

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

FERNANDO CORRÊA MARSICO

**DESENVOLVIMENTO DE UM DESSALINIZADOR SOLAR CONFECCIONADO
EM ARGILA**

LONDRINA

2022

FERNANDO CORRÊA MARSICO

**DESENVOLVIMENTO DE UM DESSALINIZADOR SOLAR CONFECCIONADO EM
ARGILA**

Development of a clay solar desalination system

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Ricardo de Vasconcelos Salvo.

Coorientador: Prof. Dr. Marcio Florian.

LONDRINA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

FERNANDO CORRÊA MARSICO

**DESENVOLVIMENTO DE UM DESSALINIZADOR SOLAR CONFECCIONADO EM
ARGILA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Mecânica da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Data de aprovação: 30/Novembro/2022

Ricardo de Vasconcelos Salvo
Doutorado em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Ismael de Marchi Neto
Doutorado em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Rafael Sene de Lima
Doutorado em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LONDRINA

2022

Dedico este trabalho à todos os jovens que sonham
e acreditam em poder mudar o mundo.

AGRADECIMENTOS

Muitas pessoas pelas quais cultivo o sentimento de gratidão talvez não saibam da existência desse sentimento, mas certamente os sentem. Dentre todas que de uma forma ou outra contribuíram para a existência desse trabalho, registro em especial:

Professores Ricardo de Vasconcelos Salvo e Ismael de Marchi Neto, do Departamento Acadêmico de Engenharia Mecânica e Professores Márcio Florian e Luiz Eduardo de Carvalho, do Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais, por terem dado ouvidos e oportunidade quando esse trabalho era apenas uma vaga ideia e por terem acreditado que era possível. Obrigado por inspirarem seus alunos a serem engenheiros melhores.

Ao técnico dos Laboratórios de Materiais, Filippe Bernardino, por toda paciência, disponibilidade, assistência e apoio.

Agradeço a Stéfani Cerâmica, de Jaboticabal/SP, em especial a gerente Tássia Gavioli e aos diretores Emílio Garcia Neto e Paulo Sérgio Sechirolli da Silva, pela parceria construída e pelo fornecimento de material que foi utilizado na parte experimental.

Agradeço a minha mãe e meu pai, Noemi e Vanderlei, e minhas irmãs Vitória e Ana Laura, por todo apoio e paciência ao longo dos anos.

Agradeço aos meus colegas de república e moradia por serem minha família nesses últimos anos.

E agradeço a Deus, por se manifestar através de todas essas pessoas e oportunidades.

Não é a expansão de um, mas a coexistência de muitos é que é bela.
(SEICHO TANIGUCHI)

Você é o único representante do seu sonho na face da terra.
Se isso não fizer você correr, chapa, eu não sei o que vai.
(EMICIDA;RAEL DA RIMA, 2014)

Se o que você quer é aquilo que pensa e faz, coragem, coragem,
eu sei que você pode mais.
(RAUL SEIXAS, 1979)

RESUMO

Relatórios da Organização Mundial de Saúde estimam que até 2025, metade da população mundial estará vivendo sob estresse hídrico. Perante essa crescente crise, estudos e projetos que buscam por soluções sustentáveis para água potável têm sido cada vez mais recorrentes. Nesse contexto, o presente trabalho busca o desenvolvimento e análise de um sistema de dessalinização confeccionado em argila para uso doméstico, comparando a eficiência e produção de água entre diferentes razões de aspectos considerando três modelos geométricos diferentes. O estudo consiste na realização de experimentos em laboratório com protótipos do sistema em escala laboratorial, utilizando painéis de simulação solar como fonte de energia, termopares para controle das temperaturas e a medição da produção de água dessalinizada por tempo. Ao tratar os dados aferidos e compará-los entre si, é possível apontar qual a influência da variação dos parâmetros geométricos analisado. Os experimentos demonstram que a eficiência varia de acordo com a espessura da estrutura superior, apontando um aumento na eficiência conforme a espessura aumenta.

Palavras-chave: dessalinizador; dessalinização; solar; argila; água;

ABSTRACT

Recent reports from the World Health Organization estimate that until 2025, more than half of the world's population will be living under water stress. Before this upcoming crisis, studies and projects aiming for sustainable solutions for drinking water are becoming more recurrent. In this context, the present paper aims to develop and analyze a desalination system built out of clay for domestic use, comparing its efficiency and water production between different aspect ratios considering three different geometric models. The research consists in experimenting in lab with scaled systems prototypes, using solar simulator lamps as energy source, thermocouples for temperature control and measuring the water ratio production. Taking and confronting the data makes it possible to point out the influence of the geometric parameter variation. Results show that efficiency changes along with the thickness variation, being more efficient as the part goes thicker.

Key-words: desalinators; desalination; solar; clay; water

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema solar de geração de vapor super aquecido com montagem tipo “sanduíche”. Adaptado.....	17
Figura 2 - Evaporador solar auto-regenerativo feito em madeira carbonizada. Adaptado.....	18
Figura 3 - Dessalinizador APAC. Adaptado.....	19
Figura 4 - Dessalinizador com estruturas 3D. Adaptado.....	20
Figura 5 - Dessalinizador de único estágio com estrutura invertida. Adaptado.....	21
Figura 6 - Exemplo de configuração para experimento. Adaptado.....	22
Figura 7 - Modelo digital do protótipo em vista explodida demonstrando as cinco partes separadas.....	23
Quadro 1 - Relação das partes do sistema com função e temperatura de queima.....	24
Figura 8 - Figura resultante do teste de dilatométrica.....	24
Figura 9 - Ilustração do funcionamento do sistema.....	25
Figura 10 - (a) Confeção do molde em gesso e (b) confeção de parte do corpo de prova em argila.....	26
Figura 11 - Molde de gesso com os modelos impressos em 3D e corpos de prova confeccionados em argila.....	27
Figura 12 - Corpos de prova confeccionados em argila sinterizados e com acabamento feito.....	27
Figura 13 - Modelo 3D do protótipo com aspectos geométricos demarcados..	28

Figura 14 - Painel Simulador Solar.....	29
Figura 15 - Sistema de aquisição de dados.....	29
Figura 16 - Configuração do experimento.....	30
Figura 17 - Disposição dos tempores no sistema.....	30
Figura 18 - Temperatura e Potência x Tempo DOMO A.....	33
Figura 19 - Temperatura e Potência x Tempo DOMO B.....	34
Figura 20 - Temperatura e Potência x Tempo DOMO C.....	34
Figura 21 - Massa d'água x Tempo DOMO A.....	35
Figura 22 - Massa d'água x Tempo DOMO B.....	35
Figura 23 - Massa d'água x Tempo DOMO C.....	35
Quadro 2 - Relação das propriedades físicas por modelo.....	36
Figura 24 - Comparação entre os modelos.....	37
Figura 25 - Condição do sistema após oito horas de operação.....	39
Quadro 3 - Relação entre os sistemas apresentados no trabalho.....	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ONU Organização das Nações Unidas

OMS Organização Mundial da Saúde

ODS Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

PSS Painel Simulador Solar

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	JUSTIFICATIVA.....	13
3	OBJETIVOS.....	14
3.1	Objetivo geral.....	14
3.2	Objetivos específicos.....	14
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
4.1	Materiais orgânicos empregados em dessalinizadores.....	15
4.2	Dessalinizadores solares.....	16
4.3	Método de experimento.....	19
5	MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
5.1	Corpo de prova.....	20
5.2	Procedimentos experimentais.....	25
5.3	Métodos para análise.....	28
5.4	Etapas do experimento.....	29
	CRONOGRAMA.....	31
	REFERÊNCIAS.....	32

1 INTRODUÇÃO

A busca por soluções sustentáveis tem se tornado cada vez mais intensa ao passo que os recursos naturais tem se demonstrado cada vez mais escassos. Os últimos relatórios da Organização Mundial da Saúde (OMS) em relação ao acesso à água no mundo apontam uma forte crescente no número de pessoas vivendo sem acesso a água potável, prevendo que metade da população mundial estará vivendo em estado de estresse hídrico até 2025.(OMS, 2019).

