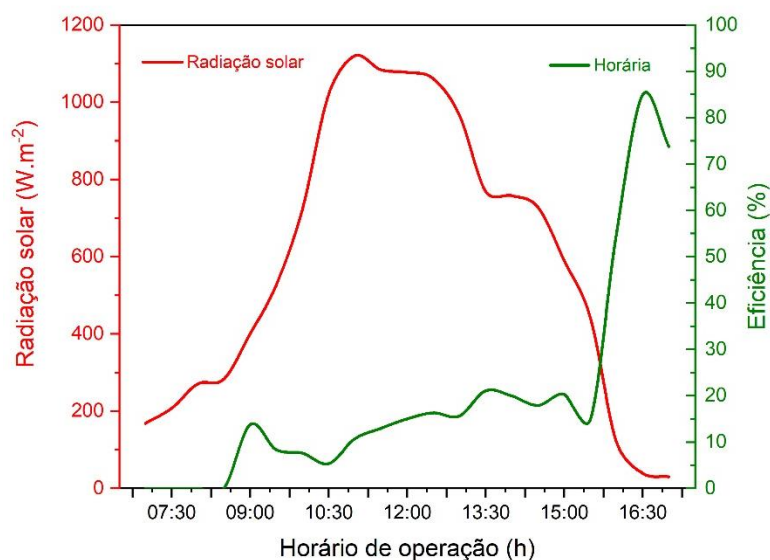
FIGURA 27 - Eficiência térmica horária e incidência de radiação solar do dia 15/09/2023.



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Na Figura 28 é mostrada a eficiência térmica horária em virtude da incidência de radiação solar do dia 21/09/2023. Com os dados da eficiência térmica foi possível observar que a partir das 16h00min a eficiência registrada já apresentava valores acima de 50%. Logo, a eficiência máxima foi obtida às 16h30min com valor de 84,90%. O estudo realizado por Sharshir *et al.* (2018) analisou comparativamente destiladores solar convencionais e modificados com micro/nanopartículas fazendo referência às suas eficiências, sendo assim obtida uma máxima eficiência horária de 35,56% em destilador convencional, enquanto para nanofluidos de grafite e CuO, foi de 46,98% e 43,68%, respectivamente, para esse estudo o maior valor de radiação solar foi de 900 W.m^{-2} observado às 12h00min e a radiação média ao final da coleta de dados foi de $650,22 \text{ W.m}^{-2}$. Esses resultados ressaltam uma melhor eficiência no destilador solar do tipo cascata durante o experimento do dia 21/09/2023, mesmo que nesse dia a radiação solar média tenha sido de $589,52 \text{ W.m}^{-2}$.

FIGURA 28 - Eficiência térmica horária e incidência de radiação solar do dia 21/09/2023.



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

De acordo com as Figuras 26, 27 e 28, foi possível constatar que os valores da eficiência térmica do destilador acompanham o fluxo de radiação solar, deste modo a eficiência é diretamente proporcional à radiação, justificada pelo aumento das temperaturas da água, proporcionando assim maior evaporação.

A Tabela 8 faz um resumo dos dados referentes à incidência de radiação solar média e à eficiência diária alcançada para cada experimento

TABELA 8 - Radiação solar e eficiência.

Experimentos	Radiação média (W.m⁻²)	Eficiência diária (%)
30/08/2023	644,52	43,29
15/09/2023	628,38	48,71
21/09/2023	589,52	41,29

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Analisando a eficiência térmica diária para o experimento do dia 30/08/2023 foi obtido 43,29%, enquanto para o dia 15/09/2023 foi de 48,71% e para o dia 21/09/2023 foi de 41,29%. O experimento do dia 21/09/2023 apresentou a menor eficiência diária isso pode ser justificado pelo fato desse experimento ter apresentado os menores valores de produtividade horária e por condições climáticas como a radiação solar que apresentou os valores mais baixos, tendo em vista que isso faz com que as temperaturas dentro do destilador não sejam elevadas, prejudicando a evaporação da água.

Toosi, Goshayeshi e Heris (2021) alcançaram eficiência diária de 28,21% no destilador solar escalonado simples, apresentando às 13h00min radiação solar máxima em torno de 950 W.m⁻². Arimi (2022) em destilador escalonado padrão obteve uma eficiência diária máxima de cerca de 21% e em destilador escalonado modificado alcançou uma eficiência de 36%, indicando resultados expressivos de eficiência para os experimentos realizados nesta pesquisa com destilador solar do tipo cascata.

5.5 Coeficientes de transferência de calor na destilação solar

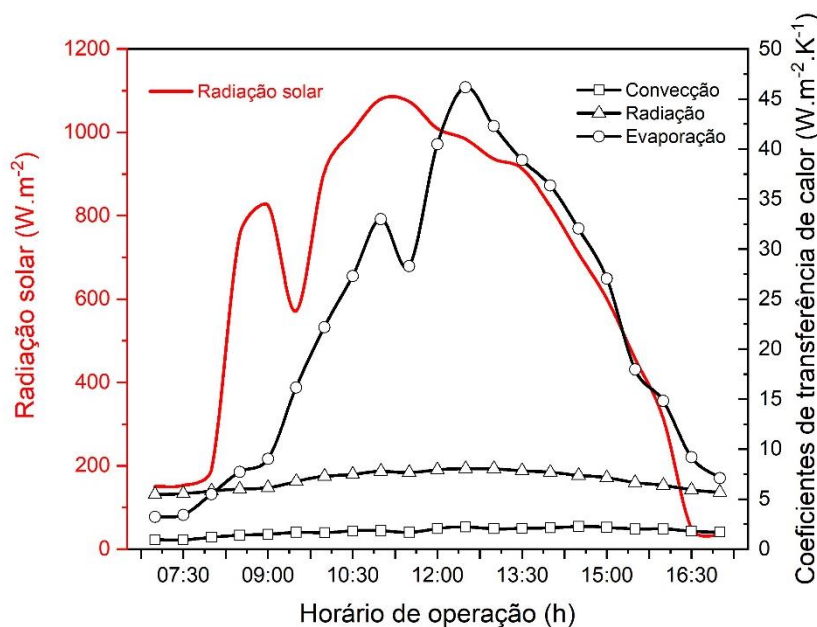
Os coeficientes de transferência de calor acontecem através da convecção, radiação e evaporação. As curvas convectivas estão relacionadas ao movimento do fluido, devido ao aumento da temperatura e ao deslocamento desse fluido horizontalmente ou verticalmente. As curvas radiativas estão associadas com a temperatura da água, da cobertura de vidro e da emissividade do vidro e da água. As curvas evaporativas apresentam valores mais altos que as anteriores e geralmente são mais sensíveis à variação de temperatura. Logo, são apresentados os coeficientes internos e externos de transferência de calor.

5.5.1 Coeficientes de transferência interna de calor

A Figura 29 mostra as curvas dos coeficientes internos de convecção, evaporação e radiação para o destilador durante o dia 30/08/2023. As curvas dos coeficientes de convecção e

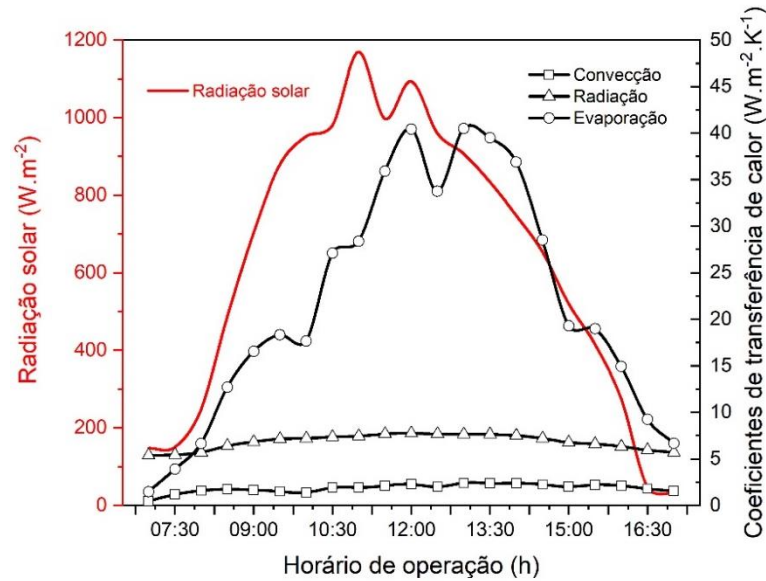
radiação têm pouca variação, atingindo valores máximos de $2,26 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ e $8,04 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, respectivamente. A curva do coeficiente evaporativo chega ao seu pico máximo às 12h30min com valor de $46,17 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. No estudo de Al-Sulttani *et al.* (2017), com utilização de um destilador solar de dupla inclinação híbrido, os maiores valores dos coeficientes convectivos, radiativos e evaporativos foram: $1,48 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, $7,78 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ e $29,50 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, respectivamente. Já no experimento do dia 30/08/2023 foram alcançados resultados mais elevados para os coeficientes, confirmando que ao longo desse dia houve uma maior diferença de temperatura entre a água e o vidro interno.

FIGURA 29 - Coeficientes de transferência interna de calor do dia 30/08/2023.



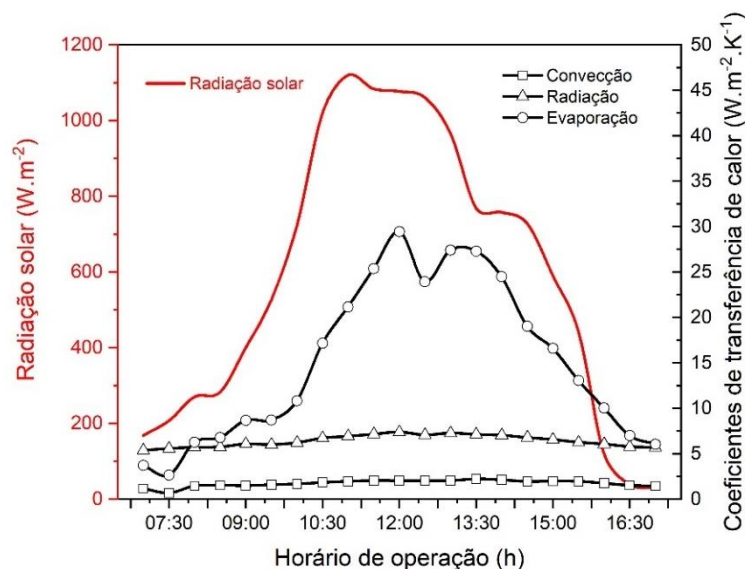
Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Para o dia 15/09/2023, pode-se observar na Figura 30 os coeficientes internos (convectivo, radiativo e evaporativo) de transferência de calor. Constata-se que o coeficiente de convecção atingiu seu valor máximo de $2,42 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ às 13h00min, enquanto o coeficiente de radiação foi de $7,75 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ às 12h00min, e o coeficiente de evaporação teve 2 valores máximos aproximados que acompanhavam a radiação solar, com $40,43 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ e $40,49 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, às 12h00min e 13h00min, respectivamente. Observa-se ainda que os valores dos coeficientes de transferência de calor por convecção e por radiação são muito inferiores ao valor do coeficiente de transferência de calor por evaporação. Logo, dos três coeficientes internos de transferência de calor no destilador, o coeficiente evaporativo é o que desempenha um papel fundamental, devido ao processo de evaporação conduzir à transferência de massa da superfície da água para condensar na cobertura de vidro (Agrawal; Rana; Srivastava, 2017).

