

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA

KATHERINE JISSELLE FLORES VASQUEZ

**COMPÓSITO DE *LUFFA CYLINDRICA* E ÓXIDO DE COBRE PARA A
DESSALINIZAÇÃO DA ÁGUA DO MAR**

SÃO MATEUS
2024

KATHERINE JISSELLE FLORES VASQUEZ

**COMPÓSITO DE *LUFFA CYLINDRICA* E ÓXIDO DE COBRE PARA A
DESSALINIZAÇÃO DA ÁGUA DO MAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia, do Campus São Mateus, da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito para obtenção do título de Mestre em Energia, na área de concentração Engenharia, Tecnologia e Gestão.

Orientador: Prof. Dr. George Ricardo
Santana Andrade
Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Silveira
Bacelos

SÃO MATEUS

2024

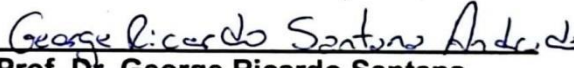
KATHERINE JISSELLE FLORES VASQUEZ

**CÓMPOSITO DE *LUFFA CYLINDRICA* E ÓXIDO DE COBRE PARA A
DESSALINIZAÇÃO DA ÁGUA DO MAR**

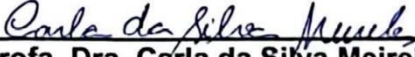
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Energia.

Aprovada em 25 de setembro de 2024.

COMISSÃO EXAMINADORA


**Prof. Dr. George Ricardo Santana
Andrade**
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador


Prof. Dr. Marcelo Silveira Bachelos
Universidade Federal do Espírito Santo
Coorientador


Profa. Dra. Carla da Silva Meireles
Universidade Federal do Espírito Santo

**Profa. Dra. Cintya D'Angeles do
Espírito Santo Barbosa**
Universidade Federal de Alagoas

Documento assinado digitalmente



CINTYA D'ANGELES DO ESPIRITO SANTO BARBOSA
Data: 25/09/2024 15:52:14-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

F634c Flores Vasquez, Katherine Jisselle, 1998-
Compósito de luffa cylindrica e óxido de cobre para a
dessalinização da água do mar / Katherine Jisselle Flores
Vasquez. - 2024.
104 p. : il.

Orientador: George Ricardo Santana Andrade.

Coorientador: Marcelo Silveira Bacelos.

Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade Federal do
Espírito Santo, Centro Universitário Norte do Espírito Santo.

1. Dessalinização da água. 2. Energia solar. 3. Energia
térmica. 4. Compósitos nanoestruturados. 5. Materiais porosos. I.
Andrade, George Ricardo Santana. II. Bacelos, Marcelo Silveira.
III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro
Universitário Norte do Espírito Santo. IV. Título.

CDU: 620.9

Dedico este trabalho, com gratidão e carinho, às pessoas mais importantes da minha vida.

A minha mãe, Olga Flores e as minhas duas irmãs Krizzia Flores e Karen Flores pelo suporte emocional na distância e pelo constante incentivo ao longo de toda minha trajetória acadêmica.

E, é claro, dedico este trabalho a mim mesma, por ter perseverado e acreditado em mim. Por ter me esforçado e dedicado na realização deste objetivo.

AGRADECIMENTO

Com muito carinho, agradeço a todas as pessoas que foram fundamentais nesta jornada.

À minha família (mãe, pai e as minhas duas irmãs) pelo suporte à distância.

À Eva, por ser a melhor companhia. Com o miado tão doce e o rostinho de fofura que me acordou todo dia com muita alegria.

As minhas amigas Nikelly Silva de Jesús e Millena Silva Pinto. Obrigada por ter me ensinado sobre sua cultura e idioma. Agradeço o seu apoio nos momentos de vulnerabilidade. Vocês além de ser amigas viraram família.

Aos meus amigos Cristian de Sousa, Antoni Elvir e Isidro Argueta pelo seu apoio, encorajamento e companhia ao longo desse percurso. Vocês tornaram os desafios mais leves.

Ao meu orientador, George Santana, principalmente, pela paciência e pelas palavras de consolo em momentos difíceis, realmente foram muito importantes para mim. Também obrigada pela disposição.

Ao meu coorientador, Marcelo Bacelos, pelo recebimento e sua constante preocupação.

À UFES e seus funcionários, em especial, a professora Carla Meireles, ao professor Aloísio Costa, aos técnicos de laboratório Pedro Couto, Jean, Flaviane e Welber, e ao doutorando Nícolas Berger pelo apoio técnico.

Ao Professor Marcos Ribeiro e doutorando Ramon Fonseca pela colaboração nas análises de UV-Vis.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) pelo apoio financeiro - Código de Financiamento 001.

À Organização dos Estados Americanos (OEA) e ao Grupo de Cooperação Internacional de Universidades Brasileiras (GCUB) por ter me concedido a bolsa referente ao programa PAEC-OEA-GCUB 001/2022.

Por fim, agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa (FAPES) pelo apoio financeiro (projetos 2023-3ZGG5 e 2024-58J99).

Só percebemos o valor da água depois que
a fonte seca.

(Provérbio popular)

RESUMO

A crescente demanda por água exige processos de dessalinização mais eficientes, econômicos e sustentáveis. A dessalinização solar é uma solução promissora, mas sua baixa eficiência energética limita a produção em grande escala. Pesquisas indicam que a adição de materiais absorvedores fototérmicos (MAFs) pode melhorar essa tecnologia. Este estudo visa desenvolver MAFs combinando loofah (*Luffa cylindrica*) e Cu_2O , para aumentar a eficiência da dessalinização solar convencional. Desta forma, os compósitos foram preparados através da adsorção de íons de cobre na loofah (*in natura* ou após tratamento alcalino) seguido por um tratamento térmico a 220°C . Foi feita a caracterização por meio de técnicas de MOD, DRX, UV-Vis, MEV, PCZ, e imagens termográficas. Os resultados de DRX revelaram a presença de picos relacionados às fases gráfitica e do Cu_2O com estrutura cúbica. Dados de MOD e MEV/EDS mostraram que estrutura da loofah permanece inalterada após o tratamento térmico e que partículas de Cu_2O estão uniformemente distribuídas na superfície das fibras da loofah. Os compósitos apresentaram alta absorção de luz na região do UV-vis e, conseqüentemente, maior temperatura superficial após exposição ao sol. Ensaio de evaporação solar utilizando o compósito sem o tratamento alcalino, escolhido por apresentar a maior temperatura superficial quando exposto a radiação solar direta, resultaram em eficiências de conversão entre 76,9% e 98,6% para água destilada e 88,1% para água do mar. Esses resultados revelam a influência direta da quantidade e superfície exposta do compósito sobre a eficiência. Além disso, foi projetado e construído um destilador com um corpo de vidro que, ao adicionar o material absorvedor, a eficiência média de dessalinização aumentou em 94%. Análises físico-químicas da água obtida, tais como pH, quantificação de cloretos e condutividade elétrica, comprovaram a dessalinização da água do mar. O compósito apresentou melhor eficiência de conversão e um aumento significativo na produtividade da destilação solar que outros materiais semelhantes da literatura. De forma que, este trabalho inova ao desenvolver um material com alto potencial para a dessalinização solar de água do mar, contribuindo para mitigar os efeitos da escassez hídrica.

Palavras-chave: tratamento de água, absorvedor fototérmico, armazenador de calor

ABSTRACT

The increasing demand for water requires more efficient, economical and sustainable desalination processes. Solar desalination is a promising solution, but its low energy efficiency limits large-scale production. Research indicates that the addition of photothermal absorbing materials (PTMs) can improve this technology. This study aims to develop PTMs by combining loofah (*Luffa cylindrica*) and Cu_2O , to increase the efficiency of conventional solar desalination. Thus, the composites were prepared by adsorbing copper ions on loofah (*in natura* or after alkaline treatment) followed by a heat treatment at 220°C . Characterization was performed using OM, XRD, UV-Vis, SEM, ZPC, and thermographic imaging techniques. The XRD results revealed the presence of peaks related to the graphitic phases and Cu_2O with cubic structure. OM and SEM/EDS data showed that the loofah structure remained unchanged after heat treatment and that Cu_2O particles were uniformly distributed on the surface of the loofah fibers. The composites presented high light absorption in the UV-vis region and, consequently, higher surface temperature after exposure to sunlight. Solar evaporation tests using the composite without alkaline treatment, chosen because it presented the highest surface temperature when exposed to direct solar radiation, resulted in conversion efficiencies between 76.9% and 98.6% for distilled water and 88.1% for seawater. These results indicate the direct influence of the amount and exposed surface of the composite on efficiency. In addition, a distiller with a glass body was designed and built, which, when incorporating the absorbing material, increased the average desalination efficiency by 94%. Physicochemical analyses of the water obtained, such as pH, chloride quantification and electrical conductivity, confirmed the desalination of seawater. The composite showed better conversion efficiency and a significant increase in the productivity of solar distillation than other similar materials in the literature. Therefore, this work innovates by developing a material with high potential for solar desalination, contributing to mitigate the effects of water scarcity.

Keywords: water treatment, photothermal absorber, heat store

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Distribuição de água no planeta Terra	22
Figura 2 — Técnicas de síntese de nanomateriais derivados da biomassa e rejeitos industriais.....	38
Figura 3 — Fotografia da loofah in natura	42
Figura 4 — Fluxograma da metodologia experimental	46
Figura 5 — Ilustração das medidas de cada peça e vista em perspectiva do destilador solar.....	51
Figura 6 — Microscopia óptica da Loofah <i>in natura</i>	54
Figura 7 — Microscopia óptica das amostras: a-b) Loofah <i>in natura</i> , e c-d) após 24 h de tratamento alcalino	55
Figura 8 — Microscopia óptica das amostras: a) A03, b) A04, c) A05 e d) A06 após adsorção dos íons de cobre	56
Figura 9 — Fotografias da amostra A03 (a e b) e imagens de microscopia óptica das amostras: (c e g) A03; (d) A04; (e) A05 e (f) A06 após o tratamento térmico	57
Figura 10 — Imagens de MEV para a loofah carbonizada A02 (a e c) e o compósito A03 (b e d) em diferentes magnificações. A seta em amarelo representa a localização de poros na superfície do material.....	59
Figura 11 — Histograma do tamanho dos agregados do compósito A03.	59
Figura 12 — Espectro de energia dispersiva para a loofah carbonizada A02 (A e B) e o compósito A03 (C e D). A região analisada corresponde ao ponto 1 demarcado na imagem de MEV.	60
Figura 13 — Mapeamento do elemento cobre para o compósito A03.	61
Figura 14 — Gráfico de DRX das amostras	62
Figura 15 — Gráfico de UV-Vis das amostras.....	65
Figura 16 — Imagens termográficas comparativas de: a) A01 e A02; b) A02 e A03; c) A02 e A04; d) A02 e A06 e; e) A02, A03 e A06.....	67
Figura 17 — Gráfico do potencial zeta <i>versus</i> pH das amostras:	68
Figura 18 — Influência da massa do compósito na evaporação da água: a) irradiância solar x temperatura da água e b) irradiância solar x porcentagem de massa evaporada.	70
Figura 19 — Influência da massa do compósito na taxa de evaporação e eficiência	

de conversão	72
Figura 20 — Imagens dos evaporadores sob radiação solar direta: a) fotografia, b) diagramas	73
Figura 21 — Influência da forma do absorvedor na evaporação da água: a) irradiância solar x temperatura d'água e b) irradiância solar x porcentagem de massa evaporada.	77
Figura 22 — Influência da forma do absorvedor na taxa de evaporação e eficiência de conversão	78
Figura 23 — Desempenho do compósito na evaporação da água do mar: a) irradiância solar x temperatura da água e b) irradiância solar x porcentagem de massa evaporada	79
Figura 24 — Taxa de evaporação e eficiência de conversão usando água do mar..	80
Figura 25 — Fotografias do destilador solar construído: a) destilação com MAF e b) destilação simples.	81
Figura 26 — Ilustração das medidas de cada peça	95
Figura 27 — Influência da massa do compósito na evaporação da água: a) irradiância solar x temperatura da água e b) irradiância solar x porcentagem de massa evaporada.	96
Figura 28 — Influência da forma do compósito na taxa de evaporação e eficiência de conversão	97
Figura 29 — Imagens dos evaporadores sob radiação solar direta: a) fotografia, b) diagramas	97
Figura 30 — Influência da massa do compósito na evaporação da água: a) irradiância solar x temperatura da água e b) irradiância solar x porcentagem de massa evaporada.	98
Figura 31 — Influência da forma do compósito na taxa de evaporação e eficiência de conversão	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Composição química de águas oceânicas	24
Tabela 2 — Parâmetros Físico-Químicos.....	26
Tabela 3 — Processos das amostras.....	48
Tabela 4 — Resumo de dados de DRX das amostras	64
Tabela 5 — Resumo dos resultados de destilação	81
Tabela 6 — Comparação dos resultados dos sistemas simples e com MAF considerando condições climáticas semelhantes:	82
Tabela 7 — Caracterização da água.....	84
Tabela 8 — Resumo de resultados de destilação simples	100
Tabela 9 — Resumo de resultados de destilação com MAF	100
Tabela 10 — Resultados determinação de Cloretos, método de Mohr.....	103

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 — Vantagens e desvantagens das principais tecnologias de dessalinização	25
Quadro 2 — Parâmetros que afetam a produtividade nos destiladores.....	29
Quadro 3 — Descrição dos mecanismos de conversão fototérmica.....	33
Quadro 4 — Características dos ASFs sob exposição a luz natural.....	34
Quadro 5 — Composição química da loofah.....	43
Quadro 6 — Comparação do desempenho de evaporação dos diferentes materiais.	75
Quadro 7 — Comparação do desempenho de destilação	83
Quadro 8 — Comparação do desempenho de destiladores	101
Quadro 9 — Estimação dos custos envolvidos no funcionamento e construção do sistema: destilador com MAF	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A01	Loofah <i>in natura</i>
A02	Loofah carbonizada
A03	Compósito de loofah e óxido de cobre sem tratamento alcalino
A04	Compósito de loofah e óxido de cobre com 3 h de tratamento alcalino
A05	Compósito de loofah e óxido de cobre com 6 h de tratamento alcalino
A06	Compósito de loofah e óxido de cobre com 12 h de tratamento alcalino
ASFs	Absorvedores Solares Fototérmicos
B1	Evaporador com apenas água destilada
B2	Evaporador com a loofah carbonizada inteira
B3	Evaporador com a loofah carbonizada triturada
B4	Evaporador com o compósito inteiro
B5	Evaporador com o compósito triturado
DRX	Difratometria de Raios X
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i> (do inglês, Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura)
FTIR	<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> (do inglês, Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier)
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde
FWHM	<i>Full Width at Half Maximum</i> (do inglês, Largura a meia altura)
INMET	Instituto Nacional De Meteorologia
MAFs	Materiais Absorvedores Fototérmicos
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MET	Microscopia Eletrônica de Transmissão
MOD	Microscopia Óptica Digital
NPs	Nanopartículas
OM	<i>Optical Microscopy</i> (do inglês Microscopia óptica digital)
PCZ	Ponto de Carga Zero
PTM	Photothermal material (do inglês Material Absorvedor fototérmico)
UV-Vis	Espectroscopia de absorção na região do UV-Vis
SEM	<i>Scanning electron microscopy</i> (do inglês Microscopia Eletrônica de

	Varredura)
TEM	<i>Transmission electron microscopy</i> (do inglês Microscopia eletrônica de transmissão)
XRD	<i>X-Ray diffraction</i> (do inglês Radiação de raios X)
ZPC	Zero point of charge (do inglês ponto de carga zero)

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
LISTA DE FIGURAS.....	10
LISTA DE TABELAS.....	12
LISTA DE QUADROS.....	13
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	14
SUMÁRIO	16
1 INTRODUÇÃO.....	18
2 OBJETIVOS	20
2.1 Objetivo Geral	20
2.2 Objetivos específicos	20
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
3.1 Recursos hídricos e problemática da água doce.....	21
3.2 Conceito e rotas tecnológicas da dessalinização de água	23
3.3 Dessalinização solar: conceitos básicos e <i>design</i> do destilador.....	27
3.4 Absorvedores fototérmicos aplicados para dessalinização solar	31
3.5 Nanocompósitos aplicados à dessalinização solar.....	37
3.6 Utilização da Loofah como matriz para ancoramento de nanomateriais.....	41
4 METODOLOGIA	46
4.1 Preparação e caracterização do material	47
4.2 Avaliação da eficiência de dessalinização solar	50
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
5.1.Preparação e caracterização dos compósitos loofah/Cu ₂ O.....	54
5.2.Ensaio de dessalinização solar	69
1.CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	85

6.1.Sugestões para trabalhos futuros:	86
2.REFERÊNCIAS	87
APÊNDICE A.....	95
APÊNDICE B.....	96
APÊNDICE C.....	98
APÊNDICE D.....	100
APÊNDICE E	101
APÊNDICE F	103
APÊNDICE G.....	104

1 INTRODUÇÃO

Os problemas relacionados à escassez de água estão aumentando devido ao crescimento populacional e industrial e às mudanças climáticas. Estima-se que, até 2050, cerca de quatro bilhões de pessoas sejam afetadas por esse fenômeno (IBRAHIM et al., 2021a). Esta situação repercute de forma social e econômica já que aumenta as lacunas sociais e expõe uma grande parte da população a problemas de saúde (IBRAHIM et al., 2021a; LIN, 2020). Neste contexto, faz-se necessário buscar, aprimorar e desenvolver tecnologias que se concentrem na melhoria da eficiência energética e na utilização de fontes de energia renováveis e sustentáveis. Uma tecnologia que combina os elementos anteriores é a dessalinização solar de água. Porém, segundo IBRAHIM, *et al.* (2021), os métodos tradicionais têm uma baixa eficiência fototérmica, o que dificulta a escala de projetos. Entretanto, é possível aumentar a eficiência térmica dos destiladores solares por meio da aplicação de materiais que absorvem a radiação solar e a convertem em calor, denominados materiais absorvedores fototérmicos (MAFs ou ASFs) (HE et al., 2021).

Atualmente, vários materiais estão sendo estudados para aumentar a eficiência fototérmica e produtividade de destiladores solares, incluindo micro e nanopartículas (NPs), membranas, filmes e compósitos (HARRIS SAMUEL et al., 2016; HE et al., 2021; KHATOD; KATEKAR; DESHMUKH, 2022; SAHOTA; SHYAM; TIWARI, 2017). Os MAFs se classificam em: materiais poliméricos orgânicos, materiais de nanoestrutura metálica, semicondutores inorgânicos e materiais à base de carbono (HE et al., 2021; YIN et al., 2022). Dentre eles, destacam-se: a plasmônica à base de Cobre, dentro das NPs metálicas (REN et al., 2021); o óxido de Cobre, dentro dos semicondutores (YIN et al., 2022), reconhecido pelo seu baixo custo e alta eficiência de absorção fototérmica; e os materiais carbonizados oriundos de fontes naturais, como plantas, dentro dos materiais à base de carbono, por sua alta resistência a oxidação, apesar de apresentarem as menores eficiências de absorção (HE et al., 2021). No entanto, o uso do cobre na dessalinização solar enfrenta grandes desafios em relação à resistência à oxidação (REN et al., 2021), exigindo sua combinação com polímeros ou materiais à base de carbono numa espécie de híbrido.

Neste contexto, vários trabalhos têm demonstrado a utilização de materiais carbonizados de origem vegetal para a dessalinização solar, tais como sabugo de

milho, talo de vegetais, cana-de-açúcar, pedaços de madeira, dentre outros (ARUNKUMAR et al., 2022a). Estes materiais apresentam absorção solar eficiente, microcanais porosos, baixa condutividade térmica e hidrofobicidade (ARUNKUMAR et al., 2022a; LIU et al., 2020a). Dentre os materiais de origem vegetal aptos para a aplicação, a loofah (*Luffa cylindrica*), uma fibra natural de baixo custo e biodegradável (TAIMUR-AL-MOBARAK et al., 2018), tem apresentado resultados significativos quanto à melhoria da eficiência de dessalinização. A loofah, também conhecida popularmente como bucha vegetal é vastamente encontrada no Brasil (BRITO et al., 2020). Quando carbonizada, a loofah, apresenta características desejáveis, como uma estrutura porosa com microcanais de 10 a 20 μm , uma taxa de evaporação de 89,9% e uma condutividade térmica de 0,06 W/mK (ARUNKUMAR et al., 2022a).

Compósitos de óxido de cobre têm demonstrado ser eficientes como absorvedores fototérmicos, tanto em processos de destilação como nos de geração de vapor. Estudos revelam que a adição de CuO a materiais como a parafina (DSILVA WINFRED RUFUSS et al., 2018) e polidopamina (YIN et al., 2022) possibilitou um aumento significativo da eficiência fototérmica. Embora, não tenhamos encontrado algum estudo sobre o nanocompósito de loofah e Cu₂O, a literatura indica que a combinação do óxido de cobre com outros produtos naturais, como a loofah, pode potencializar a dessalinização, uma vez que permite que o composto absorva uma grande quantidade de radiação infravermelha (ELSHEIKH et al., 2018; SONG et al., 2021). Além dessas aplicações, o óxido de cobre tem apresentado uma boa performance como removedor de poluentes (CHOI et al., 2017) e é conhecido como agente anticancerígeno, antimicrobiano e antioxidante (LETCHUMANAN et al., 2021), tornando o compósito um material versátil, promissor na área de saúde e no tratamento de água em geral.

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo principal desenvolver e caracterizar um novo compósito, à base de loofah carbonizada e óxido de cobre e avaliar o seu potencial para aplicação em sistemas de dessalinização solar ou geração de vapor. Diferentemente de estudos anteriores, que se limitam às condições controladas de laboratório e não contemplam todas as variáveis de um sistema real, este trabalho busca, além de contribuir na área de materiais, simular condições reais de operação permitindo uma análise mais completa do seu potencial na aplicação.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver absorvedores fototérmicos baseados em um compósito de loofah e nanocristais de óxido de cobre para aplicação em dessalinização solar.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Preparar absorvedores fototérmicos de carbono utilizando a bucha vegetal (*Luffa cylindrica*) via carbonização em mufla;
- Preparar nanocristais de Cu_2O *in situ* nos absorvedores fototérmicos de carbono via etapas de adsorção de íons de cobre e tratamento térmico;
- Caracterizar o material preparado através da espectroscopia de absorção no UV-Vis, difratometria de raios X, termografia, determinação do ponto de carga zero, microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura;
- Estudar a aplicabilidade do compósito na dessalinização mediante a análise de evaporação de água destilada e água do mar, e a análise de dessalinização da água do mar através da construção de um dessalinizador solar;
- Aplicar técnicas físico-químicas para a caracterização da água do mar e destilada, tais como determinação de cloreto por titulação, medidas de pH e condutividade.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão integrativa de estudos de preparação de nanocompósitos destinados à dessalinização solar de água e a fundamentação teórica relacionada. A estrutura da revisão está dividida em seis seções, nas seções 3.1, 3.2 e 3.3, serão discutidos os fundamentos em torno à problemática da água doce e as alternativas tecnológicas para a abordagem. Nas seções 3.4, 3.5 e 3.6 discutem-se estudos e conceitos chave para a preparação e caracterização dos nanocompósitos de Loofah e Óxido de Cobre.

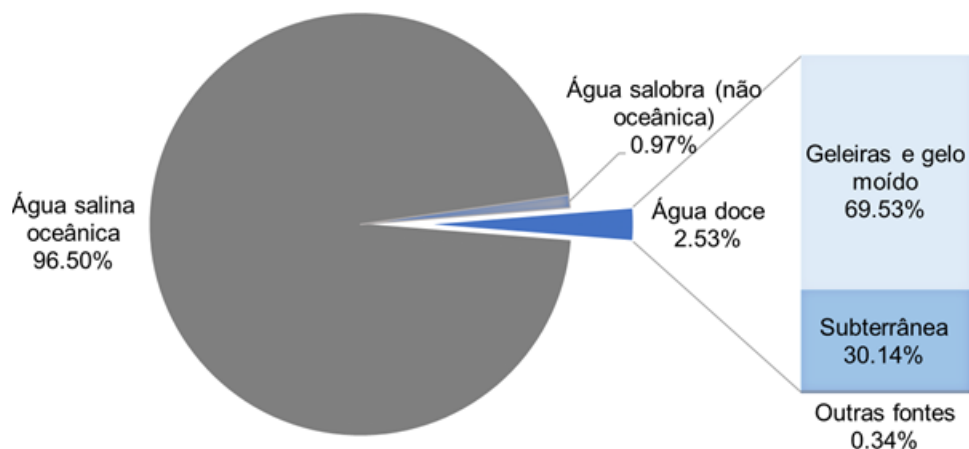
3.1 RECURSOS HÍDRICOS E PROBLEMÁTICA DA ÁGUA DOCE

Garantir o acesso à água é de interesse global. A água é um recurso vital para todos os seres vivos. É usada para beber, cozinhar, na higiene e saneamento, na irrigação e cria de gado, na construção, em refrigeração e demais processos industriais (ZHENG; SPIJKERS, 2021). A água, de acordo ao nível de salinidade, pode ser classificada em doce, salobra e salina. A água doce é aquela que possui salinidade igual ou inferior a 0,5%, a água salobra a que tem uma salinidade entre 0,5% e 30% e a água salina a que tem uma salinidade igual ou superior a 30% (BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2005).

Embora as águas salina e salobra possam ser utilizadas nos processos industriais que exigem um certo nível de salinidade, não são adequadas para o consumo humano ou irrigação. Portanto, a disponibilidade de água¹ para diferentes finalidades pode depender, entre outros fatores, do seu nível de salinidade (JIA et al., 2019). Segundo estimativa feitas nas décadas de 70 e 80, apenas 2,53% do estoque total de água na hidrosfera é composto pelas reservas de água doce (GLEICK, 1993). A maioria da água doce está no gelo nas áreas do Ártico e da Antártida o que faz que as principais fontes de água para consumo humano sejam as águas subterrâneas e os rios e lagos de água doce, que representam menos de um terço das reservas globais (Figura 1)

¹ A disponibilidade hídrica refere-se à quantidade total de água que está disponível em uma determinada área (ALCAMO, DÖLL, et al., 2003).

Figura 1 — Distribuição de água no planeta Terra



Fonte: Elaboração própria a partir de dados de GLEICK (1993)

Nota: números foram arredondados

A água doce é uma das principais preocupações frente à crescente lacuna entre demanda e oferta de recursos naturais (WEF, 2023). ALCAMO *et al.* (2003), projetaram que para 2025, as captações de água² nas áreas com bacias hidrográficas se mantenham ou reduzam devido à satisfação das necessidades hídricas e à melhoria da eficiência do uso da água. Segundo a *Food and Agriculture Organization*, FAO (2022), nos últimos anos, a curva da captação de água tem se achatado (como previsto no estudo de Alcamo) graças às fontes de água alternativas (coleta de água da chuva, água reciclada e reutilizada, água dessalinizada), mas o consumo tem aumentado. Ainda, segundo a FAO (2022), o panorama atual conta com várias regiões que estão sob estresse hídrico, sendo o setor agrícola um importante contribuinte. Comparando-se às demais bacias dos países latino-americanos, as situadas na costa do Atlântico Sul (nordeste e sudeste do Brasil) e no México destacam-se por apresentar alta exposição a condições severas, como eventos climáticos extremos, que podem afetar negativamente os lucros das colheitas (BIRNBAUM *et al.*, 2022). Os resultados de um estudo no Ceará (região semiárida do Brasil) apontam que, para 2025, 10% dos municípios mais vulneráveis tem uma expectativa média de escassez

² Captação de água refere-se à extração de água do lençol freático ou de um corpo de água superficial como um rio, lago ou reservatório de armazenamento artificial. (HOEKSTRA, 2015)

hídrica de 82% (DE ARAÚJO et al., 2004).

De forma geral, a escassez de água refere-se à falta de água doce para suprir a demanda (TZANAKAKIS; PARANYCHIANAKIS; ANGELAKIS, 2020). Segundo RIJSBERMAN (2006), não existe uma definição de escassez de água comumente aceita já que depende de como uma região define: as necessidades das pessoas, o recurso hídrico que pode ser disponibilizado para suprir as necessidades e as escalas temporais e espaciais. Há muitas percepções diferentes de escassez que podem incluir as condições de ambientes áridos, água insuficiente em escala de bacia, uma falta geral de acesso à água ou dificuldade em atender às necessidades concorrentes (MOLDEN, 2020). Segundo TZANAKAKIS e outros (2020), as causas da escassez de água incluem: as mudanças e variabilidades climáticas; o crescimento populacional e urbanização; o uso excessivo e esgotamento dos recursos hídricos; a poluição e degradação da qualidade da água; os conflitos por recursos hídricos; e a má gestão da água.