Em resposta a isso, o número de estudos e pesquisas que procuram e exploram métodos de limpeza e tratamento de água são que cada vez mais efetivos, acessíveis, de fácil operação e que chegassem às áreas de necessidade tem crescido de forma significativa. Nesses aspectos, os sistemas de evaporação e dessalinização via energia solar são uma grande aposta, pois, além de ser uma técnica milenar utilizada desde a antiguidade nas navegações gregas e no Egito, sua operação é baseada no uso de dois recursos extremamente abundantes no planeta: água do mar e energia solar. (KALAGIROU, 2016)

Considerando a realidade prevista pelos estudos da OMS e os recursos disponíveis, busca-se desenvolver, por meio do estudo da geometria, um sistema de dessalinização solar de baixo custo, fácil reprodução e eficiência satisfatória, manufaturado em argila, material natural de fácil acesso e manuseio, com o objetivo de abastecer famílias situadas em áreas remotas e áridas, sem acesso à água potável e energia elétrica.

2 JUSTIFICATIVA

Relatórios recentes da OMS estimam que, em 2017, 2,2 bilhões de pessoas viviam em condições sem acesso seguro à água, com mais de 140 mil pessoas coletando água de fontes não tratadas, como rios, lagos e poços, estando sujeitas a inúmeras doenças e infecções. Nesses mesmos relatórios, estima-se que até 2025, metade da população mundial esteja vivendo em áreas de estresse hídrico. (OMS, 2019).

Pertinente a isso, além de ter declarado em 1977, na Conferência do Mar da Prata, o direito universal de acesso à água potável e reconhecê-lo como direito fundamental, a Organização das Nações Unidas (ONU), em 2010, através da resolução 64/292 da Assembléia Geral, estabeleceu como um dos Objetivos para Desenvolvimento Sustentável (ODS) o objetivo 6, focado em água e sanitização, e que tem como meta tratar esses problemas ou reduzi-los até 2030 através de políticas conjuntas, conferências e desenvolvimento de projetos.

Dentre os processos existentes para tratar a água, o processo de dessalinização é um dos principais e mais importantes, ao se considerar a abundância de água salina disponível nos oceanos. Dentre os diversos processos, a dessalinização por energia solar é uma das opções mais acessíveis, uma vez que a energia proveniente do Sol é considerada infinita.

Chaoji Chen et al (2019) apontam os desafios e oportunidades para a tecnologia de evaporação solar, chamando a atenção para fatores como eficiência, estabilidade de operação, custo, manutenção e acessibilidade. Apesar das diversas melhorias conquistadas nos últimos anos em razão do aumento significativo dos estudos em volta desse tema, esses fatores são muitas vezes negligenciados nos estudos, que normalmente focam em obter uma maior produção de vapor, sem pensar em sua aplicação ou viabilidade.

A escolha da argila como matéria principal do sistema vem do fato que a fabricação em cerâmica, conhecida como olaria, é uma prática milenar difundida em todo mundo, sendo de fácil prática e execução, além de ser um material de baixo custo, abundante em regiões áridas e desertas, ilhas e litorais, tipos de regiões nas quais se propõe a aplicação e uso do sistema.

3 OBJETIVOS

Nessa secção apresenta-se os objetivos do trabalho, divididos entre objetivo geral e objetivos específicos.

3.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo propor, desenvolver, analisar e comparar modelos geométricos para um sistema de dessalinização que utilize energia solar para sua operação. Busca-se um sistema de baixo custo, fácil produção e manutenção, longa vida-útil e capaz de gerar uma quantidade estimada de pelo menos cinco quilos de água potável por dia por metro quadrado (5Kg/m².dia).

3.2 Objetivos específicos

O trabalho conta com os objetivos específicos:

- 1- Idealizar, prototipar e confeccionar o modelo em escala laboratorial;
- 2- Explorar a geometria das partes do dessalinizador proposto, por meio de experimentos;
- 3- Realizar os experimentos em laboratório, com parâmetros de irradiação e temperatura local controlados;
- 4- Aferir a taxa de água coletada e eficiência para cada geometria proposta;
- 5- Comparar os resultados obtidos e identificar a geometria mais promissora entre as três espessuras.
- 6- Analisar proposta de aplicação em situação real, considerando ambiente, local e escala do sistema para tamanho real;

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Buscando facilitar o entendimento, a revisão é dividida em três itens. No primeiro, item 4.1, é realizada uma discussão sobre tipos de materiais orgânicos empregados em dessalinizadores e possíveis tratamentos térmicos que podem ser realizados nos materiais. Na sequência é apresentada de forma cronológica a revisão de uma série de artigos relativos aos avanços em dessalinizadores solares a partir de diferentes abordagens. Por último, no item 4.3, é disposta uma breve discussão a cerca de métodos experimentais.

4.1 Materiais orgânicos empregados em dessalinizadores

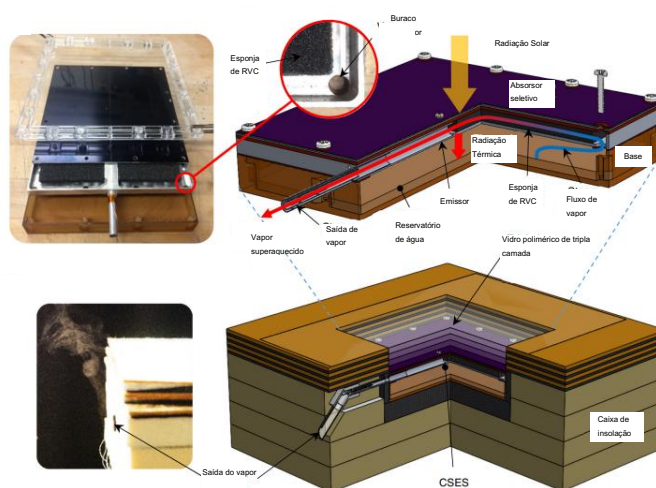
Em um artigo de revisão sobre materiais orgânicos empregados para dessalinização solar, R. Fillet et al. (2021) mencionam os diversos materiais naturais utilizados em sistemas até hoje, tanto em sua forma *in natura* quanto as possíveis modificações e tratamentos que podem ser efetuados para melhorar a eficiência do sistema. Dentre os materiais revisados, a madeira se destaca por ser a mais versátil, levando em consideração a facilidade de manuseio, baixo custo de aquisição e resposta aos tratamentos, como carbonização por queima ou pirólise. Plantas como algas e a flor de lotus assim como fungos e cogumelos também são alternativas interessantes, uma vez que a sua estrutura interna de capilares permite o fluxo de água e vapor. Outra alternativa é aproveitar a condição porosa desses materiais e transformá-los em esponjas com uma das superfície carbonizadas ou em géis, permitindo que qualquer material orgânico, como resíduos alimentícios e frutas, ou ainda outros, como a argila, possam ser empregados como sistemas de dessalinização.

