



UEPB

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS I – CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM BACHARELADO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL**

RAFAELA CABRAL DE ARAÚJO MENÊSES

**ACOMPANHAMENTO DO USO DE UM DESSALINIZADOR SOLAR DO TIPO
CASCATA PARA REMOÇÃO DE OXITETRACICLINA DE ÁGUAS
CONTAMINADAS**

**CAMPINA GRANDE
2024**

RAFAELA CABRAL DE ARAÚJO MENÊSES

**ACOMPANHAMENTO DO USO DE UM DESSALINIZADOR SOLAR DO TIPO
CASCATA PARA REMOÇÃO DE OXITETRACICLINA DE ÁGUAS
CONTAMINADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso (Artigo) apresentado ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Área de concentração: Tecnologias de Tratamento de Água e de Resíduos.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Antônio Pereira de Lima

**CAMPINA GRANDE
2024**

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

M543a Meneses, Rafaela Cabral de Araújo.

Acompanhamento do uso de um dessalinizador solar do tipo cascata para remoção de oxitetraciclina de águas contaminadas [manuscrito] / Rafaela Cabral de Araújo Meneses. - 2024.

27 f. : il. color.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia sanitária e ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2024.

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

1. Dessalinização. 2. Qualidade da água. 3. Oxitetraciclina.
I. Título

21. ed. CDD 628.162

RAFAELA CABRAL DE ARAÚJO MENÊSES

ACOMPANHAMENTO DO USO DE UM DESSALINIZADOR SOLAR DO TIPO
CASCATA PARA REMOÇÃO DE OXITETRACICLINA DE ÁGUAS
CONTAMINADAS

Trabalho de Conclusão de Curso (Artigo) apresentado ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Área de concentração: Tecnologias de Tratamento de Água e de Resíduos.

Aprovada em: 22/11/2024.

Documento assinado eletronicamente por:

- **Maria José de Sousa Cordão** (***.952.424-**), em **29/11/2024 17:10:48** com chave **066744acae8e11efb19a1a7cc27eb1f9**.
- **Carlos Antonio Pereira de Lima** (***.847.524-**), em **29/11/2024 16:56:31** com chave **0794303aae8c11ef856006adb0a3afce**.
- **Whelton Brito dos Santos** (***.379.304-**), em **29/11/2024 17:12:12** com chave **380bf4c6ae8e11ef9b541a7cc27eb1f9**.

Documento emitido pelo SUAP. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse https://suap.uepb.edu.br/comum/autenticar_documento/ e informe os dados a seguir. **Tipo de Documento:** Termo de Aprovação de Projeto Final

Data da Emissão: 29/11/2024

Código de Autenticação: 2e2d41



À minha filha, que me inspira diariamente a buscar o melhor de mim. Você é e sempre será a minha maior motivação, DEDICO.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Rota de contaminação pela OTC	9
Figura 2 - Dessalinizador solar e seu processo de purificação	9
Figura 3 - Componentes de um dessalinizador do tipo cascata	10
Figura 4 - Esquema de operação do dessalinizador	13
Figura 5 - Ilustração da quantificação de OTC	14
Figura 6 - Média dos Perfis Meteorológicos (Verão)	15
Figura 7 - Média dos Perfis Meteorológicos (Inverno)	16
Figura 8 - Perfis médios de temperatura e incidência de radiação solar (verão)	17
Figura 9 - Perfis médios de temperatura e incidência de radiação solar (Inverno)	17
Figura 10 - Produtividade média e incidência de radiação solar	18
Figura 11 - Eficiência térmica do dessalinizador	19
Figura 12 - Curva de calibração	20

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	CONTAMINANTES EMERGENTES (CEs)	8
2.1	Oxitetraciclina (OTC)	8
3	DESSALINIZAÇÃO SOLAR	9
3.1	Dessalinizador Tipo Cascata	10
4	METODOLOGIA.....	11
4.1	Caracterização da área experimental.....	11
4.2	Água Contaminada.....	11
4.3	Especificações do protótipo utilizado.....	12
4.4	Procedimento de operação do dessalinizador	12
4.5	Caracterização da OTC na água.....	13
4.6	Caracterização físico-química da água.....	14
4.7	Determinação de remoção	14
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	15
5.1	Perfis Meteorológicos	15
5.2	Perfis de temperatura do sistema e incidência de radiação solar	16
5.3	Comparação dos perfis de produtividade	18
5.4	Eficiência térmica	18
5.5	Análise da remoção de OTC na água	19
5.6	Análise da remoção dos parâmetros físico-químicos	21
6	CONCLUSÃO.....	22
	REFERÊNCIAS	23

ACOMPANHAMENTO DO USO DE UM DESSALINIZADOR SOLAR DO TIPO CASCATA PARA REMOÇÃO DE OXITETRACICLINA DE ÁGUAS CONTAMINADAS

MONITORING THE USE OF A CASCADE-TYPE SOLAR DESALINATOR FOR REMOVING OXYTETRACYCLINE FROM CONTAMINATED WATER

Rafaela Cabral de Araújo Meneses¹

RESUMO

A oxitetraciclina (OTC) é um antibiótico amplamente utilizado em tratamentos veterinários que contamina o meio ambiente em razão da parcela não absorvida pelos animais. Essa contaminação do solo e de corpos d'água torna a OTC um contaminante farmacêutico persistente e emergente, com riscos à saúde pública e ambiental. A sua resistência aos métodos convencionais de tratamento dificulta a sua remoção, exigindo novas soluções. Neste contexto, este estudo avaliou a eficiência de um dessalinizador solar do tipo cascata na remoção de OTC em águas contaminadas com concentrações de 20 e 25 mg.L⁻¹, durante as estações de verão e inverno. Foram conduzidos quatro experimentos ao longo do ano de 2024, com monitoramento de variáveis meteorológicas e parâmetros físico-químicos da água antes e depois do tratamento. A quantificação dos resíduos de OTC foi feita por espectrofotometria a 370 nm. Os resultados mostraram que o dessalinizador teve uma eficiência de remoção de até 99,3% no verão e 99,2% no inverno para a concentração de 25 mg.L⁻¹. A produção de água dessalinizada foi maior no verão, com 1.495,7 mL.m².dia⁻¹, enquanto no inverno alcançou 643,2 mL.m².dia⁻¹, evidenciando uma variação de 132,54% entre as estações. Além disso, a análise físico-química da água tratada mostrou-se adequada para atender aos limites de potabilidade estabelecidos pela Portaria GM/MS n° 888 de 4 de maio de 2021. O sistema demonstrou alta robustez e estabilidade sob diferentes condições operacionais e climáticas, destacando que o processo de dessalinização solar como uma solução eficiente na remoção de contaminantes emergentes, como a OTC. Assim, este estudo reforça a viabilidade de aplicar essa tecnologia para o tratamento de águas contaminadas por resíduos farmacêuticos.

Palavras-chave: contaminantes emergentes; dessalinização solar; qualidade de água; oxitetraciclina.

ABSTRACT

Oxytetracycline (OTC) is a widely used antibiotic in veterinary treatments that contaminates the environment due to the portion not absorbed by animals. This contamination of soil and water bodies makes OTC a persistent and emerging pharmaceutical contaminant, posing risks to public and environmental health. Its resistance to conventional treatment methods makes its removal challenging, requiring innovative solutions. In this context, this study evaluated the efficiency of a cascade-type solar desalination system in removing OTC from water contaminated with concentrations of 20 and 25 mg·L⁻¹ during the summer and winter seasons. Four experiments were conducted throughout the year 2024, monitoring meteorological variables and the physicochemical parameters of the water before and after treatment. Residual OTC was quantified using spectrophotometry at 370 nm. The results showed that the desalination system achieved a removal efficiency of up to 99.3% in the summer and 99.2% in

¹ Graduanda do curso de Bacharelado em Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Estadual da Paraíba; Campina Grande, PB; rafaela.araujo@aluno.uepb.edu.br.

the winter for the $25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ concentration. The production of desalinated water was higher in the summer, reaching $1,495.7 \text{ mL}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$, compared to $643.2 \text{ mL}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ in the winter, representing a seasonal variation of 132.54%. Furthermore, the physicochemical analysis of the treated water proved to be compliant with the potability limits established by Ordinance GM/MS No. 888, dated May 4, 2021. The system demonstrated high robustness and stability under different operational and climatic conditions, highlighting solar desalination as an efficient process for removing emerging contaminants such as OTC. Therefore, this study reinforces the feasibility of applying this technology for treating water contaminated by pharmaceutical residues.

Keywords: emerging contaminants; solar desalination; water quality; oxytetracycline.

1 INTRODUÇÃO

A intensificação da conectividade científica e comercial entre nações tem desempenhado um papel essencial na expansão do acesso e uso de fármacos, tanto na medicina humana quanto veterinária. Delgado *et al.* (2023), enfatizam que o crescimento do uso de medicamentos veterinários está diretamente relacionado à necessidade de otimizar a produção animal, impulsionada pelo aumento no consumo de alimentos dessa origem.