MOLDEN (2020) afirmou que a principal causa da escassez de água é a má gestão, enfatizando que uma gestão adequada da água pode superar a escassez. Isso se deve a que o planejamento, o desenvolvimento e a manutenção de sistemas de abastecimento de água aumentam a captação de água para uso agrícola, industrial e doméstico e reduz significativamente as causas listadas anteriormente. Promover o uso de fontes alternativas de água e integrar efetivamente esses recursos aos planos de gestão existentes resultará em benefícios significativos tanto sociais como econômicos. TZANAKAKIS et al. (2020), destacam, entre outras alternativas, a dessalinização como uma importante fonte de água particularmente para áreas urbanas que enfrentam escassez hídrica.

3.2 CONCEITO E ROTAS TECNOLÓGICAS DA DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA

Segundo RASHEED et al. (2021), "a salinidade da água salobra varia geograficamente." A composição típica das águas salinas é apresentada na Tabela 1, onde pode ser observada a presença de diversos sais, incluindo diversos cloretos. A dessalinização é basicamente um processo no qual a água doce é separada destes sais. Uma vez que as águas oceânicas representam o 96,50% do estoque total de água, de acordo com os dados mostrados na Figura 1, a dessalinização é uma alternativa que visa a aumentar a disponibilidade de água doce. Pode ser utilizada no

tratamento de águas oceânicas ou na água salobra subterrânea (SALEEM et al., 2020).

Tabela 1 — Composição química de águas oceânicas

	Concentração (g/L)
NaCl	24,53
MgCl ₂	5,20
Na ₂ SO ₄	4,09
CaCl ₂	1,16
KCl	0,695
NaHCO ₃	0,201
KBr	0,101
H ₃ BO ₃	0,027
SrCl ₂	0,025
NaF	0,003

Fonte: ASTM D 1141 – 98 (2003)

Segundo CURTO e FRANZITTA (2021), considerando que há dados limitados para algumas tecnologias de dessalinização que ainda estão em desenvolvimento, “[...] a capacidade instalada global ($95,37 \times 10^6$ m³/dia) é composta por Osmose Reversa (68,7%), Flash Multi-Estágio (17,6%), Destilação Multi-Efeito (6,9%), Nano Filtração (3,4%), Eletrodialise (2,4%), e outros (1,0%)”. As vantagens e desvantagens de cada método são apresentados no Quadro 1. As principais tecnologias de dessalinização demandam uma grande quantidade de energia térmica e elétrica (ALI; FATH; ARMSTRONG, 2011), e grande parte dela advém dos combustíveis fósseis, o que os torna econômica e ecologicamente inviáveis (CHAUHAN et al., 2021). Pesquisas devem ser feitas focadas na melhora de eficiência energética e a utilização de recursos renováveis e sustentáveis de energia pela sua natureza ecológica em detrimento dos combustíveis fósseis.

Quadro 1 — Vantagens e desvantagens das principais tecnologias de dessalinização

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens	Estado
Destilação Multi-Efeito	Alta qualidade da água; Baixo consumo de energia	Dimensionamento nos tubos	Comercial
Flash Multi-Estágio	Manutenção é mais simples do que no destilação multi-efeito; Alta qualidade da água; Alta capacidade nominal	Alta demanda de energia; Investimento vultoso; Problema de corrosão; Arranque lento; Toda a planta é parada para manutenção	Comercial
Osmose Reversa	Somente demanda elétrica; Baixos investimentos; Acoplável com muitas fontes de energia renováveis; Estrutura modular da planta	Menor qualidade da água; Altos custos para membranas e produtos químicos; Sujeito a bioincrustação	Comercial
Nano Filtração	Baixa demanda de energia	Produz água mole (solução salina diluída)	Em desenvolvimento
Eletrodiálise	Alta pureza da água doce; Consumo de energia proporcional à concentração de sal	Somente para água salobra (até 2000 ppm); Contaminantes bacterianos não removidos pelo sistema	Comercial
Destilador solar	Executado pela radiação solar; Realizável com materiais baratos	Utilizável apenas para aplicações pequenas	Comercial para pequenas aplicações

Fonte: Adaptado de CURTO e FRANZITTA, et al., 2021

A água resultante da dessalinização poderá ser empregada no consumo humano no Brasil (Água potável classe 1) caso cumpra com as condições de qualidade e os padrões estabelecidos nas resoluções vigentes do Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA, incluindo análises físico-químicas e microbiológicas. Por exemplo, são realizados rotineiramente: os exames bacteriológicos envolvendo a pesquisa de coliformes totais e termotolerantes, inclusive *Escherichia coli*, e a contagem padrão de bactérias heterotróficas; e as técnicas das análises físico-químicas como as titulométricas e colorimétricas. (BRASIL. FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE, 2013). Os valores de referência das técnicas de análise físico-químicas relevantes para este trabalho estão detalhados na Tabela 2.

Tabela 2 — Parâmetros Físico-Químicos

Parâmetro	Método	Unidade	Padrão
Cloretos	Titulação com Nitrato de Prata	mg l ⁻¹ de Cloro	250
pH	Medição com um pHmetro		7
Condutividade	Medição com um condutivímetro	µS cm ⁻¹	50 - 200

Fonte: A autora com dados da resolução de BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (2005), BRASIL. FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (2013) e BRASIL. AGÊNCIA REGULADORA DE SANEAMENTO DE TUBARÃO (2020)

O pH deve estar em torno de 7 (neutro) para garantir que está dentro de uma faixa que não prejudique a vida aquática nem cause corrosão em sistemas de distribuição (BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2005). A condutividade é usada como indicador de pureza (poluentes e sais), ele não tem um valor regulamentado já que não determina a quantidade dos sais presentes, quantifica a corrente elétrica conduzida nos ânions e cátions presentes na água, funcionando assim como um indicador de quantidade e não um quantificador; mesmo assim, a Agência Reguladora de Saneamento de Tubarão estabelece como valor padrão entre 50 para água mineral e 200 µS cm⁻¹ para água potável. A concentração do sal NaCl é importante neste estudo já que com este obtém-se o valor quantizado do sal maioritário na água do mar (≈90% dos sais) (NATIONAL GEOGRAPHIC, 2022) e

segundo a Resolução CONAMA nº 357/2005 o valor deve ser inferior a 250 mg l⁻¹.

3.3 DESSALINIZAÇÃO SOLAR: CONCEITOS BÁSICOS E *DESIGN* DO DESTILADOR.

As tecnologias utilizadas para dessalinização solar de água são várias e cada uma apresenta vantagens e desvantagens. Quanto à forma de coleta da energia solar e processo de dessalinização, os sistemas podem ser classificados em diretos e indiretos. No modo direto, um único fluido atua como coletor solar e agente dessalinizante, realizando ambos os processos no mesmo equipamento. No modo indireto, a energia solar é coletada por um fluido específico e transferida para outro fluido responsável pela dessalinização, em equipamentos separados (CHAUHAN et al., 2021; SHARON; REDDY, 2015). A dessalinização direta por destiladores é a mais simples porque exige o mínimo de manutenção, custo de operação baixo e materiais acessíveis (SHARON; REDDY, 2015). Porém, apresenta as desvantagens de baixa eficiência (inferior a 30 %), baixa produtividade (inferior a 5 L/m²/dia) (RASHEED et al., 2021) e demanda mais área se compararmos com outros tipos de sistemas. (CHAUHAN et al., 2021; DSILVA WINFRED RUFUSS et al., 2018; SHARON; REDDY, 2015)

Os destiladores solares têm sido estudados para melhorar sua eficiência e produtividade e torná-los mais competitivos em relação às outras opções de dessalinização solar. A eficiência das medições experimentais (eficiência de destilação η_D) é definida pela Equação (1), onde $\dot{m}_p$ em kg/s é a taxa na qual a água destilada é produzida (que pode ser menor à taxa de evaporação-condensação), h_{fg} em J/kg é o calor latente de vaporização, A é a área em m² e G é a irradiância do local em W/m². O objetivo quando se projeta um destilador solar é maximizar a taxa de transferência de calor por evaporação-condensação, sendo desejável que a temperatura do destilador seja a mais alta possível (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

$$\eta_D = \frac{\dot{m}_p h_{fg}}{A G} \quad (1)$$

Outra variável amplamente usada na avaliação de desempenho é a taxa r que pode ser definida de duas maneiras: como taxa de evaporação, quando $\dot{m}$ é a razão mássica de água evaporada; ou como produtividade, quando $\dot{m}'$ é a razão mássica de água produzida (Equação (2)) (ZHOU et al., 2019). Além desta, podem-

se usar outras métricas, quais serão apresentados nas seções seguintes.

$$r = \frac{\dot{m}}{A} \quad (2)$$

Segundo AL-MEZEINI et al. (2023), as variáveis que afetam a produtividade e a eficiência são: as condições climatológicas; os componentes do desenho e as condições operacionais. HAMMOODI et al. (2023), fez uma revisão detalhada sobre os fatores que afetam o desempenho dos destiladores, os quais estão resumidos no Quadro 2.

Como as condições climatológicas tipicamente estão fora do controle do pesquisador, os componentes do desenho e as condições operacionais são otimizados conforme a necessidade (AL-MEZEINI et al., 2023). As estratégias estudadas consistem na variação da geometria ou da estrutura do destilador e na adição de outros materiais para o armazenamento de energia (HARRIS SAMUEL et al., 2016). Quanto a seu desenho construtivo, os destiladores solares passivos podem variar a geometria (hemi-esférica, parabólica, plana, inclinação simples ou dupla, etc.), tamanho da área de captação, os materiais empregados e se estão equipados com refletores internos ou externos. Embora o desenho construtivo seja um fator relevante, a literatura científica indica que a incorporação de elementos armazenadores e absorvedores tem um impacto mais significativo na eficiência desses sistemas. Portanto, esta revisão se concentrará na análise detalhada desses elementos, deixando de lado as variações de design que, embora importantes, apresentam menor potencial de otimização.

Segundo dados da pesquisa desenvolvida por CAI et al. (2023), os destiladores que utilizaram compósitos armazenadores de calor e materiais de mudança de fase, apresentavam o menor custo de operação quando compararmos com os desenhos convencionais. XIAO e outros (2013), na sua revisão, compararam várias pesquisas voltadas a melhorar a eficiência dos destiladores e encontraram que o sistema com recuperação de calor latente e os que empregavam materiais armazenadores de calor obtiveram valores mais altos de eficiência térmica e produtividade quando comparados com a modificação de outros fatores como: o acoplamento de coletores, aumento de área livre e a instalação de refletores. Os materiais que armazenam energia podem ser considerados absorvedores solares fototérmicos como veremos mais adiante.

Quadro 2 — Parâmetros que afetam a produtividade nos destiladores

(continua)

Parâmetros	Fatores	Relação fator e produtividade
Meteorológicos	Radiação solar	Relação direta
	Umidade relativa do ar	Relação inversa
	Velocidade do vento	Questão em aberto
	Temperatura ambiente	Relação direta
	Poeira e nuvem	Relação inversa
Operacionais	Coloração da água	A adição de corante na bacia inferior aumenta a produção total
	Fluxo de água	Relação inversa
	Aditivos surfactantes	Impacto insignificante
	Salinidade e níveis de contaminantes	Relação inversa
	Alimentação de água	Ao aplicar o modo de alimentação dinâmica de água, você pode obter o melhor desempenho do sistema.
	Manutenção	É importante para alcançar a máxima eficiência
	Orientação	Em direção ao sul melhora a produtividade anual*
	Outros efeitos	A produção do sistema aumentou cerca de 30 %. Quando a convecção é permitida dentro da mistura e dos ventiladores.

Fonte: Adaptado de HAMMOODI, DHAHAD et al. (2023)

Nota: *os estudos foram realizados em países do hemisfério norte

Quadro 2 — Parâmetros que afetam a produtividade nos destiladores

(conclusão)

Parâmetros	Fatores	Relação fator e produtividade
Design	Número de inclinações	Um destilador solar de inclinação simples ainda recebe mais radiação do que um solar de inclinação dupla ainda em estações de baixa e alta latitude, portanto, sua produção é maior.
	Formas do destilador solar	A taxa de produção de água destilada pelo tipo pirâmide solar ainda foi maior quando comparada com outros tipos devido ao aumento da área superficial de condensação.
	Inclinação da tampa	Deve ser equivalente ao ângulo de latitude. ⁽¹⁾ Também, tem relação com os fatores: tensão superficial, forças de adesão e correntes de convecção.
	Espessura da tampa	Tem o menor impacto na produção de destiladores solares
	Armazenamento de energia térmica	A produtividade pode ser aumentada com o uso de materiais de mudança de fase
	Taxas de absorção da água da bacia	Pode ser aumentado pela adição de corante ou pela incorporação de vários tipos de materiais absorventes na bacia
	Refletores e espelhos	Aumentam a produtividade dos destiladores
	Sistema de rastreamento solar	Pode melhorar a eficiência, mas não é econômico
	Espessura do isolamento	Aumentar a espessura dos destiladores solares melhora a produção
	Materiais aditivos	O uso de ⁽²⁾ e ⁽³⁾ MAFs e/ou ⁽⁴⁾ e ⁽⁵⁾ armazenadores de energia aumentaram a produtividade do destilador solar ou a eficiência de sistemas de geração de vapor.
	Profundidade da água na bacia	O deslocamento de fase da água em vapor ocorre rapidamente em baixas profundidades de água devido ao maior coeficiente de transferência de calor e, portanto, aumentando a produção do destilador.

Fonte: Adaptado de HAMMOODI et al. (2023). Outras fontes complementares: ⁽¹⁾AZOOZ e YOUNIS, (2016), ⁽²⁾CUI et al., (2023), ⁽³⁾LIU et al. (2019), ⁽⁴⁾KHATOD et al. (2022) e ⁽⁵⁾DSILVA et al. (2018)

Um projeto bastante comum na literatura foi reportado por (SHARSHIR et al., 2018), o qual consiste em o corpo principal constituído por chapas de ferro soldadas com 0,15 cm de espessura, base de 0,25 m² (0,5 m × 0,5 m) e alturas da extremidade inferior e superior de 16 cm e 45 cm, respectivamente. As superfícies internas da bacia foram revestidas com uma tinta preta, o que tem um efeito positivo na coleta de energia solar e na melhoria da taxa de evaporação. Todas as laterais externas e base foram isolados com fibra de vidro para minimizar as perdas de calor no ambiente. A superfície superior foi coberta com uma folha de vidro a uma inclinação de 30° correspondente ao ângulo de latitude de Wuhan, China, onde foi instalado o destilador. Outros trabalhos, como RASHEED et al. (2021), DSILVA et al. (2018), HARRIS et al. (2016) e ELANGO et al. (2015), utilizam projetos semelhantes ao citado acima; outros autores utilizam evaporadores de vidro como LIU et al (2020) e (XU et al., 2018). Então, para o desenho construtivo do destilador desta pesquisa adapta-se o modelo anterior às condições do local baseado na relação dos fatores do desenho e da produtividade apresentados no Quadro 2 com a incorporação de um MAF.

Finalmente, vale destacar que o Brasil apresenta um grande potencial solar. A média anual no país do total diário de irradiação solar global varia entre 3,8 e 6,5 kWh/m²/dia. O estado do Espírito Santo possui uma irradiação solar média anual no plano inclinado de 5,07 a 5,58 kWh/m²/dia (BRASIL. AGÊNCIA DE SERVIÇOS PÚBLICOS DE ENERGIA DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO, 2013). Os dados anteriores mostram a possibilidade que a dessalinização solar de água seja uma alternativa econômica e ambientalmente apropriada para suprir a demanda crescente de água na região.

3.4 ABSORVEDORES FOTOTÉRMICOS APLICADOS PARA DESSALINIZAÇÃO SOLAR

Os absorvedores solares fototérmicos (ASFs) aplicados à dessalinização solar são substâncias auxiliares que absorvem a luz e a convertem em calor num mecanismo chamado conversão fototérmica, aumentando a eficiência do processo de dessalinização (HE et al., 2021). No Quadro 3 é apresentada uma descrição desses mecanismos. O mecanismo de conversão é diferente para cada tipo de material. YIN

(2022) e HE et al. (2021) classificam os ASFs em: materiais poliméricos orgânicos, materiais de nanoestrutura metálica, semicondutores inorgânicos e materiais à base de carbono (Quadro 4).

Os mecanismos de absorção intrínseca e de conjugação serão analisados com maior profundidade nas seguintes linhas devido à presença do semicondutor Cu_2O e do elemento carbônico no material de estudo desta pesquisa. Assim, a absorção depende das propriedades intrínsecas do material semicondutor, ou seja, de sua estrutura eletrônica. O Cu_2O possui um *bandgap* de 2,2 a 2,4 eV (SAWICKA-CHUDY et al., 2018), e absorção na região azul-verde do espectro (516 a 570 nm). No caso dos elementos à base de carbono, a conjugação depende da estrutura química, ou seja, das interações das ligações duplas (σ e π), tendo uma faixa mais ampla de comprimentos de onda que a absorção intrínseca. Uma vez que a radiação é absorvida, ocorre uma excitação dos elétrons entre os orbitais (no caso do C) ou uma transição eletrônica (no caso do Cu_2O) gerando transportadores de carga fotogerados. A transferência de energia se dá por espalhamento e relaxamento dos últimos e/ou através da vibração da rede ao voltar ao estado de energia fundamental. (CUI et al., 2023; YIN et al., 2022).

Como discutido anteriormente, o mecanismo de conversão fototérmica é diferente para cada tipo de material, então para projetar um sistema eficiente, as características levadas em conta para cada um serão diferentes. Em geral, para projetar um sistema de geração de vapor altamente eficiente para dessalinização solar, os absorvedores devem: (1) ter excelentes propriedades ópticas (absorção eficiente), (2) ter baixa condutividade térmica para localizar o calor convertido na região da interface e minimizar o calor transmitido, (3) conter canais (material poroso) para o transporte de água rápido e, (4) apresentar propriedades de anti-incrustação de sais (ARUNKUMAR et al., 2022a; IBRAHIM et al., 2021b). Além disso, as características hidrofílicas (presença de grupos funcionais de Nitrogênio) (REN et al., 2021) são úteis para facilitar o fluxo passivo para evaporação persistente, promovendo a transferência de calor na superfície de evaporação e, assim, levando à geração eficiente de vapor através do recurso solar (SONG et al., 2021).

Quadro 3 — Descrição dos mecanismos de conversão fototérmica

Mecanismo	Descrição do efeito fototérmico
Ressonância plasmônica de superfície localizada	Quando a radiação solar é irradiada na superfície de nanopartículas metálicas, a frequência da luz incidente corresponde à frequência de ressonância dos elétrons livres nas nanopartículas metálicas com forte efeito de extinção da luz (absorção ou espalhamento da luz pela nanopartícula), resultando em ressonância plasmônica. A energia absorvida impulsiona os elétrons a oscilarem, desta forma é liberada principalmente na forma de calor.
A absorção intrínseca	Quando os elétrons de valência na camada externa do átomo semicondutor absorvem energia suficiente de fótons, fazem uma transição através do <i>gap</i> de banda para se tornar um elétron livre (pares elétron-buraco ou portadores fotogerados), o calor é assim gerado à medida que os transportadores fotogerados interagem com a rede cristalina.
Conjugação ou Vibração térmica da rede atômica	Devido às interações interatômicas no sistema conjugado, os substituintes no sistema conjugado fazem com que a densidade da nuvem de elétrons de cada ligação mude. Os elétrons da ligação σ C –H, C –C interagem com os orbitais p não ligantes, orbitais π antiligação ou orbitais π completos, resultando em um efeito de hiperconjugação. No sistema π - π com o maior efeito de conjugação, os elétrons π nas transições orbitais moleculares de ligação para o orbital molecular anti-ligação π quando o comprimento de onda da luz encontra a condição de transição de elétrons na molécula. Os elétrons excitados liberarão calor e causarão vibração da rede atômica quando retornarem do estado de alta excitação para o estado fundamental, resultando em um aumento de temperatura dos materiais à base de carbono para alcançar a conversão fototérmica.

Fonte: A autora, baseado de YIN *et al.* (2022)

Quadro 4 — Caraterísticas dos ASFs sob exposição a luz natural

(continua)

Tipo	Mecanismo de conversão	Vantagens	Desvantagens	Exemplos
Poliméricos orgânicos	Conjugação vibração térmica da rede <i>relaxamento não radiativo de elétrons π deslocalizados</i>	Propriedades ópticas de interesse Baixa eficiência de conversão fototérmica. Projetos moleculares versáteis, forte absorção de luz NIR Processo de fabricação mais fácil. Excelente taxa de evaporação e eficiência da água. amigáveis com o meio ambiente. Boa biocompatibilidade São amplamente utilizados no tratamento médico devido ao seu preço caro	Custo elevado Fotodegradação de polímeros conjugados.	PDA/Madeira APDA/Madeira
Metálicos nano-estruturados	ressonância plasmônica de superfície localizada	São usados normalmente para auxiliar outros materiais fototérmicos. Mostram um desempenho excepcional na desinfecção de água Nanopartículas plasmônicas de metais nobres são desejáveis para o tratamento de desinfecção de água em larga escala.	Custo Elevado Processo de preparação complicado Baixa vida média Propenso à corrosão. Precisa ser alterado para ajustar sua largura de banda de absorção.	Ouro, prata, paládio, alumínio, cobre, telúrio, germânio e outros metais nanoestruturados.

Fonte: A autora baseado em informações de (CUI et al., 2023; HE et al., 2021; IBRAHIM et al., 2021b; YIN et al., 2022)

Quadro 4 — Caraterísticas dos ASFs sob exposição a luz natural

(conclusão)

Tipo	Mecanismo de conversão	Vantagens	Desvantagens	Exemplos
Semicondutores inorgânicos	Absorção intrínseca	Grande diversidade, Econômico Boa estabilidade à luz e ao calor Morfologia ajustável Envolvem processos simples e fáceis de síntese ou modificação; Excelentes absorvedores de luz, Alta eficiência de conversão fototérmica;	Geralmente exigem maior intensidade de luz para alcançar alta eficiência de conversão fototérmica	Óxidos metálicos e Sulfetos: existem naturalmente na forma de minerais de minério, tais como FeS ₂ , Cu ₂ S, CuFeS ₂ , MoS ₂ , FeTiO ₃ , TiO ₂
À base de carbono	vibração térmica da rede <i>relaxamento não radiativo de elétrons π deslocalizados</i>	Alta eficiência de conversão fototérmica e de absorção da luz solar morfologia da superfície ajustável Notavelmente anti-incrustação Resistência à corrosão ácida, alcalina e eletroquímica, Estrutura porosa que facilita o transporte de água	Grafeno e seus derivados e os Nanotubos de carbono são hidrofóbicos o que dificulta a troca de calor com a água.	Grafeno e seus derivados Nanotubos de carbono Plantas carbonizadas (madeira, loofah, cogumelos, girassol, etc.)

Fonte: A autora baseado em informações de (CUI et al., 2023; HE et al., 2021; IBRAHIM et al., 2021b; YIN et al., 2022)

Vale ressaltar que os ASFs também podem armazenar certa quantidade de calor para utilizar durante os intervalos de tempo que não haja radiação solar incidindo no destilador (CAI et al., 2023; KHATOD; KATEKAR; DESHMUKH, 2022). Este calor pode ser armazenado através da transformação de fase ou da energia interna do material (HARRIS SAMUEL et al., 2016). Materiais de mudança de fase permitem armazenar energia térmica de calor latente, e incluem substâncias orgânicas, inorgânicas e eutética, entre eles o óleo de palma e a parafina (DZINDZIORA; CIEŚLIK; WOJCIECHOWSKI, 2021; HARRIS SAMUEL et al., 2016). Materiais com variação da energia interna armazenam calor sensível, alguns exemplos são: madeira, esponjas, CuO, concreto, etc. (KHATOD; KATEKAR; DESHMUKH, 2022).

Autores como YIN et al. (2022), IBRAHIM et al. (2021), LIU et al. (2019) e ZHOU et al. (2019), nos seus artigos de revisão mostram pesquisas e dados de absorção de radiação e eficiência de evaporação de diferentes materiais fototérmicos. Os que apresentam menores ganhos de eficiência são as plantas carbonizadas, mas estas apresentam um bom custo-benefício. Os que apresentaram maior eficiência de evaporação foram os derivados do grafeno e do cobre com eficiências superiores a 85%, e outros nanocompósitos (híbrido metálico ou semicondutor com polímeros e materiais carbônicos). Além disso, a plasmônica à base de Cobre tem atraído enorme interesse devido à eficiente conversão de luz em calor mas sua aplicação enfrenta grandes desafios na resistência à oxidação e baixa taxa de evaporação pelo que é preciso conjugá-lo com outro material numa espécie de híbrido (REN et al., 2021).

No estudo realizado por LIU et al. (2020) sobre a aplicação de loofah carbonizada na dessalinização solar, a loofah foi cortada em cilindro de altura de 1 cm e de diâmetro de 5 cm e logo carbonizada a 500 °C por 30 s. A taxa de evaporação e eficiências de conversão de energia atingidas, após carbonização, foram de 1,42 kg m⁻² h⁻¹ e 89,9%, respectivamente. A loofah carbonizada apresentou uma melhora na eficiência de absorção de energia e de evaporação agindo como um material fototérmico excelente para a absorção da energia solar em um amplo espectro.

SHARSHIR et al. (2018), analisaram a dessalinização solar com nanopartículas de cobre e grafite. Os resultados de uma mistura de 0,5% NPs de

cobre em água alcançam uma produtividade média de $3,4 \text{ l m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e uma absorção de água e tinta preta ao redor do 90%. A eficiência energética e exergética média diária foi de 38,61% e 37,8%, respectivamente. YANG et al., (2023) desenvolveram um compósito de Cu/Cu₂O/Carvão hidrofílico e com uma boa absorção de luz sintetizado mediante o processo de pirólise. Utilizou-se o nitrato de cobre II Cu(NO₃)₂ como precursor das NPs Cu/Cu₂O e a matriz gráfica do Tabaco para ancoragem das mesmas. O material alcançou uma taxa de evaporação de $2,01 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ e uma eficiência de conversão fototérmica de 79,7%, 6,48 vezes maior que a água pura. Segundo SAHOTA; SHYAM; TIWARI, (2017), as nanoestruturas de CuO proporcionam melhor desempenho térmico, entre outros, devido a sua maior densidade, condutividade térmica e menor calor específico.

Com o desenvolvimento contínuo de nanotecnologias avançadas, uma variedade de nanomateriais fototérmicos foi dotada de excelentes capacidades de captação de luz e conversão fototérmica para explorar aplicações fascinantes e prospectivas (CUI et al., 2023), entre elas a dessalinização, já que essas características podem aumentar drasticamente o rendimento (LI et al., 2015). Criar estruturas em escala nanométrica, permite controlar as propriedades fundamentais dos materiais (RANE et al., 2018). A fim de melhorar o desempenho da geração de vapor solar, especialmente a eficiência de conversão de energia, vários trabalhos também foram feitos para combinar materiais (nanocompósitos). A busca nas bases de dados *SCOPUS* e *Web of Science* não revelou estudos sobre a preparação de nanocompósitos de Cu₂O ou CuO e loofah para dessalinização solar, surgem diversas oportunidades para novas pesquisas na área. Nas seções seguintes apresentam-se informações relevantes para a síntese e caracterização do compósito a ser aplicado na dessalinização solar de água, entre eles as técnicas de síntese e caracterização (Seção 3.5) e os tratamentos à Loofah para ser utilizada como matriz de ancoramento de nanomateriais (Seção 3.6).