Por fim, os autores ressaltam que através da biomimese, os componentes orgânicos servem de inspiração para diversos sistemas, mesmo que o material empregado seja sintético. Em todos os casos, a relação de materiais levantada pelos autores mostra que a carbonização de qualquer material aumenta significativamente a eficiência do sistema de dessalinização por aumentar a capacidade de absorção solar.

4.2 Dessalinizadores solares

Afim de abranger novas aplicações para evaporadores solares, Thomas A. Cooper et al (2018) buscam um sistema capaz de gerar vapor super-aquecido tendo como recurso apenas a energia solar. O modelo proposto, Figura 1, tem como diferencial a característica de não contato entre a água e o material fototérmico, fazendo com que o calor responsável pela evaporação seja transferido principalmente por radiação ao invés de condução térmica, comum nos modelos interfaciais. A justificativa para tal característica geométrica é baseada na capacidade que a água tem de absorver os espectros luminosos, demonstrando que há uma absorção maior dos espectros infravermelhos. Para atingir o estado de vapor super-aquecido, o design do sistema conta com uma montagem tipo sanduíche, onde os tubos de passagem de vapor são envoltos pelo material que absorve a energia solar por cima e o material capaz de irradiar calor na parte de baixo, fazendo com que o vapor dentro dos tubos aproveite o calor transferido entre as duas camadas, atingindo temperaturas acima de 130 °C.

Figura 1 - Sistema solar de geração de vapor super aquecido com montagem tipo “sanduíche”



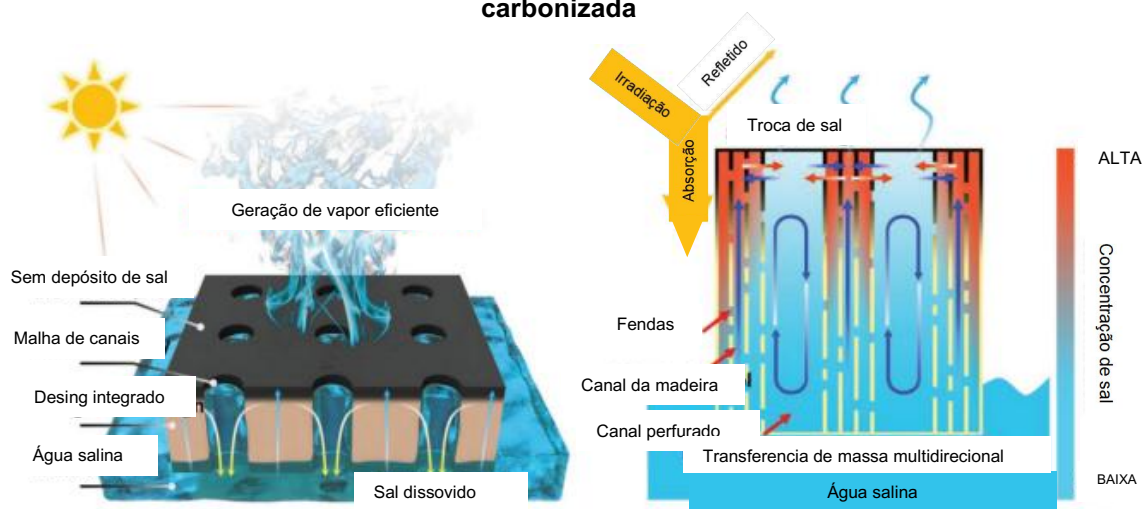
Fonte: Cooper et al (2018). Adaptado.

Neste estudo foram realizados experimentos no laboratório e um experimento ao ar livre, utilizando um modelo em escala, além de um modelo numérico para a transferência de calor e comportamento geral do sistema, permitindo prever a eficiência e quantidade de vapor gerado pelo sistema ao alterar

as propriedades do sistema. Os experimentos conduzidos envolveram variações de incidência solar e concentração salina, com o objetivo de avaliar a eficiência, medida a partir da razão entre quantidade de energia fornecida e quantidade de vapor gerado. O sistema “sem contato” atingiu a eficiência de 24,6% para 1 sol (1 kW m^{-2}) e máxima de 38,8% na marca de 1,5 sóis. A média de produção de vapor superaquecido aferida foi de $0,1041 \text{ Kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ para a condição de 1 sol.

Yudi Kuang et al (2019) propõem um evaporador solar auto-regenerativo baseado em um design com uma malha de canais distribuídos pela área de um bloco de madeira com a superfície carbonizada. O modelo proposto, Figura 2 alcançou a produção de $1,04 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, uma eficiência estável de 75%, medida a partir da quantidade de vapor gerado em razão da quantidade de energia recebida, para uma alta concentração de NaCl (20%), longo período de operação (100 hrs) e incidência de radiação de 1 sol (1 kW m^{-2}).

Figura 2 - Evaporador solar auto-regenerativo feito em madeira carbonizada



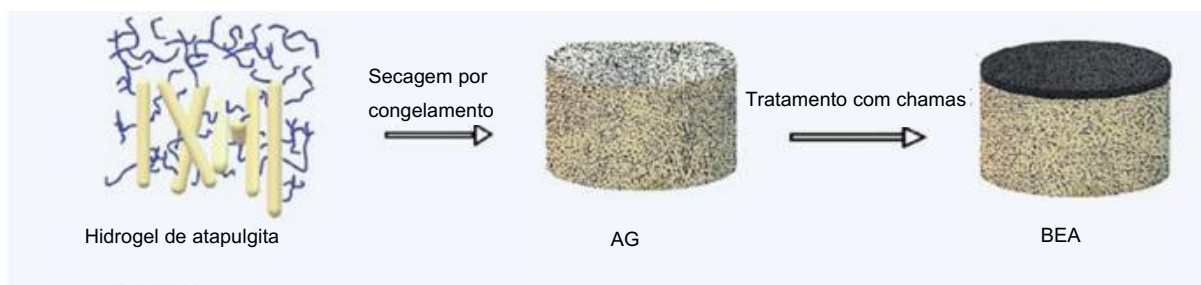
Fonte: Kuang et al (2019). Adaptado

Os autores justificam o design pelos múltiplos fluxos de massa dentro do aparato ocasionados pela interação entre os canais feitos artificialmente, da ordem de milímetros, com os canais naturais formados pelas fibras da madeira, da ordem dos micrometros, além da carbonização da superfície para aumentar a absorção da energia fototérmica. Afim de demonstrar a aplicabilidade e universalidade do design proposto, os autores efetuaram o mesmo experimento com outros materiais, comparando os modelos sem a perfuração artificial com os perfurados e, em outra

situação, usando uma solução de ácido octanóico, para simular ambiente gordurosos e poluídos. Com isso, os autores apontam o impacto da característica anti foliculante (*antifouling*) proferida pelos canais, atingindo excelentes resultados para condições extremas de operação (longos períodos em alta concentração salina).

Buscando explorar o uso de materiais orgânicos não convencionais em sistemas de dessalinização, Juan Jia et al (2019) demonstraram a criação de um novo compósito usando argilas como base. O compósito é feito a partir da polimerização da *acrilamida* na presença da *atapulgita*, utilizando N,N'-Metileno bisacrilamida como liga entre as duas argilas. O compósito é transformado em uma esponja sólida e tem uma camada superficial carbonizada por chama, Fig. 3. O sistema nomeado como APAC (*attapulgite poly acrylamide composite*) se destaca pelas características naturais da argila como os tamanhos de poros, alta estabilidade térmica, baixa condução térmica e baixa densidade aparente, além de atingir a eficiência de 85% de conversão de energia e produção média de $1,2 \text{ Kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ sob a iluminação de 1 sol.