Neste cenário, um composto amplamente utilizado tem ganhado destaque entre os pesquisadores, a oxitetraciclina (OTC), devido à sua estrutura molecular estável e dificuldade de degradação em ambientes naturais (Wang *et al.*, 2023). É um antibiótico com formulação exclusiva tanto para uso humano quanto veterinário. No contexto veterinário, a OTC é empregada na prevenção e no tratamento de uma variedade de infecções bacterianas em animais produtores de alimentos (Silva *et al.*, 2022). No entanto, uma parcela significativa do medicamento administrado não é metabolizada, sendo excretada pelos animais por meio das fezes e urina, o que contribui para sua liberação direta no ambiente sob formas ativas (Zhou *et al.*, 2023).

Classificada como um contaminante orgânico persistente, a OTC apresenta alta resistência aos processos convencionais de tratamento de águas residuais (Silva *et al.*, 2024). Além disso, a regulamentação global para o controle de resíduos de antibióticos em ambientes naturais é insuficiente e fragmentada, com diretrizes restritas em alguns países, mas ausentes ou pouco aplicadas em outros, especialmente no que se refere aos resíduos provenientes de atividades veterinárias e agroindustriais (Ferri; Lauteri; Vergara, 2022). A combinação entre a persistência química e as lacunas regulatórias representa um desafio significativo para sistemas tradicionais de tratamento de água, exigindo a adoção de tecnologias avançadas e ambientalmente sustentáveis.

Nesse contexto, a dessalinização solar surge como uma alternativa promissora, devido a sua simplicidade de operação, baixo custo, facilidade de manutenção e mínimo impacto ambiental (Hammoodi *et al.*, 2023). Esse sistema utiliza processos físicos e químicos para separar componentes, em que a energia solar aquece a água, promovendo sua evaporação. Segundo Sarmiento *et al.* (2020), o vapor gerado é conduzido a uma superfície fria, onde se condensa e é coletado como água purificada. Este método é amplamente aplicado na obtenção de água potável em regiões áridas e semiáridas, aproveitando a energia solar para separar a água de contaminantes.

Assim, o presente estudo tem como objetivo investigar o desempenho de um dessalinizador solar do tipo cascata com placa absorvedora de calor ondular, na remoção de oxitetraciclina presente em águas contaminadas, durante as estações verão e inverno, avaliar a produtividade de água dessalinizada e a eficiência térmica do sistema em diferentes condições climáticas, e analisar a qualidade físico-química da água tratada, verificando sua adequação aos

padrões de potabilidade. Essas análises visam compreender como as variações sazonais influenciam a eficiência do sistema e a qualidade da água produzida.

2 CONTAMINANTES EMERGENTES (CEs)

Os contaminantes emergentes (CEs) têm se tornado uma temática amplamente discutida por diferentes aspectos, entre eles, sua crescente presença no ambiente e aos riscos potenciais que representam. Conforme afirma Gatz (2021), o termo geralmente se refere a substâncias não regulamentadas detectadas no ambiente que podem apresentar um risco tanto à saúde humana, quanto ao ecossistêmica, e para as quais a compreensão científica dos riscos potenciais está evoluindo. São formados por uma vasta variedade de substâncias; Arman *et al.* (2021) elencam alguns representantes desse grupo como sendo, produtos de higiene pessoal, hormônios, retardadores de chama, aditivos industriais, produtos químicos, desreguladores endócrinos, nanomateriais, pesticidas e produtos farmacêuticos.

Entre eles, os produtos farmacêuticos são de particular interesse devido ao seu uso crescente e potencial impacto ambiental, sobretudo quando não descartados ou tratados de maneira adequada. Estudos indicam que fármacos, como antibióticos e hormônios, têm sido detectados em águas superficiais e subterrâneas, levando a efeitos adversos sobre a fauna aquática e contribuindo para a resistência antimicrobiana (Ortúzar *et al.*, 2022). A resistência aos agentes antimicrobianos (RAM) é a capacidade de os microrganismos, como as bactérias, se tornarem cada vez mais resistentes aos agentes antimicrobianos a que eram anteriormente sensíveis (Branco, Albert e Romão 2021). Apesar das concentrações detectadas em águas serem, geralmente, da ordem dos $\mu\text{g L}^{-1}$ e ng L^{-1} (Rathi; Kumar; Show, 2021), diversos estudos têm demonstrado que esses compostos são potencialmente tóxicos.

Além disso, Nehme *et al.* (2023) destacam que a entrada de CEs nos ecossistemas representa um desafio significativo, especialmente para sistemas convencionais de tratamento de água, que não foram projetados para remover moléculas complexas e persistentes, o que reforça a necessidade de aplicação de novas tecnologias de tratamento terciárias ou avançadas (Giler-Molina *et al.*, 2020).

2.1 Oxitetraciclina (OTC)

A oxitetraciclina (OTC) é um antibiótico da família das tetraciclinas amplamente utilizado na medicina veterinária, valorizado por suas características farmacológicas e boa relação custo-benefício (Rivas; Oñate; Palacio, 2020). Entretanto, seu uso intenso em sistemas de criação animal, como bovinos, suínos e aves, leva a um acúmulo de resíduos no ambiente (solos e águas), por meio de excrementos, que podem conter até 95% da dose de antibiótico em sua forma ativa, pois muitas vezes não são totalmente metabolizados (Bernstein, 2022; Lourido; Peluso; Aronzon, 2022).

A Figura 1 ilustra as duas principais rotas de contaminação da OTC: as excreções animais e o descarte inadequado de soluções aquosas contendo OTC. Essas soluções, utilizadas para a dessedentação dos animais, precisam ser trocadas a cada 24 horas, o que também contribui para a contaminação ambiental (Pascoal *et al.*, 2022).

Figura 1- Rota de contaminação pela OTC



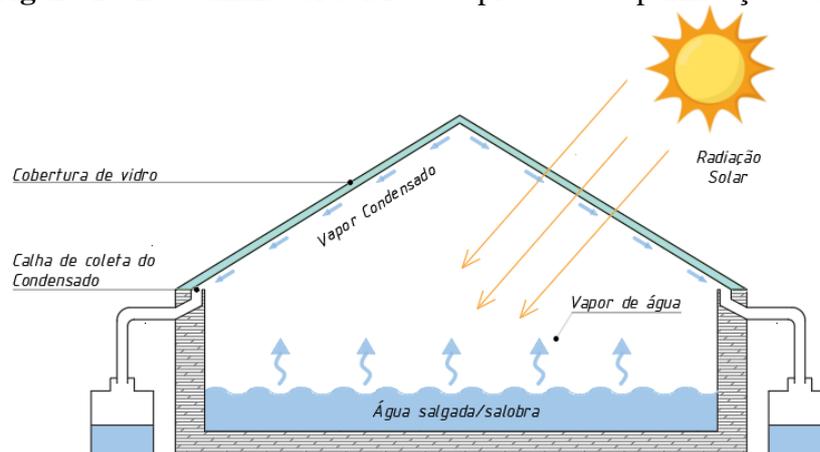
Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

3 DESSALINIZAÇÃO SOLAR

A dessalinização é definida como o processo de extração de sais ou contaminantes da água salina e/ou água salobra e seu princípio de funcionamento é baseado no efeito estufa (Tiwari; Rathod; Kumar 2022; Tiwari; Rathod; Kumar 2023). Choong e Bahar (2020) também descrevem os dessalinizadores como dispositivos que usam o conceito de estufa, retendo o calor durante a exposição solar que, por sua vez, aquecem a água de alimentação armazenada dentro do dispositivo e aumentam sua taxa de evaporação. Para Bezerra *et al.* (2021) os dessalinizadores utilizam conceitos básicos de evaporação e condensação, simulando o ciclo hidrológico da natureza.

O princípio de funcionamento de um dessalinizador solar envolve o seguinte processo: a água salgada na unidade de dessalinização é aquecida pelo sol, convertendo o líquido em vapor de água. À medida que são aquecidas, as moléculas de água ganham energia suficiente para escapar da fase líquida e formar vapor de água, deixando para trás impurezas, contaminantes e sais presentes na água. Este vapor se transforma novamente em líquido na parte interna da tampa transparente e se move para um canal de coleta e, eventualmente, para um recipiente predeterminado (Aftiss; Najim; Hissouf 2024; Alwan *et al.*, 2024). “É válido lembrar, que embora existam diversos tipos de destiladores solares, o princípio de funcionamento é o mesmo para todos, logo a diferença na geometria de cada modelo irá ter influência direta na sua eficiência” (Guerra; Oliveira; Neto 2020). A Figura 2 ilustra como processo de dessalinização da água ocorre.

Figura 2 - Dessalinizador solar e seu processo de purificação da água



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

De acordo com Cardoso *et al.* (2020) a dessalinização solar se mostra uma alternativa promissora para suprir a demanda por água doce de forma sustentável, apresentando vantagem econômica significativa em relação a outros processos devido ao uso de energia gratuita e aos menores custos operacionais e de manutenção.