FIGURA 30 - Coeficientes de transferência interna de calor do dia 15/09/2023.

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Com a Figura 31 é possível observar a curva dos coeficientes internos de transferência de calor, que são: convectivo, radiativo e evaporativo, registrados durante o dia 21/09/2023. Verifica-se que os coeficientes de convecção e radiação variaram de $0,69 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ a $2,24 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ e $5,38 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ a $7,41 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, respectivamente. Para a destilação solar, a principal forma de transferência de calor no destilador acontece devido a evaporação da água, no entanto durante esse experimento a curva do coeficiente evaporativo não desempenhou grande papel, isso ocorreu devido às baixas temperaturas registradas durante o dia afetando o processo de evaporação, apresentando valor máximo de $29,45 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ às 12h00min.

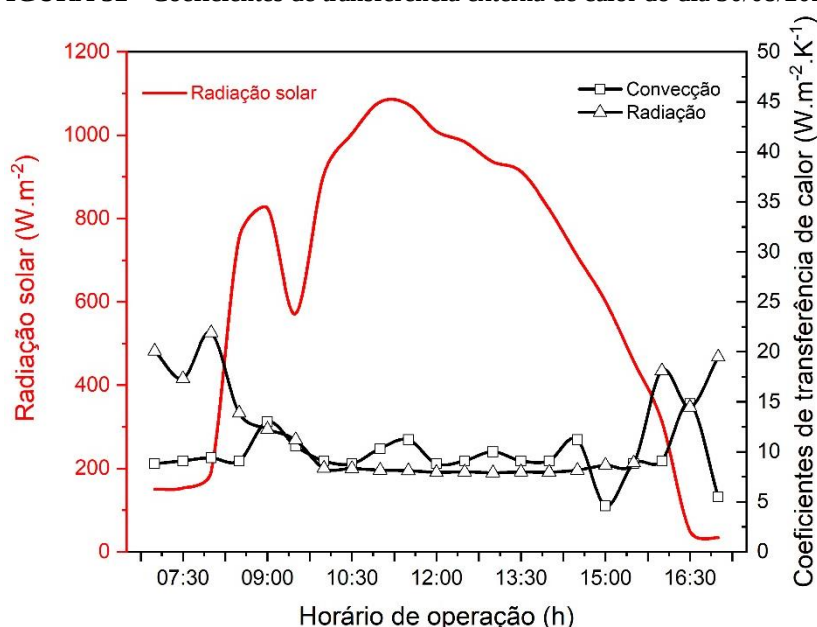
FIGURA 31 - Coeficientes de transferência interna de calor do dia 21/09/2023.

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

5.5.2 Coeficientes de transferência externa de calor

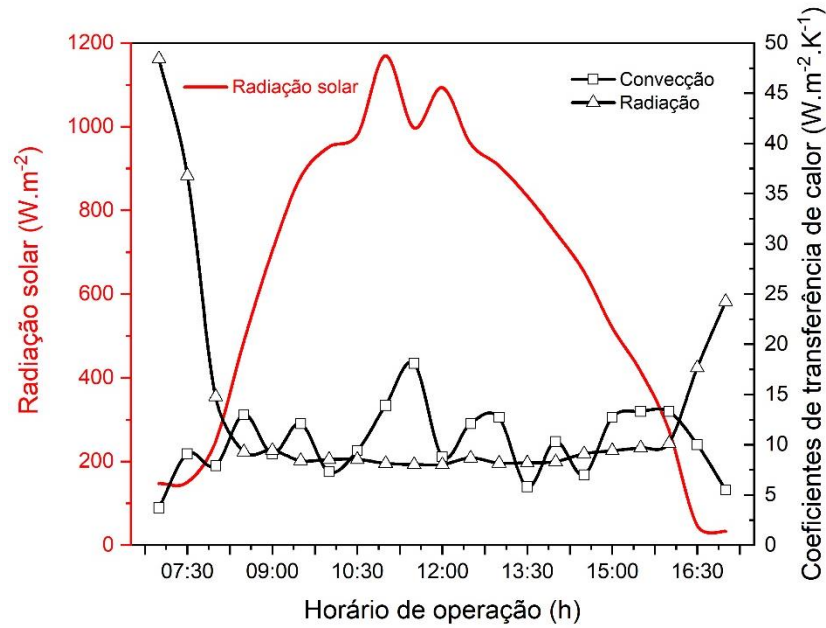
A perda de calor da cobertura de vidro para o ambiente é predominantemente por convecção (para o ar ambiente) e por radiação (para o céu). A Figura 32 mostra as curvas dos coeficientes de convecção externa e radiação do destilador solar durante o dia 30/08/2023. O coeficiente convectivo não sofre variações bruscas, variando de $4,60 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ a $14,80 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. O coeficiente radiativo se mantém relativamente constante, no entanto, no início do experimento e nas últimas horas de experimentação apresenta valores um pouco mais elevados, às 07h00min o valor é $20,08 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ e às 17h00min apresenta $19,47 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.

FIGURA 32 - Coeficientes de transferência externa de calor do dia 30/08/2023.



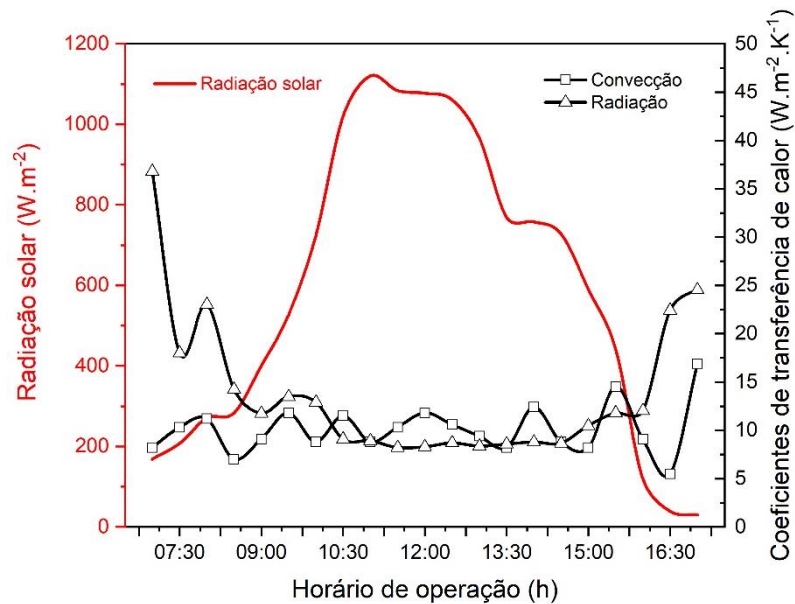
Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Os coeficientes externos de transferência de calor registrados durante o dia 15/09/2023 estão ilustrados na Figura 33. O coeficiente convectivo acompanha a curva da velocidade do vento, variando entre $3,70 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ e $18,10 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, apresentando grandes variações ao longo do dia, devido à velocidade do vento. Porém, o coeficiente radiativo apresenta o valor mais elevado no início do experimento às 07h00min com $48,41 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, isso ocorreu pois nesse horário foi registrada a menor diferença de temperatura entre o vidro externo e a temperatura ambiente.

FIGURA 33 - Coeficientes de transferência externa de calor do dia 15/09/2023.

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Na Figura 34 verificam-se para o dia 21/09/2023 os coeficientes convectivos e radiativos de transferência de calor externo. O coeficiente convectivo acompanha a curva da velocidade do vento, o valor mais baixo foi de $5,50 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ registrado às 16h30min, enquanto o valor mais alto foi registrado 30 minutos depois com $16,90 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. O coeficiente radiativo apresenta os valores mais altos no início e no final do experimento, às 07h00min e às 17h00min, com valores de $36,79 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ e $24,55 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, respectivamente.

FIGURA 34 - Coeficientes de transferência externa de calor do dia 21/09/2023.

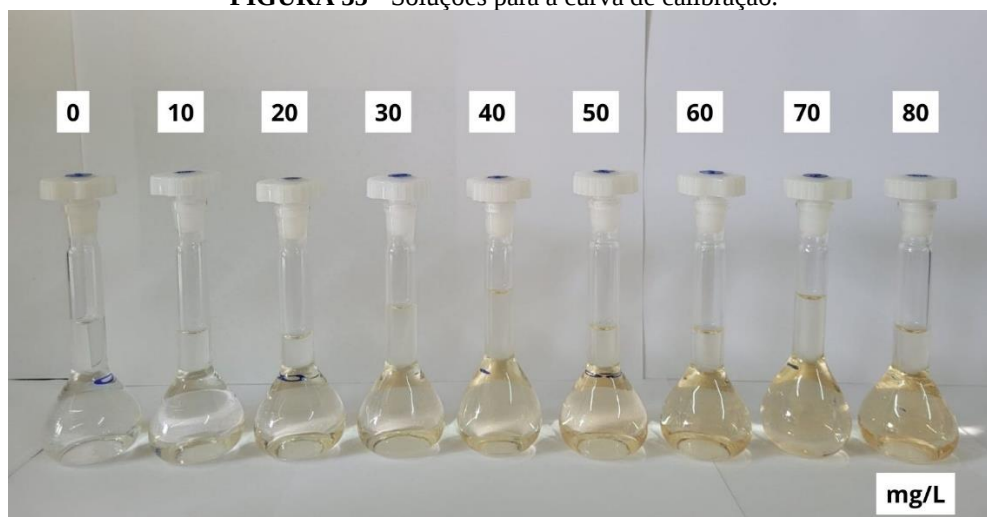
Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

5.6 Remoção de OTC da água contaminada

Os resultados sobre a remoção da OTC estão descritos nessa seção, com o intuito de verificar a eficiência do destilador solar do tipo cascata para remoção de contaminantes, como os antibióticos.

Os experimentos foram realizados com a mesma configuração, por isso para leitura das amostras de cada experimento foi feita uma única curva de calibração. As soluções utilizadas para a realização da curva de calibração estão mostradas na Figura 35. Claramente, observa-se que quanto maior a concentração, a cor vai ficando mais forte, isso indica que a coloração das soluções é diretamente proporcional à concentração. Por se tratar de uma metodologia colorimétrica é necessário ressaltar a relevância desse fato.

FIGURA 35 - Soluções para a curva de calibração.



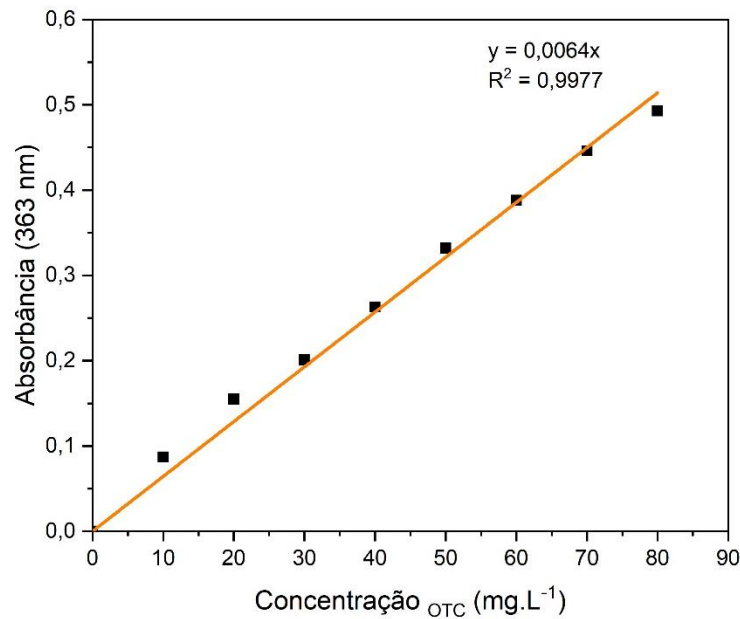
Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Dessa forma, as informações de leitura das absorvâncias dessas soluções estão contidas na Tabela 9 e a curva encontrada é mostrada na Figura 36.