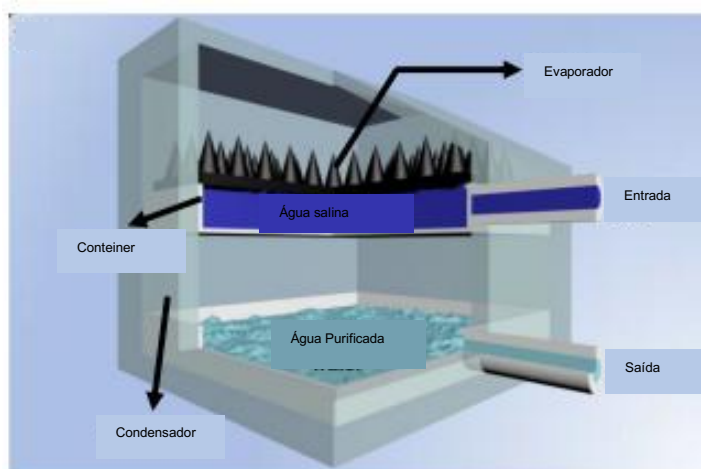
Figura 3 - Dessalinizador APAC



Fonte: Jia et al (2019). Adaptado.

Propondo uma abordagem diferente para a geometria do dessalinizador, Lei Wu et al (2020) elaboram um evaporador solar baseado na combinação de dois elementos naturais: o efeito capilar presente no bico de pássaros com bico longo e a superfície peristáltica da planta lançador (*pitcher plant*). Como resultado, os autores construíram uma estrutura em resina, de formato cônico com média de 5mm de altura, utilizando uma impressora 3D, Fig. 4.

Figura 4 - Dessalinizador com estrutura 3D.



Fonte: Wu et al (2020). Adaptado.

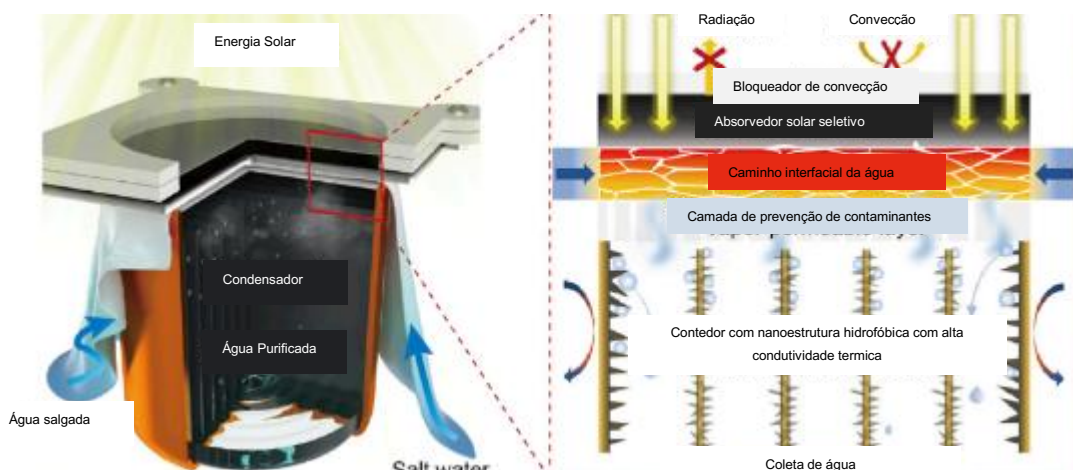
As principais características da estrutura desenvolvida pelo grupo de Wu são a distribuição de microporos formados na superfície, responsáveis pela dispersão ultra-rápida da água pela superfície e ranhuras assimétricas junto com o arranjo assimétrico de microcavidades, responsáveis pela formação do filme líquido na superfície que varia de espessura e temperatura em razão da sua posição no sistema, causando efeitos termocapilares que induzem o fluxo da água e permitem a absorção de energia do ambiente ao redor do sistema, permitindo uma maior eficiência na evaporação. Para os experimentos, os autores variaram a relação entre a altura e a base do cone, além de comparar os resultados com uma estrutura cilíndrica feita dos mesmo materiais e com as mesmas técnicas.

Como resultados, os autores constataram as marcas de $1,17 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ de vapor d'água sem incidência solar, $2,63 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ sob a iluminação de 1 sol e eficiência estável de 96% para uma concentração de 25% de NaCl. Além disso, os autores apontam que, em consequência dos fluxos gerados pela termocapilaridade, decorrente do gradiente de temperatura, a deposição do sal ocorre na ponta do cone, facilitando a sua remoção e manutenção do sistema, além de não prejudicar o desempenho energético nem o de produção de vapor. Para concluir o estudo, os autores realizaram o experimento utilizando diversas soluções aquosas com metais e com água do mar local (*Yellow Sea*), constatando também uma operação estável por 10 dias com exposição de 9 horas por dia sob a iluminação de 1 sol. (WU et al, 2022)

Entretanto, apesar de apresentarem uma eficiência média elevada e alta produção de vapor, os três artigos acima citados não levam em consideração a coleta desse vapor, fator que pode ser de crucial impacto ao sistema em geral quando adicionado. Para que ocorra essa coleta de vapor, a maioria dos sistemas contam com uma caixa em material transparente, que não atrapalha a incidência da luz solar, porém a baixa condutividade térmica e a condensação do vapor no topo são problemáticos para o sistema. (CHEN et al, 2019).

Assim, Fengyue Wang et al (2021) desenvolveram um sistema com uma estrutura invertida, Figura 5, garantido uma alta performance. Uma das principais características desse sistema é o fato do vapor gerado descer em detrimento de um gradiente de pressão que é gerado no interior do aparato, fazendo com que a coleta do vapor não prejudique as demais operações do sistema. Além disso, o sistema também conta com ligas de cobre tratadas termo e quimicamente para chegar na geometria necessária para o funcionamento, além de materiais selecionados pela alta absorção de energia fototérmica.

Figura 5 - Dessalinizador de único estágio com estrutura invertida.



Fonte: Wang et al (2021)

Os autores realizaram experimentos em laboratório e em local aberto, utilizando duas ligas de cobre distintas para comparação e obtiveram como melhor resultado a marca de $1,063 \text{ Kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ e uma eficiência aproximada de 70% para a luminosidade de 1 sol, variando a concentração de NaCl entre 1% e 7%. No experimento ao ar livre, registrou-se a capacidade de captação de vapor de 4,09 e

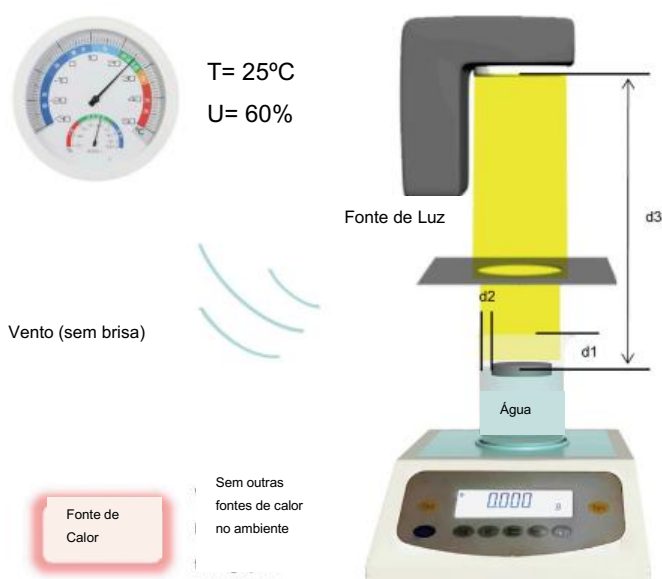
5,40 Kg m⁻² dia⁻¹ e redução significativa dos íons presentes em água salina, indo de acordo com os parâmetros da OMS. (WANG, 2021).