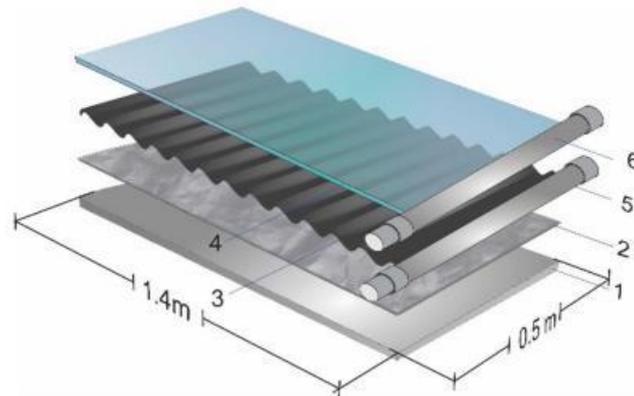
Silva (2024) em seu estudo investigou o uso de um destilador solar para remoção de OTC, e confirma que a destilação solar é uma alternativa eficaz para remover antibióticos da água, proporcionando água destilada de qualidade, especialmente útil para pequenas comunidades com escassez hídrica e alta incidência de radiação solar.

3.1 Dessalinizador Tipo Cascata

Existem diversos modelos de protótipos de dessalinizadores solares, entre eles Silva *et al.* (2020) afirmam que os do tipo bandeja plana são bastante convenientes para a produção de água potável devido à sua fácil fabricação e baixo custo em comparação a outros tipos. No entanto, esses dessalinizadores apresentam um rendimento inferior quando comparado com outros modelos de dessalinizadores solar. Diante dessa limitação, ao longo dos anos os protótipos vêm sendo aprimorados.

Sarmento *et al.* (2024) destacam que os dessalinizadores solares do tipo cascata possuem maior produtividade e eficiência do que os do tipo bandeja. Ainda segundo os autores, a água flui pelos degraus como uma camada fina, a luz solar esquenta a água que é evaporada e coletada. Nesse design, a placa absorvedora é dividida em pequenas bacias inclinadas, proporcionando mínima profundidade de água, aquecimento rápido e melhor orientação solar (Bouzaid *et al.*, 2019). A Figura 3 mostra como o protótipo do tipo cascata é composto, enfatizando as principais partes, de acordo com Cardoso *et al.* (2022).

Figura 3 - Componentes de um dessalinizador do tipo cascata



Fonte: Cardoso *et al.*, 2022.

Abaixo segue a descrição referente a cada parte constituinte desse sistema:

- (1) Placa de zinco, finalidade de vedação do equipamento (Silva, 2024).
- (2) Sistema de isolamento térmico de fibra de vidro, minimiza a perda de calor pela base, e pela lateral, garantindo o armazenamento da energia térmica absorvida (Alwan *et al.*, 2024);
- (3) Placa absorvedora ondulada de calor de fibrocimento, contém ondulações, que contribuem com o tempo de permanência da água no sistema (Silva 2024);
- (4) Vidro de cobertura, Cardoso *et al.* (2022) afirmam que a cobertura deve ter alta transparência para que a radiação solar possa ultrapassar;

- (5) Calha coletora de água contaminada, coleta e encaminha a água contaminada para o armazenamento final ou recirculação;
- (6) Calha coletora de água destilada, coleta e encaminha a água destilada para o armazenamento final.

A eficiência térmica deste modelo é aprimorada pela inclinação da placa e pelo uso de materiais de alta absorção solar, fatores que aumentam a exposição à radiação solar e reduzem as perdas de calor (Ayoub; Malaeb, 2012). Devido a essas características, o dessalinizador tipo cascata é uma solução altamente eficaz para a remoção de contaminantes emergentes, pois favorece a retenção dos poluentes na solução concentrada, oferecendo água final com alta qualidade e livre de contaminantes (Kabeel; Abdelgaied, 2017).

4 METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste estudo foi adaptada com base no trabalho de Silva (2024), que propôs a remoção de oxitetraciclina em concentrações de 30 mg.L^{-1} , 45 mg.L^{-1} e 60 mg.L^{-1} utilizando a destilação solar. As adaptações realizadas foram necessárias para adequar a abordagem às especificidades do presente estudo, tais como a utilização de concentrações menores, levando em consideração que as concentrações de antibióticos tetracíclicos encontradas em água tratada são na escala de ng.L^{-1} a $\mu\text{g.L}^{-1}$, além de avaliar o desempenho do sistema sob as condições das variações meteorológicas entre as diferentes estações do ano (verão e inverno).

Portanto, a estruturação da metodologia contemplou desde a revisão bibliográfica até a execução e análise dos experimentos. A princípio realizou-se uma pesquisa bibliográfica abrangente sobre a dessalinização solar e a presença de OTC em águas contaminadas, estabelecendo a base teórica para os testes experimentais. Antes da execução dos experimentos com o dessalinizador solar, o sistema foi montado e submetido a testes preliminares para ajustes técnicos, garantindo que ele operasse de maneira otimizada. A condução dos experimentos em ambas as estações climáticas, teve enfoque na eficiência de remoção da OTC e na produção de água potável. A água tratada foi caracterizada com base nos parâmetros de potabilidade exigidos pela legislação. Por fim, a última etapa concentrou-se na análise dos dados obtidos, permitindo avaliar o desempenho do sistema em termos de eficiência e qualidade da água.

4.1 Caracterização da área experimental

Os experimentos com o dessalinizador foram conduzidos no Centro de Ciências e Tecnologia (CCT) da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB) - Campus I, o qual localiza-se na Cidade de Campina Grande - PB, a uma latitude $7^{\circ}13'11''$ sul e longitude $35^{\circ}52'31''$ oeste. A realização das análises laboratoriais ocorreu nas dependências do Laboratório de Pesquisa em Ciências Ambientais (LAPECA), também situado no CCT da UEPB.

4.2 Preparo da Água Contaminada

A alimentação do dessalinizador foi feita com uma combinação de duas diferentes concentrações de OTC em água salobra. Essas soluções foram preparadas a partir de uma solução aquosa (1000 mg.L^{-1}) de OTC. O produto empregado é de uso veterinário comercial, que se apresenta na forma de pó solúvel do fabricante Desvet. Ele é uma mistura a base de oxitetraciclina na proporção de 82,50%, para cada 100g da massa do produto e possui 82,50g de OTC (Cloridrato). A água salobra foi coletada em um poço artesiano localizado na zona rural do município de Caturité - PB, mais precisamente no sítio Serraria de Cima.

4.3 Especificações do dessalinizador utilizado

O dessalinizador utilizado é do tipo solar, com placa absorvedora de calor em formato ondular, pertencente ao grupo de pesquisa em tratamento avançado de águas (GRUTAA). É composto por três partes principais: a placa absorvedora de calor, o vidro de condensação de água dessalinizada e o sistema de isolamento térmico com fibra de vidro para diminuir as perdas de calor para o ambiente (Cardoso *et al.*, 2020).

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. Foi operado com uma inclinação de 17° orientado para o norte, facilitando assim a máxima absorção de calor e melhor escoamento da água. A tampa de vidro no topo do dessalinizador tem 3 mm de espessura e a distância entre o vidro e a placa absorvedora é de 4 cm.

4.4 Procedimento de operação do dessalinizador

Foram realizados um total de quatro experimentos no ano de 2024, dois realizados em fevereiro representando a estação verão (dias 08/02 e 23/02) e dois entre julho e agosto no inverno (dias 30/07 e 02/08). O processo de funcionamento do equipamento ocorreu por batelada, com início às 07h00min e fim às 17h:00min, totalizando um período de 10 horas. A alimentação dos dessalinizadores foi feita com duas diferentes concentrações de OTC em água salobra. Essas soluções de 20 mg.L⁻¹ e 25 mg.L⁻¹, foram preparadas a partir de uma solução aquosa (1000 mg.L⁻¹) de OTC veterinária.

Durante o monitoramento do equipamento a cada 30 min aconteceu a coleta de dados das variáveis meteorológicas, como radiação solar e temperatura ambiente, além das temperaturas da água e do vidro (interno e externo), utilizando um Sistema Integrado Multianálise com conectividade e função *DataLogger*, garantindo precisão e confiabilidade nas medições. Outra variável aferida, foi a velocidade do vento, utilizando um anemômetro digital, modelo Incoterm TAN 100. O volume de destilado foi medido com uma proveta graduada, ambos respeitando o mesmo intervalo de tempo. A Figura 4 apresenta o modo de operação do dessalinizador.

Figura 4 - Esquema de operação do dessalinizador

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

4.5 Caracterização da OTC na água

A caracterização da OTC foi dada pelo método espectrofotométrico conforme metodologia proposta por Rufino *et al.*, (2010), utilizando o Na_2CO_3 (1% m/v) e a cloramina-T (6% m/v).

A princípio foi construída uma curva de calibração com concentrações variando entre 0 e 40 mg.L^{-1} , utilizando uma solução estoque de 100 mg.L^{-1} de OTC. Esse procedimento difere da abordagem adotada por Silva (2024), que, a partir de uma solução estoque de 1000 mg.L^{-1} , preparou uma solução intermediária de 100 mg.L^{-1} para elaborar as soluções padrão. Optou-se, neste estudo, trabalhar diretamente com a solução de 100 mg.L^{-1} para minimizar potenciais erros e variações associados às etapas adicionais, assegurando maior precisão na calibração e na análise dos resultados.