TABELA 9 – Absorvâncias das soluções da curva de calibração da OTC.

Concentração (mg.L ⁻¹)	0	10	20	30	40	50	60	70	80
Absorvância	0,000	0,087	0,155	0,201	0,263	0,332	0,388	0,446	0,493

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

FIGURA 36 - Curva de calibração para determinação da concentração de OTC.

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Com base na equação da reta obtida com a análise da curva de calibração, mostrada na Figura 30, o coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,9977 e a concentração de OTC será expressa pela Equação (34):

$$C_{OTC} = \frac{ABS}{0,0064} \quad (34)$$

Onde, C_{OTC} (mg.L⁻¹) corresponde à concentração de OTC residual e ABS é a absorbância da amostra medida no espectrofotômetro.

A menor concentração perceptível considerada nessa análise espectrofotométrica foi de 0,1 mg.L⁻¹, ou seja, o limite de detecção (LOD) do método espectrofotométrico (Rufino, 2010). Logo, é necessário analisar as amostras de água que saem do destilador, a água destilada e a água contaminada coletada, para que seja possível verificar a remoção do antibiótico na destilada e quantificar a água concentrada contaminada. Dessa forma, os valores obtidos de concentração final de OTC nas amostras e eficiência de remoção para cada experimento estão descritos na Tabela 10.

TABELA 10 - Concentração de OTC e eficiência de remoção para cada experimento.

Experimentos	Concentração inicial (mg.L ⁻¹)	Água destilada		Água contaminada	
		Concentração final (mg.L ⁻¹)	Remoção (%)	Concentração final (mg.L ⁻¹)	Aumento (%)
30/08/2023	30,0	ND	~99,67	44,69	48,96
15/09/2023	45,0	4,22	90,62	60,94	35,42
21/09/2023	60,0	6,09	89,84	72,34	20,57

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

ND = não detectado (abaixo de 0,1 mg.L⁻¹); ~99,67 = pelo menos 99,67%.

Conforme os dados presentes na Tabela 9, verifica-se que na amostra de água destilada para o experimento do dia 30/08/2023 com concentração de 30 mg.L⁻¹ não foi mais detectada a presença de OTC, indicando que pode existir uma concentração abaixo de 0,1 mg.L⁻¹, o que representa uma taxa de remoção de pelo menos 99,67%, já na amostra de água contaminada foi obtido o valor de 44,69 mg.L⁻¹, representando um aumento de 48,96% da concentração inicial do experimento. Para o experimento do dia 15/09/2023 com concentração de 45 mg.L⁻¹ foi obtida na água destilada a concentração de 4,22 mg.L⁻¹ indicando remoção de 90,62%, considerando a amostra de água contaminada foi encontrado 60,94 mg.L⁻¹ de OTC, que consiste num aumento de 35,42%. Para o experimento do dia 21/09/2023 com concentração de 60 mg.L⁻¹ foi encontrada a concentração de 6,09 mg.L⁻¹ de OTC, fornecendo uma remoção de 89,84%, já na amostra de água contaminada foi determinada uma concentração de OTC de 72,34 mg.L⁻¹ que indica um aumento de 20,57% da concentração inicial do experimento. Logo, à medida que vai aumentando a concentração inicial do efluente, a destilada vai diminuindo a remoção e a concentrada contaminada vai diminuindo o aumento da concentração.

Os dados do experimento do dia 30/08/2023 corroboram com os resultados encontrados por Hoff *et al.* (2021) que fez uso de um destilador solar do tipo pirâmide para descontaminar um efluente com volume final de 10,0 L e presença de cinco antibióticos veterinários dissolvidos em água destilada, entre eles estava a OTC com concentração inicial de 37,5 mg.L⁻¹, sendo possível obter remoção de ~100,0% (pelo menos 99,99%).

Analisando o experimento realizado com água destilada em concentração de 30 mg.L⁻¹, obteve-se no destilado a concentração de 0,47 mg.L⁻¹ de OTC, o que indica remoção de 98,44%. A partir desses resultados, têm-se que a salinidade da água aumenta a fotodegradação da OTC, visto que no experimento com a mesma concentração em água salobra não foi mais detectada a presença da substância em questão. No estudo de Leal, Esteves e Santos (2016) foi analisado em concentração de 4 mg.L⁻¹ a fotodegradação solar de OTC, constatando que em água salobra a degradação foi pelo menos 3,9 vezes maior do que na água destilada.

A intensa exposição à radiação solar e o aumento da temperatura no interior do destilador atingiram os níveis necessários para promover o processo de destilação e consequentemente a remoção da OTC. De acordo com Cervini *et al.* (2015) a OTC apresenta estabilidade térmica a baixas temperaturas (na faixa de 25 °C a 128,3 °C), evidenciando que na amostra de água destilada obtida não existem produtos de transformação, pois a temperatura máxima alcançada dentro do destilador foi de 73 °C. Já o efluente contaminado concentrado é inserido em um processo de recirculação, em que será colocado novamente no sistema de destilação solar. Contudo, para o tratamento desse efluente também podem ser consideradas outras tecnologias, como o processo de adsorção, em um tratamento posterior.

Existem poucas informações sobre a remoção ou atenuação de antibióticos veterinários em situações reais de campo. Logo, os resultados contidos nesta pesquisa só permitem comparações com estudos publicados por autores que fazem uso de outros processos de descontaminação. Portanto, uma comparação sobre a degradação e/ou remoção da OTC por diversas tecnologias foi feita para compreender a capacidade de desempenho dessas tecnologias em virtude do tratamento de águas contaminadas com esse composto. Assim, na Tabela 11 estão destacados diversos trabalhos, com seus respectivos processos e resultados de remoção.

TABELA 11 - Tecnologias para remoção de OTC.

Tecnologias	Concentração (OTC)	País	Remoção (%)	Referências
Destilação solar	30,0 mg.L ⁻¹	Brasil	99,67	Presente pesquisa
	37,5 mg.L ⁻¹	Brasil	99,99	Hoff <i>et al.</i> (2021)
Adsorção	10–400,0 mg.L ⁻¹	China	98,00	Zhou <i>et al.</i> (2023)
	100,0 mg.L ⁻¹	China	96,52	Zhang <i>et al.</i> (2023)
	10-50,0 mg.L ⁻¹	China	84,80	Du <i>et al.</i> (2023)
	20,0 mg.L ⁻¹	China	92,63	Jin <i>et al.</i> (2022)
	50,0 mg.L ⁻¹	China	59,60	Li <i>et al.</i> (2023)
Métodos biológicos	7,5 mg.L ⁻¹	Chile	89,00	Blair-González <i>et al.</i> (2021)
	10,0 mg.L ⁻¹	China	99,00	Wu <i>et al.</i> (2022)
	15,0 mg.L ⁻¹	Brasil	97,00	Pascoal <i>et al.</i> (2022)
Processos oxidativos avançados	1-30,0 mg.L ⁻¹	Malásia	50,00	Chin; Ahmad; Low (2023)
	10,0 mg.L ⁻¹	Tailândia	83,00	Senasu <i>et al.</i> (2021)
	50,0 mg.L ⁻¹	Turquia	83,00	Ozarabaci; Palas; Ersoz (2022)

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Considerando as diferenças substanciais entre a destilação solar e esses outros processos de descontaminação da Tabela 11, é difícil fazer comparações diretas. No entanto, esses

processos têm trazido resultados consideráveis para o tratamento de águas contaminadas com antibióticos, mas as tecnologias devem constantemente ser atualizadas. A destilação solar de compostos persistentes como os antibióticos ainda é escassa. Nesse contexto, evidencia-se a relevância desta pesquisa.

Mesmo não existindo limites de recargas de antibióticos em águas é necessário destacar a importância dos resultados desta pesquisa, visto que os antibióticos nas águas podem gerar incontáveis impactos, principalmente se analisados a longo prazo. Assim, diante desses resultados, tem-se que a proposta de utilização de um destilador solar apresenta potencial para aplicação em águas contaminadas com o antibiótico OTC, uma vez que foi possível eliminar esse composto químico por meio do sistema de destilação solar com uso do destilador do tipo cascata com placa absorvedora ondular.

Nessa conjuntura, nota-se a necessidade de uma harmonização da legislação mundial, com diretrizes e obrigações legais iguais, para facilitar a execução de controle de antibióticos veterinários, preservando a saúde pública e melhorando o comércio.

5.7 Qualidade físico-química da água

As propriedades físicas e químicas são importantes para determinar a qualidade da água produzida por destiladores solar, sendo essas propriedades fundamentais para adequar a água ao uso humano. Os resultados dos parâmetros físico-químicos da água contaminada e destilada estão apresentados na Tabela 12. Além disso, também são apresentados os valores máximos permitidos pela legislação atual para que sejam feitas as comparações necessárias desses parâmetros de potabilidade

TABELA 12 - Resultado dos parâmetros físico-químicos.

PARÂMETRO DE CONTROLE	30/08/2023		15/09/2023		21/09/2023		V.M.P.**
	A.C.*	A.D.*	A.C.	A.D.	A.C.	A.D.	
pH	7,3	6,8	7,6	6,1	8,1	7,6	6,0-9,0
Condutividade elétrica ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	6.118,0	14,0	6.328,0	10,0	6.288,0	56,0	-
Alcalinidade ($\text{mg CaCO}_3.\text{L}^{-1}$)	265,0	5,0	252,0	7,0	231,0	9,0	-
Turbidez (NTU)	1,8	0,5	2,6	0,6	4,3	0,8	5,0
Cor aparente (uH)	136,0	8,0	159,0	7,3	325,0	8,6	15,0
Cloretos ($\text{mg Cl}^-\text{.L}^{-1}$)	2.885,9	21,3	2.914,2	14,2	2.736,9	7,1	250,0
Dureza total ($\text{mg CaCO}_3.\text{L}^{-1}$)	196,0	0,0	180,0	0,0	192,0	0,0	500,0
Sódio ($\text{mg Na}^+.\text{L}^{-1}$)	620,0	0,0	600,0	0,0	600,0	0,0	300,0
Potássio ($\text{mg K}^+.\text{L}^{-1}$)	60,0	0,0	60,0	0,0	60,0	0,0	-
SDT (mg.L^{-1})	3.059,0	7,0	3.164,0	5,0	3.144,0	28,0	500,0

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

SDT = Sólidos Dissolvidos Totais; *A.C. = Água Contaminada; *A.D. = Água Destilada; **V.M.P. = Valor Máximo Permitido segundo a Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021 do Ministério da Saúde.

Ao analisar os dados da Tabela 12, é notória a diferença dos parâmetros da água antes e após ser destilada no destilador solar. Os valores encontrados de pH para as amostras de água contaminada foram de 7,3, 7,6 e 8,1, respectivamente, e após o processo de destilação o pH das amostras foram de 6,8, 6,1 e 7,6, respectivamente. Observa-se que todas as amostras apresentam valores de pH de acordo com os valores estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021 do Ministério da Saúde (Brasil, 2021), que determina os índices ideais de pH entre 6,0 e 9,0.