O desenvolvimento do sistema proposto nesse trabalho parte da junção de elementos característicos de cada um dos trabalhos citados acima, como formatos, disposição das partes, uso de canal para auto regeneração e material utilizado. O funcionamento detalhado do princípio de funcionamento do sistema e a descrição de cada parte serão explorados no seção 5.

4.3 Metodologia de experimento

Xiuqiang Li et al. (2019) propõem e discutem através de um artigo de revisão das metodologias utilizadas nos estudos de dessalinizadores do tipo sistema aberto, fazendo recomendações de *setup*, Figura 6, e como converter os dados aferidos em dados de parâmetros do sistema, como a eficiência. Os autores apontam quais parâmetros são importantes de serem registrados, sendo esses: a potência solar simulada, tempo de exposição, variação de massa ou massa coletada, temperatura e área da parte responsável pela absorção da energia fototérmica e temperatura de evaporação e temperatura do sistema como um todo.

Figura 6 - Exemplo de configuração para experimento.



Fonte: Li et al (2021). Adaptado.

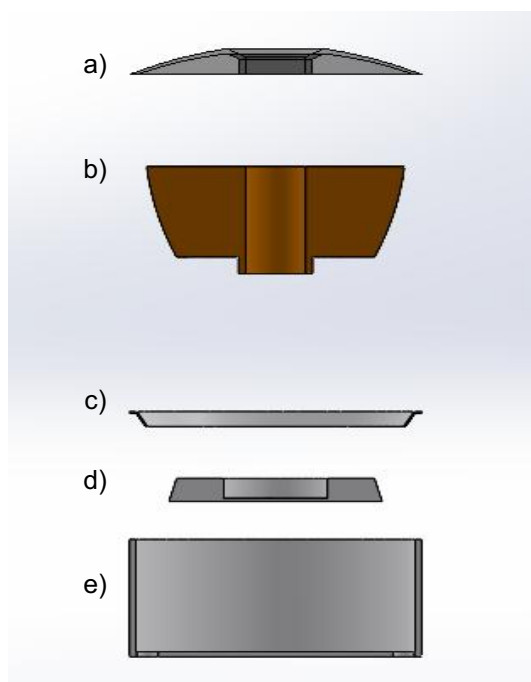
5 DESCRIÇÃO DO SISTEMA E DOS PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Nas subsecções a seguir descreve-se o princípio de funcionamento do sistema em geral, bem como a função e a descrição de cada parte que constitui o sistema.

5.1 Descrição do sistema e suas partes

Cada modelo consiste em cinco partes, conforme mostrado na Figura 7. No Quadro 1 descreve-se detalhadamente cada parte do modelo, bem como a sua função no sistema e também faz uma relação da temperatura de queima de cada parte em função do tamanho e característica física desejada, baseado no teste de dilatometria, ilustrado na Figura 8

Figura 7: Modelo digital do protótipo em vista explodida demonstrando as cinco partes separadas



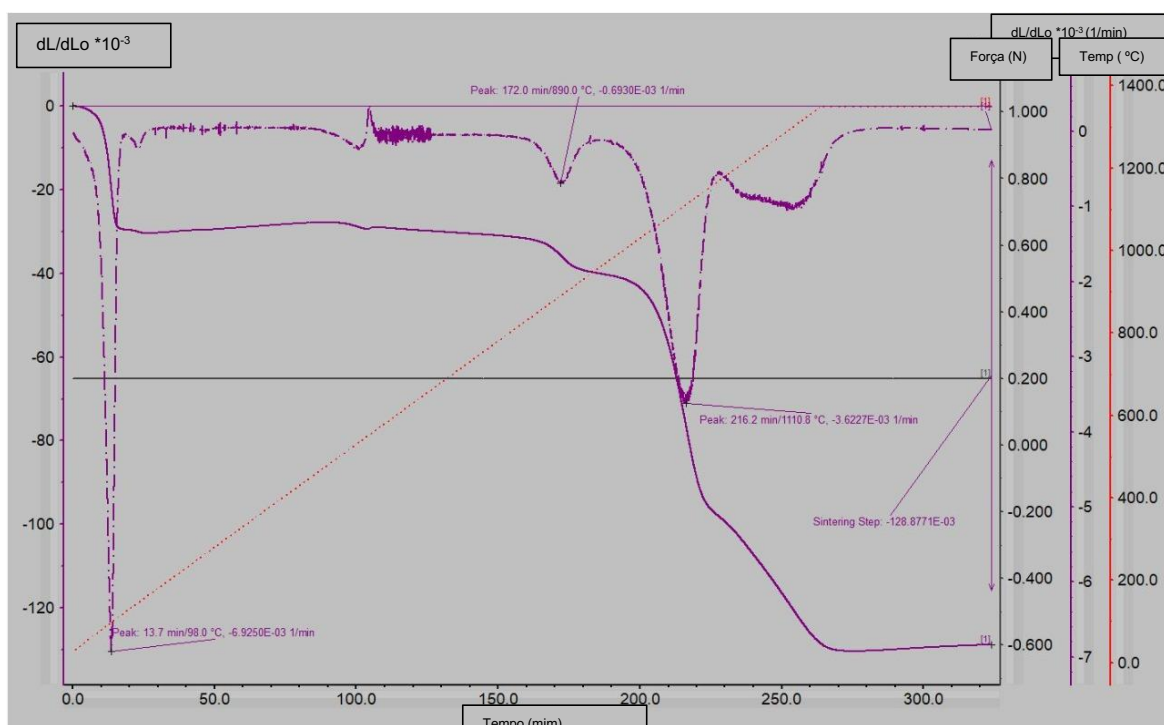
Fonte: Aatoria própria (2022)

Quadro 1 - Relação das partes do sistema com função, temperatura e tempo de queima

Item	Nome da Parte	Descrição	Temperatura de queima
a	Domo Absorvedor	Parte responsável por absorver energia solar e transformar em energia térmica, fornecendo calor para o sistema.	1200 °C
b	Núcleo	Responsável por transportar água de baixo para cima por efeito capilar e dividila em micro volumes nos poros. Também é onde o sal se acumula conforme a água evapora	900 °C
c	Saia	Responsável por ajudar na vedação e direcionar a água condensada	1200 °C
d	Base	Responsável pelo acumulo de água advinda do reservatório.	1200 °C
e	Copo Externo	Responsável por vedar o sistema e ser isolante termico	1200 °C

Fonte: Autoria própria (2022)

O teste de dilatometria da argila, Figura 8, tem como objetivo relacionar a deformação do corpo de prova em função da temperatura e do tempo de experimento, apontando quais são as taxas de contração e a temperatura crítica para a estrutura da argila.

Figura 8 - Gráfico resultante do teste de dilatometria.