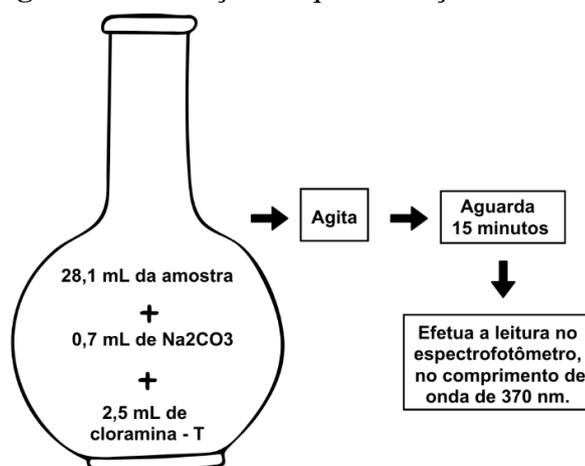
Para essa curva, foram adicionadas alíquotas correspondentes a cada concentração, em balões volumétricos (25 mL), como também 0,7 mL de Na_2CO_3 e 2,5 mL de cloramina – T. Utilizando um espectrofotômetro de modelo GTA-96, foram realizadas as leituras das absorvâncias das concentrações.

Após a preparação das soluções padrões para cada concentração, foi realizada uma varredura espectral para identificar o comprimento de onda ideal para as leituras. Esse procedimento consiste em medir a absorvância das amostras em uma faixa específica de comprimentos de onda, a fim de determinar aquele que proporciona maior sensibilidade, precisão e linearidade na detecção do analito (componente de uma amostra que é alvo de análise em um ensaio). Com base na análise, foi definido 370 nm como o comprimento de onda mais apropriado para a quantificação da oxitetraciclina (OTC).

Esse valor está em concordância com estudos anteriores, como os de Silva (2024) e Pascoal *et al.* (2022), que utilizaram 360 nm. A diferença observada pode ser atribuída a variações nas especificações técnicas dos espectrofotômetros empregados.

Para a quantificação do residual do antibiótico nas amostras de água destiladas, utilizou a absorbância apresentada no espectrofotômetro, usando o mesmo comprimento de onda. Os procedimentos utilizados estão apresentados na Figura 5.

Figura 5 - Ilustração da quantificação de OTC



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

4.6 Caracterização físico-química da água

As águas utilizadas passaram por análises físico-químicas tanto antes quanto após o processo de dessalinização para verificar a eficiência do tratamento. A avaliação envolveu análises físico-químicas de parâmetros que indicam a qualidade da água, seguindo os limites estabelecidos pela Portaria nº 888 de 4 de maio de 2021 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021). Esses parâmetros estão apresentados na Tabela 1.

As metodologias empregadas para as análises foram conduzidas com base nos procedimentos recomendados pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (Baird *et al.*, 2017), assegurando rigor técnico e padronização na obtenção dos resultados. Dessa forma, foi possível avaliar não apenas a concentração residual de OTC, mas também a qualidade final da água, garantindo que o processo atenda aos critérios de potabilidade vigentes.

Tabela - 1 Parâmetros e metodologias adotadas

Parâmetros	Unidade	Métodos
pH	adimensional	Potenciométrico
Cor aparente	uH	Colorimétrico
Turbidez	NTU	Nefelométrica
Condutividade elétrica	$\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$	Condutometria
Alcalinidade	$\text{mg CaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$	Titulométrico
Cloretos	$\text{mg Cl}^- \cdot \text{L}^{-1}$	Mohr
Dureza Total	$\text{mg CaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$	Titulométrico
Salinidade	(PSU)	Condutometria
Sódio	$\text{mg Na}^+ \cdot \text{L}^{-1}$	Fotométrico
Potássio	$\text{mg K}^+ \cdot \text{L}^{-1}$	Fotométrico
SDT	$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	Instrumental

SDT = Sólidos Totais Dissolvidos

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

4.7 Determinação de remoção

Ao comparar os dados obtidos antes e após o processo de dessalinização conseguimos identificar e quantificar a remoção dos parâmetros investigados. Com base nesses resultados, calcula-se o percentual de redução alcançado, descrito matematicamente pela Equação 1, expressando a relação entre as concentrações inicial e final dos parâmetros analisados.

$$\text{Remoção (\%)} = \left(\frac{C_{inicial} - C_{final}}{C_{inicial}} \right) \times 100 \quad (1)$$

Onde, $C_{inicial}$ corresponde à concentração da OTC de entrada no dessalinizador e C_{final} concentração da OTC de saída, após o processo de dessalinização.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

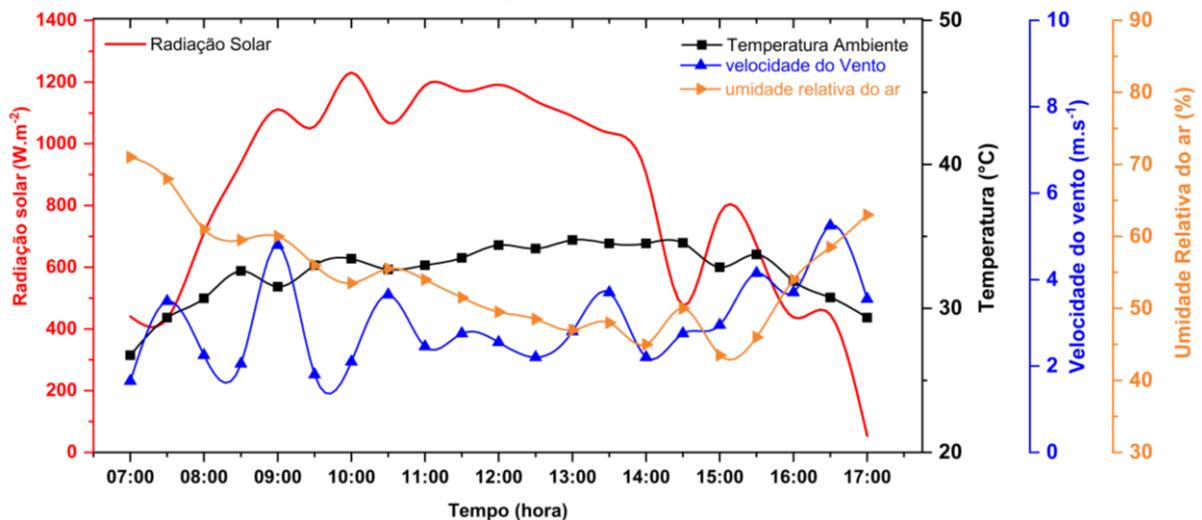
Esta seção apresenta e discute os resultados obtidos ao longo do estudo. Será abordado de forma detalhada os parâmetros meteorológicos denominados de perfis de temperatura e incidência de radiação solar. A análise relaciona a produtividade de água dessalinizada às condições ambientais observadas, destacando as diferenças sazonais entre verão e inverno. Vale ressaltar que os resultados foram expressos em forma de média. Para o verão, foi calculada a média entre os experimentos realizados em 08/02 e 23/02. Da mesma forma, no inverno, obteve-se uma média com base nos experimentos conduzidos em 30/07 e 02/08.

Além disso, foi examinada a eficiência do sistema na remoção da OTC, considerando os fatores ambientais e operacionais que influenciaram o desempenho do processo. Por fim, a qualidade físico-química da água tratada foi avaliada, assegurando sua conformidade com os padrões normativos, evidenciando o impacto do tratamento tanto na remoção de contaminantes quanto na potabilidade final.

5.1 Perfis Meteorológicos

As condições meteorológicas foram monitoradas ao longo do experimento, pois são parâmetros condicionantes na avaliação do desempenho da produção desses sistemas. A média dos perfis meteorológicos (verão e inverno) está apresentada na Figura 6 e 7, e incluem radiação solar, temperatura ambiente, velocidade do vento e umidade relativa do ar.

Figura 6 - Média dos Perfis Meteorológicos (Verão)

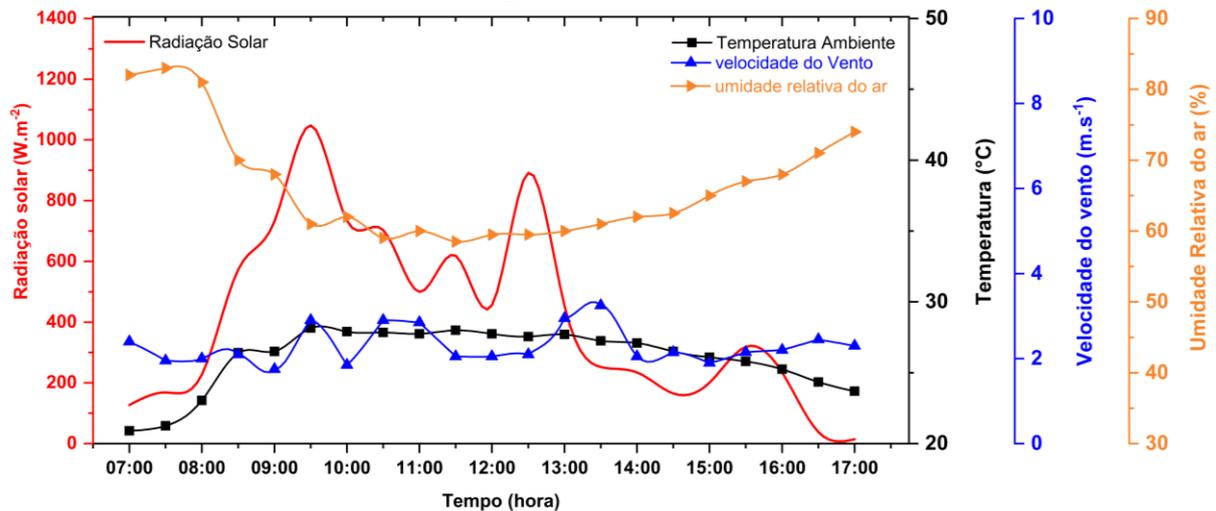


Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Durante o verão, as médias de radiação solar são significativamente elevadas, variando de $440,5 \text{ W.m}^{-2}$ a 1.231 W.m^{-2} ao longo do dia, o que contribui de forma substancial para o processo de dessalinização. De acordo com Guerra, Oliveira e Neto (2020), a radiação solar desempenha um papel fundamental nesse processo, pois sua incidência sobre o sistema aquece e evapora a água salobra, iniciando a dessalinização. As temperaturas médias nesse período também são altas, variando de $26,75 \text{ }^\circ\text{C}$ nas primeiras horas da manhã a $34,7 \text{ }^\circ\text{C}$ no início da tarde.