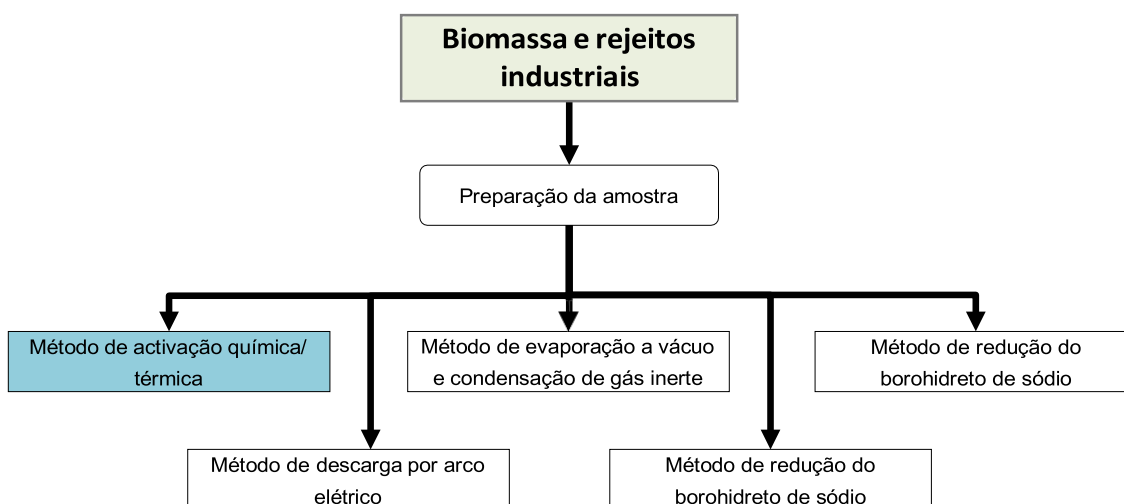
3.5 NANOCOMPÓSITOS APLICADOS À DESSALINIZAÇÃO SOLAR

Segundo RANE (2018), um nanocompósito é um material sólido multifásico em que uma das fases tem uma, duas ou três dimensões de menos de 100 nm, ou

estruturas com distâncias de repetição em nanoescala entre as diferentes fases que compõem o material. No sentido mais amplo, esta definição pode incluir meios porosos, coloides, géis e copolímeros, mas é mais comumente tomada como significando a combinação sólida de uma matriz macrocristalina ou tipo *Bulk* e fase(s) nanodimensional(is) podendo propiciar que novas propriedades apareçam (RANE et al., 2018).

As técnicas de fabricação de nanocompósitos dependem da constituição desejada. Os nanocompósitos metálicos são materiais que tem uma matriz metálica reforçada com a implantação de outro material nanoestruturado (RANE et al., 2018). Os nanocompósitos derivados da biomassa tem uma matriz polimérica com a adesão de outro material nanoestruturado (SAMADDAR et al., 2018). As técnicas de interesse nesta pesquisa são as relacionadas à síntese de nanocompósitos com matriz polimérica e a adesão de nanopartículas de um semicondutor nanoestruturado. Na Figura 2 mostra-se as diferentes técnicas empregadas na síntese destes materiais. Entre elas temos o método de ativação termoquímica, de descarga de arco elétrico, evaporação a vácuo e condensação de gás inerte, redução do borohidreto de sódio e térmico do solvente.

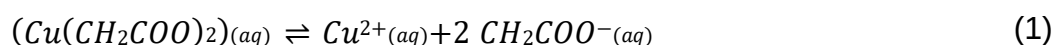
Figura 2 — Técnicas de síntese de nanomateriais derivados da biomassa e rejeitos industriais



Fonte: Adaptado de SAMADDAR (2018)

ASHIK *et al.* (2018) classificam as metodologias de síntese como: “(1) *bottom-up* (montagem em solução); ou (2) *top-down* (técnicas litográficas)”. Além disso, os autores comentam que na literatura, o método bottom-up é a abordagem líder em nanossíntese, especialmente para óxidos metálicos, pois resulta em menos defeitos, composição química homogênea e melhor ordenação de cristais (ASHIK; KUDO; HAYASHI, 2018). LETCHUMANAN *et al.* (2021), no seu artigo estabelece como uma das técnicas comuns na biossíntese vegetal de NPs de Cu/CuO misturar uma concentração conhecida de extrato vegetal com uma concentração conhecida de precursor ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, CuCl_2 , $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, etc) e aquecer a mistura a uma temperatura fixa, com agitação contínua³.

ASAMOAHA e colaboradores (2020), apresentam uma metodologia para a síntese de NPs de CuO com a técnica *bottom-up*, utilizando como solução precursora o acetato de cobre e a centrifugação magnética. A formação das NPs é descrita mediante as seguintes reações



³ É interessante notar que as NPs de Cu e CuO são amplamente utilizados como agentes anticancerígenos, antimicrobianos e antioxidantes (LETCHUMANAN *et al.*, 2021) e que nanocompósitos de Cu, CuO e Cu_2O com óxido grafítico reduzido (rGO) tem apresentado uma excelente eficiência de fotocatalise (CHOI *et al.*, 2017). Embora não esteja diretamente ligado ao objetivo principal do trabalho, esses pontos destacam uma potencialidade que pode expandir as aplicações para outras áreas.

A caracterização dos nanomateriais é crucial para garantir a reprodutibilidade e segurança na sua produção (HANO; ABBASI, 2021). Caracterização é um termo amplo e interdisciplinar que reúne especialistas de diversas áreas como metalurgia, eletrônica de materiais, física de estado sólido, químicos analíticos, entre outros (CAHN; LIFSHIN, 1993). Inclui a determinação da composição, morfologia, microestrutura e determinação de uma ampla variedade de propriedades. As análises de estrutura cristalina, morfologia, absorção de radiação, termográficas e de anti-incrustação são relevantes nesta pesquisa.

A determinação da estrutura cristalina do material auxilia na determinação da composição de um material composto ou misto e é realizada através da Difractometria de Raios X (DRX). A análise morfológica de nanomateriais pode ser realizada usando técnicas de microscopia óptica digital (MOD) microscopia eletrônica de varredura (MEV), microscopia eletrônica de transmissão (MET) e espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS) (SAMADDAR et al., 2018). Para avaliar a potencialidade do material no aumento de eficiência de conversão fototérmica podem ser utilizadas as técnicas de termografia para medir a variação da temperatura superficial quando o material é exposto à radiação solar e FTIR e UV-Vis, já que, segundo BHATIA (2014), cerca de 40% da radiação eletromagnética emitida pelo sol está contida na faixa visível 0,4 a 0,7 μm (40%) e na faixa do infravermelho 0,7 a 4 μm (51%).

A avaliação das propriedades de anti-incrustação pode ser feita com: a medição do ponto de carga zero (PCZ) para prever e analisar a interação do material com os sais em diferentes valores de pH; (PASHAI GATABI; MILANI MOGHADDAM; GHORBANI, 2016) e através da identificação, por meio de Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), da presença de grupos funcionais que favorecem a hidrofobicidade. Isso é devido a que a incrustação de sais depende não só da interação iônica, mas também da presença de grupos funcionais na superfície do material. Se a superfície do material tiver grupos funcionais que favorecem a hidrofobicidade (-OH, C=O, -COOH, -COO⁻, -NH₂, -NH₃⁺, -SO₃H), a incrustação é reduzida (KANDUČ et al., 2016).

Para avaliar o desempenho deste tipo de absorvedores na dessalinização é possível calcular a eficiência total de conversão η_{TC} com a equação (3) (HE et al.,

2021; LI et al., 2015).

$$\begin{aligned}\eta_{TC} &= \eta_{Solar.T\acute{e}rmica} \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) \\ \eta_{Solar.T\acute{e}rmica} &= \frac{E_\alpha - E_R}{C \times \int d\lambda \alpha(\lambda) E_{solar}(\lambda) - \int d\lambda \alpha(\lambda) E_B(\lambda, T_2)} \\ &= \frac{E_\alpha - E_R}{C \times \int d\lambda E_{solar}(\lambda)}\end{aligned}\quad (3)$$

onde T_1 é a temperatura ambiente, T_2 é a temperatura do absorvedor, E_{solar} é a irradiação espectral solar, $\alpha(\lambda)$ é absortividade/emissividade espectral do material tanto para a luz solar quanto para a radiação infravermelha térmica (em T_2), E_B é a radiação de corpo negro a temperatura T_2 e C é o fator de concentração geralmente é da ordem de 10-1000. Esta equação (3) apresenta a dificuldade de encontrar $\alpha(\lambda)$ pois é preciso uma análise detalhada de UV-Vis do material à temperatura de trabalho, o qual não é uma tarefa simples.

Outra forma de avaliar a eficiência é através da equação (4), conhecida como eficiência de evaporação-solar η_E ou eficiência de conversão solar térmica (LI; ZHU; ZHU, 2019; ZHOU et al., 2019).

$$\eta_E = \frac{Q_1 + Q_s}{Q_{en}} = m_{\acute{a}gua} \times \frac{h_{fg} + C_m \Delta T}{Q_{en}} = \dot{m}_p \times \frac{h_{fg} + C_m \Delta T}{\dot{Q}_{en}} \quad (4)$$

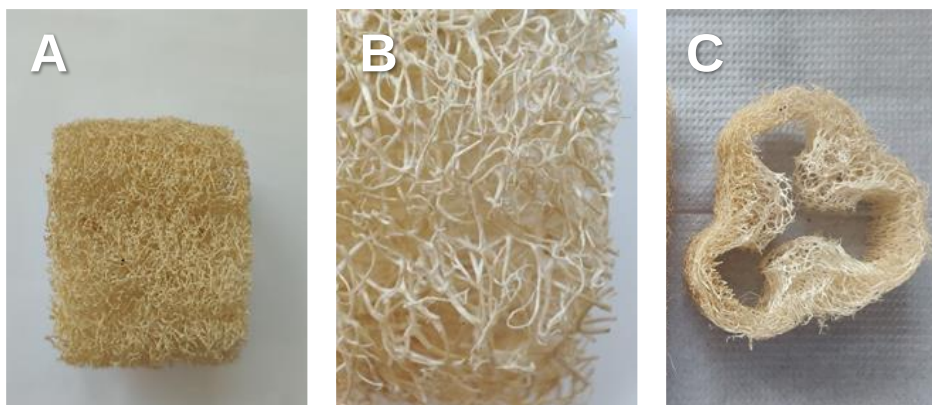
onde Q_s é o calor sensível de evaporação, Q_1 o calor latente de evaporação e C_m a capacidade calorífica do líquido, Q_{en} é a energia total de entrada e ΔT é a diferença entre a temperatura do vapor e a temperatura ambiente.

3.6 UTILIZAÇÃO DA LOOFAH COMO MATRIZ PARA ANCORAMENTO DE NANOMATERIAIS

Loofah (Figura 3) é uma fibra natural amplamente utilizada como esponja de banho. O nome científico é *Luffa cylindrica*, é conhecida popularmente como bucha, e na literatura é possível encontrá-la com diferentes grafias: loofah, lufa, luffah esfregão, etc. (LIMA, [s.d.]) É um material barato e biodegradável (TAIMUR-AL-MOBARAK et al., 2018). Os compósitos fabricados com este material e os tratamentos químicos podem melhorar as propriedades do material compósito final

(ALHIJAZI et al., 2020). Nesta seção apresentam-se diversos estudos referentes às possibilidades e modificação para deixa-la apta para o ancoramento de nanomateriais e as características mais relevantes para a aplicação.

Figura 3 — Fotografia da loofah in natura



Fonte: a autora.

GUIMARÃES *et al.* (2009), fizeram um estudo de caracterização da loofah, analisando a cristalinidade, a composição química, os aspectos morfológicos e térmicos. Os resultados das análises de: a composição química da loofah, com base nas normas ABNT NBR 9656 (Associação Brasileira de Normas Técnicas); a cristalinidade (analisada no DRX); e morfologia, analisada via MEV; mostram-se no Quadro 5. SIQUEIRA *et al.* (2010), ALHIJAZI *et al.* (2020) e TAIMUR-AL-MOBARAK *et al.* (2018) encontraram resultados semelhantes. Ademais, a análise por FTIR desse estudo mostra a presença de ligações que podem ser atribuídas aos grupos funcionais OH, C–O–C, C–O e C=O, grupos funcionais característicos de materiais hidrofílicos. Também, por meio da análise térmica por TGA, encontraram que a temperatura de estabilidade térmica da loofah é de 250 °C, que a temperaturas maiores que esta existe uma perda considerável de massa devido à decomposição das fibras de celulose e hemicelulose, e que acima de 500 °C só temos presença de cinza.

Quadro 5 — Composição química da loofah

Celulose m%	Hemicelulose m%	Lignina m%	Outros m%	Diâmetro µm	Cristal %
66,59	17,44	15,46	0,51	233	50%

Fonte: GUIMARÃES (2009)

Segundo TAIMUR-AL-MOBARAK *et al.* (2018), “[...] tratamentos de fibras naturais tornaram-se procedimentos usuais para melhorar as propriedades adesivas com outros materiais que atendam aos requisitos de engenharia desejados. [...] O efeito dos tratamentos químicos desenvolve a rugosidade da superfície da fibra, aumentando assim a área superficial disponível para o contato da superfície com o outro material.”. Entre as soluções que podem ser empregadas temos Hidróxido de sódio, peróxido de hidrogênio, ácido acético, carbamida, metacrilamida, permanganato de cloreto de benzoíla, anidrido acético, acetona, álcool furfurílico seguido de oxidação, ácido sulfúrico, etanol. Cloro alvejante, fosfato de cálcio, hidróxido de cálcio, etc. (ALHIJAZI *et al.*, 2020).

GHALI *et al.* (2011), fizeram um estudo sobre os efeitos da modificação química da loofah. No estudo comentam que a absorção de água pode afetar as propriedades mecânicas de materiais compósitos fibrosos naturais e que alterara morfologia externa das fibras naturais parece ser o fator chave que poderia alterar o comportamento hidrofílico (modificar a quantidade de água que poderia ser absorvida). Os autores concluíram que: (a) o tratamento de acetilação (anidrido acético a 100 °C por 3 h) melhorou as propriedades mecânicas dos materiais compósitos, diminuiu o comportamento hidrofílico e a absorção de água das fibras de loofah, melhorando a adesão das fibras; (b) o tratamento alcalino (NaOH a 4% a 100°C por 2 h) removeu a camada protetora das fibras celulares, aumentando a absorção de água das fibras de loofah.

TAIMUR-AL-MOBARAK *et al.* (2018), fizeram um estudo sobre os efeitos da modificação química à loofah usando tratamentos separados com álcali, anidrido acético e cloreto de benzoíla, cada um com concentrações de 5, 10 e 15% em peso.

No trabalho, comentam que, de acordo com a literatura, no tratamento com anidrido acético a polaridade reduz, com o tratamento de cloreto de benzoíla reduz a hidrofobicidade. Encontraram que a rugosidade da superfície aumentava nos três casos, também acharam que com o tratamento alcalino aumentava a cristalinidade e a aparição de novas ligações químicas. O tratamento das fibras de loofah com NaOH a 5% por 2 h apresentou a menor transmissão de radiação infravermelha quando compararmos com as obtidas com a acetilação ou a benzoilação e que a maiores concentrações o material propriedades mecânicas (tensão). Outrossim, para as temperaturas de um destilador a degradação térmica devido à absorção de água é muito semelhante nos três tratamentos.

ALHIJAZI *et al.* (2020), ressaltam na sua revisão que o tratamento das fibras de loofah com NaOH a 4% a 120 °C por 3 h revelou o maior índice de cristalinidade das fibras e, além disso, a mistura de NaOH com outras soluções como CH₃COOH pode melhorar drasticamente o desempenho mecânico do material, bem como diminuir significativamente sua absorção de água (ALHIJAZI *et al.*, 2020). Note-se que para a aplicação requerida, dos tratamentos discutidos, o tratamento alcalino é o mais adequado, mas requer modificações ou adaptações, uma vez que o material precisa absorver água. Em relação aos nanocompósitos semelhantes, REN *et al.* (2021) no seu artigo mostram o desenho de um material absorvedor fototérmico com uma eficiência solar-térmica de 90,2% e uma taxa de evaporação de 1,54 kg m⁻² h⁻¹ sob iluminação solar, no qual nanopartículas de cobre encapsuladas em grafeno ultrafino foram preparadas *in situ* na superfície da loofah por pirólise.

LIU *et al.* (2022), modificaram a loofah para que tivesse uma maior eficiência de adsorção dos íons de cobre. Os resultados mostraram que a adsorção de Cu(II) na loofah modificada com manitol foi altamente dependente do valor do pH, e a loofah teve uma excelente capacidade de adsorção para íons(II) quando o pH foi 5,0. A metodologia consistiu na pulverização da loofah limpa até a obtenção de pós menores que 74 µm. As etapas experimentais foram as seguintes: 4,0 g de bucha foram colocados em solução de água contendo emulsificante (0,3 g) por 30 min a 40 °C. Em seguida, 8,0 g de Metacrilato de glicidila (GMA), 1,5 g de K₂S₂O₈ e 2,0 g de NaHSO₃ foram adicionados e a mistura foi agitada com um agitador magnético de temperatura

constante por 80 min a 35 °C. Finalmente, o produto foi lavado com acetona e etanol e seco a 80 °C. Logo, 1,0 g de este produto foi adicionado a 40 mL de solução de 1,4-dioxano por 6 h, então 10 mL de água deionizada foi adicionada (V_{Water}:V_{1,4-dioxano} = 1:4), 12,0 g de manitol foram adicionados lentamente ao mesmo tempo e agitados a 85 °C por 20 h. O produto foi filtrado e extraído até ficar neutro com água deionizada, e o sólido foi então seco no vácuo.(LIU; LIANG; ZHANG, 2022)

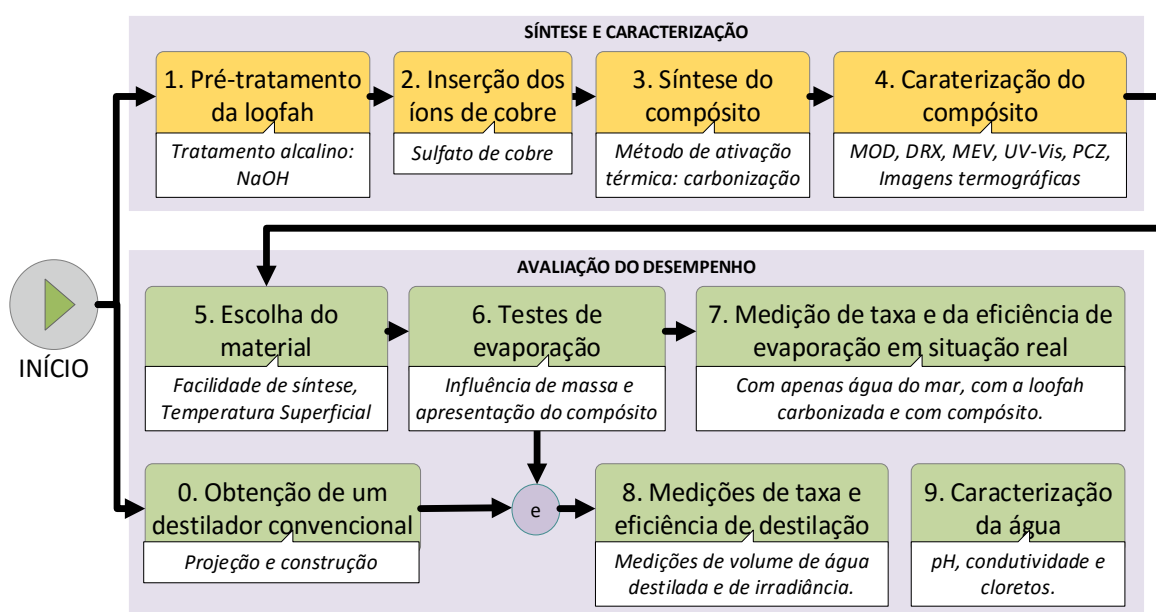
ARUNKUMAR *et al.* (2019), estudaram o efeito de placas absorvedoras nanoestruturadas de CuO integradas a esponjas de Álcool Polivinílico num destilador solar convencional de uma inclinação e encontraram que a adição das esponjas era contraproducente já que a eficiência do compósito (41%) foi menor que as nanoestruturas de CuO (53%). As nanoestruturas do CuO foram sintetizadas usando o método de evaporação térmica. No estudo, foram feitos quatro experimentos com 4 destiladores solares convencionais idênticos e com as configurações seguintes: (1) sem modificações, (2) com CuO nanoestruturado ancorado em um substrato de aço inoxidável, (3) com esponjas de Álcool Polivinílico, (4) com CuO nanoestruturado ancorado em um substrato de aço inoxidável e esponjas de Álcool Polivinílico. As eficiências e produtividades foram (37%, 2144 ml m⁻² dia⁻¹), (53%, 2995 ml m⁻²dia⁻¹), (32%, 1970 ml m⁻² dia⁻¹) e (41%, 2318 ml m⁻² dia⁻¹) para as configurações (1), (2), (3) e (4), respectivamente. (ARUNKUMAR *et al.*, 2019)

Segundo GAAZ *et al.* (2015), as esponjas de Álcool Polivinílico são hidrofílicas e a constituição deste polímero permite que seja misturado com outros polímeros naturais e artificiais. Também, comentam que por mais de 50 anos foram utilizados na área da biomedicina por ser um material biocompatível, atóxico, não cancerígeno, e bioadesivo. Concluíram que, os nanocompósitos formados com este tipo de esponjas e nanopartículas com grupos funcionais - OH, apresentam um aperfeiçoamento nas propriedades mecânicas, uma estabilidade térmica melhorada reduzindo a decomposição das esponjas e características térmicas dependentes da concentração das nanopartículas. Além disso, conta com uma estrutura porosa, hidrofobicidade e uma baixa condutividade térmica. Portanto, um material parecido com a loofah, ainda pode ser considerado como uma boa opção, se analisarmos o comportamento resultante de acordo com a influência da concentração ou as técnicas de adesão.

4 METODOLOGIA

O projeto de pesquisa tem caráter experimental e está inserido na área de engenharia e tecnologia na linha de eficiência energética. A metodologia experimental consta de duas etapas, tal e como apresentado na Figura 4. A primeira, ressaltada com a cor amarela no fluxograma, consiste na síntese e caracterização dos ASFs e, a segunda, a avaliação experimental do desempenho na dessalinização (cor verde). Nas seções seguintes, será detalhado o processo experimental.

Figura 4 — Fluxograma da metodologia experimental



Fonte: A autora

4.1 PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

4.1.1. Materiais

Para a realização deste trabalho, foram utilizados os seguintes reagentes: hidróxido de sódio (lentilhas) (NaOH, Dinâmica, <98%), sulfato de cobre II ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Synth, 99%), nitrato de prata (AgNO_3 , PLAT-LAB), ácido clorídrico (HCl, Anidrol, 36,5% a 38,0%), cromato de potássio: (K_2CrO_4 , ISOFAR, <99%).

4.1.2. Obtenção e tratamento alcalino da loofah

A loofah utilizada neste trabalho foi comprada de comerciantes locais no Mercado Municipal de São Mateus, cidade situada no norte do Espírito Santo. Inicialmente, a loofah foi submetida a um tratamento químico em meio alcalino, também conhecido como mercerização (OLADELE et al., 2019), seguindo uma adaptação de uma metodologia previamente reportada na literatura (GHALI et al., 2011; TAIMUR-AL-MOBARAK et al., 2018). Este tratamento foi realizado com a finalidade de aumentar a área superficial da celulose, o que poderia facilitar a adsorção de íons de cobre. Em um experimento típico, a loofah foi cortada em retângulos com massa de 3,0 g e dimensões aproximadas de 10 x 4 cm². Em seguida, as amostras foram mergulhadas em 200 mL de uma solução aquosa de NaOH (4% m/v) durante 3 h, 12h ou 24h. Após este tempo, foram lavadas com água destilada até pH neutro. Por fim, as amostras foram secas em uma estufa durante 1 h a 90°C.

4.1.3. Preparação dos compósitos loofah/ Cu_2O

A preparação dos compósitos foi iniciada com uma etapa de adsorção dos íons de Cu^{2+} na superfície da bucha vegetal. Desta forma, as amostras de loofah *in natura* e após o tratamento alcalino foram submersas em 200 mL de solução aquosa de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ com concentração 0,1 M por 48 h a temperatura ambiente. Após este tempo, as amostras foram lavadas uma vez com água destilada e secas durante 1 h em estufa a 90 °C.

A seguir, realizou-se um tratamento térmico com o intuito de carbonizar da bucha vegetal e preparar as partículas de Cu_2O (SAMADDAR et al., 2018). Este tratamento foi realizado em uma mufla (EDG modelo 3000 3P) a 220°C por 90 min a uma taxa de aquecimento de 30°C/min que se iniciou desde temperatura ambiente.

Estes parâmetros foram escolhidos após testes em diferentes temperaturas (180°C, 200°C, 220°C e 240°C) e tempos (60 min, 90 min e 120 min). Durante estes testes, avaliou-se qual seria a menor temperatura que promoveria uma carbonização uniforme e integridade física das fibras. A Tabela 3 apresenta todas as etapas de preparação e a nomenclatura adotada para as amostras.

Tabela 3 — Processos das amostras

Nomenclatura adotada	Etapa		
	Tratamento alcalino	Etapa de adsorção em CuSO ₄	Tratamento térmico
A01	Não	Não	Não
A02	Não	Não	Sim
A03	Não	Sim	Sim
A04	Sim, por 3h	Sim	Sim
A05	Sim, por 12h	Sim	Sim
A06	Sim, por 24h	Sim	Sim

Fonte: A autora

4.1.4. Caracterização das amostras

A caracterização das amostras foi realizada empregando as técnicas descritas a seguir:

Microscopia óptica digital (MOD): utilizou-se a MOD para examinar a morfologia superficial e o arranjo dos materiais sintetizados. As imagens das amostras foram obtidas utilizando um Microscópio USB VD3035s da marca VEDO. O software ImageJ foi utilizado para inserção das escalas e análise das imagens (RASBAND, W.S.; IMAGEJ; NATIONAL INSTITUTES OF HEALTH, BETHESDA, MARYLAND, USA, 2018).

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV): a morfologia superficial das amostras foi estudada por MEV. Para esta análise, utilizou-se um microscópio eletrônico de varredura da marca Jeol, modelo JSM – 6610. As amostras foram

recobertas com uma fina camada de ouro e foi aplicada uma tensão de aceleração de 10kV durante a análise. O estudo realizado no Laboratório Multiusuário de Microscopia de Alta Resolução da Universidade Federal de Goiás (LabMic/UFG).

Espectroscopia de energia dispersiva (EDS): a identificação elementar e o mapa composicional foram realizados utilizando um detector da Thermo scientific NSS Spectral Imaging acoplado ao equipamento de MEV descrito acima. A amostra foi recoberta com uma fina camada de carbono e utilizou-se uma tensão de aceleração de 20kV durante a análise.

Espectroscopia de absorção na região do UV-Vis para sólido: para esta análise, utilizou-se um espectrofotômetro Cary 60 da marca Agilent. As medidas foram realizadas no pelo grupo do prof. Marcos A. Ribeiro (DQUI/UFES).

Difratometria de Raios X (DRX): empregada para determinar a estrutura de rede cristalina dos componentes do compósito. Para a coleta do padrão de difração, as amostras que receberam tratamento térmico foram maceradas em almofariz de pedra Água, e logo analisadas no difratômetro miniflex 600 da marca Rigaku configurado no modo de reflexão com uma faixa de varredura de 2θ de 5° a 80° e passo de 0,02°.

Termografia: empregado para obter a temperatura superficial das amostras após exposição à luz solar. Esta técnica é muito relevante para avaliar a potencialidade do material na aplicação, já que a temperatura superficial é um indicador da existência de conversão fototérmica. Para a obtenção das imagens, as amostras foram colocadas sobre uma placa de poliestireno expandido EPS Isopor como fundo da imagem e foi empregada uma câmera termográfica marca Unit-T modelo Uti260B.