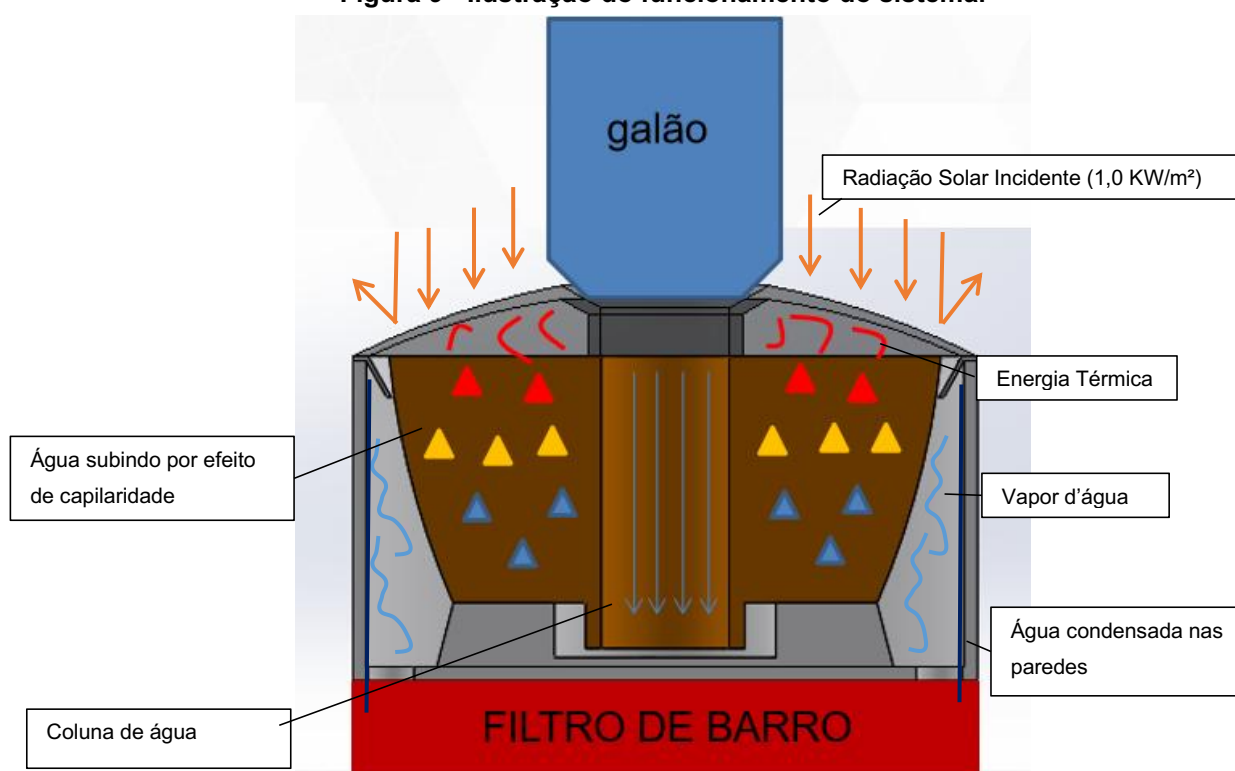
Fonte: Autoria própria (2022)

5.2 Princípio de funcionamento

A Figura 9 esquematiza em etapas o funcionamento do sistema. Primeiro, a água desce pelo canal central do núcleo chegando até a base, se espalhado por todo o corpo pelo efeito de capilaridade criado pelos poros da argila. Conforme parte da radiação solar vai sendo absorvida, a temperatura do domo vai aumentando e assim a energia térmica acumulada no corpo vai sendo transferida para a parte superior do núcleo por energia térmica e radiação, fazendo com que a temperatura da superfície aumente. Após atingir o estado de regime “semi permanente”, assim descrito por não ser possível atingir um estado de regime permanente absoluto, a água na superfície porosa do núcleo começa a evaporar e se espalhar pelo copo externo, condensando na parede e escorrendo para ser armazenada, enquanto o sal se acumula nas camadas superiores do núcleo. A taxa de evaporação se mantém constante enquanto o sistema estiver no regime semi permanente.

Conforme a água vai evaporando, o sistema se preenche de vapor e, ao entrar em contato com a parede interna do sistema, troca calor com o meio externo e condensa. Após condensada, a água escorre pelas paredes sendo armazenada dentro do sistema ou passando para outro reservatório.

Figura 9 - Ilustração do funcionamento do sistema.



Fonte: Autoria própria (2022)

6 MATERIAIS E MÉTODOS

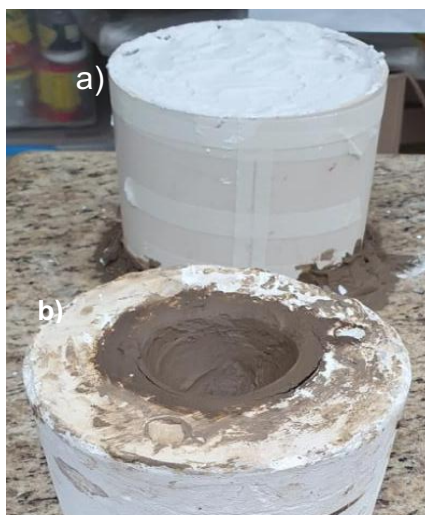
Nessa sessão são descritos e detalhados os materiais e métodos utilizados para a confecção dos corpos de prova, bem como os instrumentos e aparatos utilizados para os experimentos, seguido com a descrição da montagem e dos procedimentos experimentais. Por fim, serão indicados quais dados serão aferidos e como serão correlacionados para se obter a eficiência do sistema.

6.1 Corpo de prova

Os corpos de prova foram confeccionados em argila, fornecida pela empresa STEFANI CERÂMICA. Para os moldes, utilizou-se gesso branco, da marca JUNTALIDER.

Primeiramente desenvolveu-se um modelo digital de cada parte do sistema, com o objetivo de imprimi-las usando uma impressora 3D. Em seguida, o procedimento consistiu em construir um molde de gesso utilizando os objetos impressos, Fig. 10. Para isso, fez-se a mistura do gesso com água na proporção de 1 kg de gesso para 700ml de água e despejou-se a mistura em um recipiente contendo o objeto modelo. Após secagem, retirou-se o molde do recipiente e posteriormente o objeto modelo do molde, obtendo um molde com cavidade estilo matriz. Após a obtenção do molde, trabalhou-se com a argila, umedecendo pequenas porções em água e depositando no molde buscando a espessura desejada.

Figura 10 - (a) Confecção do molde em gesso e (b) confecção de parte do corpo de prova em argila



Fonte: Autoria própria (2022)

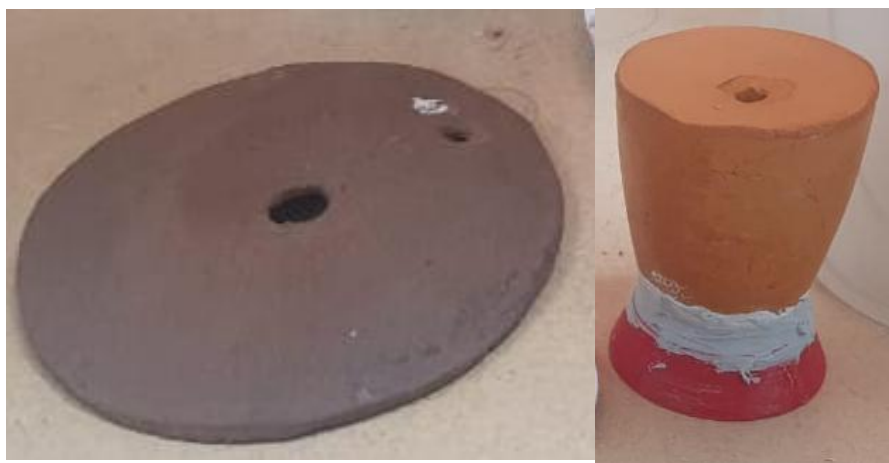
Após a secagem da argila em local aberto, retirou-se o corpo de prova do molde levando-o para o forno para realização da queima, etapa responsável pela sinterização do corpo e controle da densidade de poros. Após queima, realizou-se os procedimentos de usinagem e acabamentos necessários, como desbaste com lixa, perfuração do canal central e ajustes de altura. As Figuras 11 e 12 ilustram os processos supracitados.