A condutividade elétrica é definida como uma expressão digital do potencial de uma solução aquosa em conduzir corrente elétrica e depende da concentração e da quantidade de sais dissolvidos na água (Alwan; Ali, 2021). Os valores encontrados foram de $6.118,0 \mu\text{S.cm}^{-1}$, $6.328,0 \mu\text{S.cm}^{-1}$ e $6.288,0 \mu\text{S.cm}^{-1}$ para as amostras de água contaminada, logo após a aplicação da destilação foi possível observar uma redução de condutividade elétrica na água de 99,77%, 99,84% e 99,11%, respectivamente.

A alcalinidade total mede a capacidade da água em neutralizar os ácidos. Diferentes formas de alcalinidade que podem ser encontradas nas águas analisadas, dessa forma, pode-se expressar a alcalinidade total através do somatório das concentrações de hidróxidos, carbonatos e bicarbonatos, sendo esse parâmetro expresso em termos de carbonato de cálcio por litro (Funasa, 2013). Para tal parâmetro todas as amostras após o processo de destilação sofreram uma redução expressiva, apesar de não apresentar valores máximos permissíveis pela portaria, chegando a reduções de 98,11%, 97,22% e 96,10%, respectivamente.

A turbidez está relacionada à presença de sólidos em suspensão na água, ocasionados pela presença de algas, matéria orgânica e outras substâncias que acabam restringindo a transparência das águas. Todas as amostras de água, tanto da água contaminada como da água destilada, se encontram dentro do valor máximo permitido pela Portaria GM/MS nº 888 que é de 5,0 NTU. Os valores de turbidez, conforme Tabela 12, encontrados nas amostras de água contaminada são justificados tendo em vista que as águas subterrâneas, geralmente, não indicam problemas relacionados a alta turbidez.

A portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021 do Ministério da Saúde (Brasil, 2021) determina para o parâmetro de cor aparente o valor máximo de 15,0 uH (unidade Hazen) para a potabilidade da água, visto que, quanto maior o valor da cor, maior será a quantidade de partículas coloidais ou em suspensão. Dessa forma, a cor indica a presença de substâncias dissolvidas na água, podendo ser originadas através da decomposição da matéria orgânica e presença de ferro e manganês. Ainda com a Tabela 12 é possível observar que os valores de cor aparente das amostras da água contaminada apresentaram-se acima do máximo permitido pelos padrões de potabilidade, apenas as amostras de água destilada se encontram de acordo com a legislação vigente.

O teor de cloretos nas amostras de água contaminada foram de 2.885,9 mg.L⁻¹, 2.914,2 mg.L⁻¹ e 2.736,9 mg.L⁻¹, apresentando uma redução significativa com o processo de destilação, com remoção de 99,26%, 99,51% e 99,74%, respectivamente. A legislação vigente tem como valor máximo permitido de cloretos de 250,0 mg.L⁻¹ e as amostras contaminadas continham níveis altíssimos de Cl⁻. A redução desse parâmetro se mostra pertinente, pois a presença elevada de cloretos na água traz consigo desvantagens como sabor e efeito laxativo (Funasa, 2013).

Levando em consideração a dureza de uma amostra de água que estaria relacionada com a presença de sais de cálcio e magnésio, é possível observar que no estudo em questão todas as amostras de água se encontram dentro do valor máximo permitido pela legislação vigente que é de 300,0 mg.L⁻¹, sendo importante destacar que na água destilada a remoção da dureza total foi de 100% para cada dia de experimento. Esses resultados são relevantes visto que a dureza elevada tem potencial de resistir a ação dos sabões, podendo provocar incrustações (Funasa, 2013).

Com relação ao parâmetro de controle sódio a portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021 do Ministério da Saúde (Brasil, 2021), estabelece o valor máximo permitido de 200 mg.L⁻¹

¹, no presente estudo foi utilizada água com elevado teor de sódio. Os valores encontrados foram de 620,0 mg.L⁻¹, 600,0 mg.L⁻¹ e 600,0 mg.L⁻¹, respectivamente, para a água contaminada, havendo uma redução do teor de sódio de 100 % nas amostras de água destilada. Esses valores de sódio na água bruta são inferiores aos valores encontrados em água de poço por Cardoso *et al.* (2022) que foi de 1.200,0 mg.L⁻¹, no entanto a água destilada apresentava o valor de 1,0 mg.L⁻¹, o que garante redução de apenas 99,92%.

Acerca do parâmetro potássio, a portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021 do Ministério da Saúde (Brasil, 2021) não estabelece limites em água de abastecimento humano. Contudo, é importante destacar que após o processo de destilação as amostras de água sofreram uma redução de 100% do teor de potássio.

Diante do parâmetro SDT foi observado que as amostras de água contaminada se encontravam acima do valor máximo permitido pela legislação que é de 500,0 mg.L⁻¹ e após o processo de destilação todas as amostras de água destilada tiveram uma redução acima de 99%, logo, o parâmetro atendeu a exigência da Portaria.

Dessa maneira, com base nos resultados alcançados é possível garantir a potabilidade da água estudada, visto que de acordo com os parâmetros de controle avaliados a água destilada pelo destilador solar do tipo cascata apresenta-se de acordo com os padrões estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021, demonstrando a eficácia da tecnologia para o tratamento de água.

5.8 Custos de produção de água tratada

A lista detalhada de custos de cada componente do destilador solar é apresentada na Tabela 13. O custo total foi calculado em 630,0 reais, nesse valor estão incluídos os materiais utilizados e a mão de obra para fabricação do equipamento. O custo do vidro de condensação é o custo mais considerável para o destilador solar, pois foi um pedido feito sob medida. Os resultados da análise do custo unitário da água considerando 10 anos de vida útil de operação do sistema são fornecidos na Tabela 14.

TABELA 13 - Lista dos custos de matéria-prima e mão de obra.

Componentes	Especificações	Custo (R\$)
Vidro de condensação	4 mm de espessura	120,0
Placa absorvedora ondular	Telha de fibrocimento	54,0
Estrutura	Forra de madeira	85,0
Isolante térmico	Lã de vidro	15,0
Placa de zinco	1 mm de espessura	86,0
Sistema de vedação	Colas, silicones e impermeabilizantes	85,0
Calhas coletoras de água	Tubos de cloreto de polivinila (PVC)	80,0
Trabalho	10 horas (taxa de R\$ 10,50 por hora)	105,0
Custo total (R\$)		630,0

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

TABELA 14 - Análise do custo unitário da água para o destilador solar.

Parâmetro	Destilador solar
Vida operacional (n) (anos)	10
Taxa de juro (i) (%)	10
Custo de capital (P) (R\$)	630,00
Valor residual (R) (R\$)	126,00
Valor residual anual (VRA) (R\$.ano ⁻¹)	7,91
Área da água de abertura para energia solar (m ²)	0,78
Fator de recuperação de capital (FRC)	0,16
Fator de fundo de amortização (FFA)	0,06
Primeiro custo anual (PCA) (R\$.ano ⁻¹)	102,53
Custo médio anual (CMA) (R\$.ano ⁻¹)	10,26
Custo anual total (CAT) (R\$.ano ⁻¹)	104,88
Produtividade diária - 30/08/2023 (L.m ⁻²)	2,49
Produtividade diária - 15/09/2023 (L.m ⁻²)	3,03
Produtividade diária - 21/09/2023 (L.m ⁻²)	2,01
Média da produtividade diária (L.m ⁻²)	2,51
Produtividade anual (média diária*365) (L.m ⁻² .ano ⁻¹)	915,62
Custo anual por litro (CPL) (R\$.L ⁻¹ .m ²)	0,11

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

A Tabela 14 resume os vários parâmetros de custo P, R, VRA, FRC, FFA, PCA, CMA, CAT e CPL. De acordo com a análise de custos, o custo unitário anual de água produzido pelo destilador solar com placa absorvedora de calor ondular é estimado em 0,11 R\$.L⁻¹.m².

No estudo de El-Sebaei e El-Naggar (2017) o custo anual de um litro de água produzida por um destilador solar de placa plana foi de 1,52 R\$.L⁻¹.m², esse resultado considera uma taxa de juros de 12% ao ano e um custo médio anual de 15% do primeiro custo anual. Na pesquisa de Shoeibi *et al.* (2020) foi realizada uma análise econômica em destiladores solar convencional e modificado, indicando que o preço da água produzida anualmente era de cerca de 0,86 e 0,52 R\$.L⁻¹.m² respectivamente, nesse caso a vida operacional foi considerada em 10 anos e a taxa de juros era de 18% ao ano.

6 CONCLUSÕES

Diante do exposto, como conclusões, pode-se inferir que:

O foco principal da pesquisa que era de remoção da OTC foi atingido, pois o sistema conseguiu remover a OTC em uma faixa de 89,84% a mais de 99,67%, o que confirma a capacidade da destilação solar em remover contaminantes persistentes.

Os níveis de incidência de radiação solar sobre o destilador foram essenciais para o aumento dos perfis de temperatura e evaporação da água, que viabilizaram o processo de destilação e contribuem para o melhor desempenho do destilador solar.

A eficiência térmica do destilador acompanhou o fluxo de radiação solar e teve relação direta com a produção de destilado. A maior produção de água foi de $3.025,40 \text{ mL.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, nesse dia a incidência de radiação solar média foi de $628,38 \text{ W.m}^{-2}$, em seguimento disso, a eficiência térmica diária máxima obtida foi de 48,71%.

Os coeficientes de transferência de calor internos e externos foram obtidos. Entre os coeficientes internos a evaporação desempenha um papel fundamental, pois é a principal forma de transferência de calor. Já para os coeficientes externos a radiação se destaca por apresentar valores pontuais elevados.

Ao se referir sobre a qualidade da água, os resultados obtidos com as análises físico-químicas das águas contaminada e destilada foram satisfatórios, os valores obtidos se encaixam dentro dos padrões estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021 do Ministério da Saúde, o que confirma a eficiência do destilador solar para a obtenção de água de qualidade. Dessa forma, houve reduções para valores de condutividade elétrica, cor aparente, cloretos, alcalinidade e sólidos dissolvidos totais. Além disso, alcançou nível máximo de redução de 100% para dureza total, sódio e potássio.

O custo unitário anual de água potável é estimado em $0,11 \text{ R\$.L}^{-1}.\text{m}^2$, o que é substancialmente mais baixo do que os destiladores solar convencionais.

O processo de destilação solar se configura como uma alternativa interessante e eficaz para promover a retirada de antibióticos da água e produzir água destilada de qualidade para atender pequenas comunidades, onde há grande escassez hídrica e em localidades de alta incidência de radiação solar.