Estudo do potencial zeta: utilizado para a determinação do ponto de carga zero (PCZ) e analisar a interação do material com os sais em diferentes valores de pH. Foi analisado o PCZ das amostras que tiveram as maiores temperaturas superficiais da análise anterior (imagens termográficas) e a loofah carbonizada (amostra A02) por meio do analisador de potencial zeta stabino zeta S/N A0258. O analisador foi configurado para fazer titulações com NaOH e HCl a 0,01 M cada 20 a

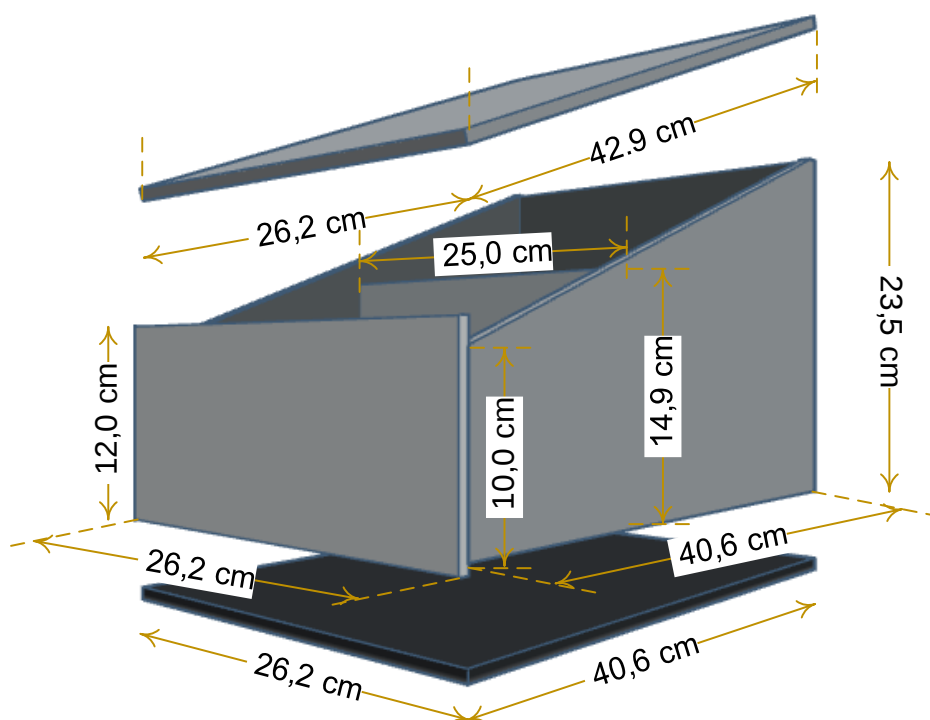
25 s com dosagem dinâmica de 20 a 30 μ l. Aproximadamente 10,5 mg das amostras (depois de terem sido carbonizadas e maceradas) foram diluídas em 10 ml de uma solução de NaCl 0,01 M e foram colocadas na célula de medição de 10 ml preta e o pistão de 0,4 nm para a análise. As medições foram feitas em duplicata do pH inicial (aproximadamente 5) até pH 2 e do pH inicial até pH 10.

4.2 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE DESSALINIZAÇÃO SOLAR

4.2.1. *Dimensionamento e construção dos destiladores*

Para o desenho construtivo do destilador, modificou-se os modelos discutidos na revisão (no final da Seção 3.3) às condições do local baseado na relação dos fatores do desenho e da produtividade apresentados no Quadro 2. Por tanto, considerou-se as coordenadas geográficas do campus CEUNES, obtidas utilizando o *Google Maps* (-18.6757°, -39.8624°), para definir a inclinação do destilador, a qual deve corresponder com a latitude. O volume do destilador foi definido em 5 L. O corpo do destilador foi construído com peças de vidro (vidro cristal incolor lapidado) de 6 mm de espessura e foram coladas (selante de silicone para vidros, DOWSIL 999A) de acordo com o mostrado na Figura 5. Para evitar vazamento de vapor, um selante de borracha de silicone foi empregado junto com folha de EVA como interface de vedação entre o corpo do destilador e a tampa de vidro. As medidas de cada peça são apresentadas no APÊNDICE A.

Figura 5 — Ilustração das medidas de cada peça e vista em perspectiva do destilador solar.



Fonte: A autora

4.2.2. Determinação do desempenho na destilação solar

A análise do desempenho do compósito foi realizada nas etapas descritas a seguir:

Etapla 1. Escolha do material: como será descrito no item 5.1. Preparo e caracterização dos compósitos, a escolha dos compósitos utilizados para a aplicação se deu através da análise do conjunto de dados obtidos na caracterização, em especial a temperatura da amostra após exposição à luz solar e facilidade de síntese. Desta forma, a amostra A03 foi utilizada durante os ensaios de dessalinização solar. Adicionalmente, para fins comparativos, a amostra A02, a qual apresentava apenas a bucha vegetal carbonizada, foi utilizada nos testes.

Etapla 2. Determinação da relação massa do compósito/volume de água: nesta etapa, determinou-se a quantidade em massa que oferece a maior taxa de

evaporação ($\dot{m}$ em $\text{kg m}^{-2} \text{dia}^{-1}$) de água. Para isso, os ensaios foram realizados em béqueres de 250 ml, aos quais foram adicionados uma massa conhecida do compósito A03 (0,5g, 1,0g, 1,5g, 2,0g e 2,5g) e 100g de água destilada. Um teste controle foi performedo na ausência do compósito. Tais béqueres foram colocados sob radiação solar direta em uma área pouco arborizada e medidas da massa, temperatura e irradiância solar foram realizadas em intervalos de 1 h desde 09:00 h até 17:00 h. Mediu-se a massa utilizando uma balança analítica marca SHIMADZU modelo ATX224 (para medição de taxa de evaporação); a temperatura da água com um termômetro de mercúrio; e a irradiância horizontal com um medidor de irradiância da marca Fluke modelo IRR1-SOL. Ensaio realizado em 2 dias diferentes.

Etapa 3. Avaliação da influência da forma do material: este teste buscou avaliar a influência do tamanho das fibras carbonizadas sobre a eficiência de destilação. Para isso: considerou-se a massa que apresentou os melhores resultados de taxa de evaporação na etapa anterior; as amostras A02 e A03 foram utilizadas na sua forma triturada e inteira; e mediu-se a eficiência de evaporação mediante a taxa de evaporação dos 5 sistemas abaixo seguindo o mesmo procedimento realizado no item anterior:

- a. B1: apenas água
- b. B2: com a loofah carbonizada inteira
- c. B3: com a loofah carbonizada triturada
- d. B4: com o compósito inteiro
- e. B5: com o compósito triturado

Dito ensaio foi realizado em 2 dias diferentes.

Etapa 4. Ensaios de dessalinização solar utilizando água do mar: nesta etapa, avaliou-se a evaporação numa situação real, utilizando a água do mar coletada na praia de Guriri Sul, zona norte do estado do Espírito Santo, Brasil. Mediu-se a taxa de evaporação de 3 sistemas: apenas água, com a loofah carbonizada e com o compósito, conforme descrito na etapa 2 e considerando a mesma massa usada na etapa anterior. Ensaio feito em duplicata e realizado no mesmo dia.

Etapa 5. Ensaio de dessalinização utilizando o destilador solar: por último foi colocado o destilador solar com água do mar, com e sem o compósito, por um período de 3 dias de 09 às 16 h em cada configuração. Empregou-se 2 l de água do mar em ambos os casos, e massa do compósito, quando utilizado, foi de 30 g. A cada meia hora, o destilador foi submetido a ajustes manuais para acompanhar o movimento do sol e assim aproveitar ao máximo a radiação solar e a produtividade. A inclinação do destilador, foi temporariamente aumentada para favorecer a captação de água que estava sendo dificultada pelo ângulo de inclinação. Ao final do dia, às 17h30, o volume de água destilada foi medido utilizando uma pipeta de 5 ml. A produtividade média diária ($\text{l m}^{-2} \text{dia}^{-1}$) e as eficiências de destilação foram calculadas por meio das equações (2), e (1) respectivamente.

Etapa 6. Caracterização da água obtida: foram feitas medidas dos parâmetros físico-químicos na entrada (água do mar) e na saída do destilador (água dessalinizada). O pH e a condutividade foram obtidos usando o potencial zeta Stabino Zeta S/N A0258. Para a determinação de cloretos, utilizou-se o método de Mohr (argentometria), que consistiu, em suma, na titulação das amostras utilizando uma solução de nitrato de prata AgNO_3 padronizada a 0,09698 M e cromato de potássio K_2CrO_4 (5% m/v) como indicador de ponto final. As eficiências de pureza (através da condutividade elétrica) e de recuperação (eficiência gravimétrica) também foram calculadas.

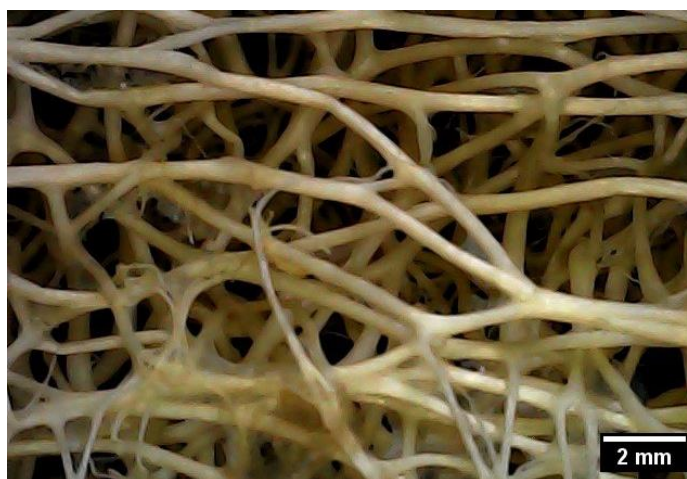
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS LOOFAH/CU₂O

5.1.1. Microscopia óptica digital e UV-vis

A morfologia da loofah *in natura* e após tratamento em meio alcalino foi avaliada por microscopia óptica. Como pode ser observado na Figura 6, os macroporos, definidos como os espaços entre as fibras, têm dimensões que vão desde 0,3 mm até um pouco mais de 2,0 mm. As fibras da loofah *in natura* apresentam diferentes tamanhos e arranjos em todo o volume. As fibras são canais os cilíndricos interligados com diâmetros superiores a 0,1 mm. Imagens de MOD com maiores magnificações podem ser observadas nas Figura 7a-b, as quais revelam a superfície lisa das fibras e de coloração amarelada. Segundo a literatura, a cor amarela a marrom de fibras vegetais está diretamente relacionada à presença de lignina na superfície, um biopolímero de estrutura complexa que confere suporte mecânico ao vegetal (KUMAR; KANDASAMI; SINGH, 2022).

Figura 6 — Microscopia óptica da Loofah *in natura*

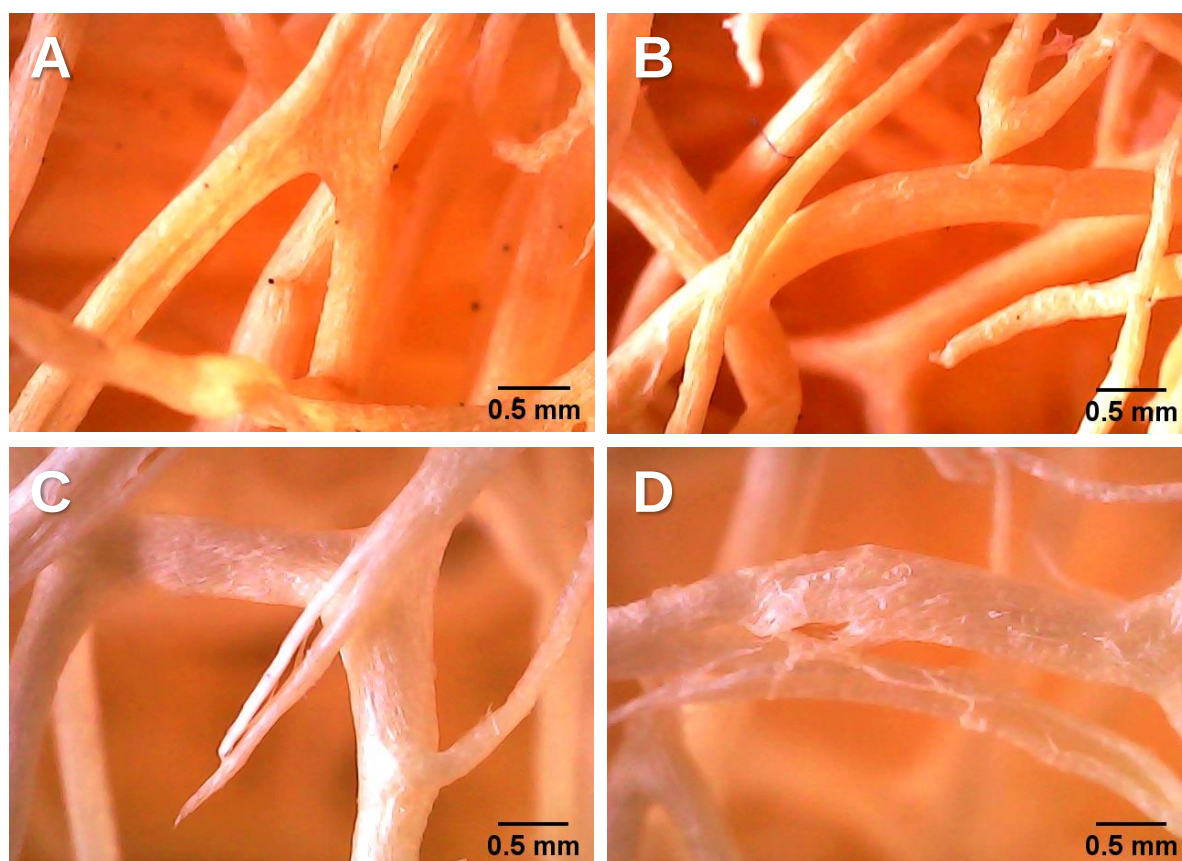


Fonte: A autora

Como mencionado na metodologia, a bucha *in natura* passou por um tratamento alcalino, o qual teve como finalidade remover parcialmente a lignina, cera e impurezas adicionais na superfície da fibra (KUMAR; KANDASAMI; SINGH, 2022). Adicionalmente, este tratamento tem a potencialidade de expor a celulose, polímero

que apresenta grupos hidroxilas de superfície aptos à adsorção de íons metálicos, como amplamente relatado na literatura (MATTER et al., 2024). As Figura 7c e Figura 7d apresentam imagens de MOD da loofah após 24h de tratamento alcalino, as quais revelam um aumento da rugosidade em algumas regiões e, conseqüentemente, um aumento da área superficial interna. Adicionalmente, é notável uma diminuição na intensidade de cor nas fibras, o que pode indicar a remoção parcial da lignina. Segundo a literatura, a remoção da lignina a partir de NaOH envolve a quebra das ligações químicas da lignina (hidrólise) e a solubilização (ORTEGA, 2021), observáveis através da descamação e do inchamento das fibras que é possível apreciar na figura.

Figura 7 — Microscopia óptica das amostras: a-b) Loofah *in natura*, e c-d) após 24 h de tratamento alcalino

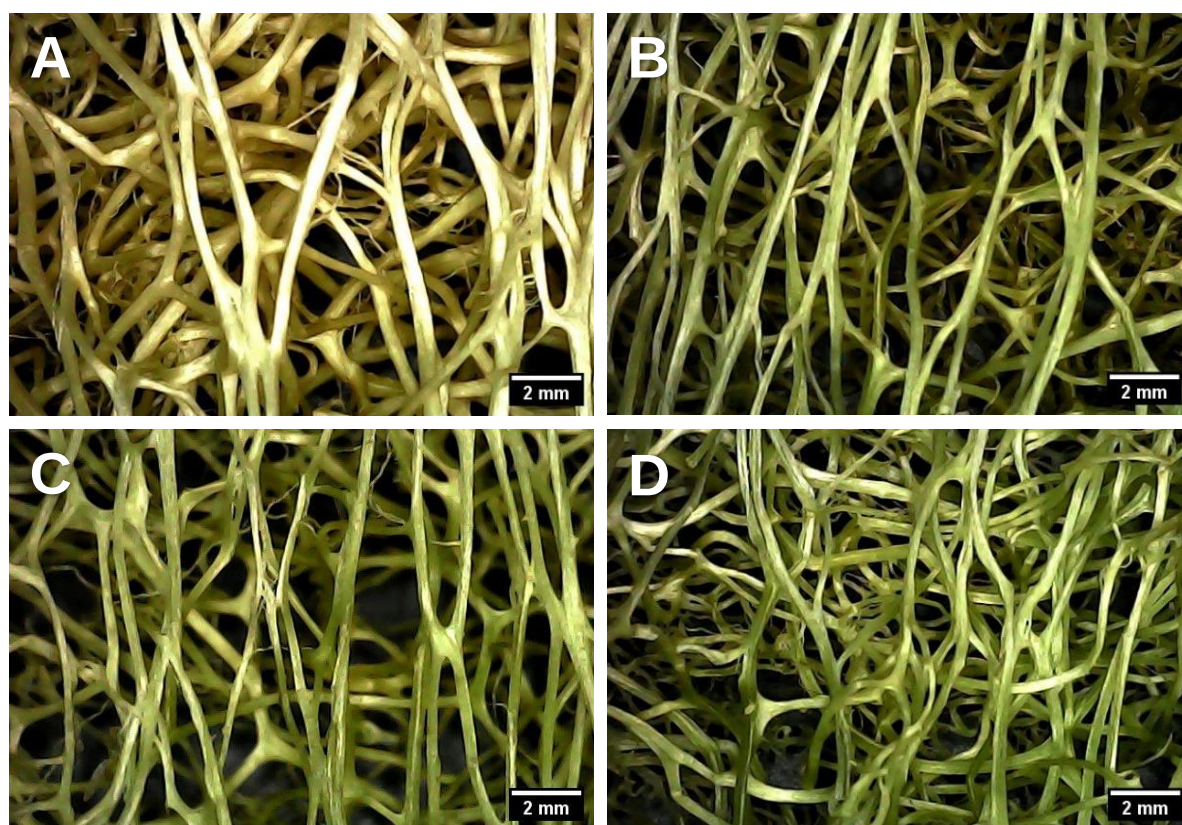


Fonte: A autora

A Figura 8 mostra imagens de MOD das fibras da loofah após 24h de imersão

em uma solução aquosa de CuSO_4 . Como pode ser observado, para todas as amostras, a coloração das fibras mudam de amarelo pálido para verde, implicando a impregnação dos íons Cu^{2+} na superfície do material. Ainda, as fibras tratadas com NaOH (Figura 8c-d) apresentaram uma maior intensidade da cor verde na superfície, o que poderia estar relacionado com uma maior concentração destes íons. Este resultado sugere que o tratamento alcalino aprimorou as propriedades adsorptivas do material (GHALI et al., 2011; TAIMUR-AL-MOBARAK et al., 2018).

Figura 8 — Microscopia óptica das amostras: a) A03, b) A04, c) A05 e d) A06 após adsorção dos íons de cobre



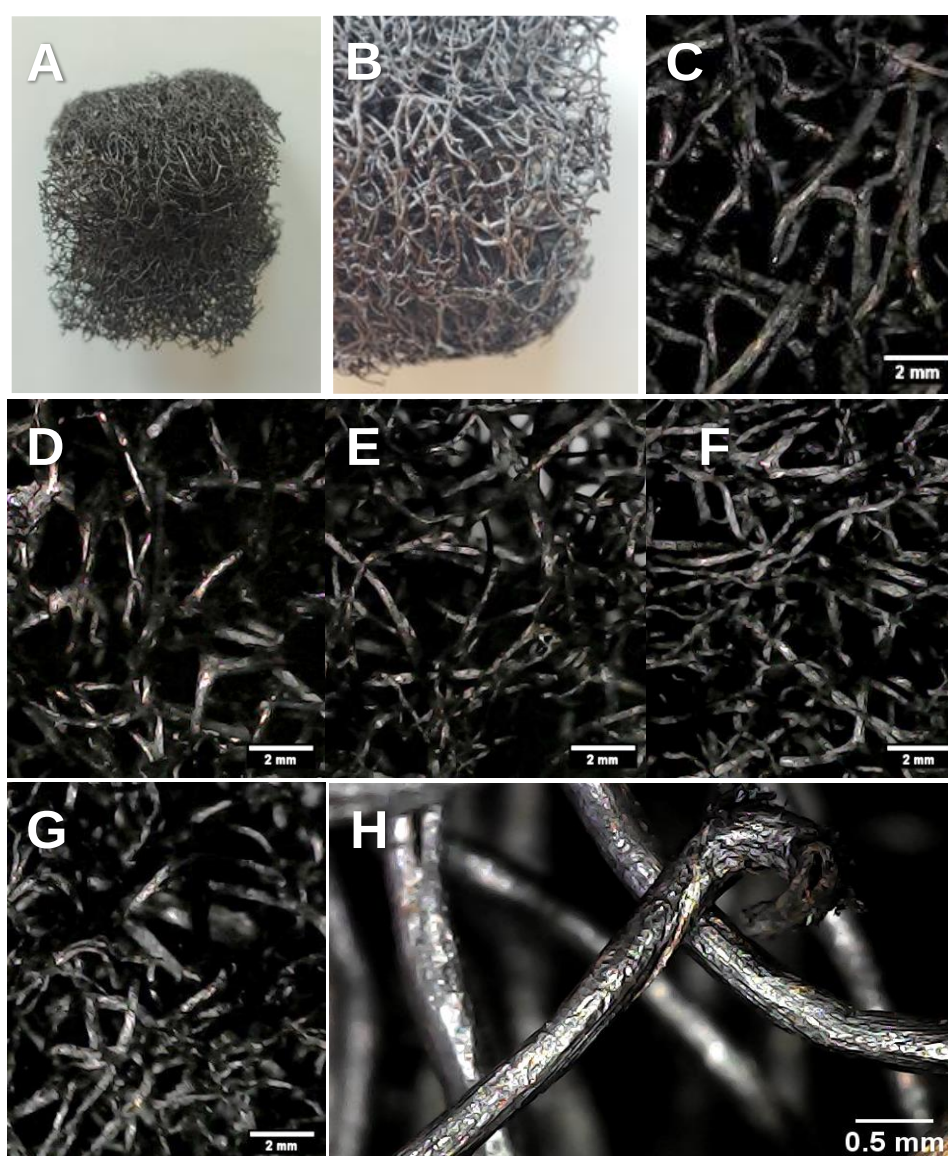
Fonte: A autora

Nota: A03 não teve alcalino, e A04, A05 e A06 tiveram um tratamento prévio com NaOH de 3h, 12h e 24 h, respectivamente.

Após a etapa de adsorção, as diferentes amostras de loofah, com e sem os íons Cu^{2+} adsorvidos, foram submetidas a um tratamento térmico a 220 °C por 90 min. Como pode ser observado na fotografia apresentada na Figura 9 (a e b), após a

carbonização, a loofah manteve as suas propriedades morfológicas a nível macroscópico. As Figura 9c-h apresentam as imagens de MOD para as diferentes amostras do compósito, revelando que a microestrutura também é mantida após a carbonização, mesmo após a inserção dos íons de cobre, o qual é benéfico para a aplicação. Na literatura, os microcanais porosos interligados favorecem ao transporte de água eficiente e a superfície cilíndrica das fibras com múltiplas camadas aumenta a área de captação de luz e reduz a refletividade (LIU et al., 2020a).

Figura 9 — Fotografias da amostra A03 (a e b) e imagens de microscopia óptica das amostras: (c e g) A03; (d) A04; (e) A05 e (f) A06 após o tratamento térmico

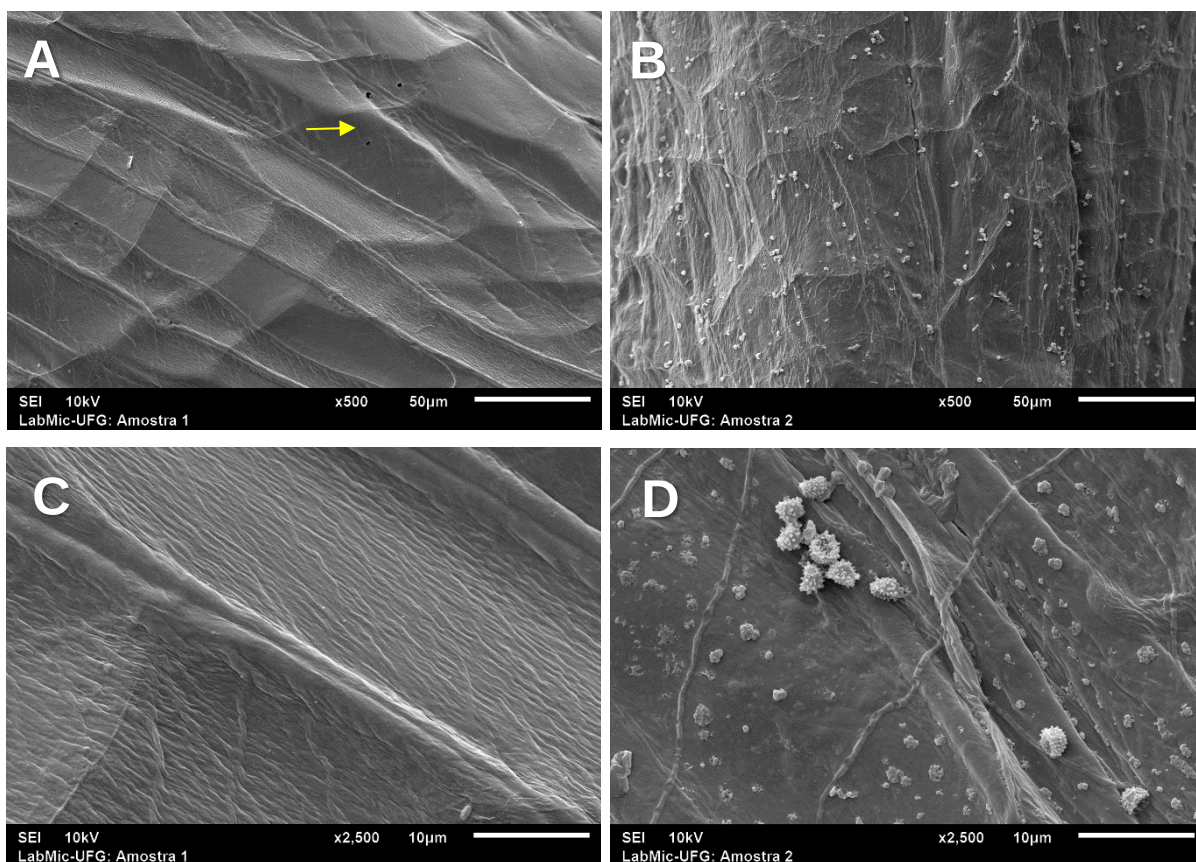


Fonte: A autora

5.1.2. *Microscopia Eletrônica de Varredura e Espectroscopia de Energia Dispersiva*

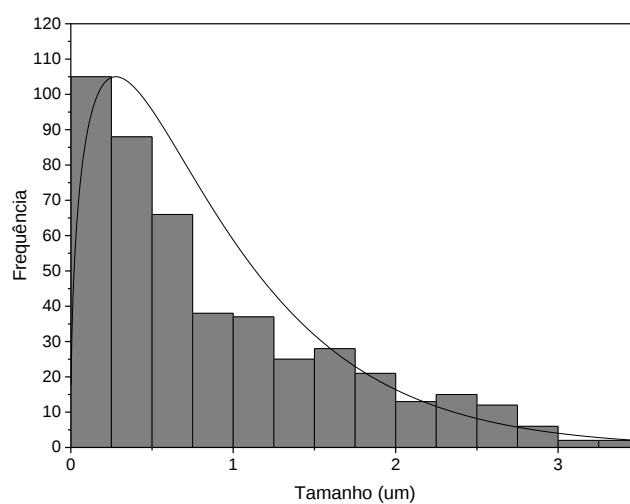
A análise por MEV revelou diferenças na morfologia superficial entre a loofah carbonizada pura (A02) e o compósito (A03). Como pode ser observado na Figura 10a, a fibra do material vegetal carbonizado apresentou uma superfície uniforme aproximadamente lisa e com ondulações por toda a extensão. Também, é possível observar a presença de alguns poros com tamanhos na ordem de 2 μm (ver seta amarela). A Figura 10c apresenta uma aproximação de 2500x para esta amostra, revelando detalhes da parede celular da fibra da loofah após a carbonização. Por outro lado, para a amostra A03, as Figuras 10b e 10d revelam o recobrimento com o óxido de cobre por toda a extensão da fibra, o que ocasiona um aumento da rugosidade superficial. A análise de tamanho de partícula (Figura 11) indica que os agregados de óxido de cobre apresentam, majoritariamente, diâmetros inferiores a 250 nm. Essa informação foi obtida a partir de um histograma ajustado por uma função gamma assimétrica ($\alpha=1,4376$ e $\Theta= 0,6319$), utilizando o software Origin. O espectro de EDS e o mapeamento elementar, disponíveis nas Figura 12 e Figura 13, respectivamente, confirmam a presença de cobre na amostra do compósito e a distribuição uniforme deste elemento por toda a fibra, corroborando os resultados observados nas imagens de MEV.

Figura 10 — Imagens de MEV para a loofah carbonizada A02 (a e c) e o compósito A03 (b e d) em diferentes magnificações. A seta em amarelo representa a localização de poros na superfície do material.