Figura 11 - Molde de gesso com os modelos impressos em 3D e corpos de prova confeccionados em argila



Fonte: Autoria própria (2022)

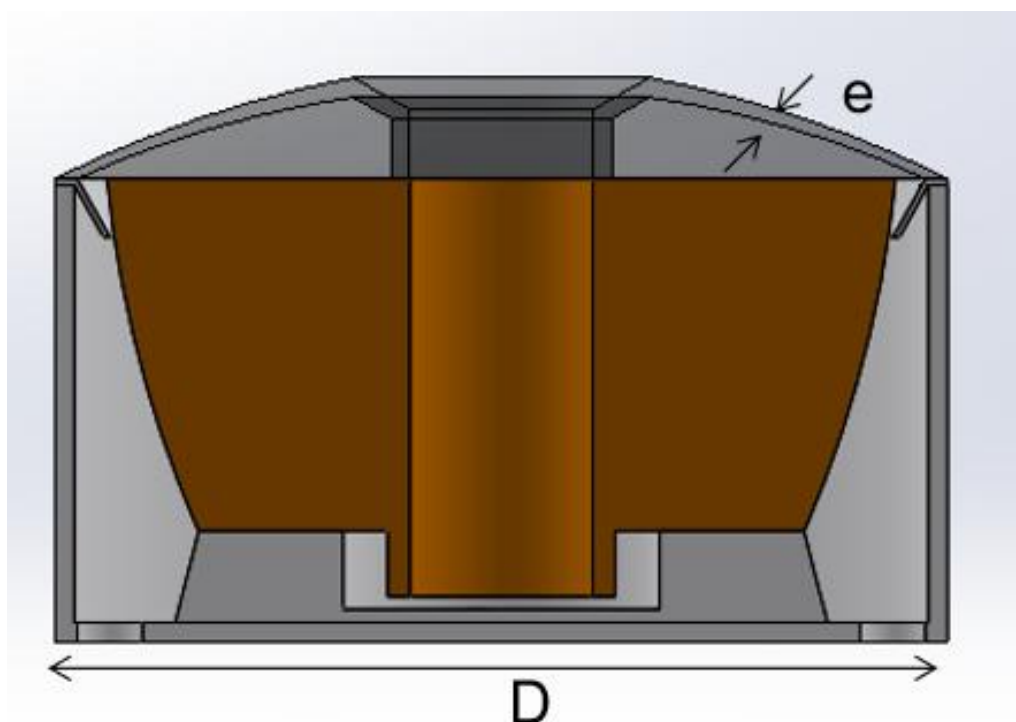
Figura 12 - Corpos de prova confeccionados em argila sinterizados e com acabamento feito.



Fonte: Autoria própria (2022)

O experimento conta com um modelo geométrico e para esse modelo se propôs variações na razão de aspecto de espessura (e), determinada através de uma relação de área, volume, massa e densidade, por diâmetro de referência (D), como ilustrado na Figura 13, totalizando 3 modelos de sistema. Para cada parte do sistema fabricou-se um molde.

Figura 13 - Modelo 3D do prototipo com aspectos geométricos demarcados.



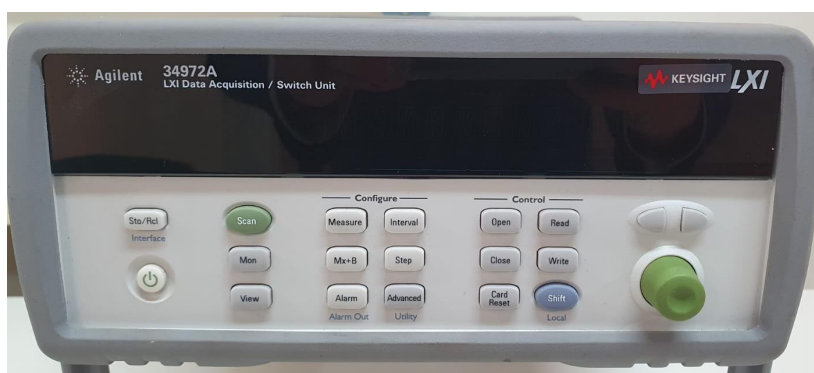
Fonte: Autoria própria (2022)

6.2 Procedimentos experimentais

Para a realização do experimento, utilizou-se um Painel Simulador Solar (PSS), da marca DIDATECH, modelo DT ER001.02, composta por 6 lâmpadas halógenas, com capacidade nominal de 1000 W m^{-2} , Figura 14, um piranômetro, termopares do tipo K em conjunto com o sistema de aquisição da marca AGILENT, modelo 34972A, (Figura 15), que gera automaticamente uma tabela de dados.

Figura 14 - Paineil Simulador Solar.

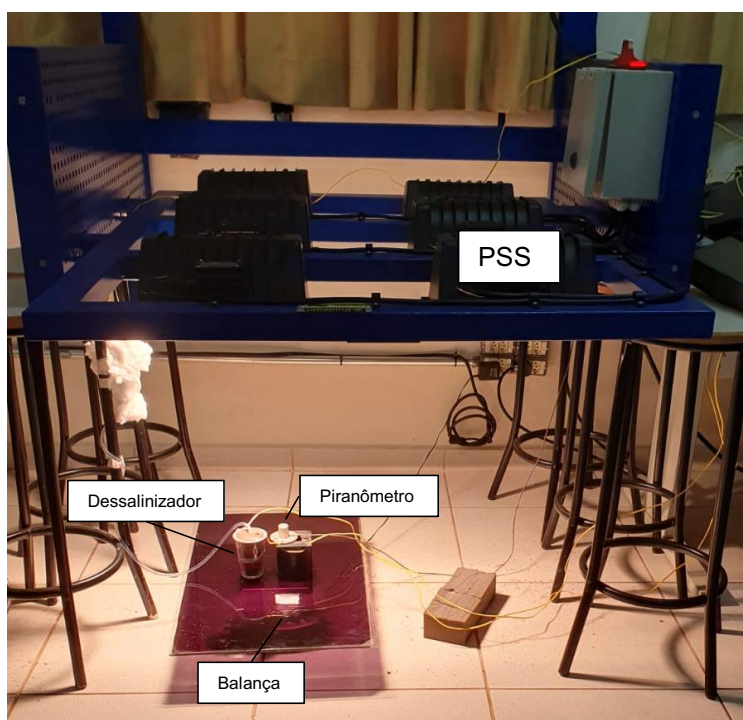
Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 15- Sistema de aquisição de dados.