No inverno (Figura 7), há uma redução na radiação solar com médias entre 127 W.m^{-2} às 7h00min e $891,5 \text{ W.m}^{-2}$ às 12h30min, enquanto as temperaturas médias situam-se entre $20,9 \text{ }^\circ\text{C}$ e $27,85 \text{ }^\circ\text{C}$.

Figura 7 - Média dos Perfis Meteorológicos (Inverno)



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

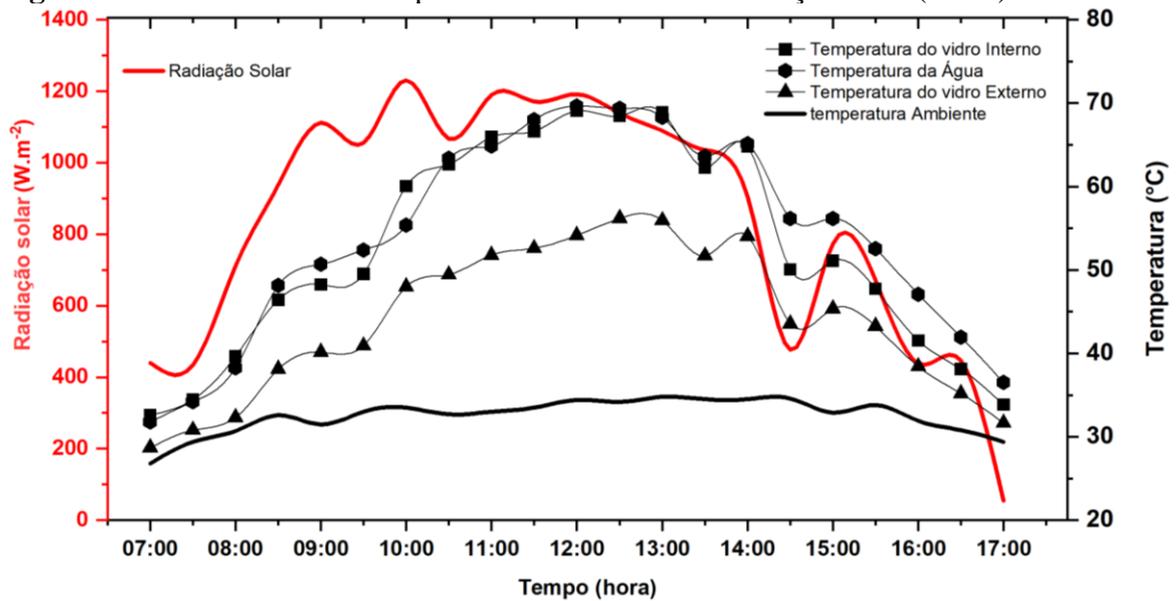
A umidade relativa do ar, no verão e no inverno, apresenta um padrão semelhante: é mais alta nas primeiras horas da manhã, diminui ao longo do dia com o aumento da temperatura e volta a subir no final da tarde. No entanto, observa-se uma umidade relativa mais elevada no inverno (entre 59% e 82%), em contraste com os valores mais baixos do verão, que variam entre 45% e 71%. Hammoodi *et al.* (2023) destacam que o rendimento da água dessalinizada tende a diminuir com o aumento da umidade relativa, uma vez que a evaporação é impactada pelas condições de saturação do ar.

Em relação à velocidade do vento, a média no verão varia de $1,65 \text{ m.s}^{-1}$ a $5,25 \text{ m.s}^{-1}$, superior ao inverno, que apresenta velocidades entre $1,75 \text{ m.s}^{-1}$ e $3,25 \text{ m.s}^{-1}$. Embora essa diferença não seja extrema, ventos mais fortes no inverno podem acelerar a condensação e a remoção do vapor d'água.

5.2 Perfis de temperatura do sistema

As Figuras 8 e 9 apresentam simultaneamente os diferentes perfis de temperatura do dessalinizador (vidro interno, externo, temperatura da água na bandeja, e a temperatura do ambiente) e da radiação solar ao longo das 10 horas de cada monitoramento.

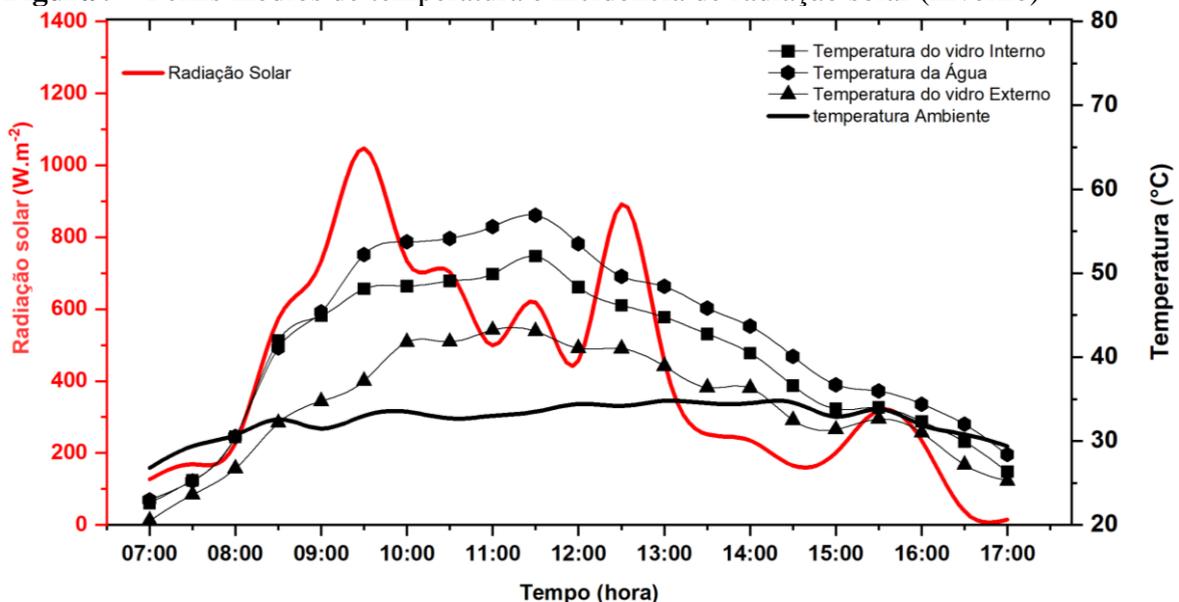
Figura 8 - Perfis médios de temperatura e incidência de radiação solar (verão)



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

No verão, observa-se uma radiação solar significativamente alta, com picos próximos de 1.200 W.m^{-2} entre 10h:00min e 14h:00min, resultando em temperaturas mais elevadas nas superfícies do sistema. A temperatura da água, por exemplo, aumenta conforme a radiação solar incide de forma mais intensa, alcançando um valor de $69,66 \text{ }^{\circ}\text{C}$ às 12h00min, esta tendência de subida térmica reforça a coerência no funcionamento do dessalinizador solar (Mendoza et al., 2023). A temperatura do vidro interno também segue esse padrão, sendo mais alta que a do vidro externo, devido à retenção de calor dentro do sistema. Ainda às 12h00min a temperatura no vidro externo era de $54,16 \text{ }^{\circ}\text{C}$, enquanto a do vidro interno alcançou sua maior média de $69,00^{\circ}\text{C}$.