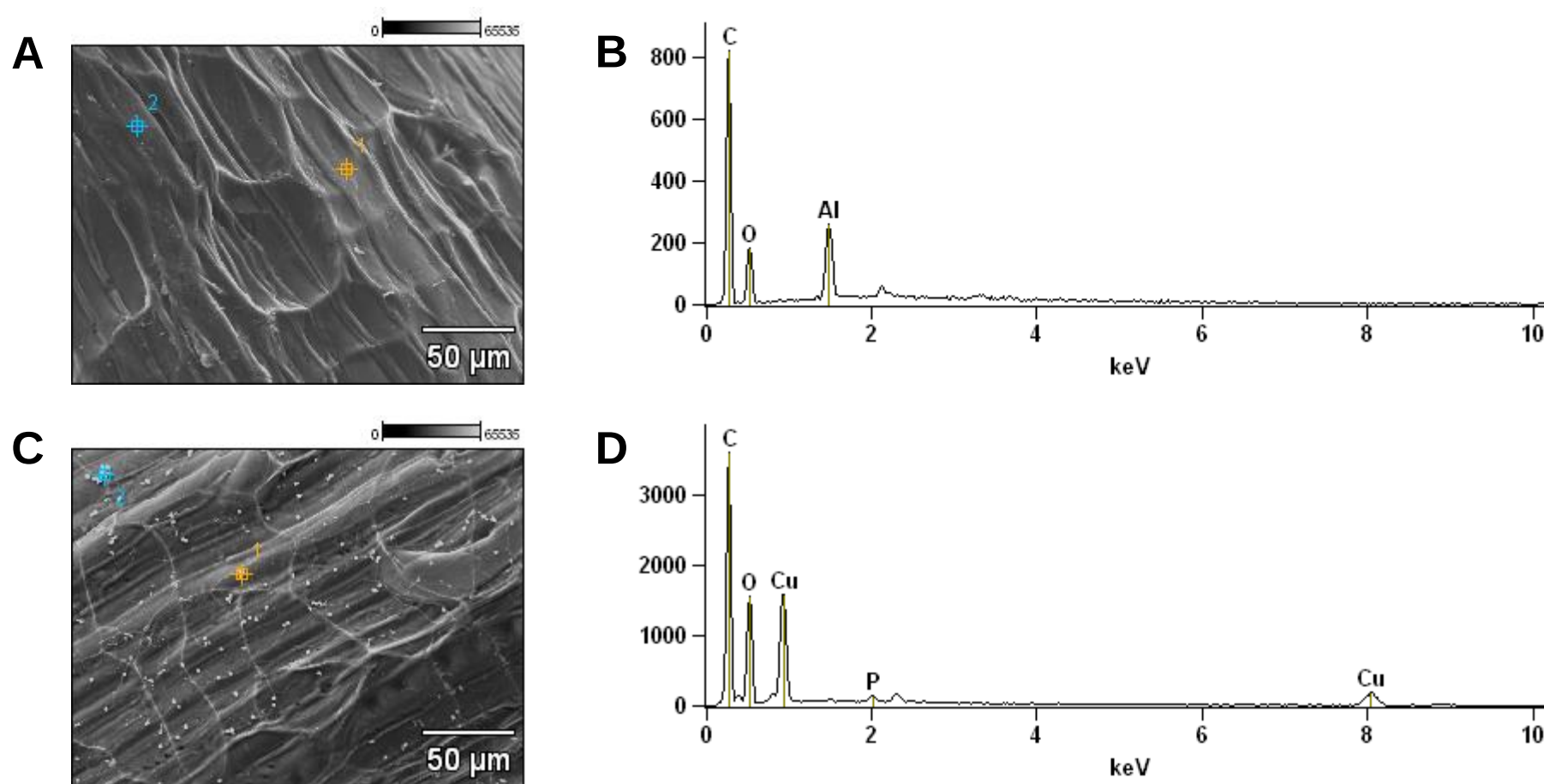
Fonte: A autora

Figura 11 — Histograma do tamanho dos agregados do compósito A03.



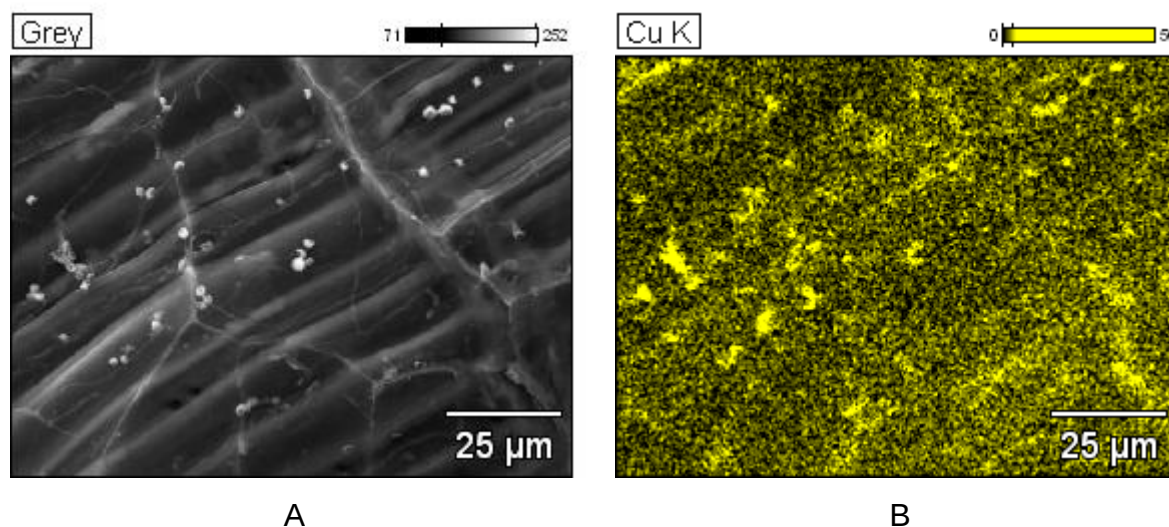
Fonte: A autora

Figura 12 — Espectro de energia dispersiva para a loofah carbonizada A02 (A e B) e o compósito A03 (C e D). A região analisada corresponde ao ponto 1 demarcado na imagem de MEV.



Fonte: A autora

Figura 13 — Mapeamento do elemento cobre para o compósito A03.

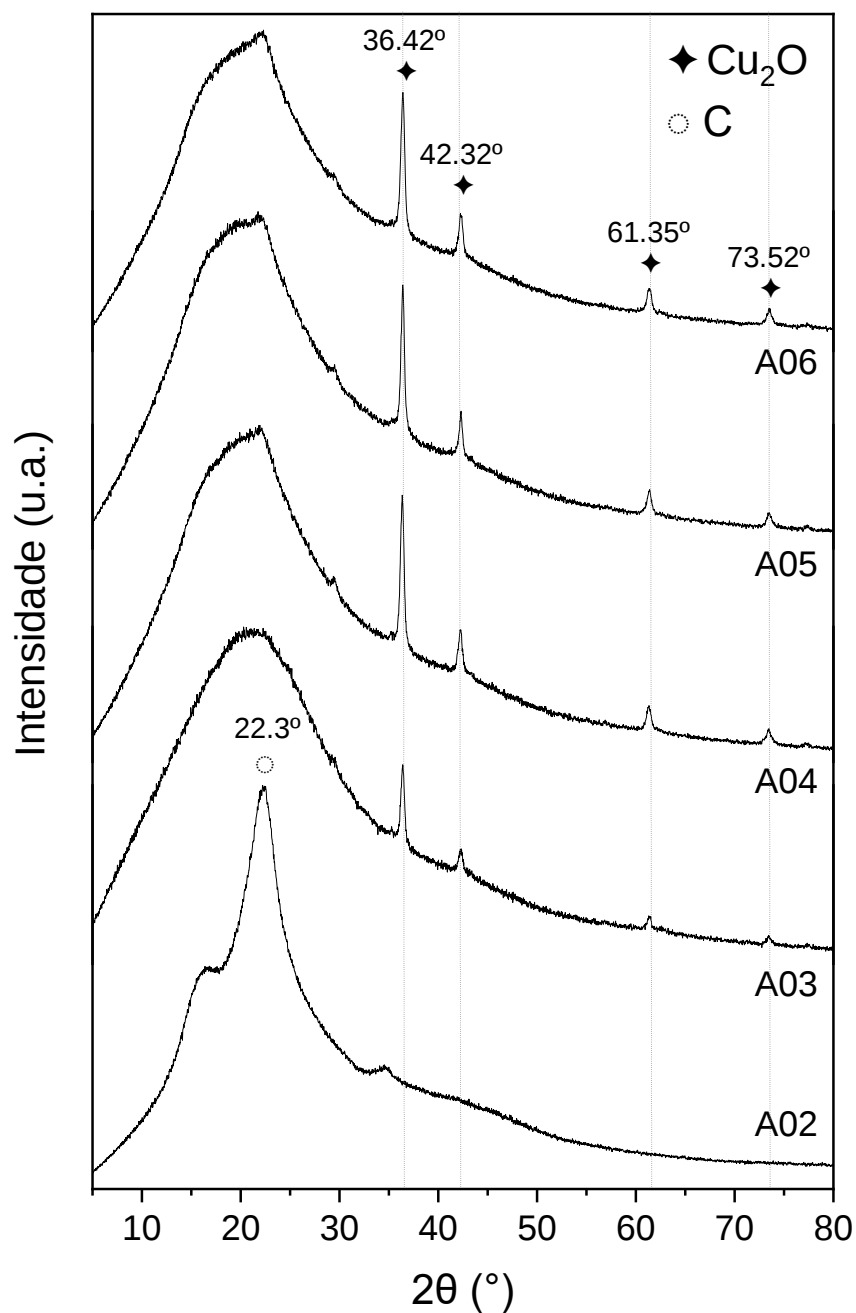


Fonte: A autora

5.1.3. Análise do estudo de Difração de Raios X

As fases cristalinas presentes nas diferentes amostras de loofah foram avaliadas pela difratometria de raios-X. Como pode ser observado na Figura 14, o padrão de difração da loofah carbonizada é marcado pela presença de um pico principal em $2\theta = 22,52^\circ$, o qual pode ser atribuído ao plano (002) de uma fase hexagonal de grafite. Este valor é bastante próximo a $2\theta = 26,60^\circ$ do *card* (WWW-MINCRYST, GRAPHITE-1800) (MINCRYST, 2009). GUIMARÃES, FROLLINI, (2009) encontraram um padrão de DRX da loofah carbonizada semelhante ao obtido, cujos picos ocorrem em $2\theta \approx 15,5^\circ, 22,2^\circ, 34,6^\circ$, (ver dados na Tabela 4). LIU *et al.*, (2020), encontraram que para a loofah carbonizada a 500°C por 30s o pico correspondente ao plano (002) ocorreu em $2\theta = 22,9^\circ$, valor semelhante ao encontrado. Para os compósitos preparados neste trabalho, além do pico em $2\theta \approx 22,0^\circ$, foram encontrados novos picos em $2\theta \approx 30^\circ, 36^\circ, 42^\circ, 61^\circ$ e 73° , os quais podem ser atribuídos aos planos (1 1 0), (1 1 1), (2 0 0), (2 2 0), (3 1 1) e (2 2 2) de estruturas cristalinas cúbicas de Cu_2O (JCPDS Card No. 01-078-2076) (BERRA *et al.*, [s.d.]) e (ICDD #01—078—2076) (LAM *et al.*, 2022).

Figura 14 — Gráfico de DRX das amostras



Fonte: A autora

Nota: A02 é a loofah carbonizada, A03 é o compósito sem tratamento alcalino, e os compósitos A04, A05 e A06 tiveram um tratamento prévio com NaOH de 3h, 12h e 24 h, respectivamente.

A determinação do tamanho do cristalito calculou-se usando a equação de Scherrer:

$$D = \frac{K \lambda}{\beta \cos(\theta)} \quad (5)$$

onde K refere-se ao fator de Scherrer, valor adimensional que geralmente está entre 0,9 e 1,0, para este trabalho foi fixado em 0,94; λ é o comprimento de onda dos raios X (1,5418 Å); β , em radianos, corresponde à largura do pico a metade da altura que foi obtida pelo método integrativo com correção de linha base (CULLITY; STOCK, 2014); e θ é o ângulo de difração Bragg (em radianos) no qual o pico de difração é observado. O tamanho do cristalito nas quatro amostras que foram submetidas à adsorção de íons está em torno dos 21 nm, como mostrado na Tabela 4. Os picos mostrados no padrão de difração são largos e de baixa intensidade, características típicas do padrão de DRX dos nanomateriais devido às dispersões elásticas e inelásticas dos cristais (LONDOÑO-RESTREPO et al., 2019). Isto sugere que o material sintetizado é um nanocompósito.

A quantificação das fases foi realizada usando a razão de intensidades e pela quantidade relativa do óxido, como descrito na equação (6).

$$I_{\text{relativa}} = \frac{I_{2\theta=36,4^\circ}}{I_{2\theta=22,3^\circ}} \quad (6)$$

onde I_{relativa} é a intensidade relativa, $I_{2\theta=36,4^\circ}$ e $I_{2\theta=22,3^\circ}$ são as intensidades das curvas onde ocorre, em média, o plano 111 do óxido de cobre e o plano 002 do carbono, respectivamente. Além disso, a cristalinidade C e a quantidade relativa do óxido de cobre $Q_{\text{Cu}_2\text{O}}$ foram estimadas através do método de deconvolução dos picos utilizando função de perfil Gaussiano com ajuste superior ao 98% dos dois picos mais representativos (DE SOUZA CAROLINO, 2017).

$$C = \left(1 - \frac{I_{\text{amorfa}}}{I_{\text{Total}}}\right) \times 100\% \quad (7)$$

$$Q_{\text{Cu}_2\text{O}} = \frac{I_{\text{Cu}_2\text{O}_{111}}}{I_{\text{Total}}} \times 100\% \quad (8)$$

Desta forma, I_{Total} é a soma das intensidades dos picos deconvoluidos das fases: amorfa ou não cristalina I_{amorfa} ; do carbono $I_{\text{C}_{002}}$ e do óxido no plano 002 $I_{\text{Cu}_2\text{O}_{111}}$.

Na Tabela 4 são apresentados os resultados da quantificação das fases. A

análise da intensidade relativa e a MOD sugerem um aumento na quantidade de óxido de cobre nos compósitos que tiveram tratamento alcalino. No entanto, a quantificação da fase Cu_2O revelou um acréscimo discreto (cerca de 1%) entre estas amostras. A cristalinidade do material está por volta de 64%, indicando que o material não é completamente cristalino, característica encontrada em materiais nanoestruturados.

Tabela 4 — Resumo de dados de DRX das amostras

Amostra	Picos [2 θ]	$L_{\text{Cu}_2\text{O}}$ nm	I_{relativa}	C %	$Q_{\text{Cu}_2\text{O}}$ %
A02	16,4°, 22,5° e 34,5°		-	-	
A03	20,3°, 36,4°, 42,3°, 61,3° e 73,5°	20,9	0,64	64,5	20,7
A04	21,9°, 29,5°, 36,3°, 42,3°, 61,3° e 73,5°	21,3	0,80	64,2	22,0
A05	22,3°, 29,4°, 36,4°, 42,2°, 61,3° e 73,5°	19,8	0,82	63,1	22,3
A06	21,8°, 29,5°, 36,4°, 42,3°, 61,4° e 73,5°	22,9	0,81	64,6	21,8

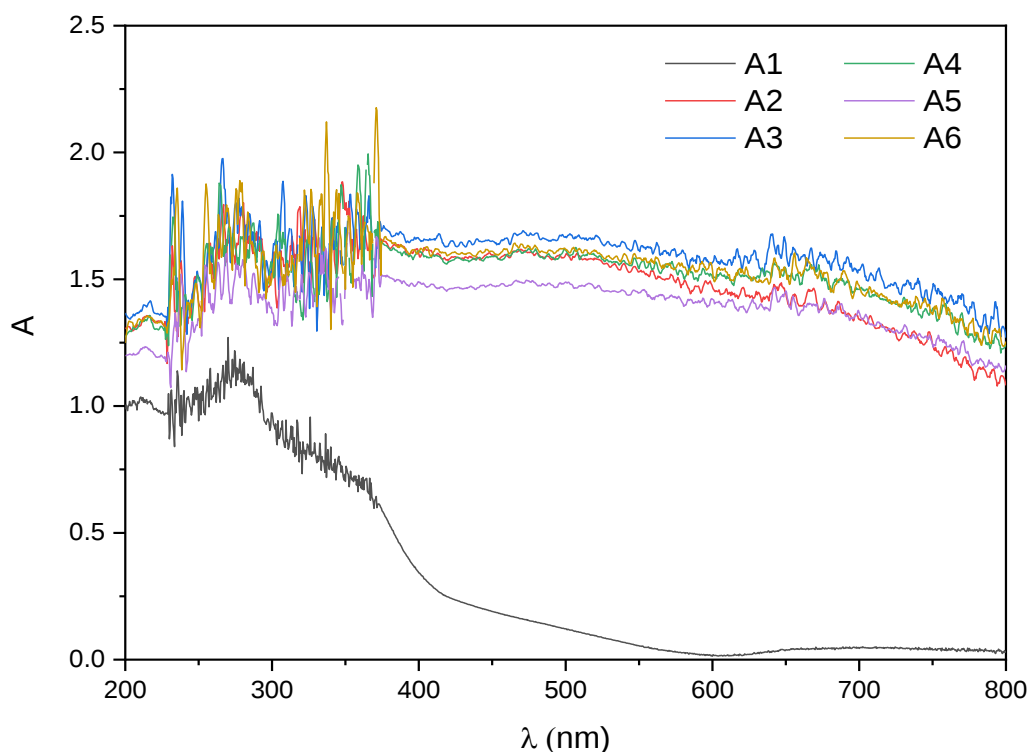
Fonte: A autora

Nota: A02 é a loofah carbonizada, A03 é o compósito sem tratamento alcalino, e os compósitos A04, A05 e A06 tiveram um tratamento prévio com NaOH de 3h, 12h e 24 h, respectivamente.

5.1.4. Estudo de UV-Vis.

A análise do espectro de absorção na região do UV-Vis é fundamental para a aplicação na dessalinização solar, uma vez que mais do que 40% da radiação solar está na faixa do visível (BHATIA, 2014). Os espectros de UV-Vis apresentados na Figura 15 revelaram diferenças significativas entre a loofah *in natura* (A01), a loofah carbonizada (A02) e os compósitos (A03, A04, A05 e A06) o que indica que a carbonização e a adição do óxido de cobre alteraram as propriedades ópticas do material original e aumentaram a banda absorção, propriedades desejáveis nos ASFs.

Figura 15 — Gráfico de UV-Vis das amostras



Fonte: A autora

Nota: A01 é a loofah in natura, A02 é a loofah carbonizada, A03: compósito sem tratamento alcalino, e os compósitos A04, A05 e A06 tiveram um tratamento prévio com NaOH de 3h, 12h e 24 h, respectivamente.

A loofah *in natura* apresentou uma alta absorvância na região UV, característica de compostos orgânicos com sistemas conjugados extensos, a diminuição gradual da absorvância a partir de 350 nm indica que o material absorve menos radiação na região visível, explicando a cor branca amarelada. Em geral, constatou-se que a carbonização elevou os valores de absorvância com uma distribuição mais uniforme da mesma, indicando um aumento na conjugação e na formação de estruturas gráficas, tal e como foi abordado na análise de DRX pela presença de um pico largo no $2\theta \approx 22,3^\circ$. A introdução de nanopartículas de Cu_2O no material carbonizado resultou em uma leve melhora na absorvância em todo o espectro. Adicionalmente, os compósitos apresentaram leves diferenças entre si. Por exemplo, o compósito A03 apresentou a maior absorvância e os compósito A06 a

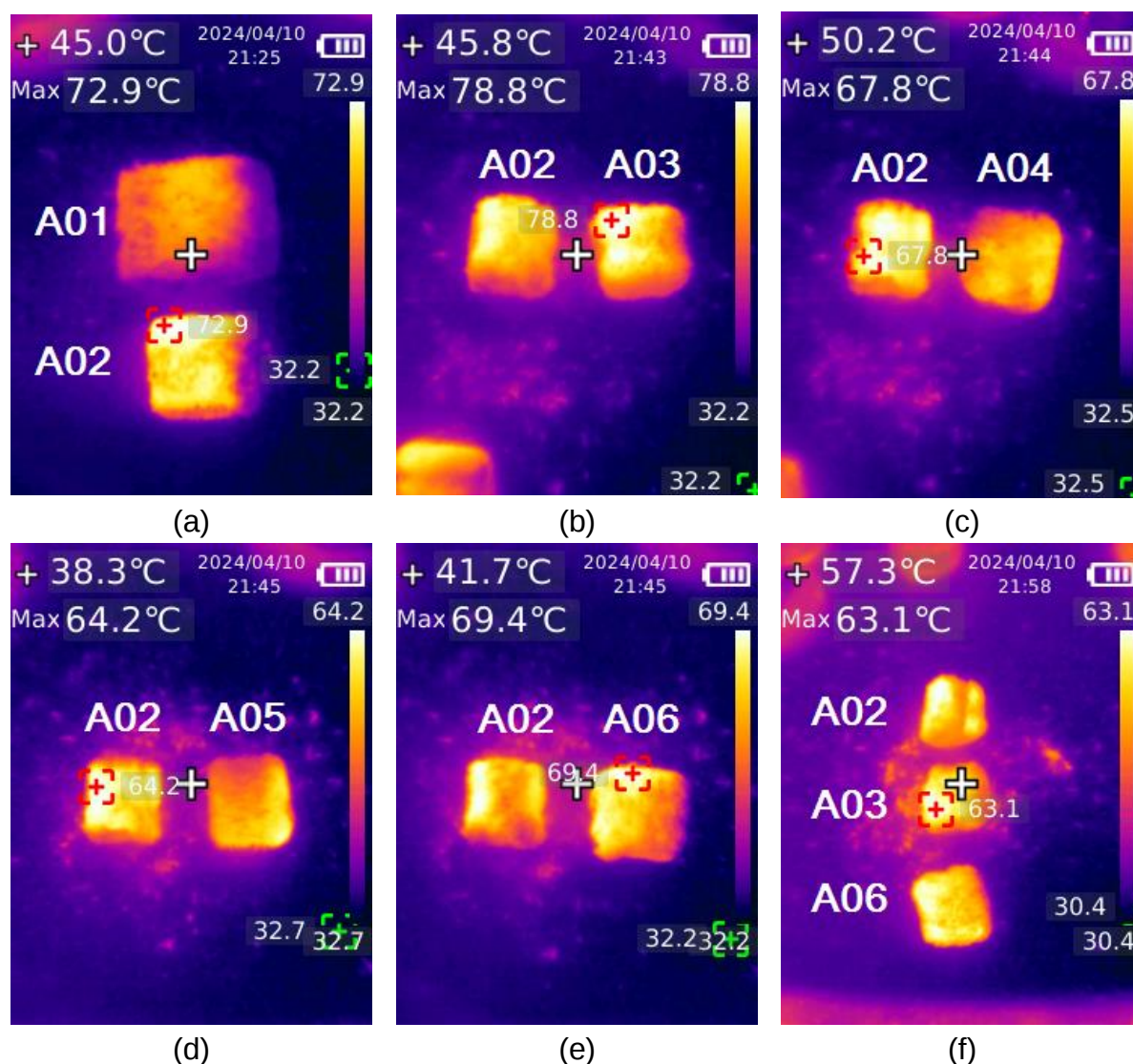
menor, o que pode afetar nas propriedades fotofísicas das amostras, como será relatado no item a seguir.

5.1.5. *Estudo de imagens termográficas*

A temperatura superficial das amostras após exposição à luz solar é um parâmetro muito importante para avaliar a potencialidade do material na aplicação, já que a temperatura superficial é um indicador da eficiência de conversão fototérmica. As imagens termográficas comparativas das diferentes amostras da loofah e dos compósitos são apresentadas na Figura 16, onde é possível observar uma escala que compreende o mínimo e máximo de temperatura para aquela região. Os locais exatos de mínimo e máximo de temperatura são apresentados por um símbolo em verde e vermelho, respectivamente.

A Figura 16a faz a comparação entre a loofah *in natura* (A01) e a loofah carbonizada (A02) sob irradiação solar. Como esperado, a carbonização aumenta a concentração de carbono (ARUNKUMAR et al., 2022), forma mais ligações carbono-carbono (LIU et al., 2020a), o que facilita a absorção de luz e o processo de conjugação (conversão fototérmica) (YIN et al., 2022). Nas Figura 16b-d, é possível observar que as amostras A03 e A06 apresentam uma maior temperatura superficial, podendo alcançar temperaturas próximas aos 80°C para a amostra A03. Na Figura 16e, é realizada uma comparação entre as amostras A02, A03 e A06, onde é possível observar que é a amostra A03 apresenta uma maior temperatura superficial. O estudo de UV-Vis mostra um resultado semelhante. Constatou-se que a diferença de temperatura entre as amostras A03 e A06 é mínima. Desta forma, a amostra A03 foi escolhida para a aplicação, uma vez que apresenta processo de síntese mais simples e mais econômico.

Figura 16 — Imagens termográficas comparativas de: a) A01 e A02; b) A02 e A03; c) A02 e A04; d) A02 e A06 e; e) A02, A03 e A06



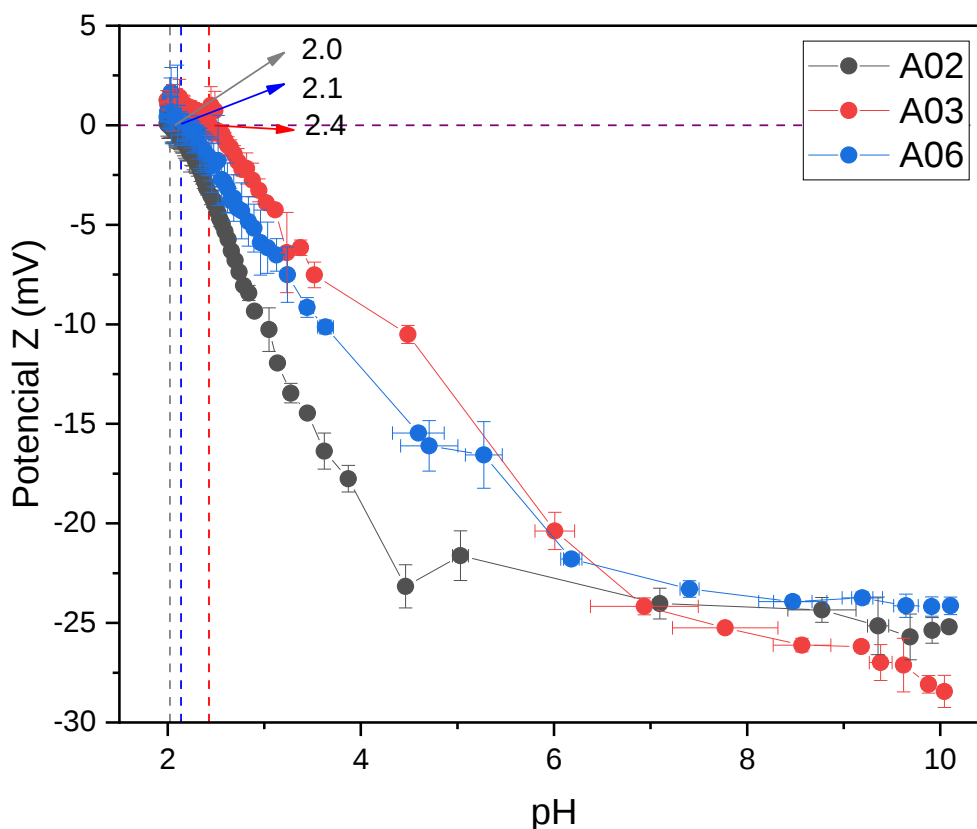
Fonte: A autora

5.1.6. Ponto de carga zero

A determinação do PCZ ajuda a prever e analisar a interação do material com os sais em diferentes valores de pH. Ele indica o valor do pH que a superfície do material é eletricamente neutra, sendo que valores de pH inferiores ao PCZ tornam a superfície positiva contribuindo para a adsorção de ânions e valores superiores ao ponto de carga zero favorecem a adsorção e precipitação de cátions via interação eletrostática (PASHAI GATABI; MILANI MOGHADDAM; GHORBANI, 2016). Como é possível observar na Figura 17, o PCZ para a amostra A02 é de 2,0, para a amostra

A03 é de 2,4 e para A06 é de 2,1. Estes valores correspondem aos obtidos para o carvão ativado, como relatado anteriormente na literatura (LIU et al., 2016),

Figura 17 — Gráfico do potencial zeta *versus* pH das amostras:



Fonte: A autora

As três amostras estudadas possuem um ponto de carga zero inferior ao pH da água do mar, que é aproximadamente 8. Isto significa que o material tem uma superfície com carga negativa e, quando submerso em água, pode atrair os cátions como o Na^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+} que estão presentes na água de mar (Tabela 1), podendo favorecer a incrustação de sais e a calcificação. A incrustação de sais depende não só da interação iônica, mas também da presença de grupos funcionais na superfície do material. Se a superfície do material tiver grupos funcionais que favorecem a hidrofobicidade ($-\text{OH}$, $\text{C}=\text{O}$, $-\text{COOH}$, $-\text{COO}^-$), a incrustação é reduzida (KANDUČ et al., 2016). Porém a carga negativa da superfície em contato com a água do mar pode modificar as propriedades da superfície ao decorrer o tempo reduzindo a eficiência do material e a durabilidade, precisando de manutenções mais frequentes. Quanto ao

processo de calcificação, as deposições de cálcio podem isolar termicamente, isto é, reduz sua condutividade térmica, característica desejável nos materiais absorvedores fototérmicos (ARUNKUMAR et al., 2022).