REFERÊNCIAS

- 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 Environments and the 1st Arab Water Forum**, 2008.
- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **Instrução Normativa N° 51 de 19 de dezembro de 2019**. Estabelece a lista de limites máximos de resíduos (LMR), ingestão diária aceitável (IDA) e dose de referência aguda (DRFA) para insumos farmacêuticos ativos (IFA) de medicamentos veterinários em alimentos de origem animal. Publicada no Diário Oficial da União N° 249 de 26 de dezembro de 2019.
- AGRAWAL, A.; RANA, R. S.; SRIVASTAVA, P. K.; 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.
- AHMED, M. B. M.; RAJAPAKSHA, A. U.; LIM, J. E.; VU, N. T.; KIM, S.; KANG, H. M.; LEE, S. S.; OK Y. S.; Distribution and Accumulative Pattern of Tetracyclines and Sulfonamides in Edible Vegetables of Cucumber, Tomato, and Lettuce. **Journal of Agriculture and food Chemistry**, 2014.
- AJAROSTAGHI, S. S. M.; MOUSAVI, S. S.; Chapter 2 - Solar energy conversion technologies: principles and advancements. **Solar Energy Advancements in Agriculture and Food Production Systems**, p. 29-76, 2022.
- AJIBOYE, T. O.; SAWUNYAMA, L.; RAVELE, M. P.; RASHEED-ADELEKE, A. A.; SEHERI, N. H.; ONWUDIWE, D. C.; MHLANGA, S. D.; Synthesis approaches to ceramic membranes, their composites, and application in the removal of tetracycline from water. **Environmental Advances**, v. 12, 100371, 2023.
- AL-SULTTANI, A. O.; AHSAN, A.; RAHMAN, A.; DAUD, N. N. N.; IDRUS, S.; Heat transfer coefficients and yield analysis of a double-slope solar still hybrid with rubber scrapers: An experimental and theoretical study. **Desalination**, v. 407, p. 61–74, 2017.
- ALVES, R.V.; FERNANDES, M. S. M.; LIMA, S. A.; COSTA, T. S.; FRANÇA, K. B.; Qualidade da água consumida pelos moradores do semiárido paraibano após dessalinização. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 6, n. 1, p. 222-245, 2015.
- ALWAN, N. T.; SHCHEKLEIN, S. E.; ALI, O. M.; Evaluation of distilled water quality and production costs from a modified solar still integrated with an outdoor solar water heater. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 27, 101216, 2021.
- AL-HARAHSEH, M.; ABU-ARABI, M.; MOUSA, H.; ALZGHOUL, Z.; Solar desalination using solar still enhanced by external solar collector and PCM. **Applied Thermal Engineering**, v. 128, p. 1030–1040, 2018.
- ALSAGRI, A. S.; CHIASSEON, A.; GADALLA, M.; Viability assessment of a concentrated solar power tower with a supercritical CO₂ Brayton cycle power plant. **Journal of Solar Energy Engineering**, n. 051006, p. 141-172, 2019.

ANGAPPAN, G.; PANDIARAJ, S.; ALRUBAIE, A. J.; MUTHUSAMY, S.; SAID, Z.; PANCHAL, H. KATEKAR, V. P.; SHOEIBI, S.; KABEEL, A. E.; Investigation on solar still with integration of solar cooker to enhance productivity: Experimental, exergy, and economic analysis. **Journal of Water Process Engineering**, v. 51, 103470, 2023.

ARIMI, H.; Enhancing the stepped solar still performance using a built-in passive condenser. **Solar Energy**, v. 248, p. 88-102, 2022.

ARUNKUMAR, T.; RAJ, K.; RUFUSS, D. D. W.; DENKENBERGER, D.; TINGTING, G.; XUAN, L.; VELRAJ, R.; A review of efficient high productivity solar stills. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 101, p. 197-220, 2019.

ASHFAQ, M.; LI, Y.; REHMAN, M. S. U.; ZUBAIR, M.; MUSTAFA, G.; NAZAR, M. F.; YU, C.-P.; SUN, Q.; Occurrence, spatial variation and risk assessment of pharmaceuticals and personal care products in urban wastewater, canal surface water, and their sediments: A case study of Lahore, Pakistan. **Science of the Total Environment**, v. 688, p. 653-663, 2019.

BAI, Y.; RUAN, X.; XIE, X.; YAN, Z.; Antibiotic resistome profile based on metagenomics in raw surface drinking water source and the influence of environmental factor: a case study in Huaihe river basin, China. **Journal of Environmental Pollution**, n. 248, p. 438-447, 2019.

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.

BI, W.; WU, Y.; DONG, W.; The degradation of oxytetracycline with low concentration of persulfate sodium motivated by copper sulphate under simulated solar light. **Chemical Engineering Journal**, v. 393, 122782, 2020.

BLAIR-GONZÁLEZ, J.; CONTRERAS-VILLACURA, E.; GUEVARA, A. C.; TOLOZA, C. P.; Oxytetracycline removal by biological/chemical activated mesoporous carbon. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 237, 111384, 2021.

BOUZAIID, M.; ANSARI, O.; TAHA-JANAN, M.; MOUHSIN, N.; OUBREK, M.; Numerical Analysis of Thermal Performances for a Novel Cascade Solar Desalination Still Design. **Energy Procedia**, v. 157, p. 1071-1082, 2019.

BRASIL, DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO. Ministério Da Saúde/Gabinete Do Ministro. **PORTARIA GM/MS Nº 888, DE 4 DE MAIO DE 2021**. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017. Publicada no Diário Oficial da União Nº 85 de 07 de maio de 2021.

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

CARDINAL, K. M.; KIPPER, M.; RIBEIRO, A. M. L.; Withdrawal of antibiotic growth promoters from broiler diets: performance indexes and economic impact. **Poultry Science**, p. 1-9, 2019.

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

CARDOSO, M. K. B.; SILVA, K. S.; SILVA, C. B.; LIMA, G. G. C.; MEDEIROS, K. M.; LIMA, C. A. P.; Low-cost solar still with corrugated absorber basin for water desalination. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, n. 44, v. 214, p. 1-12, 2022.

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

CERVINI, P.; AMBROZINI, B.; MACHADO, L. C. M.; FERREIRA, A. P. G.; CARVALHEIRO, E. T. G.; Thermal behavior and decomposition of oxytetracycline hydrochloride. **Journal of Thermal Analysis Calorimetry**, v. 121, p. 347–352, 2015.

CHEN, H.; LIU, S.; XU, X-R.; DIAO, Z-H.; SUN, K-F.; HAO, Q-W.; LIU, S-; YING, G-G.; Tissue distribution, bioaccumulation characteristics and health risk of antibiotics in cultured fish from a typical aquaculture area. **Journal of Hazardous Materials**, v. 343, p. 140–148, 2018.

CHIN, J. Y.; AHMAD, A. L.; LOW, S. C.; Antibiotics oxytetracycline removal by photocatalyst titanium dioxide and graphitic carbon nitride in aquaculture wastewater. **Journal of Environmental Management**, v. 343, 118231, 2023.

CHOI, S.; WOOHYUNG, S.; JANG, D.; YOON, Y.; RYU, J.; OH, J.; WOO, J. S.; KIM, Y. M.; LEE, Y.; Antibiotics in coastal aquaculture Waters: occurrence and elimination efficiency in oxidative water treatment process. **Journal of Hazardous Materials**, v. 396, 122585, 2020.

CHOI, S-S.; On the brine re-utilization of a multi-stage flashing (MSF) desalination plant. **Desalination**, v. 398, p. 64–76, 2016.

DA ROCHA, M. P.; DOURADO, P. L. R.; CARDOSO, C. A. L.; CÂN-DIDO, L. S.; PEREIRA, J. G.; OLIVEIRA, K. M. P.; GRISOLIA, A. B.; Tools for monitoring aquatic environments to identify anthropic effects. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 190, n. 61, p. 1-13, 2018.

DIAB, M. R. D.; ESSA, F. A.; TALEB, F. S. A.; OMARA, Z. M.; Solar still with rotating parts: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 54260–54281, 2021.

DU, C.; LV, Y.; CAO, J.; ZHU, H.; ZHANG, Y.; ZOU, Y.; PENG, H.; DONG, W.; ZHOU, L.; YU, G.; YU, H.; JIANG, J.; Removal of oxytetracycline from water by S-doped MIL-53(Fe): Synergistic effect of surface adsorption and persulfate activation. **Environmental Research**, 2023.

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

- 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.
- ELANGO, C.; GUNASEKARAN, N.; SAMPATHKUMAR, K.; Thermal models of solar still - A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 47, p. 856-911, 2015.
- EL-AGOUZ, S. A.; Experimental investigation of stepped solar still with continuous water circulation. **Energy Conversion and Management**, v. 86, p. 186-193, 2014.
- EL-DESSOUKY, H. T.; ETTOUNEY, H. M. Fundamentals of Salt Water Desalination. **Elsevier Science BV**; 2002.
- FUNASA - FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (Brasil). Ministério da Saúde. **Manual Prático de Análise de Água**. 4. ed. Brasília: p. 150, 2013.
- GORJIAN; S.; GHOBADIAN, B.; EBADI, H.; KETABCHI, F.; KHANMOHAMMADI, S.; Chapter 8 - Applications of solar PV systems in desalination technologies. **Photovoltaic Solar Energy Conversion, Elsevier**, p. 237–274, 2020.
- HAMMOODI, K. A.; DHAHAD, H. A.; ALAWEE, W. H.; OMARA, Z. M.; A detailed review of the factors impacting pyramid type solar still performance. **Alexandria Engineering Journal**, v. 66, p. 123-154, 2023.
- HAN, Q. F.; ZHAO, S.; ZHANG, X. R.; WANG, X. L.; SONG, C.; WANG, S. G. Distribution, combined pollution and risk assessment of antibiotics in typical marine aquaculture farms surrounding the yellow sea, North China. **Journal Environment International**, v. 138, p. 1-12, 2020.
- HARRIS, D. A.; **Química Analítica Quantitativa**. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- HE, L-X.; HE, L-Y.; GAO, F-Z.; ZHANG, M.; CHEN, J.; JIA, W-L.; YE, P.; JIA, Y-W.; HONG, B.; LIU, Y-S.; ZHAO, J-L.; YING, G-G.; Mariculture affects antibiotic resistome and microbiome in the coastal environment. **Journal of Hazardous Materials**, v. 452, 131208, 2023.
- HOFF, R.; VOGELMANN, E. S.; MELO, A. P. Z.; DEOLINDO, C. T. P.; MEDEIROS, B. M. S.; DAGUER, H.; Reacqua: A low-cost solar still system for the removal of antibiotics from contaminated effluents. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, ed. 6, v. 9, 2021.
- HONG, P.; WU, Z.; YANG, D.; ZHANG, K.; HE, J.; LI, Y.; XIE, C.; YANG, W.; YANG, Y.; KONG, L.; LIU, J.; Efficient generation of singlet oxygen ($^1\text{O}_2$) by hollow amorphous Co/C composites for selective degradation of oxytetracycline via Fenton-like process. **Chemical Engineering Journal**, v. 421, 139594, 2021.
- 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.
- IHSANULLAH, I.; ATIEH, M. A.; SAJID, M.; NAZAL, M. K.; Desalination and environment: A critical analysis of impacts, mitigation strategies, and greener desalination technologies. **Science of the Total Environment**, v. 780, p. 1465-85, 2021.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Ministério da agricultura, pecuária e abastecimento**. Brasília, DF: INMET, 2019.

INSTITUTO TRATA BRASIL; **Acesso á Agua nas Regiões Norte e Nordeste do Brasil: Desafios e Perspectivas**, 2018.

JESUS, G. O.; FREITAS, J. J. S. O.; SILVA, R. J.; FORTE, L. G.; MATTEDI, S. S.; FIUZA, R. P.; Destilação de Água por Energia Solar. **Revista Cadernos de Prospecção**, v. 8, n. 3, p. 469-477, 2015.