Figura 9 - Perfis médios de temperatura e incidência de radiação solar (Inverno)



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

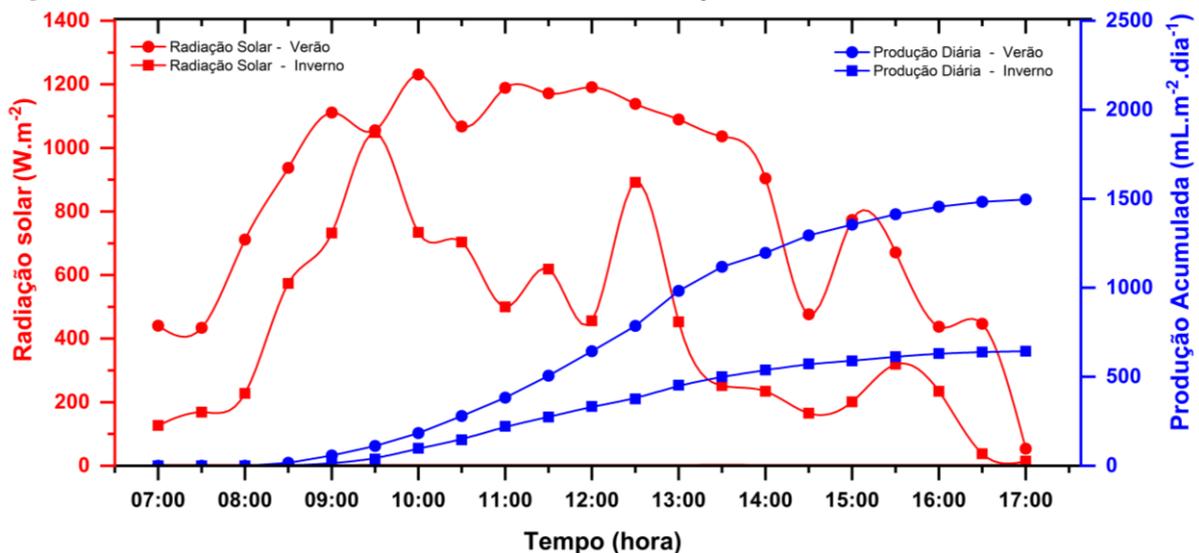
No inverno, a radiação solar é mais baixa, o que impacta as temperaturas internas do sistema. A temperatura da água, do vidro interno e do externo são mais baixas que as registradas

no verão, tendo suas maiores médias as 11h30min, sendo 56,9°C, 52,0°C e 43°C respectivamente, o que sugere uma menor taxa de evaporação.

5.3 Perfis de produtividade do dessalinizador

A produtividade relaciona o quanto um dessalinizador solar produz água purificada por dia pela área da bandeja (Rocha *et al.*, 2023). Com a análise dessa variável é possível identificar diferenças significativas entre as estações do ano, influenciada diretamente pelos parâmetros meteorológicos. Como observa-se na Figura 10, durante o verão, o sistema de dessalinização apresentou uma produtividade acumulada de 1.495,7 mL.m⁻².dia⁻¹, enquanto no inverno (Figura 10) o valor máximo acumulado foi de 643,2 mL.m⁻².dia⁻¹.

Figura 10 - Produtividade média e incidência de radiação solar



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

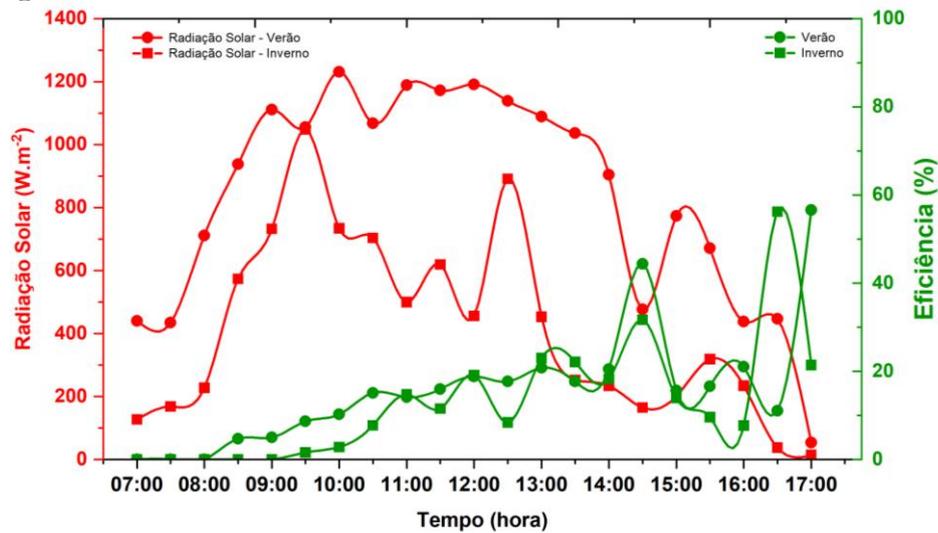
Estudos semelhantes, como o de Moura (2019), também observaram maior produção de água destilada no verão em comparação ao inverno. No entanto, a variação identificada em seu experimento foi menos expressiva, com um aumento de apenas 16,86% na produção sazonal, possivelmente devido às condições meteorológicas de Fortaleza, onde as variações de radiação solar ao longo do ano não são significativas. Em contraste, os resultados obtidos no presente estudo revelam uma diferença marcante, com a produtividade acumulada no verão superando em 132,54% a do inverno.

5.3 Eficiência térmica

Na Figura 11 pode ser visto a eficiência térmica de produção horária, que corresponde a quantidade produzida de água em função da energia fornecida ao sistema.

Durante o verão, a radiação solar é significativamente mais alta, como resultado, a eficiência térmica do sistema atinge valores mais elevados ao longo do dia, tendo um pico bastante significativo as 14h:30min de 44,37%. A partir das 08:30, a eficiência já começa a aumentar, e se mantém relativamente alta até o fim da tarde, refletindo as condições favoráveis de radiação e temperatura externa. Enquanto no inverno a eficiência só inicia essa tendência de aumento uma hora depois (9h:30min).

Figura 11 - Eficiência térmica do dessalinizador



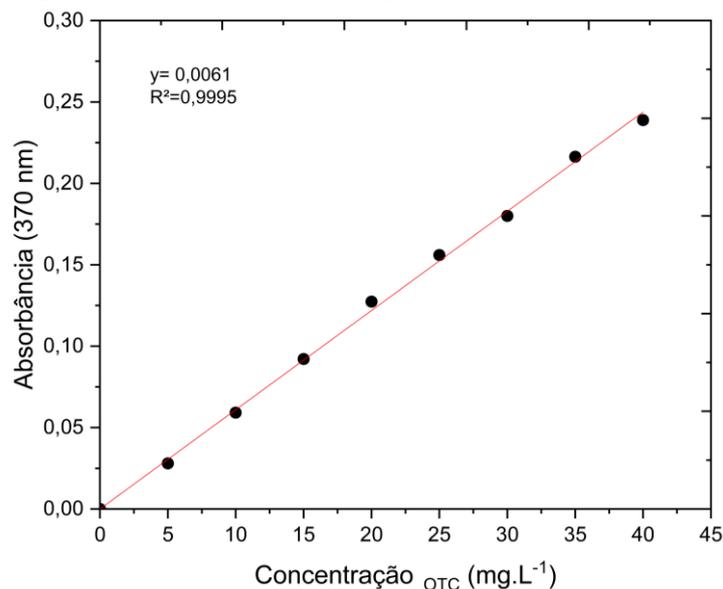
Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

É possível observar que no último horário de monitoramento (17h:00min) existe uma discrepância nos picos de eficiência térmica entre os dois experimentos, verão com uma eficiência horária de 56,55%, e inverno com 21,43%. Esse fenômeno pode ser explicado devido à alta radiação solar acumulada durante o dia no verão, o sistema acabou por armazenar calor nos materiais (bandejas e água). Essa energia térmica residual é liberada e utilizada no processo de dessalinização no final da tarde, mesmo com a queda da radiação solar. Já no inverno, a radiação foi mais baixa ao longo do dia, o que significa menos calor acumulado. Assim, com a queda da radiação solar às 17:00, a eficiência também diminuiu rapidamente, pois o sistema não consegue manter a temperatura necessária para o processo.

5.4 Remoção de OTC na água

Esta seção apresenta a análise dos dados referentes à remoção da OTC, com o objetivo de examinar a capacidade do dessalinizador na redução do antibiótico. Esses resultados são fundamentais para validar o uso da tecnologia como uma solução ambientalmente eficiente no contexto da dessalinização e purificação de águas contaminadas.

Os experimentos foram conduzidos sob uma configuração padronizada, de modo que uma única curva de calibração foi utilizada para todas as leituras e encontra-se apresentada na Figura 12.

Figura 12 - Curva de calibração

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

A partir da curva obtivemos o R^2 sendo igual a 0,9995, valor bem próximo de 1, indicando que a reta de calibração ajustada explica bem a variação dos pontos experimentais. A equação da reta (Equação 2) determinada, foi utilizada para prever a concentração das amostras até então desconhecidas.

$$C_{OTC} = \frac{ABS}{0,0061} \quad (2)$$

Onde, C_{OTC} corresponde à concentração residual de oxitetraciclina em $mg.L^{-1}$ e ABS é a absorbância da amostra medida no espectrofotômetro.

Os valores finais de OTC nas amostras e eficiência de remoção para cada experimento estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 - Eficiência de remoção da OTC

Experimentos		Concentração inicial ($mg.L^{-1}$)	Concentração final ($mg.L^{-1}$)	Remoção (%)
Verão	08/02/2024	20	1,049	94,8
	23/02/2024	25	0,180	99,3
Inverno	30/07/2024	20	0,967	95,2
	02/08/2024	25	0,197	99,2

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Nos experimentos realizados no verão, observou-se uma redução significativa na concentração de contaminantes. A concentração inicial de $20 mg.L^{-1}$ foi reduzida para $1,049 mg.L^{-1}$, resultando em uma remoção de 94,8%. A concentração inicial mais elevada de $25 mg.L^{-1}$, houve uma redução ainda mais expressiva para $0,180 mg.L^{-1}$, alcançando uma eficiência de remoção de 99,3%.