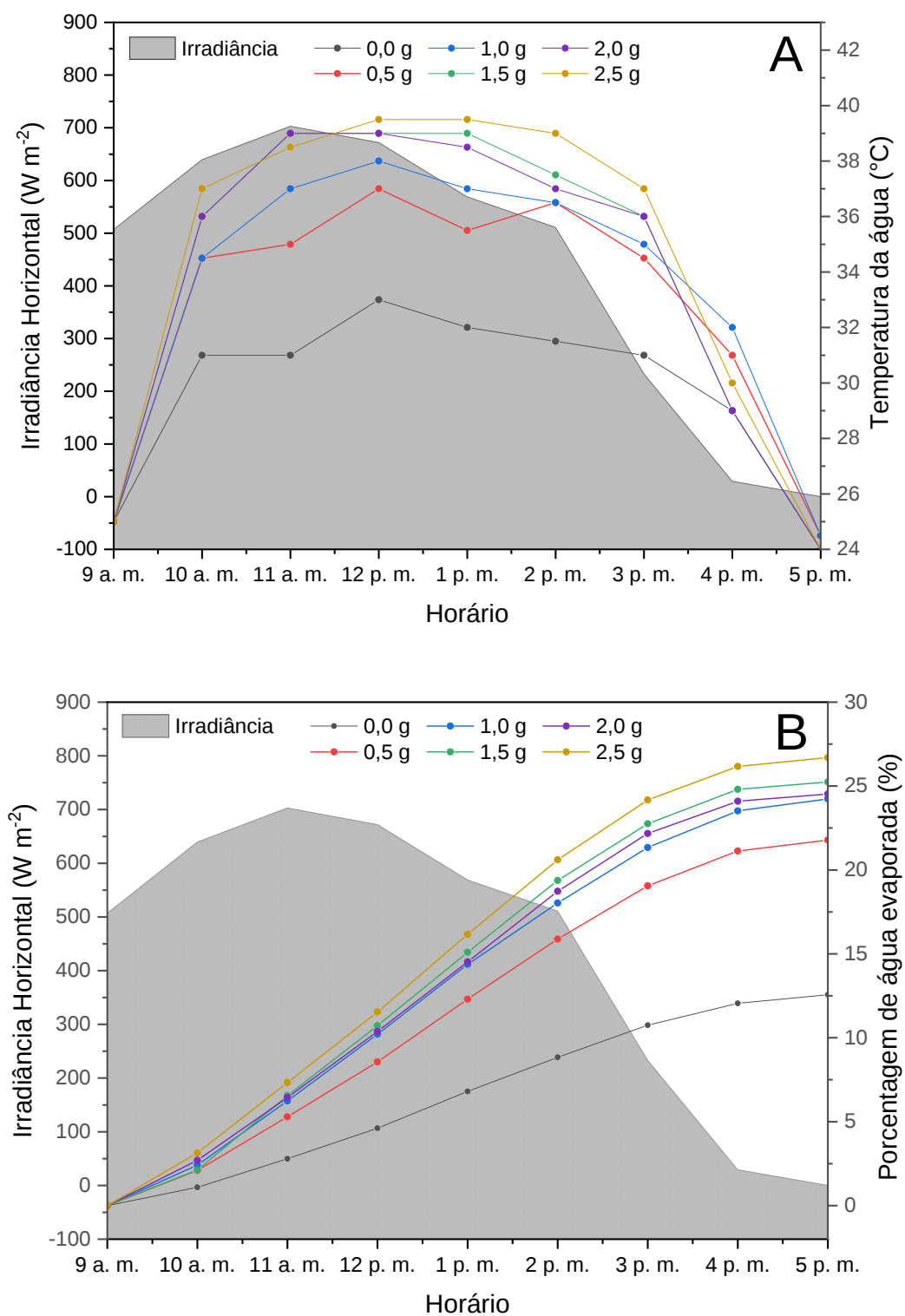
5.2. ENSAIOS DE DESSALINIZAÇÃO SOLAR

5.2.1. *Efeito da variação da Massa do compósito*

Neste trabalho, foi avaliada a eficiência de evaporação da água utilizando a luz solar como fonte de energia e absorvedores fototérmicos baseados em compósitos loofah carbonizada e óxido de cobre. Os ensaios foram realizados utilizando béqueres de vidro, 100g de água destilada e uma massa conhecida do compósito A03 (0,0 g, 0,5g, 1,0g, 1,5g, 2,0g e 2,5g). Um dos ensaios é discutido nesta seção enquanto o outro está disponível no APÊNDICE B para consulta. A Figura 18 fornece uma visão geral da relação entre a irradiância solar e a temperatura da água ao longo de um dia para os diferentes sistemas de evaporação. Como esperado, as curvas de temperatura da água acompanham de forma geral o padrão da irradiância horizontal solar. Entretanto, observa-se uma diferença discreta na temperatura da água quando os compósitos preparados neste trabalho são aplicados.

O experimento realizado na ausência de um absorvedor fototérmico (0,0 g) apresentou uma temperatura média de, aproximadamente, 30°C em todo o experimento. Para os outros sistemas, as temperaturas médias da água ficaram por volta de 34°C. Observa-se um aumento de 4°C, em média, quando os compósitos preparados neste trabalho são aplicados. O aumento da temperatura da água ocorreu devido à conversão de energia radiante em energia térmica no material absorvedor e pela transferência de energia em forma de calor entre os elementos. Essa conversão pode ser descrita como uma combinação dos mecanismos de absorção intrínseca e de conjugação devido à presença de Cu_2O e C (seção 3.4). Os sistemas com as maiores massas de MAF (2,5 g, 1,5 g e 2,0 g) apresentaram a maior temperatura máxima, atingindo 39°C.

Figura 18 — Influência da massa do composto na evaporação da água: a) irradiância solar x temperatura da água e b) irradiância solar x porcentagem de massa evaporada.



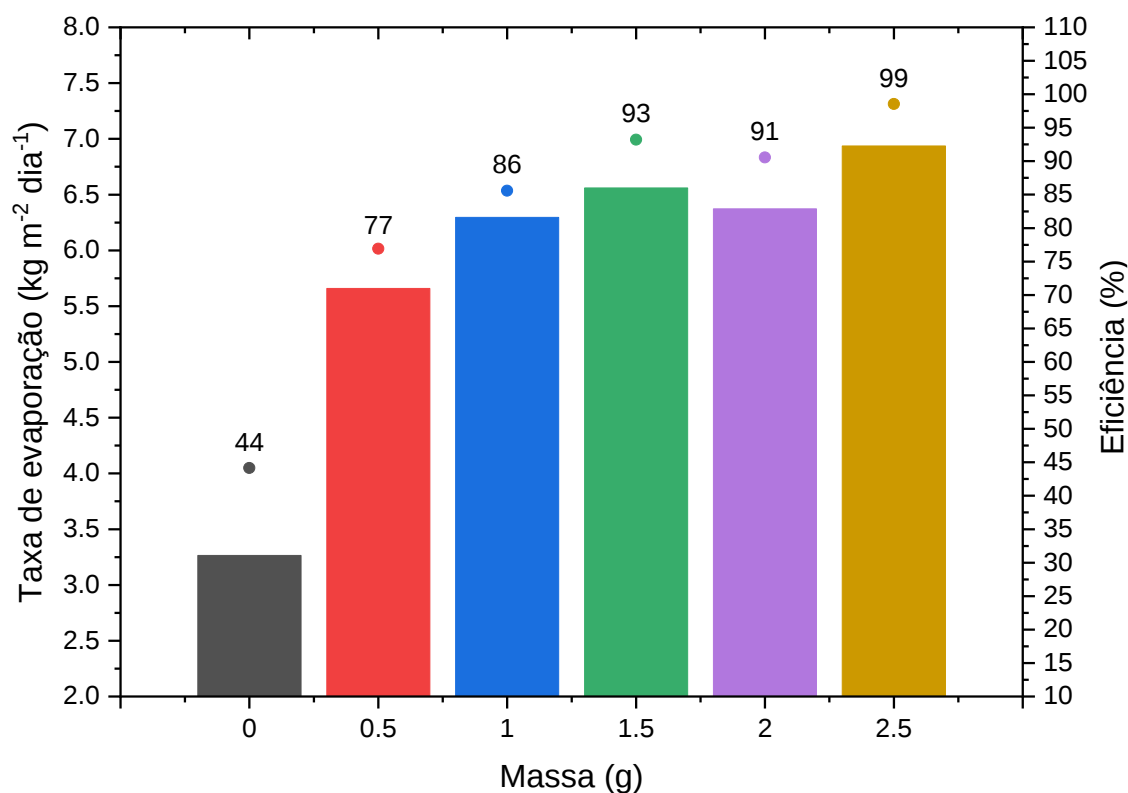
Fonte: A autora

Apesar da diferença discreta na temperatura da água entre os sistemas, a utilização do compósito aumentou de forma significativa as taxas de evaporação da água quando comparado ao ensaio na ausência do material. Como pode ser observado na Figura 18b, a porcentagem acumulada de evaporação da água ao longo do dia foi de aproximadamente 12,6% quando o experimento foi realizado na ausência do MAF. Entretanto, para os demais sistemas, a presença do compósito representou uma porcentagem de evaporação de 21,8%, 24,2%, 25,2%, 24,5% e 26,7% para os sistemas de 0,5 g, 1,0 g, 1,5 g, 2,0 g e 2,5 g de MAF, respectivamente. Com os valores obtidos neste experimento, é possível avaliar a eficiência de conversão solar-térmica (η_{S-T}) através da equação abaixo:

$$\eta_{S-T} = \dot{m} \frac{C_p \times \Delta T + \Delta H_{vap}}{c_{opt} I A_{proj}} \quad (9)$$

onde $\dot{m}$ é o fluxo mássico em kg s^{-1} , C_p o calor específico da água ($4,180 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$), ΔT é a diferença entre a temperatura média da água e a temperatura ambiente média, ΔH_{vap} é o calor latente a $100 \text{ }^\circ\text{C}$ (2257 kJ kg^{-1}), o c_{opt} o coeficiente óptico do sistema fixado em 1,06, a A_{proj} a área transversal do béquer de 250 ml e I a irradiância média horizontal (NAYAR et al., 2016; ZHOU et al., 2019). Além disso, foi calculada a taxa de evaporação ($\text{kg m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) por meio da equação (2). Na Figura 19, é possível apreciar as taxas de evaporação diárias e as eficiências de conversão fototérmica para os sistemas estudados. O uso de 0,5 g do MAF resultou em um aumento de 73% em relação ao valor de referência (utilizando apenas água). Para as melhores condições, utilizando 1,5 g, 2,0 g e 2,5 g de MAF, os aumentos foram de 110%, 104% e 122%, respectivamente, em relação ao valor de referência (branco).

Figura 19 — Influência da massa do compósito na taxa de evaporação e eficiência de conversão



Fonte: A autora

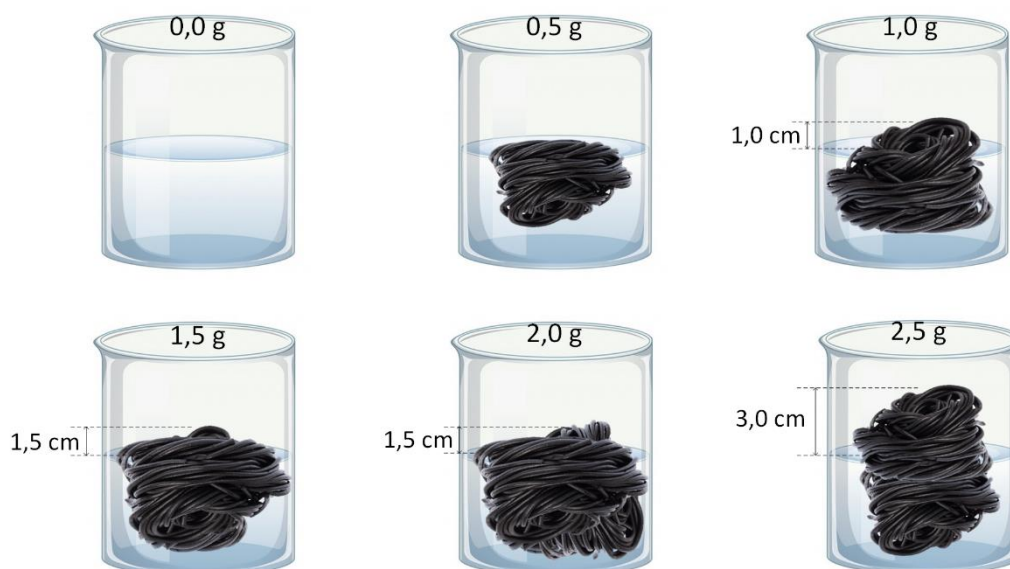
A explicação para estes resultados pode ser relacionada com a disposição do material no meio. Como pode ser observado na Figura 20, o volume da loofah permitiu uma combinação de dois mecanismos de geração de vapor amplamente reportados na literatura: a configuração volumétrica (*bulk heating*), quando o material fototérmico está disperso no meio, no nosso caso, quando as fibras estão submersas na água; e a configuração interfacial (*interfacial heating*), quando o material está na interface água-ar (IBRAHIM et al., 2021a) e as fibras tem contato direto com o ar. O material absorve a luz e a converte em calor. Esse calor é transferido a água no primeiro mecanismo por condução, gerando um aumento na temperatura da água; e no segundo mecanismo, por aquecimento localizado das gotículas da água que ascendem através das fibras por capilaridade (ARUNKUMAR et al., 2022b). No segundo caso, as perdas de calor para o meio são reduzidas, uma vez que a

condutividade térmica do ar é menor quando comparada com a da água. Tal e como podemos observar no diagrama, os evaporadores com a maior quantidade de superfície exposta apresentaram as melhores eficiências. Os resultados apresentados anteriormente sugerem que o segundo mecanismo (aquecimento interfacial), foi o principal responsável pelo aumento nas taxas de evaporação.

Figura 20 — Imagens dos evaporadores sob radiação solar direta: a) fotografia, b) diagramas



(a)



(b)

Fonte: A autora

No Quadro 6, são apresentados os resultados de eficiência de conversão e taxa de evaporação utilizando materiais semelhantes aos utilizados neste estudo. Por exemplo, Liu *et al.* aplicaram a loofah carbonizada em sistemas de geração de vapor e encontraram uma eficiência de conversão de 89,9% e uma taxa de evaporação de $1,42 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (LIU *et al.*, 2020a). Ren *et al.* prepararam nanopartículas de cobre metálico encapsuladas nas camadas grafíticas da loofah carbonizada e aplicaram sistemas de geração de vapor (REN *et al.*, 2021). Os resultados apontaram uma eficiência de conversão de 90,2% e uma taxa de evaporação de $1,54 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Em outro trabalho, Chen *et al.* reportaram eficiências que variam de 80,7%, para o nanofluido de $\text{SnO}_2\text{:Sb}$ (óxido de estanho dopado com antimônio), até 96,9%, para o compósito de CuO e $\text{SnO}_2\text{:Sb}$ (CHEN *et al.*, 2017). É importante destacar que a grande maioria dos trabalhos reportados na literatura utilizam simuladores solares de 1 sol, o que representa uma irradiância média de 1000 W m^{-2} . Neste trabalho, a eficiência de evaporação foi avaliada sob radiação solar direta, com uma irradiância global horizontal média de 550 W m^{-2} . Desta forma, nas condições testadas, o material preparado neste trabalho demonstrou resultados de evaporação superiores em comparação aos apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 — Comparação do desempenho de evaporação dos diferentes materiais.

Material	Método de preparação	Luz W m ⁻²	Eficiência de conversão (%)	Taxa de evaporação (kg m ⁻² h ⁻¹)	Ref.
Loofah carbonizada	Carbonização	1000	89,9	1,42	(LIU et al., 2020a)
Nanopartículas de cobre encapsuladas nas camadas gráficas da loofah carbonizada	Pirólise simples	1000	90,2	1,54	(REN et al., 2021)
Nanofluido compósito de CuO e óxido de estanho dopado com antimônio (ATO)	Nanofluido de CuO: método químico úmido	1000	81,3	--	(CHEN et al., 2017)
	ATO: dispersando nanopartículas de ATO em água	1000	80,7	--	
	Nanofluido compósito: ultrassonicação	1000	96,9	--	
Compósito de loofah e óxido de cobre	Adsorção de íons <i>in situ</i> com ativação térmica	550	Máx. 98,6 Min. 76,9	Max. 0,87 Min: 0,71	Este trabalho.

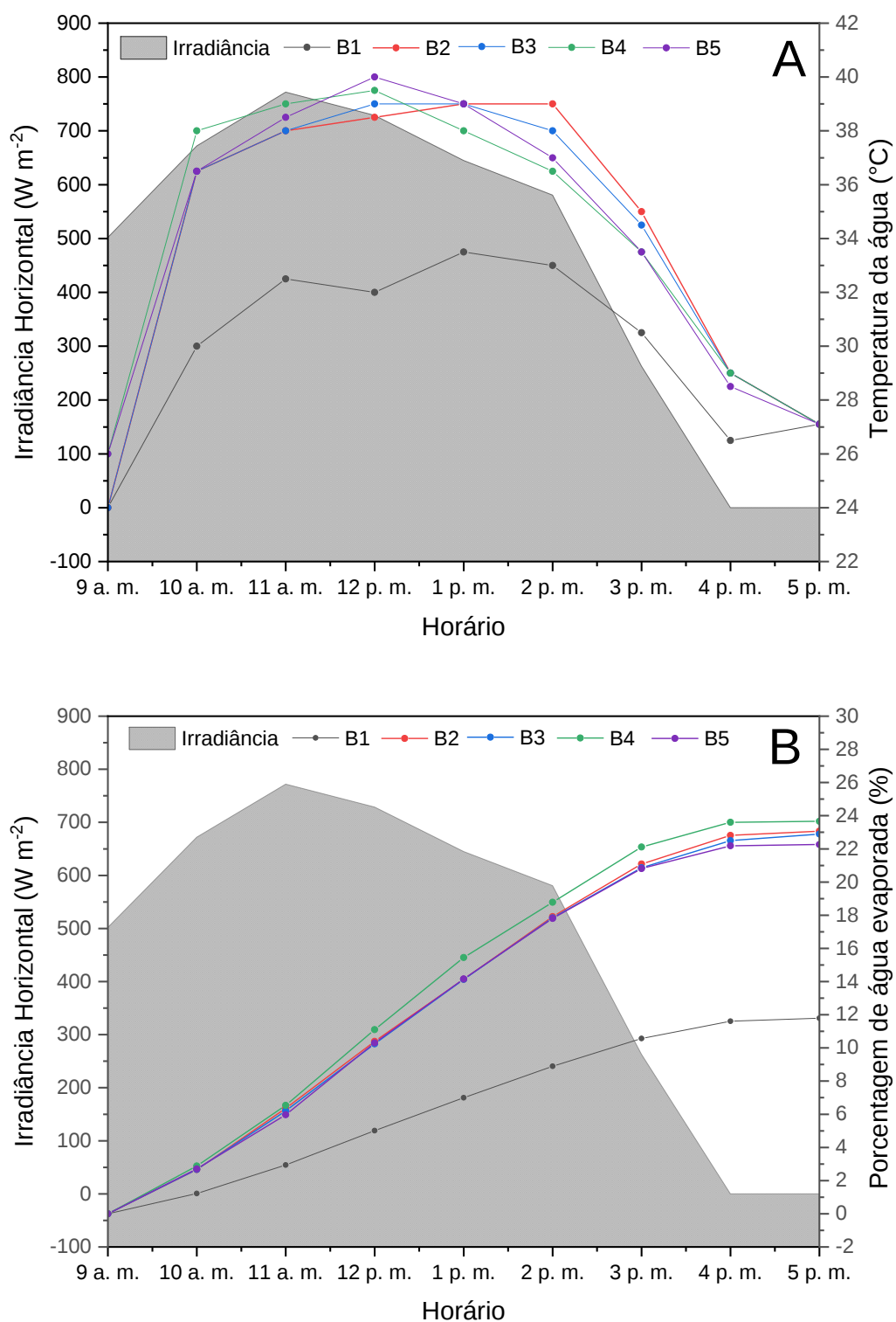
Fonte: A autora

5.2.2. *Impacto da variação da apresentação do material:*

Na segunda etapa dos ensaios de destilação solar, avaliou-se o impacto da forma do material, triturado ou mantendo-se a morfologia vegetal, sobre a eficiência de evaporação. Para este estudo, utilizou-se 1,5g da loofah carbonizada ou do compósito e 100g de água destilada. Os béqueres foram rotulados como segue: B1: apenas água; B2: com a loofah carbonizada inteira; B3: com a loofah carbonizada triturada; B4: com o compósito inteiro; e B5: com o compósito triturado. Na Figura 21, é possível observar que os absorvedores elevaram a temperatura média da água de 30°C para 34°C, representando um aumento de cerca de 13%. A porcentagem obtida também apresentou crescimento, quase dobrando em relação aos testes sem os materiais (de 12% a 24% em média). Esses resultados são similares aos observados na etapa anterior e corroborado pelos dados adicionais apresentados no APÊNDICE C, os quais correspondem à repetição do experimento em um dia diferente.

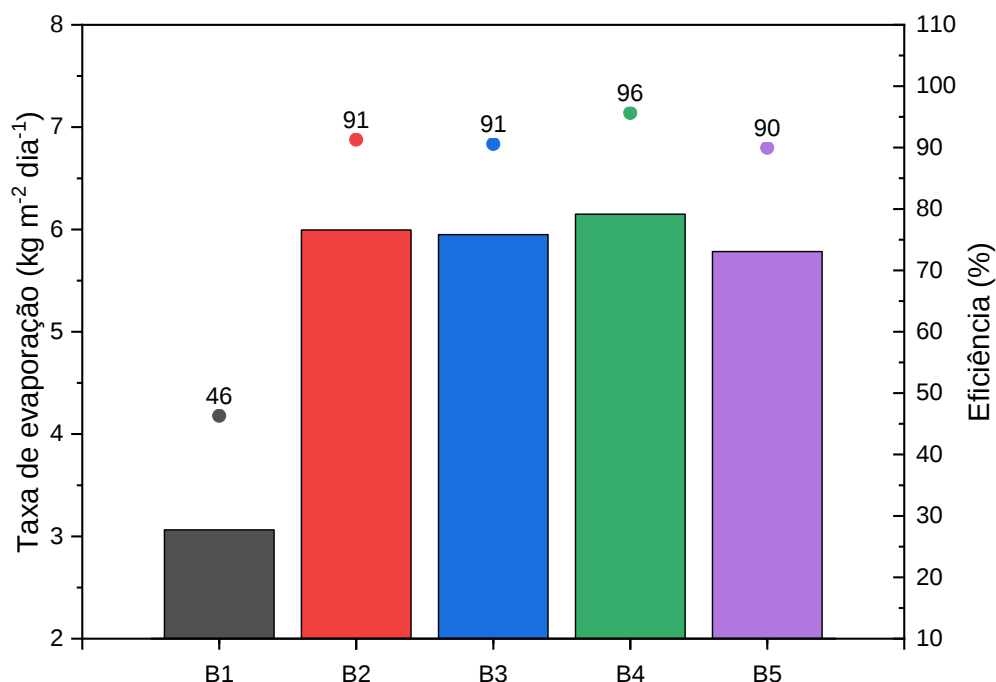
Considerando a temperatura da água, a variação entre a apresentação dos absorvedores foi pequena. No entanto, observou-se uma ligeira vantagem nos materiais inteiros em relação à eficiência de conversão (Figura 22). Isto sugere que a quantidade de superfície exposta influencia o processo de aquecimento. A estrutura porosa dos materiais inteiros, com seus canais interligados, facilita o transporte de água por capilaridade para as regiões expostas otimizando a transferência de calor do material à água. Também, é possível apreciar que quando óxido de cobre está presente no material inteiro (B4) a porcentagem de água evaporada é a maior, acompanhada por uma taxa e eficiência de evaporação mais elevadas. Em média, os ganhos de eficiência para o compósito foi, em média de 100%, e para a loofah carbonizada de 96%, isto em relação à evaporação sem MAF. Embora a diferença nos resultados entre o compósito e o material carbonizado seja pequena, o compósito apresenta características adicionais, amplamente reportadas na literatura, como uma elevada atividade fotocatalítica (remoção de corantes como azul de metileno) e propriedades antimicrobianas pela presença do óxido de cobre na sua composição, que o tornam promissor para aplicações em tratamento de água (CHOI et al., 2017; LETCHUMANAN et al., 2021).

Figura 21 — Influência da forma do absorvedor na evaporação da água: a) irradiância solar x temperatura d'água e b) irradiância solar x porcentagem de massa evaporada.