JIN, X.; LI, H.; ZHU, X.; LI, N.; OWENS, G.; CHEN, Z.; Enhanced removal of oxytetracycline from wastewater using bimetallic Fe/Ni nanoparticles combined with ZIF-8 nanocomposites. **Journal of Environmental Management**, v. 318, 115526, 2022.

KABEEL, A. E.; EL-MAGHLANY, W. M.; ABDELGAIED, M.; ABDEL-AZIZ, M. M.; Performance enhancement of pyramid-shaped solar stills using hollow circular fins and phase change materials. **Journal of Energy Storage**, v. 31, p. 101610, 2020.

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

KOVALAKOVA, P.; CIZMAS, L.; McDONALD, T. J.; MARSALEK, B.; FENG, M.; SHARMA, V. K.; Occurrence and toxicity of antibiotics in the aquatic environment: A review. **Chemosphere**, V. 251, 126351, 2020.

KHECHEKHOUCHE, A.; HAOUA, B. B.; KABEEL, A. E.; ATTIA, M.E.H.; EL-MAGHLANY, 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.

LEAL, J. F.; ESTEVES, V. I.; SANTOS, E. B. H.; Use of sunlight to degrade oxytetracycline in marine aquaculture's Waters. **Environmental Pollution**, v. 213, p. 932-939, 2016.

LEAL, J. F.; ESTEVES, V. I.; SANTOS, E. B. H.; Solar photodegradation of oxytetracycline in brackish aquaculture water: New insights about effects of Ca^{2+} and Mg^{2+} . **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, v. 372, p. 218-225, 2019.

LI, Y.; FANG, J.; YUAN, X.; CHEN, Y.; YANG, H.; FEI, X.; Distribution characteristics and ecological risk assessment of tetracyclines pollution in the Weihe river, China. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 15, n. 9, p. 1-11, 2018.

LI, X.; LIU, F.; XI, S.; XIE, H.; LI, J.; LIU, G.; Removal of antibiotics and antibiotic resistance genes in the synthetic oxytetracycline wastewater by UASB-A/O(MBR) process. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 11, 109699, 2023.

LYU, J.; YANG, L.; ZHANG, L.; YE B.; WANG, L.; Antibiotics in soil and water in China: a systematic review and source analysis. **Environmental Pollution**, v. 266, 115147, 2020.

MA, N.; TONG, L.; LI, Y.; YANG, C.; TAN, Q.; HE, J.; Distribution of antibiotics in lake water-groundwater - Sediment system in Chenhu Lake area. **Environmental Research**, v. 204, 112343, 2022.

MARGALIDA, A.; BOGLIANI, G.; BOWDEN, C. G. R.; DONÁZAR, J. A.; GENERO, F.; GILBERT, M.; KARESH, W. B.; KOCK, R.; LUBROTH, J.; MANTECA, X.; NAIDOO, V.; NEIMANIS, A.; SÁNCHEZ-ZAPATA, J. A.; TAGGART, M. A.; VAARTEN, J.; YON, L.; KUIKEN, T.; GREEN, R. E. One health approach to use of veterinary pharmaceuticals. **Science and Regulation**, v. 346, p. 1296-1298, 2014.

MIAO, H.; WANG, Y.; YANG, X.; Carbon dots derived from tobacco for visually distinguishing and detecting three kinds of tetracyclines. **Nanoscale**, v. 10, p. 8139–8145, 2018.

MIGLIORE, L.; GODEAS, F.; FILIPPIS, S. P.; MANTOVI, P.; BARCHI, D.; TESTA, C.; RUBATTU, N.; BRAMBILLA, G.; Hormetic effect(s) of tetracyclines as environmental contaminant on *Zea mays*. **Environmental Pollution**, v. 158, p. 129–134, 2010.

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

NAZARI, S.; SAFARZADEH, H.; BAHIRAEI, M.; 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, 2019.

OZARABACI, I.; PALAS, B. ERSOZ, G.; Photocatalytic oxidation of oxytetracycline hydrochloride by using natural marine material supported perovskite composites. **Chemical Physics Letters**, v. 803, 139856, 2022.

PASCOAL, S. A.; FERREIRA, M. D. S.; PEREIRA, J. P. V.; CAVALCANTE, G. G. C.; MEDEIROS, K. M. M.; DE LIMA, C. A. P.; Remoção de oxitetraciclina veterinária pelo sistema H₂O₂/UV. **Águas Subterrâneas**, v. 36, n. 1, e-30106, 2022.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L.; RUTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G.; **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2 edição. São José dos Campos: INPE, p. 80, 2017.

PEREIRA, J. H. O. S.; REIS, A. C.; QUEIROS, D.; NUNES, C. O.; BORGES, M. T.; VILAR, V. J. P.; BOAVENTURA, R. A. R.; Insights into solar TiO₂-assisted photocatalytic oxidation of two antibiotics employed in aquatic animal production, oxolinic acid and oxytetracycline. **Science of the Total Environment**, p. 274–283, 2013.

PEREIRA, L. A.; JARDIM, I. C. S. F.; FOSTIER, A. H.; RATH, S.; Ocorrência, comportamento e impactos ambientais provocados pela presença de antimicrobianos veterinários em solos. **Química Nova**, v. 35, n. 1, p. 159-169, 2012.

PRAKASH, P.; VELMURUGAN, V.; Parameters influencing the productivity of solar stills - a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 585-609, 2015.

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.

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

RAHMAH, A. U.; HARIMURTI, S.; MURUGESAN, T.; Experimental investigation on the effect of wastewater matrix on oxytetracycline mineralization using UV/H₂O₂ system. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 14, p. 1225-1233, 2017.

RAMOS, R. O.; DE LIMA, C. A. P.; CAVALCANTE, G. G.; MEDEIROS, K. M.; **Sistema Integrado Multianálise com Conectividade e Função Datalogger para Monitoramento de Estações de Dessalinização Solar e Outros Sistemas de Tratamento de Águas e Efluentes**. Patente: Privilégio de Inovação. Depositante: Universidade Estadual da Paraíba. Número do registro: BR1020210075996. Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Brasil, 2021.

RUFINO, J. L.; FERNANDES, F. C. B.; RUY, M. S.; PEZZA, H. R.; PEZZA, L.; A simple spectrophotometric method for the determination of tetracycline and doxycycline in pharmaceutical formulations using chloramine-T. **Revista Eclética Química**, v. 35, n. 4, p. 139-145, 2010.

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. **Journal of Energy Storage**, v. 24, 100809, 2019.

SARHADDI, F.; TABRIZI, F. F.; ZOORI, H. A.; MOUSAVI, S. A. H. S.; Comparative study of two weir type cascade solar stills with and without PCM storage using energy and exergy analysis. **Energy Conversion and Management**, v. 11, p. 97-109, 2017.

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

SENASU, T.; YOUNGME, S., HEMAVIBOOL, K.; NANAN, S.; Sunlight-driven photodegradation of oxytetracycline antibiotic by BiVO₄ photocatalyst. **Journal of Solid State Chemistry**, v. 297, 122088, 2021.

SHOEIBI, S.; RAHBAR, N.; ESFAHLANI, A. A.; KARGARSHARIFABAD, H.; Application of simultaneous thermoelectric cooling and heating to improve the performance of a solar still: An experimental study and exergy analysis. **Applied Energy**, v. 263, 114581, 2020.

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. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 47, 101339, 2021.

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.

SIEDLEWICZ, G.; ZAK, A.; SHARMA, L.; KOSAKOWSKA, A.; PAZDRO, K.; Effects of oxytetracycline on growth and chlorophyll a fluorescence in Green algae (*Chlorella vulgaris*), diatom (*Phaeodactylum tricornutum*) and cyanobacteria (*Microcystis aeruginosa* and *Nodularia spumigena*). **Journal Oceanologia**, v. 62, p. 214-225, 2020.

SILVA, A. O.; BRITO, Y. J. V.; BEZERRA, V. R.; LIMA, G. G. C.; MEDEIROS, K. M. M.; LIMA, C. A. P.; Potabilização de água salobra por meio de um dessalinizador solar portátil com refletores de radiação integrados. **Águas Subterrâneas**, v. 34, n. 3, p. 285-295, 2020.

SIQUEIRA, A. M. O.; MARTINS, A. L. S.; VIANA, E. E. D.; Princípios de funcionamento de diferentes métodos de dessalinização de água do mar e análise paramétrica de um dessalinizador de múltiplo efeito (MED). **The Journal of Engineering and Exact Sciences – Jcec**, v. 8, n. 1, 2022.

SOHANI, A.; HOSEINZADEH, S.; BERENJKAR, K.; Experimental analysis of innovative designs for solar still desalination technologies; an in-depth technical and economic assessment. **Journal of Energy Storage**, v. 33, p. 101862, 2021.

SHARSHIR, S. W.; PENG, G.; WU, L.; YANG, N.; ESSA, F. A.; ELSHEIKH, A. H.; MOHAMED, S. I. T.; KABEEL, A. E.; Enhancing the solar still performance using nanofluids and glass cover cooling: Experimental study. **Applied Thermal Engineering**, v. 113, p. 684–693, 2017.

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.

SHARSHIR, S. W.; OMARA, M. A.; ELSISI, G.; JOSEPH, A.; KANDEAL, A. W.; ALI, A.; BEDAIR, G.; Thermo-economic performance improvement of hemispherical solar still using wick material with V-corrugated basin and two different energy storage materials. **Solar Energy**, v. 249, p. 336-352, 2023.

TAN, N. P. B.; UCAB, P. M. L.; DADOL, G. C.; JABILE, L. M.; TALILI, I. N.; CABARABAN, M. T. I.; A review of desalination technologies and its impact in the Philippines. **Desalination**, v. 534, p. 115805, 2022.

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

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.

TOOSI, S. S. A.; GOSHAYESHI, H. R.; ZAHMATKESH, I.; NEJATI, V.; Experimental assessment of new designed stepped solar still with Fe_3O_4 + graphene oxide + paraffin as nanofluid under constant magnetic field. **Journal of Energy Storage**, v. 62, 106795, 2023.

TORRES, R. N. S.; DREHER, A.; SIMIONI, T. A.; Uso de antibióticos como promotor de crescimento e seus possíveis substitutos ao seu uso em frangos de corte. **Revista Eletrônica Nutri Time**, v. 12, n. 6, p. 4348-4358, 2015.

TRAN, M. L.; DENG, S.-W.; FU, C.-C.; JUANG, R.-S.; Efficient removal of antibiotic oxytetracycline from water using optimized montmorillonite-supported zero-valent iron nanocomposites. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, p. 30853–30867, 2020.

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

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

VILCA, F. Z.; GALARZA, N. C.; TEJEDO, J. R.; CUBA, W. A. Z.; QUIRÓZ, C. N. C.; TORNISIELO, V. L.; Occurrence of residues of veterinary antibiotics in water, sediment and trout tissue (*Oncorhynchus mykiss*) in the southern area of Lake Titicaca, Peru. **Journal of Great Lakes Research**, 2020.

WANG, C.; SUN, Q.; YANG, M.; LIU, E.; XUE, W.; FAN, J.; Preparation of highly luminescent nitrogen-doped carbon quantum dots and their detection of tetracycline antibiotics. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 653, 129982, 2022.

WANG, Y.; ZHOU, J.; BI, W.; QIN, J.; WANG, G.; WANG, Z.; FU, P.; LIU, F.; Schwertmannite catalyze persulfate to remove oxytetracycline from wastewater under solar light or UV-254. **Journal of Cleaner Production**, v. 364, 132572, 2022.