Nos experimentos de inverno, a eficiência do sistema também se manteve elevada, embora com pequenas variações. A concentração inicial de $20 mg.L^{-1}$ foi reduzida para $0,967 mg.L^{-1}$, correspondendo a uma remoção de 95,2%. Enquanto a concentração inicial de $25 mg.L^{-1}$

¹ foi reduzida para 0,197 mg.L⁻¹, resultando em uma eficiência de 99,2%. Os resultados demonstraram que a remoção do contaminante é independente das variações meteorológicas, comprovando a robustez do sistema mesmo em diferentes condições climáticas.

Esses resultados contrastam com os de Silva (2024), que relatou uma tendência de queda na eficiência de remoção com o aumento da concentração inicial de OTC. Entretanto, ambos os estudos mostram que a tecnologia de dessalinização é altamente eficaz, com Silva (2024) reportando remoções superiores a 99% e este estudo alcançando resultados semelhantes, especialmente nas concentrações mais altas, com remoções acima de 99%, reforçando o potencial da dessalinização como uma solução viável para a remoção de OTC.

5.5 Remoção dos parâmetros físico-químicos

A Tabela 3 apresenta os resultados das análises físico-químicas da água utilizada nos experimentos, comparando as condições antes (A.C.) e após (A.D.) o processo de dessalinização para diferentes concentrações (20 mg.L⁻¹ e 25 mg.L⁻¹) e períodos sazonais (verão e inverno). Os parâmetros avaliados foram confrontados com os Valores Máximos Permissíveis (VMP) definidos pela legislação vigente.

Tabela 3 - Resultados dos parâmetros físico-químicos.

Parâmetros	Verão				Inverno				VMP ³
	20 mg.L ⁻¹		25 mg.L ⁻¹		20 mg.L ⁻¹		25 mg.L ⁻¹		
	A.C. ¹	A.D. ²	AC	AD	A.C.	AD	A.C.	AD	
pH	8,7	6,7	8,9	7,1	7,6	7,3	7,8	7,0	6,0-9,0
Cor aparente (uC)	91,3	11,4	70,8	10,8	69,4	12,5	48,0	11,4	15,0
Turbidez (NTU)	3,0	0,7	1,2	0,3	1,9	0,5	0,9	0,44	5,0
Condutividade elétrica (µS.cm ⁻¹)	2509,0	15,0	2537,0	10,0	2981,0	25	2990,0	12	-
Alcalinidade (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	402,8	13,0	183,2	8,5	394,84	11,0	375,33	7,1	-
Cloretos (mg Cl ⁻ .L ⁻¹)	535,3	7,9	514,0	7,9	716,15	7,9	694,88	7,9	250
Dureza Total (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	326,3	0,0	328,3	0,0	512,4	0,0	492,4	0,0	300
Sódio (mg Na ⁺ .L ⁻¹)	520,0	0,0	530,0	0,0	530,0	0,0	530,0	0,0	200
Potássio (mg K ⁺ .L ⁻¹)	10,0	0,0	10,0	0,0	10,0	0,0	10,0	0,0	-
SDT (mg.L ⁻¹)	1254,0	7,0	1269,0	5,0	1495,0	13	1496	6,0	500,0

SDT = Sólidos Dissolvidos Totais; A.C.¹ = Água contaminada; A.D.² = Água destilada; V.M.P.³ = Valor Máximo Permissível (portaria n° 888, de 04 de maio de 2021);

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

A análise demonstra alta eficiência do sistema, com a turbidez reduzida para níveis inferiores a 0,7 NTU, dentro do VMP de 5,0 NTU, e a cor aparente reduzida para menos de 12,5 uC, atendendo ao limite de 15 uC. A condutividade elétrica foi reduzida em mais de 99%, refletindo a eliminação de sais dissolvidos, que se confirma também pelos baixos níveis de sólidos dissolvidos totais (SDT) que após o tratamento manteve-se entre 5,0 e 13,0 mg.L⁻¹.

Outro aspecto positivo foi a remoção total de sódio nas amostras tratadas, com valores reduzidos de 530,0 mg.L⁻¹ para 0,0 mg.L⁻¹. Segundo a FUNASA (2013), o sódio em altas concentrações pode representar risco para pessoas com hipertensão arterial e doenças

cardiovasculares. A eliminação completa desse íon demonstra a capacidade do sistema de produzir água segura e adequada para consumo humano, respeitando o VMP de 200,0 mg.L⁻¹.

A dureza total foi igualmente eliminada, com os valores finais zerados após o processo. Os valores de pH inicial das amostras contaminadas variaram entre 7,1 e 8,9, enquanto as amostras dessalinizadas apresentaram variações entre 6,7 e 7,3. Todos os valores finais respeitam o intervalo recomendado (6,0 – 9,5). Von Sperling (2014) destaca a importância de controlar a dureza e o pH para evitar problemas como corrosão e incrustações em sistemas de água tratada, complementando a importância dos resultados obtidos.

Embora a alcalinidade não seja um requisito obrigatório na Portaria de potabilidade, faz necessário ressaltar a sua importância, já que águas alcalinas podem influenciar tanto o sabor quanto a aceitação da água pelos consumidores. A alcalinidade das amostras ultrapassou 95% de remoção, tanto no verão, quanto no inverno. Outro parâmetro que não apresenta limites padrão na portaria GM/MS n° 888/2021 (Brasil, 2021) é o potássio, porém vale destacar uma redução de 100% para esse parâmetro.

Com base nos resultados apresentados, o sistema de dessalinização solar demonstrou alta eficiência e desempenho consistente, independentemente das variações sazonais e das concentrações aplicadas. A análise não evidenciou diferenças estatisticamente significativas nos parâmetros físico-químicos pós-tratamento, indicando que a operação do sistema é robusta e estável frente às variações climáticas e operacionais, mantendo a qualidade da água dentro dos limites normativos estabelecidos.

6 CONCLUSÃO

Os experimentos realizados indicaram que a eficiência do sistema está diretamente relacionada à intensidade da radiação solar e à temperatura ambiente. Durante o verão, as condições meteorológicas favoreceram a produtividade, resultando em uma produção acumulada de até 1.495,7 mL.m²/dia de água dessalinizada, valor significativamente superior ao registrado no inverno (643,2 mL.m²/dia), o que representa um aumento de 132,54%. Esse desempenho se deve à maior disponibilidade de radiação solar e temperaturas mais altas no verão, que aumentam a taxa de evaporação da água salobra.

Quanto à remoção da OTC, os resultados mostraram que o sistema de dessalinização solar é altamente eficaz, com eficiência de remoção variando entre 94,8% e 99,3% no verão e entre 95,2% e 99,2% no inverno. Esses dados demonstram que, mesmo com concentrações iniciais de OTC diferentes, o sistema manteve uma alta capacidade de purificação. A remoção de outros parâmetros físico-químicos também foi satisfatória sendo reduzidos a níveis que atendem às exigências de potabilidade da legislação vigente, reafirmando a segurança da água tratada.

Uma recomendação para estudos futuros é a utilização de métodos analíticos mais sensíveis, como a cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massa (LC-MS), para quantificar com precisão as baixas concentrações de OTC encontradas em ambientes naturais. Esse ajuste metodológico permitiria uma análise mais fiel às condições ambientais reais e aumentaria a aplicabilidade prática dos resultados.

Portanto, os resultados deste trabalho confirmam que a dessalinização solar é uma tecnologia promissora para a remoção de contaminantes emergentes, como a oxitetraciclina, aliada à produção de água potável de alta qualidade. A metodologia empregada e os resultados alcançados reforçam que o sistema é uma alternativa viável e sustentável para regiões com alta incidência solar e escassez de água potável.

REFERÊNCIAS

- AFTISS, R.; NAJIM, M.; HISSOUF, M. Numerical study of PCM-integrated solar still efficiency enhancement. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, v. 19, p. 443-454, 2024.
- ALWAN, N.T.; ALI, B.M.; ALOMAR, O.R.; ABDULRAZZAQ, N.M; A.L.I, O.M; ABED, RM. Performance of solar still units and enhancement techniques: A review investigation. *Heliyon*, v. 10, n. 18, p. e37693, 2024.
- ARMAN, N.Z.; SALMIATI, S.; NAZIFA, T.H.; MUHAMAD, M.S.; MARPONGAHTUN, M. A Review on Emerging Pollutants in the Water Environment: existences, health effects and treatment processes. *Water*, v. 13, n. 22, p. 3258-1, 2021.
- AYOUB, G.M.; MALAEB, L. Developments in Solar Still Desalination Systems: a critical review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, v. 42, n. 19, p. 2078-2112, out. 2012.
- 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.
- BERNSTEIN, Any. Contaminantes emergentes na água. *Revista Educação Pública*, Rio de Janeiro, v. 22, nº 34, 13 de setembro de 2022. Disponível em: <https://educacaopublica.cecierj.edu.br/artigos/22/34/contaminantes-emergentes-na-agua>.
- BEZERRA, V. R.; BRITO, Y. J. V.; SARMENTO, K. K. F.; OLIVEIRA, C. S.; MEDEIROS, K. M.; LIMA, C. A. P. Análise de parâmetros construtivos no desempenho térmico de alambiques solares: Revisão. *Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento*, v. 10, n. 6, p. e24010615472, 2021.
- BOUZAID, 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*. *Energy Procedia*, v. 157, p. 1071-1082, 2019.
- BRANCO, N.M.C.; ALBERT, A.L.M.; ROMÃO, C.M.C.P. Emerging Pollutants: Antimicrobials in the environment, environmental education and the national and international regulatory aspect. *Research, Society and Development*. *Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento*, v. 10, n. 8, e16910817083, 2021.
- BRASIL, DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO. Ministério da Saúde/Gabinete do Ministro. 4 DE MAIO DE 2021. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021, Brasil, p. 127. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>. Acesso em 03 de outubro de 2024.
- CARDOSO, M.B.K.; BRITO, V.Y.J.; SILVA, K.S.; SILVA, C.B.; LIMA, C.A.P.; MEDEIROS, K.M. Dessalinizador solar do tipo cascata aplicado em poços artesianos no interior da Paraíba. *Águas Subterrâneas*, v. 2, p. 135–142, 2020.
- CHOONG, W.S.; BAHAR, R. Solar Desalination Using Fresnel Lens as Concentrated Solar Power Device: an experimental study in tropical climate. *Frontiers in Energy Research*, v. 8, 2020.