Fonte: A autora

Figura 22 — Influência da forma do absorvedor na taxa de evaporação e eficiência de conversão



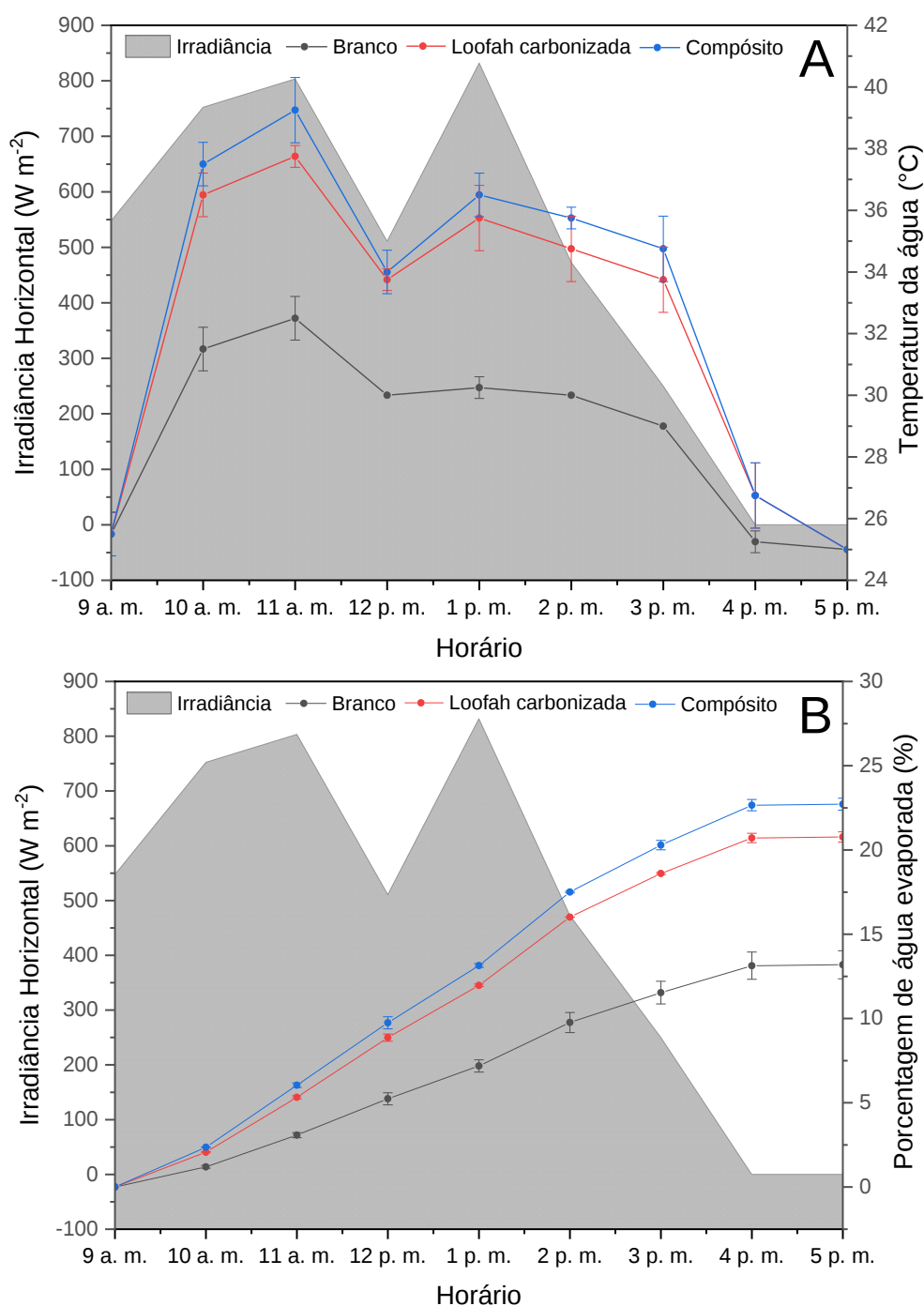
Fonte: A autora

5.2.3. Avaliação da taxa de evaporação utilizando a água do mar

Nesta etapa, avaliou-se o desempenho dos absorvedores usando água do mar. Desta forma, três sistemas foram estudados: um branco (sem material), com a loofah carbonizada inteira (1,5 g) e com o compósito inteiro (1,5 g). Os testes foram realizados no mesmo dia e considerou-se a média dos resultados. Assim como é possível observar na Figura 23a, o béquer contendo o compósito apresentou a maior temperatura média (33°C), seguido pelo material carbonizado (32°C) e pelo teste controle com apenas água do mar (29°C). A temperatura, assim como nos testes anteriores, tem um impacto discreto na taxa de evaporação devido ao aumento da pressão de vapor da água. A porcentagem de água evaporada no ensaio foi de 22,7%, 20,8% e 13,1% para o compósito, loofah carbonizada e água do mar, respectivamente (Figura 23b). Da mesma forma, o compósito apresentou a maior taxa de evaporação ($5,9 \text{ kg m}^{-2} \text{dia}^{-1}$) e eficiência de conversão fototérmica (88,1%), representando uma melhora na eficiência de 10% em relação ao material carbonizado e 81% em relação ao branco (Figura 24). Comparando-se com os resultados obtidos para a água

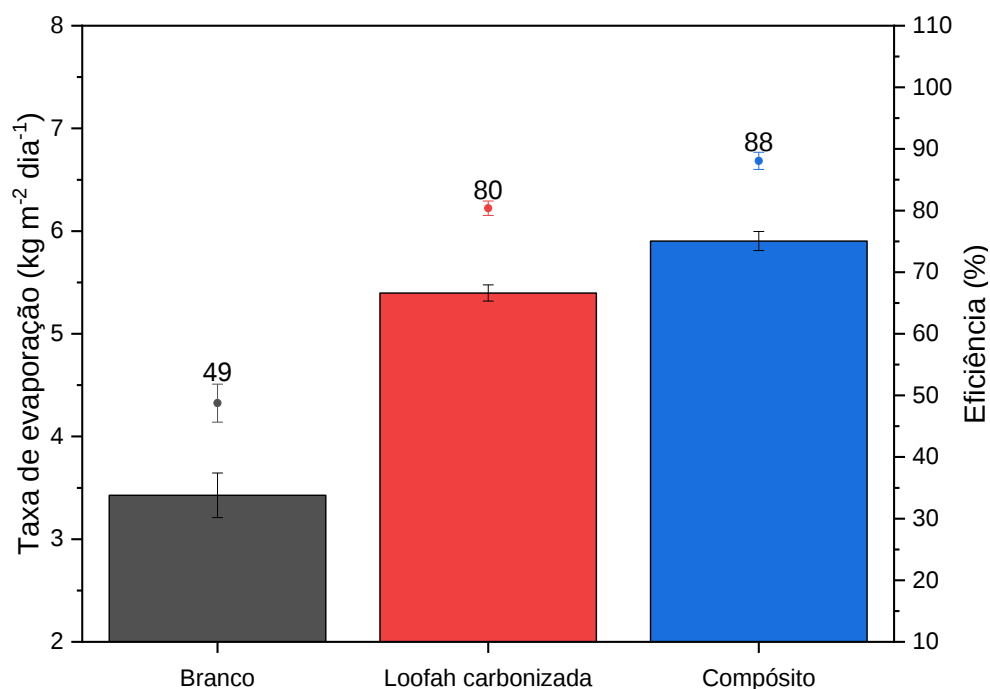
destilada, observa-se uma ligeira diminuição das taxas evaporação. Este resultado é esperado, uma vez que a presença de sais na água impacta diretamente nas propriedades coligativas da água, como a pressão de vapor.

Figura 23 — Desempenho do compósito na evaporação da água do mar: a) irradiância solar x temperatura da água e b) irradiância solar x porcentagem de massa evaporada



Fonte: A autora

Figura 24 — Taxa de evaporação e eficiência de conversão usando água do mar



Fonte: A autora

5.2.4. Determinação de eficiência de destilação

Os experimentos foram conduzidos num destilador com compósito (destilação com MAF) e sem compósito (destilação simples) durante 3 dias para cada situação. A Figura 25 ilustra o destilador solar empregado. Os resultados detalhados para cada dia são apresentados no APÊNDICE D, e o resumo dos resultados é apresentado na Tabela 5. Na destilação simples, em média, obteve-se 12 ml de água destilada, uma eficiência experimental de 3,6%, uma produtividade média de $0,25 \text{ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ e uma eficiência de recuperação de 0,61% para uma irradiância média no plano inclinado de 670 W/m^2 . Estes resultados são inferiores aos encontrados na literatura, que comumente estão em torno de 30% para a eficiência e entre 2 a $5 \text{ l m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ para a produtividade (KALIDASA MURUGAVEL et al., 2010). Uma análise detalhada das possíveis causas para este resultado pode ser encontrada no APÊNDICE E.

Figura 25 — Fotografias do destilador solar construído: a) destilação com MAF e b) destilação simples.



a



b

Fonte: A autora

Tabela 5 — Resumo dos resultados de destilação

	$V_{\text{destilado}}$ (ml)	$G_{\text{plano inclinado}}$ (W m^{-2})	η_{exp} (%)	r ($\text{l m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)	$\eta_{\text{recuperação}}$ (%)
Média destilação simples	12 ± 1	670 ± 90	$3,6 \pm 0,2$	$0,25 \pm 0,02$	$0,61 \pm 0,06$
Média destilação com MAF	24 ± 9	640 ± 80	7 ± 1	$0,5 \pm 0,2$	$1,2 \pm 0,4$

Fonte: A autora

Nota: A incerteza nas medições é devida principalmente à variação das condições climáticas.

Na destilação com MAF, o uso do compósito, em média, duplicou a produção de água em comparação à destilação simples. Obteve-se 24 ml de água destilada, uma eficiência experimental de 7%, uma produtividade média de $0,5 \text{ l m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e uma eficiência de recuperação de 1,2% para uma irradiância média no plano inclinado de 640 W/m^2 . Convém ressaltar que a intensidade da radiação solar influenciou diretamente a melhoria da eficiência do processo.

Na Tabela 6, são apresentados a comparação dos resultados para condições de irradiância semelhantes entre os dois sistemas (simples e com MAF). Para uma irradiância média de 543 W m^{-2} o uso do MAF gerou um aumento de 53,8% na eficiência e um 63,6% de produtividade. E no caso de uma irradiância média de 742 W m^{-2} a melhoria da eficiência e produtividade é acima do dobro, com 141% e 157%, respectivamente. Ditos resultados são esperados devido à presença do óxido de cobre.

Tabela 6 — Comparação dos resultados dos sistemas simples e com MAF considerando condições climáticas semelhantes:

$G_{\text{plano inclinado}}$ (W m^{-2})	Eficiência			Produtividade		
	Simples (%)	Com MAF (%)	Melhora	Simples ($\text{l m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)	Com MAF ($\text{l m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)	Melhora
543±3	3,9	6,0	53,8%	0,22	0,36	63,6%
742±2	3,6	8,7	141,7%	0,28	0,72	157,1%

Fonte: A autora

A incorporação do MAF ao sistema de destilação revelou-se altamente eficaz. Os dados experimentais indicam que a integração do MAF sintetizado neste trabalho foi o que proporcionou os maiores aumentos de produtividade dos estudos analisados, quando comparado com o sistema de referência (Quadro 7). A análise realizada demonstrou uma superioridade do material em termos de eficiência energética. No entanto, para uma avaliação mais robusta, seria necessário considerar outros fatores, como viabilidade econômica, durabilidade e consistência dos resultados. No APÊNDICE G apresenta-se uma análise preliminar de custo e algumas sugestões para a otimização do processo de síntese.

Quadro 7 — Comparação do desempenho de destilação

Estudo	Método de preparação / Descrição	Eficiência diária	Produtividade $\text{l m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$	Melhoria (%)	Referência
Membrana de grafeno espinhoso com <i>nano-dots</i> de cobre	Filtração a vácuo: 25% de polivinilideno PVDF e 75% do absorvedor	ND	5,0	117%	(XU et al., 2018)
Nanoestruturas de cobre	Esponjas de Polivil Acrílico (PVA)	32%	2,0	-8%	(ARUNKUMAR et al., 2019)
	Placas absorvedoras revestidas nanoestruturadas de CuO (NCAP)	53%	3,0	40%	
	NCAP + PVA	41%	2,3	8%	
Material de mudança de fase	Material absorvedor	ND	7,5	67%	(KABEEL; ABDELGAIED, 2016)
Materiais absorvedores	Loofah <i>in natura</i>	21,2%	2,9	36%	(RAMZY et al., 2023)
	Loofah pintada com tinta preta	24,7%	3,3	42%	
	Almofadas de lã de aço	32,7%	4,4	55%	
	Lã de aço fina	28,6%	3,7	29%	
Compósito de loofah e óxido de cobre	Adsorção de íons <i>in situ</i> com ativação térmica	8,7%	0,36 a 0,72	64% a 157%	Este trabalho

Fonte: A autora

Nota: A melhoria corresponde ao incremento de produtividade ao utilizar o material em questão (diferencia porcentual).

5.2.5. Caracterização da água

Os parâmetros físico-químicos de qualidade de água analisados foram pH, condutividade, e concentração de íons cloreto. Os resultados obtidos da caracterização da água estão resumidos na Tabela 7. Os parâmetros físico-químicos avaliados para a água do mar (pH_m , σ_m , $C_{m\text{NaCl}}$) estão dentro dos encontrados na literatura (IN-SITU, 2024; NATIONAL GEOGRAPHIC, 2022; NOAA, 2020),. As medições da água dessalinizada (pH_d , σ_d , $C_{d\text{NaCl}}$) estão dentro do padrão estabelecido na legislação vigente e também concordam com o reportado na literatura (AL-QADAMI et al., 2020; BRASIL. AGÊNCIA REGULADORA DE SANEAMENTO DE TUBARÃO, 2020; BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2005).

Tabela 7 — Caracterização da água

	Água do mar			Água dessalinizada			η_{pureza} (%)
	pH_m	σ_m (mScm^{-1})	$C_{m\text{NaCl}}$ (g l^{-1})	pH_d	σ_d (mS cm^{-1})	$C_{d\text{NaCl}}$ (g l^{-1})	
Apenas água	7,93±0,05	51,3±0,5	28,8±0,7	7,16±0,04	0,14±0,04	<0,18	99,7
Com o compósito	7,88±0,03	55,8±0,2	34±1	6,26±0,04	0,04±0,03	<0,11	99,9
Valor típico ou padrão	8,1 ⁽¹⁾	40-55 ⁽²⁾	24 ⁽³⁾ -46 ⁽⁴⁾	7 ⁽⁵⁾	0,05-0,20 ⁽⁶⁾	<0,25 ⁽⁵⁾	

Fonte: A autora com dados de: ⁽¹⁾(NOAA, 2020), ⁽²⁾(IN-SITU, 2024), ⁽³⁾ASTM D 1141 – 98 (2003), ⁽⁴⁾(NATIONAL GEOGRAPHIC, 2022), ⁽⁵⁾(BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2005), ⁽⁶⁾(BRASIL. AGÊNCIA REGULADORA DE SANEAMENTO DE TUBARÃO, 2020), Nota: Ver cálculo de concentração de NaCl no APÊNDICE F

A eficiência de pureza foi calculada por meio da diferença porcentual da condutividade da água do mar e a água dessalinizada (equação (10)). Os resultados mostram uma redução de poluentes e sais de 99,7 e 99,9% para a dessalinização simples e com MAF, respectivamente. De forma geral, a dessalinização gera água com características físico-químicas de qualidade.

$$\eta_{\text{pureza}} = \frac{\sigma_m - \sigma_d}{\sigma_m} \times 100\% \quad (10)$$

1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho foi desenvolver e caracterizar absorvedores fototérmicos baseados em um compósito de loofah e nanocristais de óxido de cobre para aplicação em dessalinização solar. A caracterização do material foi realizada utilizando técnicas de MOD, DRX, UV-Vis, MEV, PCZ e imagens termográficas. Os resultados de DRX indicaram a presença de picos correspondentes às fases grafitica e ao Cu_2O com estrutura cúbica. Dados de MOD e MEV/EDS demonstraram que a estrutura da loofah permaneceu inalterada após o tratamento térmico, com partículas de Cu_2O distribuídas uniformemente na superfície das fibras da loofah. Os compósitos apresentaram alta absorção de luz na região do UV-Vis, resultando em maior temperatura superficial após a exposição ao sol. A síntese que não utilizou NaOH apresentou a maior potencialidade, pois, além de ser mais simples, proporcionou ao compósito a maior temperatura superficial, fator crucial para a eficiência do processo de destilação solar.

Os resultados dos ensaios de evaporação demonstraram que o compósito de loofah e óxido de cobre apresentou uma eficiência de conversão solar térmica superior à da loofah carbonizada e a outros materiais reportados na literatura. As eficiências de conversão alcançadas estão entre 76,9% e 98,6% para água destilada e de aproximadamente 90% para água do mar, indicando uma influência da irradiância solar e da quantidade e superfície exposta do material utilizado. A utilização do material em sua forma integral, sem trituração, proporcionou um aumento no rendimento devido ao efeito de aquecimento interfacial. Os resultados demonstram que a utilização do compósito aumentou a eficiência e a produtividade da destilação solar, especialmente em condições de maior irradiância (742 W m^{-2}) onde obtiveram-se aumentos de 141% na produtividade e 157% na eficiência. A água dessalinizada obtida apresentou alta qualidade, com uma eficiência de purificação superior a 99,5% e pH e quantidade de sais dentro dos padrões estabelecidos para a água potável.

Por fim, os resultados indicam que combinação da estrutura porosa da loofah carbonizada com as propriedades ópticas e térmicas do Cu_2O resultou em um material de baixo custo e altamente eficiente para a conversão de energia solar em energia térmica. O compósito de loofah e óxido de cobre desenvolvido neste trabalho

apresenta um grande potencial para aplicação em dessalinização solar. Esta aplicação pode contribuir de forma social e ecológica, aumentando a quantidade de água doce produzida e reduzindo a dependência dos combustíveis fósseis, tecnologia amplamente utilizada para produzir água doce.

6.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS:

Este estudo abre caminho para pesquisas mais aprofundadas sobre absorvedores fototérmicos aplicados à dessalinização solar. Desta forma, alguns trabalhos futuros podem ser sugeridos:

1. Um estudo detalhado de otimização do projeto de destilador solar com foco na diminuição das perdas de calor durante o processo e aumento da eficiência de dessalinização;
2. A análise do ponto de carga zero indica a necessidade de avaliar a formação de incrustações e determinar a vida útil do material;
3. Análise de custos e viabilidade econômica;
4. Avaliar a versatilidade do material para outras aplicações no contexto de purificação da água. Por exemplo, a matriz de carbono pode ser utilizada para a adsorção de uma variedade de poluentes aquáticos. Já o óxido de cobre tem potencial para aplicações em fotocatalise e atividade antimicrobiana, como agente bactericida ou fungicida.

2. REFERÊNCIAS

- ALCAMO, J. et al. Global estimates of water withdrawals and availability under current and future “business-as-usual” conditions. **Hydrological Sciences Journal**, v. 48, n. 3, p. 339–348, jun. 2003.
- ALHIJAZI, M. et al. Recent Developments in Luffa Natural Fiber Composites: Review. **Sustainability**, v. 12, n. 18, p. 7683, 17 set. 2020.
- ALI, M. T.; FATH, H. E. S.; ARMSTRONG, P. R. A comprehensive techno-economical review of indirect solar desalination. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 8, p. 4187–4199, out. 2011.
- AL-MEZEINI, S. S. S. et al. Design and Experimental Studies on a Single Slope Solar Still for Water Desalination. **Water**, v. 15, n. 4, p. 704, 10 fev. 2023.
- AL-QADAMI, E. et al. Productivity Enhancement of a Double Slope Solar Still Coupled with a Solar System. **Journal of Ecological Engineering**, v. 21, n. 4, p. 255–263, 1 abr. 2020.
- ARUNKUMAR, T. et al. Effect of nano-coated CuO absorbers with PVA sponges in solar water desalting system. **Applied Thermal Engineering**, v. 148, p. 1416–1424, fev. 2019.
- ARUNKUMAR, T. et al. A review on carbonized natural green flora for solar desalination. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 158, p. 112121, abr. 2022a.
- ARUNKUMAR, T. et al. A review on carbonized natural green flora for solar desalination. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 158, p. 112121, 1 abr. 2022b.
- ASAMOAHA, R. B. et al. Synthesis and characterization of zinc and copper oxide nanoparticles and their antibacteria activity. **Results in Materials**, v. 7, p. 100099, set. 2020.
- ASHIK, U. P. M.; KUDO, S.; HAYASHI, J. An Overview of Metal Oxide Nanostructures. Em: **Synthesis of Inorganic Nanomaterials**. [s.l.] Elsevier, 2018. p. 19–57.
- AZOOZ, A. A.; YOUNIS, G. G. Effect of glass inclination angle on solar still performance. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 8, n. 3, p. 033702, 1 maio 2016.
- BERRA, D. et al. GREEN SYNTHESIS OF COPPER OXIDE NANOPARTICLES BY PHEONIX DACTYLIFERA L LEAVES EXTRACT. [s.d.].
- BHATIA, S. C. Solar radiations. Em: **Advanced Renewable Energy Systems**. [s.l.] Elsevier, 2014. p. 32–67.

BIRNBAUM, A. et al. Drivers of Future Physical Water Scarcity and Its Economic Impacts in Latin America and the Caribbean. **Earth's Future**, v. 10, n. 8, p. e2022EF002764, ago. 2022.

BRASIL. AGÊNCIA DE SERVIÇOS PÚBLICOS DE ENERGIA DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO. **Energia solar no Espírito Santo: tecnologia, aplicações e oportunidades**. Vitória, ES: Aspe, 2013.

BRASIL. AGÊNCIA REGULADORA DE SANEAMENTO DE TUBARÃO. **Nota de esclarecimento – Condutividade na água**. , 21 abr. 2020. Disponível em: <<http://agr.sc.gov.br/nota-de-esclarecimento/#:~:text=Normalmente%2C%20este%20%C3%ADndice%20%C3%A9%20de,%CE%BCS%2Fcm%20%C3%A1gua%20do%20mar.>>. Acesso em: 28 nov. 2023

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA N° 357 de 17 de março de 2005. . 2005.

BRASIL. FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE. **Manual Prático de Análise de Água**. 4. ed. Brasília: FUNASA, 2013.

BRITO, N. D. A. M. et al. Aplicação da bucha vegetal (*Luffa aegyptiaca*) para colmeia de resfriamento evaporativo no Oeste da Bahia. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 6, p. 366694–36709, 2020.

CAHN, R. W.; LIFSHIN, E. (EDS.). **Concise encyclopedia of materials characterization**. 1st ed ed. Oxford ; New York: Pergamon Press, 1993.

CAI, Y. et al. Advances in desalination technology and its environmental and economic assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 397, p. 136498, abr. 2023.

CHAUHAN, V. K. et al. A comprehensive review of direct solar desalination techniques and its advancements. **Journal of Cleaner Production**, v. 284, p. 124719, fev. 2021.

CHEN, N. et al. Complementary optical absorption and enhanced solar thermal conversion of CuO-ATO nanofluids. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 162, p. 83–92, 1 abr. 2017.

CHOI, J. et al. Preparation and characterization of graphene oxide supported Cu, Cu₂O, and CuO nanocomposites and their high photocatalytic activity for organic dye molecule. **Current Applied Physics**, v. 17, n. 2, p. 137–145, 1 fev. 2017.

CUI, X. et al. Photothermal Nanomaterials: A Powerful Light-to-Heat Converter. **Chemical Reviews**, v. 123, n. 11, p. 6891–6952, 14 jun. 2023.

CULLITY, B. D.; STOCK, S. R. **Elements of X-ray diffraction**. 3. ed., new internat. ed ed. Harlow: Pearson Education, 2014.

CURTO, D.; FRANZITTA, V.; GUERCIO, A. A Review of the Water Desalination

Technologies. **Applied Sciences**, v. 11, n. 2, p. 670, 12 jan. 2021.

DE ARAÚJO, J. C. et al. Water Scarcity Under Scenarios for Global Climate Change and Regional Development in Semiarid Northeastern Brazil. **Water International**, v. 29, n. 2, p. 209–220, jun. 2004.

DE SOUZA CAROLINO, A. **Estimativa do porcentual de cristalinidade de polímeros cristalinos derivados da anilina através dos padrões de difração de Raios X**. Manaus - AM: Universidade Federal do Amazonas (UFAM), fev. 2017.

DSILVA WINFRED RUFUSS, D. et al. Effects of nanoparticle-enhanced phase change material (NPCM) on solar still productivity. **Journal of Cleaner Production**, v. 192, p. 9–29, ago. 2018.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes / John A. Duffie, William A. Beckman**. 4th ed ed. Hoboken: John Wiley, 2013.

DZINDZIORA, A.; CIEŚLIK, J.; WOJCIECHOWSKI, J. Phase change materials and their use for energy accumulation. **MATEC Web of Conferences**, v. 338, p. 01006, 2021.

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

ELSHEIKH, A. H. et al. Applications of nanofluids in solar energy: A review of recent advances. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 3483–3502, fev. 2018.

FAO. **The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture 2021 – Systems at breaking point**. [s.l.] Food and Agriculture Organization (FAO), 2022.

GAAZ, T. et al. Properties and Applications of Polyvinyl Alcohol, Halloysite Nanotubes and Their Nanocomposites. **Molecules**, v. 20, n. 12, p. 22833–22847, 19 dez. 2015.

GHALI, L. et al. Effect of chemical modification of *Luffa cylindrica* fibers on the mechanical and hygrothermal behaviours of polyester/luffa composites. **BioResources**, v. 6, n. 4, p. 3836–3849, 9 ago. 2011.

GLEICK, P. H. **Water in crisis: a guide to the world's fresh water resources**. New York: Oxford University Press, 1993.

GUIMARÃES, J. L. et al. Characterization of banana, sugarcane bagasse and sponge gourd fibers of Brazil. **Industrial Crops and Products**, v. 30, n. 3, p. 407–415, nov. 2009.

HAMMOODI, K. A. et al. A detailed review of the factors impacting pyramid type solar still performance. **Alexandria Engineering Journal**, v. 66, p. 123–154, mar. 2023.

HANO, C.; ABBASI, B. H. Plant-Based Green Synthesis of Nanoparticles: Production, Characterization and Applications. **Biomolecules**, v. 12, n. 1, p. 31, 25 dez. 2021.

HARRIS SAMUEL, D. G. et al. Improving the yield of fresh water in conventional solar still using low cost energy storage material. **Energy Conversion and Management**, v. 112, p. 125–134, mar. 2016.

HE, W. et al. Structure development of carbon-based solar-driven water evaporation systems. **Science Bulletin**, v. 66, n. 14, p. 1472–1483, jul. 2021.

HOEKSTRA, A. Y. The water footprint of industry. Em: **Assessing and Measuring Environmental Impact and Sustainability**. [s.l.] Elsevier, 2015. p. 221–254.

IBRAHIM, I. et al. Semiconductor photothermal materials enabling efficient solar steam generation toward desalination and wastewater treatment. **Desalination**, v. 500, p. 114853, mar. 2021a.

IBRAHIM, I. et al. Biomass-based photothermal materials for interfacial solar steam generation: a review. **Materials Today Energy**, v. 21, p. 100716, set. 2021b.

IN-SITU. **What are typical conductivity values in natural environments?** Disponível em: <<https://in-situ.com/us/faq/water-quality-information/conductivity-faqs/what-are-typical-conductivity-values-in-natural-environments#:~:text=Sea%20water%3A%2040%2C000%20to%2055%2C000,Salt%20Lake%3A%20158%2C000%20%CE%BCS%2Fcm>>. Acesso em: 13 ago. 2024.

JIA, X. et al. Water Availability Footprint Addressing Water Quality. **Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems**, v. 7, n. 1, p. 72–86, mar. 2019.

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

KALIDASA MURUGAVEL, K. et al. Single basin double slope solar still with minimum basin depth and energy storing materials. **Applied Energy**, v. 87, n. 2, p. 514–523, fev. 2010.

KANDUČ, M. et al. Water-Mediated Interactions between Hydrophilic and Hydrophobic Surfaces. **Langmuir**, v. 32, n. 35, p. 8767–8782, 6 set. 2016.

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

KUMAR, N.; KANDASAMI, R.; SINGH, S. Effective utilization of natural fibres (coir and jute) for sustainable low-volume rural road construction – A critical review. **Construction and Building Materials**, v. 347, p. 128606, 12 set. 2022.

LABREN. **Irradiação Global Horizontal para o Estado do Espírito Santo**. Disponível em: <https://labren.ccst.inpe.br/atlas2_tables/ES_glo.html>. Acesso em: 1 ago. 2024.

LAM, N. H. et al. Evaluation of the Structural Deviation of Cu/Cu₂O Nanocomposite Using the X-ray Diffraction Analysis Methods. **Crystals**, v. 12, n. 4, p. 566, abr. 2022.

LETCHUMANAN, D. et al. Plant-Based Biosynthesis of Copper/Copper Oxide Nanoparticles: An Update on Their Applications in Biomedicine, Mechanisms, and Toxicity. **Biomolecules**, v. 11, n. 4, p. 564, abr. 2021.

LI, P. et al. Large-Scale Nanophotonic Solar Selective Absorbers for High-Efficiency Solar Thermal Energy Conversion. **Advanced Materials**, v. 27, n. 31, p. 4585–4591, ago. 2015.

LI, X.; ZHU, B.; ZHU, J. Graphene oxide based materials for desalination. **Carbon**, v. 146, p. 320–328, maio 2019.

LIMA, L. F. P. **Luffa. Flora e Funga do Brasil**, [s.d.]. Disponível em: <<https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB17090>>. Acesso em: 11 nov. 2023

LIN, S. Energy Efficiency of Desalination: Fundamental Insights from Intuitive Interpretation. **Environmental Science & Technology**, v. 54, n. 1, p. 76–84, 7 jan. 2020.

LIU, C. et al. An ‘antifouling’ porous loofah sponge with internal microchannels as solar absorbers and water pumpers for thermal desalination. **Journal of Materials Chemistry A**, v. 8, n. 25, p. 12323–12333, 2020a.

LIU, F. et al. Photothermal materials for efficient solar powered steam generation. **Frontiers of Chemical Science and Engineering**, v. 13, n. 4, p. 636–653, dez. 2019.

LIU, G.; LIANG, J.; ZHANG, J. Preparation of Mannitol-Modified Loofah and Its High-Efficient Adsorption of Cu(II) Ions in Aqueous Solution. **Polymers**, v. 14, n. 22, p. 4883, 12 nov. 2022.

LIU, J. et al. Surface-Carbonized Bamboos with Multilevel Functional Biostructures Deliver High Photothermal Water Evaporation Performance. **Advanced Sustainable Systems**, v. 4, n. 9, p. 2000126, 2020b.

LIU, T. et al. A comparison of the influence of flocculent and granular structure of sludge on activated carbon: preparation, characterization and application. **RSC Advances**, v. 6, n. 90, p. 87353–87361, 2016.