WU, D. L.; ZHANG, M.; HE, L. X.; ZOU, H. Y.; LIU, Y. S.; LI, B. B.; YANG, Y. Y.; LIU, C.; HE, L. Y.; YING, G. G.; Contamination profile of antibiotic resistance genes in ground water in comparasion with surface water. **Journal of Science of the Total Environment**, n. 715, p. 1-9, 2020.

WU, S.; ZHANG, J.; XIA, A.; HUANG, Y.; ZHU, X.; ZHU, X.; LIAO, Q.; Microalgae cultivation for antibiotic oxytetracycline wastewater treatment. **Environmental Research**, v. 214, 113850, 2022.

YOU, C.-S.; LEE, H.; PARK, J.; KIM, S.-J.; PARK, Y.-K.; KIM, S.-C.; JUNG, S.-C.; Removal of oxytetracycline from water by liquid-phase plasma process with an iron precipitated TiO₂ photocatalyst. **Chemosphere**, v. 308, 136163, 2022.

ZAINAB, S. M.; JUNAID, M.; XU, N.; MALIK, R. N.; Antibiotics and antibiotic resistant genes (ARGs) in groundwater: A global review on dissemination, sources, interactions, environmental and human health risks. **Water Research**, v. 187, 116455, 2020.

ZHANG, F.; WANG, J.; TIAN, Y.; LIU, C.; ZHANG, S.; CAO, L.; ZHOU, Y.; ZHANG, S.; Effective removal of tetracycline antibiotics from water by magnetic functionalized biochar derived from rice waste. **Environmental Pollution**, v. 330, 121681, 2023.

ZHANG, X.; LI, Y.; LIU, B.; WANG, J.; FENG, C.; GAO, M.; WANG, L.; Prevalence of veterinary antibiotics and antibiotic-resistant *Escherichia coli* in the surface water of a livestock production region in northern China. **Plos One**, v. 9. n. 11. p. 1-11, 2014.

ZHAO, W.; ZUO, H.; GUO, Y.; LIU, K.; WANG, S.; HE, L.; JIANG, X.; XIANG, G.; ZHANG, S.; Porous covalent triazine-terphenyl polymer as hydrophilic–lipophilic balanced sorbent for solid phase extraction of tetracyclines in animal derived foods. **Talanta**, v. 201, p. 426–432, 2019.

ZHAO-JUN, L.; WEI-NING, Q.; YAO, F.; YUAN-WANG, L.; SHEHATA, E.; JIAN, L.; Degradation mechanisms of oxytetracycline in the environment. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 18, n. 9, p. 1953-1960, 2019.

ZHOU, H.; JIAO, G.; LI, X.; GAO, C.; ZHANG, Y. HASHAN, D.; LIU, J.; SHE, D.; High capacity adsorption of oxytetracycline by lignin-based carbon with mesoporous structure: Adsorption behavior and mechanism. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 234, 123689, 2023.

APÊNDICE A - DADOS OPERACIONAIS COLETADOS

Quadro 1 – Dados operacionais do destilador solar coletados no dia 12/12/2022.

Tempo (h)	Radiação solar (W.m^{-2})	Velocidade do vento (m.s^{-1})	Temperaturas ($^{\circ}\text{C}$)				Volume de destilado	
			Ambiente	Vidro externo	Vidro interno	Água	Horário (mL.m^{-2})	Acumulado (mL.m^{-2})
08:00	354	1,5	30,50	32,52	45,52	47,00	0,00	0,00
08:30	708	2,0	30,98	32,88	47,96	48,69	0,00	0,00
09:00	859	2,1	31,00	37,75	47,81	51,75	51,28	51,28
09:30	771	2,2	31,72	38,31	45,75	52,13	141,03	89,74
10:00	914	2,2	31,56	38,19	49,44	51,50	243,59	102,56
10:30	1058	2,1	32,91	42,88	54,31	61,31	384,62	141,03
11:00	1066	2,7	34,09	46,94	61,13	63,00	538,46	153,85
11:30	986	1,8	35,36	47,88	63,33	68,19	756,41	217,95
12:00	965	1,0	36,08	51,88	64,81	67,56	1000,00	243,59
12:30	913	2,8	37,00	45,06	63,81	66,81	1256,41	256,41
13:00	961	2,0	38,04	48,75	64,61	65,87	1423,08	166,67
13:30	884	2,0	38,47	53,75	60,38	65,75	1576,92	153,85
14:00	783	1,4	38,06	48,31	60,25	64,49	1743,59	166,67
14:30	682	1,8	39,30	49,75	56,31	62,25	1846,15	102,56
15:00	586	2,1	38,12	46,38	47,94	53,81	2000,00	153,85
15:30	418	1,6	36,56	44,63	45,5	49,56	2038,46	38,46
16:00	222	1,7	35,28	37,75	43,25	46,06	2102,56	64,10
16:30	126	1,4	34,64	35,75	39,00	41,50	2153,85	51,28
17:00	120	1,5	34,21	34,85	38,00	41,00	2173,08	19,23

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Quadro 2 – Dados operacionais do destilador solar coletados no dia 13/12/2022.

Tempo (h)	Radiação solar (W.m^{-2})	Velocidade do vento (m.s^{-1})	Temperaturas ($^{\circ}\text{C}$)				Volume de destilado	
			Ambiente	Vidro externo	Vidro interno	Água	Horário (mL.m^{-2})	Acumulado (mL.m^{-2})
08:00	670	1,9	29,80	29,50	35,00	41,94	0,00	0,00
08:30	757	2,0	30,50	36,94	41,50	43,75	0,00	0,00
09:00	765	1,8	31,56	40,13	45,00	47,19	64,10	64,10
09:30	814	1,2	32,55	46,88	50,50	50,94	76,92	141,03
10:00	863	2,1	33,99	47,44	58,56	58,75	192,31	333,33
10:30	996	1,4	34,73	51,75	60,94	65,62	179,49	512,82
11:00	1029	1,4	35,40	49,31	61,31	64,75	192,31	705,13
11:30	1025	1,2	37,76	56,31	66,75	70,44	230,77	935,90
12:00	1006	1,8	39,63	60,56	70,50	72,94	320,51	1256,41
12:30	882	1,2	39,24	52,31	62,38	68,19	230,77	1487,18
13:00	757	0,6	39,97	56,00	59,31	64,44	166,67	1653,85
13:30	824	1,8	40,51	53,81	62,31	67,19	179,49	1833,33
14:00	839	2,1	40,00	48,88	52,94	59,50	128,21	1961,54
14:30	625	0,4	39,59	49,63	53,31	57,06	153,85	2115,38
15:00	540	1,4	39,65	49,63	52,13	56,06	128,21	2243,59
15:30	391	2,1	39,03	44,25	45,75	52,13	102,56	2346,15
16:00	200	2,2	36,69	40,19	41,69	47,94	76,92	2423,08
16:30	129	2,0	34,25	34,50	35,44	41,44	51,28	2474,36
17:00	128	2,0	34,00	33,00	36,00	41,00	32,05	2506,41

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Quadro 3 – Dados operacionais do destilador solar coletados no dia 14/12/2022.

Tempo (h)	Radiação solar (W.m^{-2})	Velocidade do vento (m.s^{-1})	Temperaturas ($^{\circ}\text{C}$)				Volume de destilado	
			Ambiente	Vidro externo	Vidro interno	Água	Horário (mL.m^2)	Acumulado (mL.m^2)
08:00	105	1,0	29,52	33,56	34,00	35,19	0,00	0,00
08:30	823	1,4	29,78	34,13	38,25	38,90	0,00	0,00
09:00	920	3,3	32,32	40,00	47,25	48,56	64,10	64,10
09:30	978	1,4	34,10	39,81	49,25	51,56	76,92	141,03
10:00	1036	1,2	35,06	44,13	55,06	57,00	205,13	346,15
10:30	1175	6,7	35,73	47,25	59,31	62,13	192,31	538,46
11:00	1160	1,7	37,16	52,06	66,94	67,25	217,95	756,41
11:30	1062	1,8	38,14	52,06	64,87	69,31	256,41	1012,82
12:00	1029	2,1	39,18	53,75	62,94	65,82	166,67	1179,49
12:30	1023	2,1	37,36	48,06	54,06	63,31	217,95	1397,44
13:00	557	1,0	38,83	48,06	56,38	63,69	141,03	1538,46
13:30	910	2,0	38,51	51,69	54,75	61,50	166,67	1705,13
14:00	829	1,8	35,82	41,19	49,38	53,56	115,38	1820,51
14:30	692	2,1	36,28	48,88	52,06	57,56	141,03	1961,54
15:00	576	1,5	38,65	49,31	50,25	57,69	115,38	2076,92
15:30	445	0,9	37,78	44,81	47,50	53,44	115,38	2192,31
16:00	164	2,1	36,16	41,69	44,06	48,00	76,92	2269,23
16:30	86	0,6	34,13	35,75	39,81	42,38	51,28	2320,51
17:00	85	1,0	34,00	35,00	39,00	42,00	12,82	2333,33

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Quadro 4 – Dados operacionais do destilador solar coletados no dia 11/05/2023.

Tempo (h)	Radiação solar (W.m^{-2})	Velocidade do vento (m.s^{-1})	Umidade relativa do ar (%)	Temperaturas ($^{\circ}\text{C}$)				Volume de destilado	
				Ambiente	Vidro externo	Vidro interno	Água	Horário (mL.m^2)	Acumulado (mL.m^2)
08:30	699	0,9	73	27,30	36,56	45,50	50,48	0,00	0,00
09:00	845	2,1	70	27,70	36,63	47,13	52,02	0,00	0,00
09:30	945	2,1	69	27,90	39,94	49,75	53,25	51,28	51,28
10:00	1045	2,1	66	28,60	43,13	54,13	55,59	89,74	141,03
10:30	996	1,8	64	29,00	45,88	59,13	61,75	89,74	230,77
11:00	1102	2,0	60	30,70	49,31	61,5	66,17	153,85	384,62
11:30	852	1,5	56	32,30	51,25	70,09	71,07	179,49	564,10
12:00	1188	0,7	54	32,30	46,56	65,00	66,69	192,31	756,41
12:30	1145	2,0	52	32,60	48,38	67,06	69,39	205,13	961,54
13:00	966	1,5	51	32,60	44,25	61,19	68,37	179,49	1141,03
13:30	992	2,2	47	32,00	49,69	67,87	70,62	217,95	1358,97
14:00	953	1,7	48	31,80	47,44	65,56	69,00	166,67	1525,64
14:30	866	0,9	40	31,00	46,38	62,44	66,87	230,77	1756,41
15:00	729	1,4	39	30,00	45,75	60,69	62,63	166,67	1923,08
15:30	646	2,1	52	30,00	43,50	56,00	57,06	128,21	2051,28
16:00	500	0,6	54	31,00	40,31	50,44	52,38	89,74	2141,03
16:30	85	0,7	57	29,70	33,31	40,75	42,38	64,10	2205,13
17:00	53	0,7	60	28,20	31,31	35,13	36,63	51,28	2256,41
17:30	27	0,7	61	27,00	30,75	32,81	35,25	25,64	2282,05

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Quadro 5 – Dados operacionais do destilador solar coletados no dia 30/08/2023.