DELGADO, N.; OROZCO, J.; ZAMBRANO, S.; CASAS-ZAPATA, J.C; MARINO, D. Veterinary pharmaceutical as emerging contaminants in wastewater and surface water: an overview. *Journal Of Hazardous Materials*, v. 460, 132431, 2023.

Ferri, Gianluigi et al. "Antibiotic Resistance in the Finfish Aquaculture Industry: A Review." *Antibiotics (Basel, Switzerland)* v. 11, 1574, 2022.

FUNASA - FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (Brasil). Ministério da Saúde. Manual prático de análise de água. 4.ed. Brasília: p. 150, 2013.

GATZ, L. Contaminants of Emerging Concern Under the Clean Water Act. Washington, D.C.: Congressional Research Service, 29 de novembro. 2021. Disponível em: <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R45998> . Acesso em: 2 nov. 2024.

GILER-MOLINA, J.M.; ZAMBRANO-INTRIAGO, L.A.; QUIROZ-FERNÁNDEZ, L.S.; NAPOLEÃO, D.C.; VIEIRA, J.D.S.; OLIVEIRA, N.S.; RODRÍGUEZ-DÍAZ, J.M. Degradation of Oxytetracycline in Aqueous Solutions: application of homogeneous and heterogeneous advanced oxidative processes. *Sustainability*, v. 21, 8807, 2020.

GUERRA, F. K. O. M. V.; OLIVEIRA, P. V.; NETO, L. J. DE B. DESSALINIZADOR SOLAR PORTÁTIL PARA APLICAÇÃO EM COMUNIDADES RURAIS NO RIO GRANDE DO NORTE. *Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS*, 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.

KABEEL, A.; ABDELGAIED, M. Observational study of modified solar still coupled with oil serpentine loop from cylindrical parabolic concentrator and phase changing material under basin. v. 144, p. 71-78, 2017.

LOURIDO, M.; PELUSO, J.; ARONZON, C. M. Efeitos letais e subletais do contaminante emergente oxitetraciclina no desenvolvimento embrionário-larval de *Rhinella arenarum*. *Toxicologia e farmacologia ambiental*, v. 89, p. 103783, 2022.

MENDOZA, P. C. MOLARES, R. Z, MENDONZA, T. O. B. CONCHA, E. Z. HUACHACA, S. M. D. Destilador solar do tipo declive e purificação da qualidade da água, Ica. *Revista Alfa*, v. 7, n. 21, p. 511–529, 2023.

MOURA, A. F. F. MODELAGEM E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UM DESTILADOR SOLAR PASSIVO. 2019. 69 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Departamento de Química, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019.

NEHME, T.M.; MARTINS, G.E.C.; CALVELLI, J.M.F.F.B.; SANTOS, L.V.S. CONTAMINANTES EMERGENTES. *Contaminantes Emergentes: uma visão ecotoxicológica sobre o impacto dos fármacos no meio ambiente e na saúde pública*, p. 11-21, 2023.

ORTÚZAR, M.; ESTERHUIZEN, M.; OLCÓN-HERNÁNDEZ, D.R.; GONZÁLEZ-LÓPEZ, J.; ARANDA, E. Pharmaceutical Pollution in Aquatic Environments: a concise review of environmental impacts and bioremediation systems. *Frontiers In Microbiology*, v. 13, 2022.

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

RATHI, B.S.; KUMAR, P.S.; SHOW, P.L. A review on effective removal of emerging contaminants from aquatic systems: current trends and scope for further research. *Journal Of Hazardous Materials*, v. 409, p. 124413, 2021.

RIVAS, B.L.; OÑATE, P.; PALACIO, D.A REMOVAL OF OXYTETRACYCLINE BY POLYMERS. AN OVERVIEW. *Journal Of The Chilean Chemical Society*, v. 65, n. 4, p. 4943-4947, 2020.

ROCHA, L.O.; LIMA, C.A.P.; MEDEIROS, K.M.; FARIAS, L.M.S.; SILVA, J.M.N. Uma revisão sistemática da literatura sobre os parâmetros que influenciam a produtividade dos dessalinizadores solares. *Revista de Departamento de Águas e Esgotos*, v. 244, p. 1-16, 2024.

SARMENTO, K.K.F.; CONSERVA, V.R.; SILVA, K.C.; MENESES, R.C.A.; MEDEIROS, K.M.; LIMA, C.A.P de. Processos de dessalinização via energia solar: uma revisão. *Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS*, 2024.

SARMENTO, K.K.F.; BEZERRA, V.R.; SOUZA, J.E.S.; LIMA, C.A.P.; MEDEIROS, K.M. de. Diferentes tipos de destiladores solares para potabilização de águas contaminadas. In: *CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM CIÊNCIAS*. Anais do V CONAPESC. Campina Grande: Realize, 2020.

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

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

SILVA, C.B.; SOUSA, C.F.; MEDEIROS, K.M.; ALMEIDA, O.E.L. Remoção de oxitetraciclina de águas contaminadas via energia solar: revisão de literatura. *Anais do VII CONAPESC*. Campina Grande: Realize Editora, 2022.

SILVA, C. B. Remoção de oxitetraciclina de águas contaminadas via destilação solar. 2024. 96 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental - PPGCTA) - Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2024.

TIWARI, A.; RATHOD, M.K; KUMAR, A. A comprehensive review of solar-driven desalination systems and its advancements. *Environment, Development and Sustainability*, v. 25, n. 2, p. 1052-1083, 2022.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 4.ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.

WANG, X.; ZHANG, L.; HAN, C.; ZHANG Y.; ZHUO, J. Simulation study of oxytetracycline contamination remediation in groundwater circulation wells enhanced by nano-calcium peroxide and ozone. *Scientific Reports*, v. 13, 9136, 2023.

ZHOU, H.; J.I.A.O, G.; L.I, X.; G.A.O, C.; ZHANG, Y.; HASHAN, D.; L.I.U, J.; S.H.E, D.
High capacity adsorption of oxytetracycline by lignin-based carbon with mesoporous
structure: Adsorption behavior and mechanism. *International Journal of Biological
Macromolecules*, v. 234, p. 123689–123689, 2023.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho. Primeiramente, ao meu orientador, Prof. Dr. Carlos Antônio Pereira de Lima, por sua dedicação, paciência e orientação ao longo de todas as etapas deste projeto.

Minha amiga e companheira de curso Kelly Cristine, cuja presença constante foi fundamental ao longo de toda a pesquisa. Sua motivação e assistência foram indispensáveis, especialmente nos momentos em que surgiam dificuldades, oferecendo-me força e incentivo para seguir adiante.

Agradeço à Universidade Estadual da Paraíba, ao grupo de pesquisa GRUTAA e aos demais colegas de curso em especial Daiane, Lays, Ivan e Bruno, pela troca de conhecimentos, pelo apoio e pelas experiências compartilhadas ao longo desses anos.

Minha gratidão se estende, com muito carinho, à minha filha, Maria Cecília, que foi minha maior motivação e razão de cada esforço ao longo desta jornada. Enfrentamos juntas dias difíceis, em que minha presença em sua vida foi limitada. Mas cada momento de estudo e dedicação foi pensando em você, e espero que este passo abra caminhos que inspirem também o seu futuro.

Ao meu esposo, Arthur César, por seu suporte, paciência e motivação. Seu incentivo constante e compreensão em todos os momentos, especialmente nos mais difíceis, foram fundamentais para que eu pudesse seguir em frente.

Gostaria de dedicar um agradecimento especial a Luciene Araújo, que me acolheu como uma mãe e esteve ao meu lado em todos os momentos da minha vida, oferecendo um apoio inestimável. Ao meu irmão Narcísio Araújo, que foi minha principal fonte de inspiração ao escolher o curso de engenharia sanitária e ambiental, seu incentivo e seu exemplo profissional foram fundamentais para minha decisão e para a concretização deste trabalho.

A todos os que, direta ou indiretamente, contribuíram para esta conquista, meu mais profundo agradecimento. Este trabalho é resultado do apoio, das orientações e do carinho que recebi de cada um de vocês, e a todos deixo aqui minha sincera gratidão.