LONDOÑO-RESTREPO, S. M. et al. Effect of the Nano Crystal Size on the X-ray Diffraction Patterns of Biogenic Hydroxyapatite from Human, Bovine, and Porcine Bones. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 5915, 11 abr. 2019.

MATTER, E. A. et al. Enhanced adsorption of lead (II) ions onto cellulose

nanoparticles/chitosan composite based on loofah sponge: kinetic and thermodynamic studies. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 24 jun. 2024.

MINCRYST. **WWW-MINCRYST information card - GRAPHITE**. Database. Disponível em: <http://database.iem.ac.ru/mincryst/s_carta.php?GRAPHITE+1800>. Acesso em: 2 jun. 2024.

MOLDEN, D. Scarcity of water or scarcity of management? **International Journal of Water Resources Development**, v. 36, n. 2–3, p. 258–268, 3 mar. 2020.

NATIONAL GEOGRAPHIC. **Por qué el agua del mar es salada**. , 10 nov. 2022. Disponível em: <https://www.nationalgeographic.com.es/naturaleza/por-que-agua-mar-es-salada_19033>. Acesso em: 28 nov. 2023

NAYAR, K. G. et al. Thermophysical properties of seawater: A review and new correlations that include pressure dependence. **Desalination**, v. 390, p. 1–24, jul. 2016.

NOAA. **Ocean acidification**. Disponível em: <<https://www.noaa.gov/education/resource-collections/ocean-coasts/ocean-acidification>>. Acesso em: 13 ago. 2024.

OLADELE, I. O. et al. Effect of mercerization on the mechanical and thermal response of hybrid bagasse fiber/CaCO₃ reinforced polypropylene composites. **Polymer Testing**, v. 76, p. 192–198, 1 jul. 2019.

ORTEGA, J. O. **Pré-tratamento de palha de cana-de-açúcar empregando ozonólise, em meio aquoso alcalino e em solventes de baixo ponto eutético para a obtenção de açúcares fermentáveis**. São José do Rio Preto, Brasil: Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2021.

PASHAI GATABI, M.; MILANI MOGHADDAM, H.; GHORBANI, M. Point of zero charge of maghemite decorated multiwalled carbon nanotubes fabricated by chemical precipitation method. **Journal of Molecular Liquids**, v. 216, p. 117–125, 1 abr. 2016.

RAMZY, K. et al. Performance of a single slope solar still using different porous absorbing materials: an experimental approach. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 28, p. 72398–72414, 12 maio 2023.

RANE, A. V. et al. Methods for Synthesis of Nanoparticles and Fabrication of Nanocomposites. Em: **Synthesis of Inorganic Nanomaterials**. [s.l.] Elsevier, 2018. p. 121–139.

RASBAND, W.S.; IMAGEJ; NATIONAL INSTITUTES OF HEALTH, BETHESDA, MARYLAND, USA. **ImageJ**. , 2018. Disponível em: <<https://imagej.net/ij/>>

RASHEED, R. et al. Study of optimum performance of solar still process under weather conditions of Baghdad. **International Journal of Nonlinear Analysis and Applications**, v. 12, n. Special Issue, jan. 2021.

REN, L. et al. Designing Carbonized Loofah Sponge Architectures with Plasmonic Cu Nanoparticles Encapsulated in Graphitic Layers for Highly Efficient Solar Vapor Generation. **Nano Letters**, v. 21, n. 4, p. 1709–1715, 24 fev. 2021.

RIJSBERMAN, F. R. Water scarcity: Fact or fiction? **Agricultural Water Management**, v. 80, n. 1–3, p. 5–22, fev. 2006.

SAHOTA, L.; SHYAM; TIWARI, G. N. Energy matrices, enviroeconomic and exergoeconomic analysis of passive double slope solar still with water based nanofluids. **Desalination**, v. 409, p. 66–79, maio 2017.

SALEEM, H. et al. Recent advances in nanofibrous membranes: Production and applications in water treatment and desalination. **Desalination**, v. 478, p. 114178, mar. 2020.

SAMADDAR, P. et al. Synthesis of nanomaterials from various wastes and their new age applications. **Journal of Cleaner Production**, v. 197, p. 1190–1209, out. 2018.

SAWICKA-CHUDY, P. et al. Numerical analysis and optimization of $\text{Cu}_2\text{O}/\text{TiO}_2$, CuO/TiO_2 , heterojunction solar cells using SCAPS. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1033, p. 012002, maio 2018.

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

SHARSHIR, S. W. et al. Energy and exergy analysis of solar stills with micro/nano particles: A comparative study. **Energy Conversion and Management**, v. 177, p. 363–375, dez. 2018.

SIQUEIRA, G.; BRAS, J.; DUFRESNE, A. Luffa cylindrica as a lignocellulosic source of fiber, microfibrillated cellulose and cellulose nanocrystals. **Luffa as a cellulose source**, 2010.

SONG, C. et al. A Chitin/CuS composite film for efficient solar seawater desalination. **Inorganic Chemistry Communications**, v. 133, p. 108886, nov. 2021.

TAIMUR-AL-MOBARAK et al. Effect of Chemical Modifications on Surface Morphological, Structural, Mechanical, and Thermal Properties of Sponge-gourd Natural Fiber. **Fibers and Polymers**, v. 19, n. 1, p. 31–40, jan. 2018.

TZANAKAKIS, V. A.; PARANYCHIANAKIS, N. V.; ANGELAKIS, A. N. Water Supply and Water Scarcity. **Water**, v. 12, n. 9, p. 2347, 21 ago. 2020.

WEF. **Global risk report 2023: insight report**. 18. ed. [s.l.] World Economic Forum (WEF), 2023.

XIAO, G. et al. A review on solar stills for brine desalination. **Applied Energy**, v. 103, p. 642–652, mar. 2013.

XU, J. et al. Copper nanodot-embedded graphene urchins of nearly full-spectrum solar absorption and extraordinary solar desalination. **Nano Energy**, v. 53, p. 425–431, nov. 2018.

YANG, Q. et al. One-pot pyrolysis and enhanced efficient solar evaporation of Cu/Cu₂O/biochar. **Materials Today Sustainability**, v. 22, p. 100363, 1 jun. 2023.

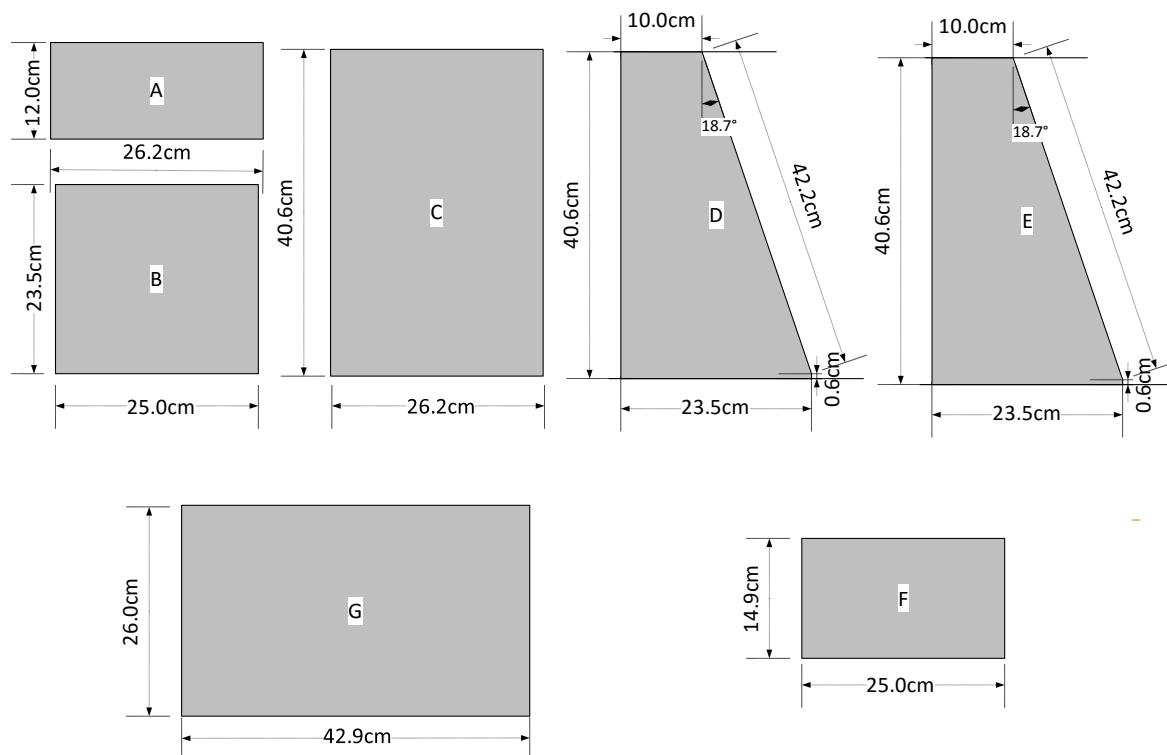
YIN, Q. et al. The emerging development of solar evaporators in materials and structures. **Chemosphere**, v. 289, p. 133210, fev. 2022.

ZHENG, C.; SPIJKERS, O. Priority of Uses in International Water Law. **Sustainability**, v. 13, n. 3, p. 1567, 2 fev. 2021.

ZHOU, J. et al. Development and Evolution of the System Structure for Highly Efficient Solar Steam Generation from Zero to Three Dimensions. **Advanced Functional Materials**, v. 29, n. 50, p. 1903255, dez. 2019.

APÊNDICE A

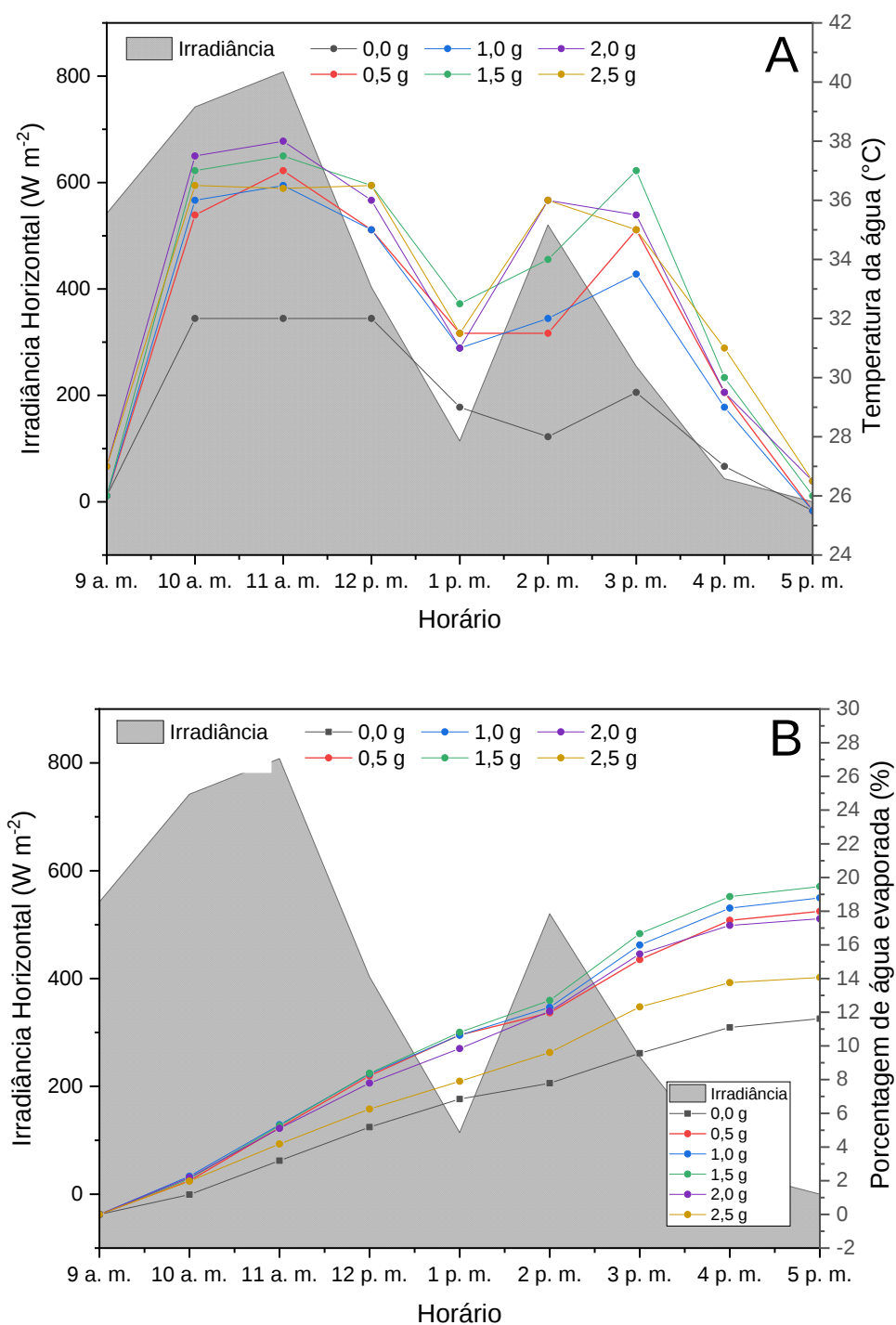
Figura 26 — Ilustração das medidas de cada peça



Fonte: A autora

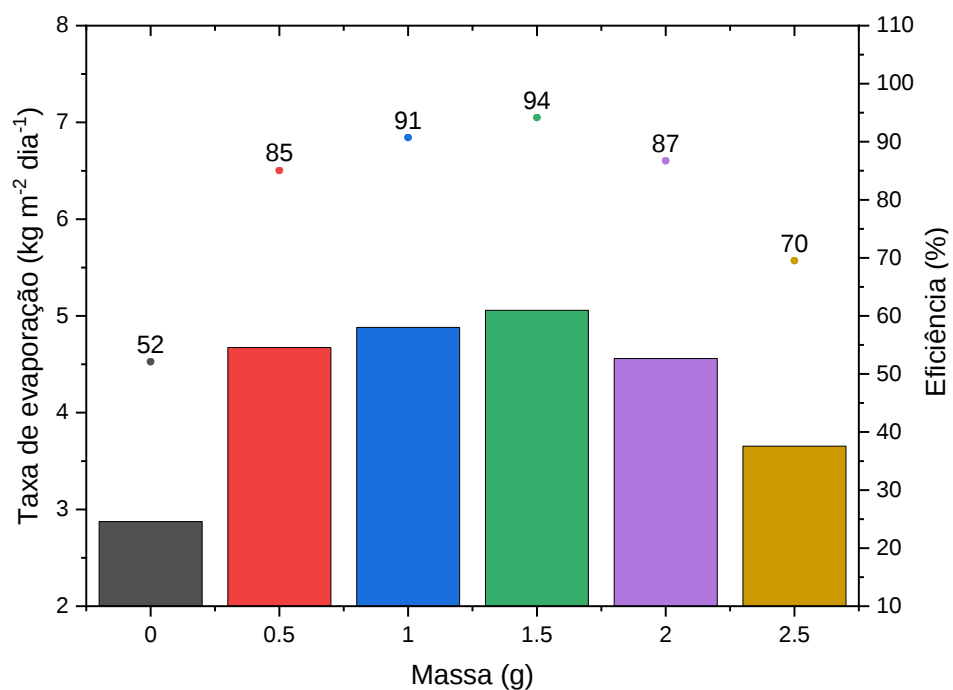
APÊNDICE B

Figura 27 — Influência da massa do compósito na evaporação da água: a) irradiância solar x temperatura da água e b) irradiância solar x porcentagem de massa evaporada.



Fonte: A autora

Figura 28 — Influência da forma do compósito na taxa de evaporação e eficiência de conversão



Fonte: A autora

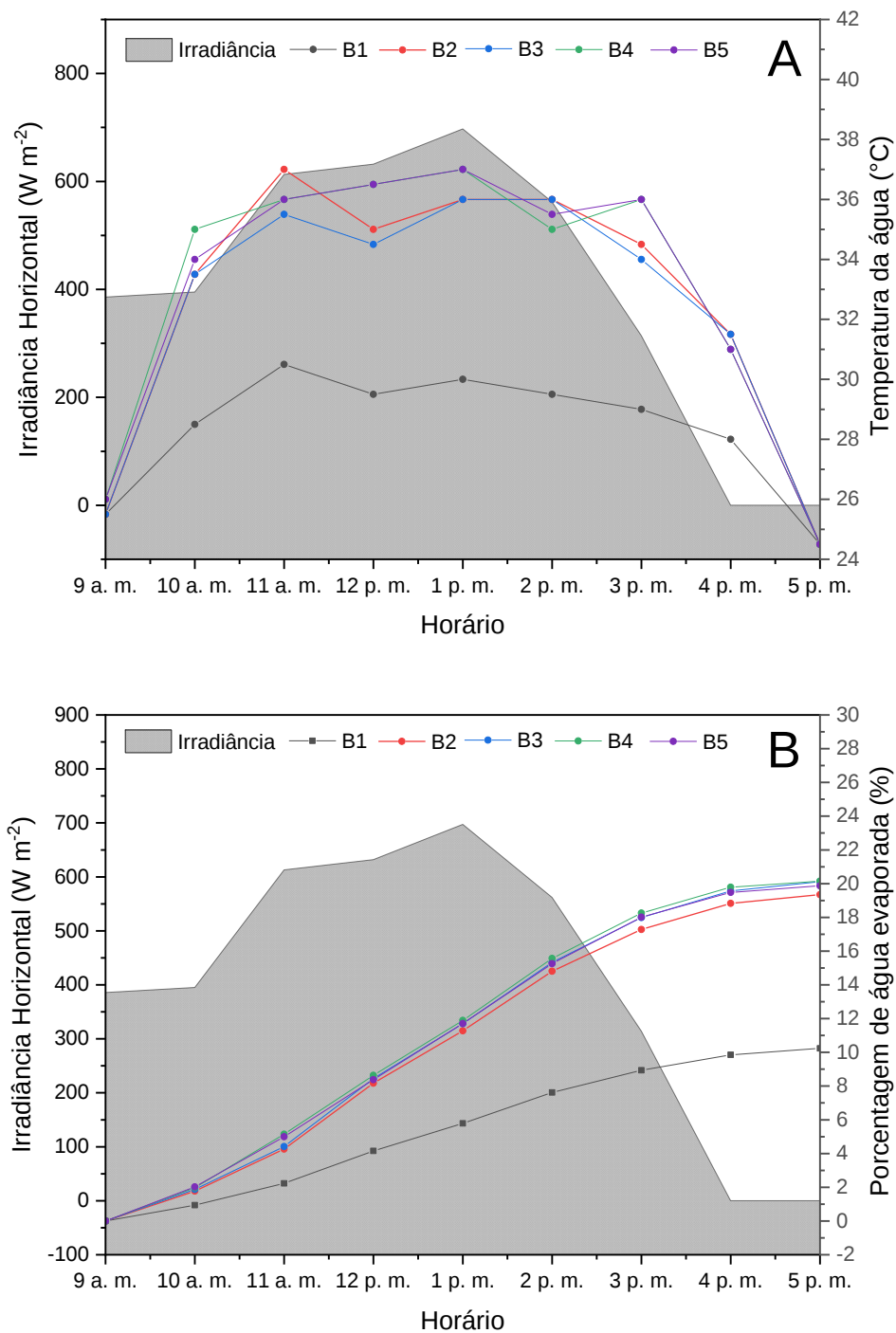
Figura 29 — Imagens dos evaporadores sob radiação solar direta: a) fotografia, b) diagramas



Fonte: A autora

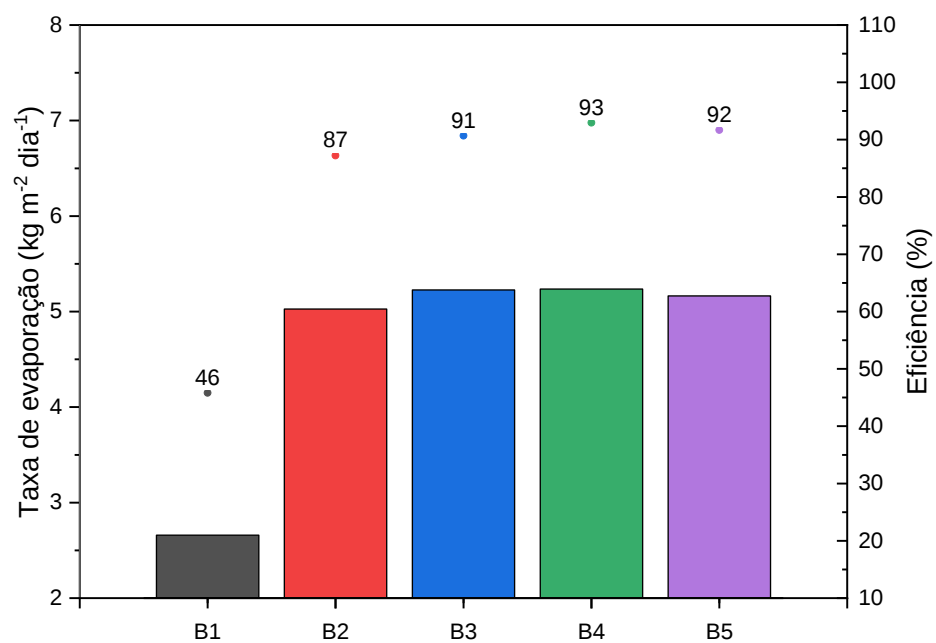
APÊNDICE C

Figura 30 — Influência da massa do compósito na evaporação da água: a) irradiância solar x temperatura da água e b) irradiância solar x porcentagem de massa evaporada.



Fonte: A autora

Figura 31 — Influência da forma do compósito na taxa de evaporação e eficiência de conversão



Fonte: A autora

APÊNDICE D

Tabela 8 — Resumo de resultados de destilação simples

	$V_{\text{destilado}}$ (ml)	$G_{\text{plano inclinado}}$ (W m ⁻²)	$T_{\text{exposição}}$ (min)	η_{exp} (%)	r (kg m ⁻² dia ⁻¹)	$\eta_{\text{recuperação}}$ (%)
25/6/2024	12,7	727	415	3,3	0,26	0,64
28/6/2024	10,5	545	385	3,9	0,22	0,53
29/6/2024	13,2	743	385	3,6	0,28	0,66
Média	12 ± 1	670 ± 90	400 ± 10	3,6 ± 0,2	0,25 ± 0,02	0,61 ± 0,06

Fonte: A autora

Tabela 9 — Resumo de resultados de destilação com MAF

	$V_{\text{destilado}}$ (ml)	$G_{\text{plano inclinado}}$ (W m ⁻²)	$T_{\text{exposição}}$ (min)	η_{exp} (%)	r (kg m ⁻² dia ⁻¹)	$\eta_{\text{recuperação}}$ (%)
23/7/2024	20,8	633	410	6,1	0.43	1.04
24/7/2024	34,6	740	410	8,7	0.72	1.73
25/7/2024	17,5	540	410	6,0	0.36	0.88
Média	24 ± 9	640 ± 80	410	7 ± 1	0,5 ± 0,2	1,2 ± 0,4

Fonte: A autora

APÊNDICE E

Na destilação simples, em média, obteve-se 12 ml de água destilada, uma eficiência experimental de 3,6%, uma produtividade média de $0,25 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e uma eficiência de recuperação de 0,61% para uma irradiância média no plano inclinado de 670 W/m^2 . Ditos resultados são muito inferiores aos encontrados na literatura, sendo que a eficiência costuma ser menor a 30% e os valores típicos de produtividade de 2 a $5 \text{ l m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (KALIDASA MURUGAVEL et al., 2010). Produtividades de designs parecidos ao empregado neste trabalho estão resumidas no Quadro 8.

Quadro 8 — Comparação do desempenho de destiladores

Design	Produtividade	Fonte
– 1 câmara $50 \text{ cm} \times 75 \text{ cm}$ – Bacia de vidro – Chapa metálica preta na base – tampa de vidro superior de 6 mm (inclinada 45°)	Valor reportado: $2,4 \text{ l m}^{-2}$	(RASHEED et al., 2021)
– 2 câmeras: $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ e $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ – Bacia de vidro – tampa de vidro superior inclinada – Tinta preta na água	$2,3 \text{ l m}^{-2}$	(XU et al., 2018)
– 2 câmeras de $25 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$. – Bacia de vidro – Tampa de vidro superior inclinada 18°	$0,3 \text{ l m}^{-2}$	Este estudo

Fonte: A autora

As possíveis causas disso podem ser devido a:

- a. uma metodologia de medição de volume inadequada: esperou-se aproximadamente 1 h após a exposição à luz solar fazer as medições de volume. A temperatura da água estava em torno dos 29°C. A medição do volume foi realizada enquanto ainda havia vapor presente o que pode ter comprometido os resultados;
- b. uma vedação inadequada: a folha de EVA não vedou completamente o sistema propiciando uma perda de vapor durante o processo, comprometendo a eficiência do destilador;
- c. uma câmara de condensação de grande dimensão: a grande dimensão da câmara de condensação poderia ter prejudicado o funcionamento devido a uma distribuição irregular de calor;
- d. inclinação do plano inclinado: apesar do ângulo ótimo do plano inclinado para aproveitar melhor a captação da radiação solar média anual ser próximo à latitude do local do destilador (como no caso dos painéis solares), esse mesmo ângulo em São Mateus poderia não estar permitindo a recuperação eficiente da água. Segundo AZOOZ e YOUNIS (2016), o ângulo ótimo de inclinação também possui relação com a tensão superficial das gotículas de água, à força de adesão entre água e vidro e às correntes de convecção no interior do destilador. O esforço feito de aumentar leve e temporariamente a inclinação do destilador para reduzir a dificuldade na recuperação de água pode não ter sido suficiente;
- e. estação do ano: os experimentos de dessalinização foram realizados nos meses de junho e julho. Este período do ano (inverno), para a cidade de São Mateus – ES, é caracterizado por temperaturas amenas e incidência frequente de precipitação pluviométrica, Segundo dados disponíveis *website* do Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (LABREN-INPE), os meses de maio, junho e julho apresentam os menores valores de irradiação global horizontal do ano (LABREN, 2023).

APÊNDICE F

Tabela 10 — Resultados determinação de Cloretos, método de Mohr

Experimento	Descrição da amostra	Volume utilizado na amostra ml	Volume gasto de AgNO ₃ ml	Concentração de sais g l ⁻¹
Branco	Água destilada	5,0	0,1	<0,11
Dessalinização simples	Água do mar	5,0	25,4	28,79
	Água dessalinizada	3,0	0,1	<0,18
Dessalinização com MAF	Água do mar	3,0	18,0	34,01
	Água dessalinizada	5,0	0,1	<0,11

Fonte: A autora

$$C_{\text{água do mar simples}} = \frac{n_{MM}}{V} = \frac{(0,09698 \frac{\text{mol}}{L} \times 25,4 \times 10^{-3} L) \times 58,44 \frac{g}{\text{mol}}}{5 \times 10^{-3} L} = 28,79 \frac{g}{L}$$

$$C_{\text{água dessalinizada simples}} = \frac{n_{MM}}{V} = \frac{(0,09698 \frac{\text{mol}}{L} \times 0,1 \times 10^{-3} L) \times 58,44 \frac{g}{\text{mol}}}{3 \text{ mL}} = 0,18 \frac{g}{L}$$

$$C_{\text{água dessalinizada com MAF}} = \frac{n_{MM}}{V} = \frac{(0,09698 \frac{\text{mol}}{L} \times 0,1 \times 10^{-3} L) \times 58,44 \frac{g}{\text{mol}}}{5 \text{ mL}}$$

$$= 0,11 \frac{g}{L}$$

APÊNDICE G

Quadro 9 — Estimação dos custos envolvidos no funcionamento e construção do sistema: destilador com MAF

Categoria	Material	Unidade	Quantidade	Preço (R/Unidade)	Custo R	Total por categoria R
Construção do destilador	Vidro	M2	0.64	234.38	150	253
	Selante	UND	1	49.9	50	
	Aplicador/pistola de silicone	UND	1	49.9	50	
	Folha EVA	UND	1	3	3	
Síntese do material	Loofah	UND	1.5	15	23	89
	Solução de sulfato	g	89.88	0.17	15	
	Energia eléctrica	kWh	75.27	0.67	51	
TOTAL						342

Fonte: A autora

Nota: O custo atrelado à energia elétrica envolve as etapas: carbonização, secagem, produção da água destilada para as soluções.

Para a otimização, recomenda-se: avaliar a possibilidade de carbonizar uma maior quantidade de material e fazer a secagem de mais amostras por vez, já que os custos de energia envolvem utilização da solução de sulfato de cobre e em especial determinar as condições para carbonizar mais quantidade do material