Tempo (h)	Radiação solar (W.m ⁻²)	Velocidade do vento (m.s ⁻¹)	Umidade relativa do ar (%)	Temperaturas (°C)				Volume de destilado	
				Ambiente	Vidro externo	Vidro interno	Água	Horário (mL.m ²)	Acumulado (mL.m ²)
07:00	150	2,0	81	24,30	26,50	27,00	28,00	0,00	0,00
07:30	153	2,1	81	24,40	27,12	28,56	29,50	0,00	0,00
08:00	191	2,2	76	24,90	26,87	32,81	34,63	0,00	0,00
08:30	753	2,1	74	25,50	29,44	35,94	38,81	0,00	0,00
09:00	825	3,4	74	24,60	29,44	37,94	41,19	0,00	0,00
09:30	571	2,6	70	26,30	32,31	47,81	51,75	51,28	51,28
10:00	905	2,1	67	27,30	41,69	56,38	59,44	64,10	115,38
10:30	1003	2,0	65	28,30	43,75	58,56	62,44	76,92	192,31
11:00	1079	2,5	62	29,00	46,88	63,38	66,87	320,51	512,82
11:30	1074	2,8	61	28,90	47,44	61,88	64,75	205,13	717,95
12:00	1009	2,0	59	29,40	52,25	65,19	69,75	217,95	935,90
12:30	984	2,1	57	31,30	57,69	66,12	71,62	256,41	1192,31
13:00	936	2,4	54	30,30	58,50	66,75	71,00	256,41	1448,72
13:30	913	2,1	55	30,80	55,88	63,50	68,50	205,13	1653,85
14:00	823	2,1	55	30,00	54,00	60,88	66,56	230,77	1884,62
14:30	710	2,8	57	29,70	48,44	55,25	62,88	192,31	2076,92
15:00	601	0,6	51	31,90	47,00	51,81	59,44	115,38	2192,31
15:30	457	2,0	54	29,70	42,00	44,31	51,44	141,03	2333,33
16:00	314	2,1	52	30,10	32,88	39,75	47,44	64,10	2397,44
16:30	50	4,0	59	27,10	30,87	32,75	38,88	51,28	2448,72
17:00	34	0,9	58	26,20	28,56	29,00	34,38	38,46	2487,18

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Quadro 6 – Dados operacionais do destilador solar coletados no dia 14/09/2023.

Tempo (h)	Radiação solar (W.m ⁻²)	Velocidade do vento (m.s ⁻¹)	Umidade relativa do ar (%)	Temperaturas (°C)				Volume de destilado	
				Ambiente	Vidro externo	Vidro interno	Água	Horário (mL.m ²)	Acumulado (mL.m ²)
07:00	188	2,1	80	22,00	23,87	26,00	27,87	0,00	0,00
07:30	257	2,2	80	22,50	25,69	27,50	30,25	0,00	0,00
08:00	332	2,1	79	23,10	26,00	30,12	33,81	0,00	0,00
08:30	362	2,1	76	24,10	29,81	34,19	38,88	0,00	0,00
09:00	400	2,7	72	25,30	32,75	38,00	43,88	51,28	51,28
09:30	672	2,2	67	26,20	35,13	43,75	49,81	115,38	115,38
10:00	793	3,0	63	26,90	36,38	49,75	55,31	115,38	230,77
10:30	990	2,4	60	27,80	39,81	51,19	55,75	153,85	384,62
11:00	1044	2,1	58	28,70	45,13	58,94	62,56	141,03	525,64
11:30	893	2,4	56	29,30	41,94	54,75	57,50	205,13	730,77
12:00	865	3,0	56	29,40	41,69	50,75	57,69	141,03	871,79
12:30	1039	3,0	55	29,10	41,50	52,63	57,88	166,67	1038,46
13:00	1031	3,2	54	29,90	43,06	53,44	59,25	166,67	1205,13
13:30	832	2,1	55	29,40	44,81	52,88	58,38	141,03	1346,15
14:00	734	4,8	53	30,30	40,31	47,19	53,56	141,03	1487,18
14:30	647	2,1	57	28,70	39,31	41,94	50,38	89,74	1576,92
15:00	512	2,3	55	29,90	39,00	43,25	51,13	102,56	1679,49
15:30	400	4,2	59	28,10	38,30	39,69	49,31	102,56	1782,05
16:00	325	0,7	62	27,00	34,00	35,94	43,25	76,92	1858,97
16:30	45	3,7	62	26,30	30,25	33,00	37,31	38,46	1897,44
17:00	35	2,1	62	25,60	28,06	30,56	33,38	38,46	1935,90

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Quadro 7 – Dados operacionais do destilador solar coletados no dia 15/09/2023.

Tempo (h)	Radiação solar (W.m ⁻²)	Velocidade do vento (m.s ⁻¹)	Umidade relativa do ar (%)	Temperaturas (°C)				Volume de destilado	
				Ambiente	Vidro externo	Vidro interno	Água	Horário (mL.m ²)	Acumulado (mL.m ²)
07:00	147	0,3	74	23,70	24,44	25,94	26,06	0,00	0,00
07:30	150	2,1	79	22,50	23,50	26,12	28,00	0,00	0,00
08:00	248	1,7	76	23,20	26,62	29,62	34,00	0,00	0,00
08:30	487	3,4	72	24,50	33,56	41,19	46,06	0,00	0,00
09:00	703	2,1	68	25,30	34,19	49,00	52,63	89,74	89,74
09:30	878	3,1	65	26,10	39,50	54,38	56,81	269,23	269,23
10:00	951	1,5	61	27,20	40,50	55,69	57,56	179,49	448,72
10:30	980	2,2	59	27,90	41,44	56,69	61,38	179,49	628,21
11:00	1169	3,7	58	27,80	44,88	57,75	62,38	230,77	858,97
11:30	997	5,1	56	28,60	48,13	60,94	66,44	269,23	1128,21
12:00	1093	2,0	56	28,90	48,88	61,31	68,06	243,59	1371,79
12:30	960	3,1	51	30,00	43,81	61,06	65,81	269,23	1641,03
13:00	907	3,3	54	29,20	47,25	59,00	67,37	243,59	1884,62
13:30	834	1,0	54	29,60	47,63	59,00	67,00	269,23	2153,85
14:00	748	2,5	52	30,00	47,00	56,75	65,38	230,77	2384,62
14:30	654	1,4	46	29,80	41,25	52,63	60,44	192,31	2576,92
15:00	520	3,3	54	29,10	39,13	46,31	53,06	179,49	2756,41
15:30	415	3,5	47	28,70	37,75	42,56	51,81	102,56	2858,97
16:00	275	3,5	56	27,80	35,63	38,06	47,13	89,74	2948,72
16:30	47	2,4	60	26,70	29,44	33,25	39,13	51,28	3000,00
17:00	33	0,9	63	25,70	27,44	29,81	34,13	25,64	3025,64

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Quadro 8 – Dados operacionais do destilador solar coletados no dia 21/09/2023.

Tempo (h)	Radiação solar (W.m ⁻²)	Velocidade do vento (m.s ⁻¹)	Umidade relativa do ar (%)	Temperaturas (°C)				Volume de destilado	
				Ambiente	Vidro externo	Vidro interno	Água	Horário (mL.m ²)	Acumulado (mL.m ²)
07:00	168	1,8	75	23,30	24,31	25,06	27,00	0,00	0,00
07:30	207	2,5	74	24,00	26,56	29,62	30,00	0,00	0,00
08:00	270	2,8	74	23,50	25,31	30,5	33,94	0,00	0,00
08:30	283	1,4	74	23,60	27,25	30,87	34,81	0,00	0,00
09:00	400	2,1	72	24,90	30,19	36,75	40,19	64,10	64,10
09:30	526	3,0	73	24,90	29,00	35,06	39,31	51,28	115,38
10:00	723	2,0	70	25,70	30,19	38,50	43,13	64,10	179,49
10:30	1020	2,9	67	26,80	37,19	46,56	51,75	64,10	243,59
11:00	1120	2,0	65	27,50	38,81	49,38	55,36	141,03	384,62
11:30	1084	2,5	64	27,90	44,19	52,69	58,88	166,67	551,28
12:00	1077	3,0	60	28,40	44,31	56,88	62,38	192,31	743,59
12:30	1061	2,6	60	28,80	41,88	51,31	57,63	205,13	948,72
13:00	966	2,2	50	29,30	45,13	54,88	60,69	179,49	1128,21
13:30	769	1,8	57	29,00	42,94	51,31	59,44	192,31	1320,51
14:00	758	3,2	57	29,50	42,38	50,44	57,63	179,49	1500,00
14:30	728	2,0	59	28,80	42,00	47,00	53,13	153,85	1653,85
15:00	590	1,8	59	28,80	36,19	42,94	49,94	141,03	1794,87
15:30	441	3,9	58	28,20	33,81	37,88	45,13	76,92	1871,79
16:00	120	2,1	64	27,10	32,38	35,38	40,94	76,92	1948,72
16:30	39	0,9	66	26,00	27,94	31,50	35,44	38,46	1987,18
17:00	30	4,7	69	25,60	27,31	30,00	33,38	25,64	2012,82

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Quadro 9 – Dados operacionais do destilador solar coletados no dia 04/10/2023.

Tempo (h)	Radiação solar (W.m ⁻²)	Velocidade do vento (m.s ⁻¹)	Umidade relativa do ar (%)	Temperaturas (°C)				Volume de destilado	
				Ambiente	Vidro externo	Vidro interno	Água	Horário (mL.m ²)	Acumulado (mL.m ²)
07:00	256	1,2	74	24,80	25,75	29,69	29,94	0,00	0,00
07:30	344	2,5	73	24,90	28,06	31,44	32,00	0,00	0,00
08:00	611	4,1	68	26,30	30,90	41,63	42,81	0,00	0,00
08:30	679	5,0	67	26,70	33,75	44,56	49,75	0,00	0,00
09:00	744	2,9	66	27,00	35,38	46,00	51,00	128,21	128,21
09:30	880	2,0	65	27,60	36,75	48,75	54,69	115,38	243,59
10:00	898	2,5	61	28,80	40,25	49,63	58,69	141,03	384,62
10:30	961	1,8	57	29,40	42,69	52,94	62,63	205,13	589,74
11:00	996	2,5	58	29,50	43,00	55,13	62,75	153,85	743,59
11:30	1040	2,5	55	30,20	44,81	57,38	64,37	166,67	910,26
12:00	1100	2,2	51	30,40	45,06	59,31	65,31	192,31	1102,56
12:30	1090	3,9	48	33,60	47,00	60,88	65,50	256,41	1358,97
13:00	1013	4,3	48	32,70	45,06	59,50	66,87	256,41	1615,38
13:30	944	3,2	49	32,00	44,75	57,50	63,00	230,77	1846,15
14:00	928	4,6	49	31,70	42,88	57,38	64,00	243,59	2089,74
14:30	902	4,4	45	31,10	42,75	53,13	60,63	179,49	2269,23
15:00	772	1,8	50	30,00	38,75	48,88	56,06	128,21	2397,44
15:30	711	3,7	53	29,20	38,31	45,25	53,31	128,21	2525,64
16:00	565	2,1	57	28,40	33,06	39,88	46,10	102,56	2628,21
16:30	80	0,6	61	27,00	28,94	33,88	37,88	64,10	2692,31
17:00	42	1,7	65	26,00	27,56	30,81	34,38	38,46	2730,77

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.