Fonte: Autoria própria (2022)

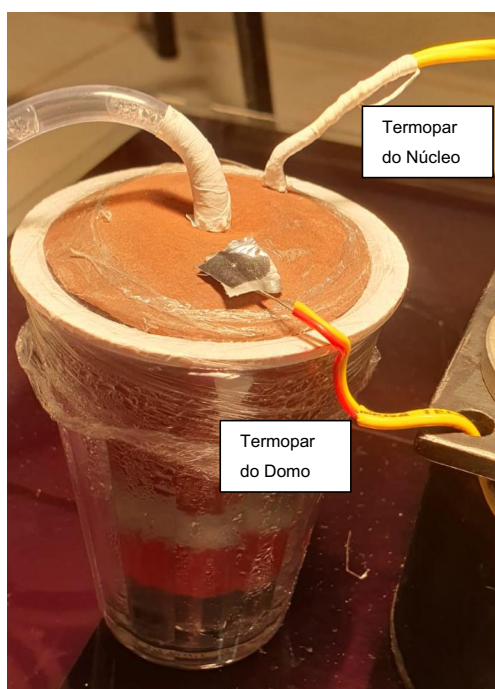
Com o PSS disposto na horizontal com as luzes voltadas para baixo, de forma que a incidência luminosa seja perpendicular ao solo, monta-se a bancada com distância de 1 metro do solo. Os corpos de prova então são dispostos sob a luz por 8 (oito) horas, Fig. 16. Os termopares são dispostos no corpo de prova, sendo um termopar posicionados na parte interna do sistema, no núcleo, e outro na parte externa do domo absorvedor, Fig. 17. Os termopares foram calibrados utilizando um calibrador da marca FLUKE, modelo 9142.

Figura 16 - Configuração do experimento.



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 17 - Disposição dos termopares no sistema.



Fonte: Autoria própria (2022)

A temperatura do núcleo do sistema, necessária para determinar a entalpia específica de vaporização, é aferida utilizando o termopar, bem como a temperatura do domo absorsor. As temperaturas da parte externa, como temperatura ambiente e

do reservatório de água, também são aferidas com termopares. A quantidade de água coletada nos copos é medida utilizando uma balança, fazendo anotações a cada uma hora.

A solução salina utilizada nos experimentos é obtida misturando água destilada com NaCl, na concentração de 3,5%, baseado na média da salinidade dos oceanos no planeta (MILLERO et al, 2007).

6.3 Método para análise

Apesar do sistema aqui proposto não ser um sistema aberto, diversas partes das proposta e observações feitas por Xiuqiang Li et al. (2019) podem ser adaptadas e consideradas para este estudo.

Ao se aferir o fluxo de energia emulada e a área exposta, é possível obter a taxa média de energia fornecida ao sistema (Q_{in}). Para medir a taxa de variação de massa, foi medida a quantidade de massa coletada pelo sistema e dividindo pelo tempo de experimento após o sistema entrar em regime semi permanente, obteve-se a taxa de coleta de água, em quilogramas por hora (\dot{m}_c). Por meio dos termopares dispostos na parte superior do núcleo aferiu-se a temperatura de evaporação (T) para a obtenção da entalpia de vaporização (h_v). A partir desses dados, foi possível calcular a eficiência média geral do sistema (η) por meio da Equação 1.

$$\eta = \frac{\dot{m}_c h_v(T)}{Q_{in}} [\%] \quad (1)$$

onde

η - Eficiência média geral do sistema [%]

\dot{m}_c - Taxa horária de água coletada por metro quadrado [$\text{Kg h}^{-1} \text{m}^{-2}$]

h_v - Entalpia específica de vaporização [kJ Kg^{-1}]

Q_{in} - Taxa de calor fornecida para o sistema [kJ h^{-1}]

As equações para o cálculo da taxa de coleta de água e da quantidade de calor fornecida para o sistema são apresentadas na Equação (2) e na Equação (3), respectivamente.

$$\dot{m}_c = \frac{\text{massa coletada no copo}}{\text{tempo de experimento em regime semi-permanente}} [Kg h^{-1}] \quad (2)$$

$$Q_{in} = \text{Potência medida} * \text{Área de exposição} * 3,6 [kJ h^{-1}] \quad (3)$$

O valor da entalpia específica de vaporização (h_v) está disponível em tabelas de propriedades da água saturada (SHAPIRO; HOWARD, 2009). A entalpia de vaporização pode ser descrita como a diferença entre a entalpia de vapor saturado e a entalpia de líquido saturado a determinada temperatura. Para o sistema em análise, considera-se a temperatura na superfície da parte descrita como núcleo como sendo a temperatura de evaporação.

O objetivo do experimento é obter a taxa horária de coleta de água por metro quadrado e a eficiência de cada modelo e compará-las entre si, com a proposta de apontar o impacto do aspecto geométrico na eficiência.

6.4 Etapas do experimento

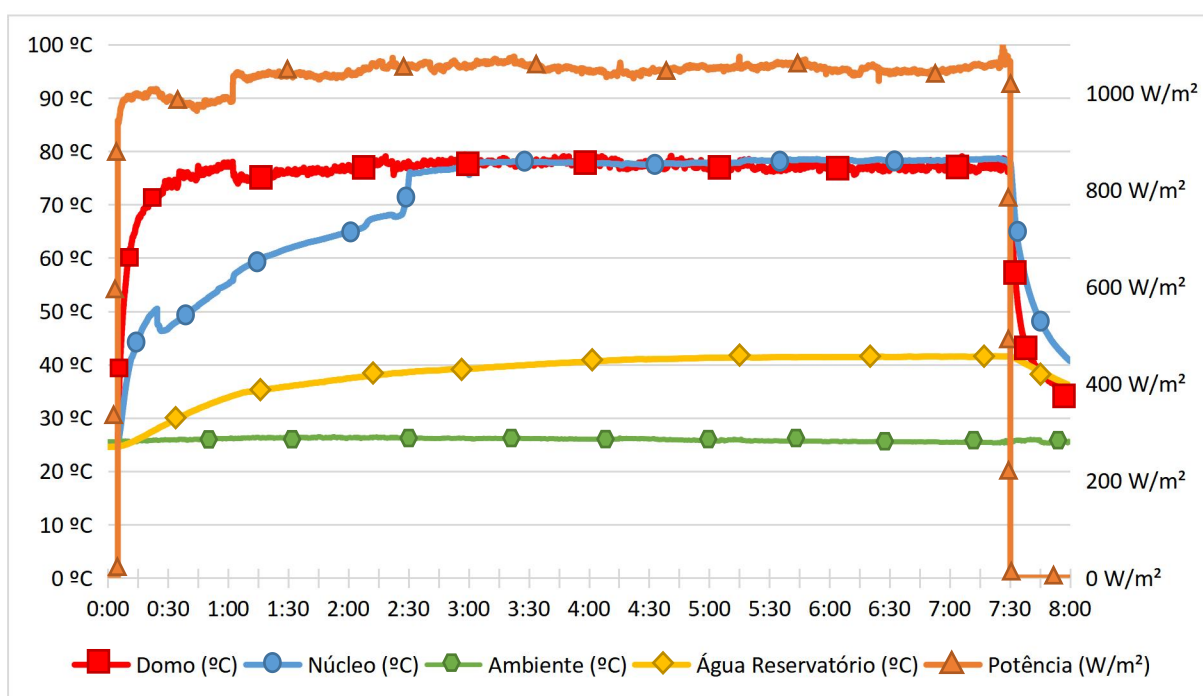
Primeiramente, efetua-se o teste de dilatometria para se estimar a curva de queima (sinterização) de cada parte em função das propriedades físicas desejadas. Em seguida, os corpos de provas são fabricados com suas respectivas variações, queimados em seus respectivos tempos. Após acabamento final do corpo de prova, são realizados os experimentos com a solução salina e coleta de dados. Por fim, com os dados tratados, os resultados foram analisados em termos de comparação das geometrias e desempenho geral e expostos em relatório.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos experimentos realizados são apresentados através de gráficos elaborados pelo autor, correlacionando tempo de exposição, potência fornecida pelo PSS, quantidade de água coletada, temperaturas do sistema, a taxa horária por metro quadrado de coleta de água e a eficiência de cada modelo em função da razão de aspecto.

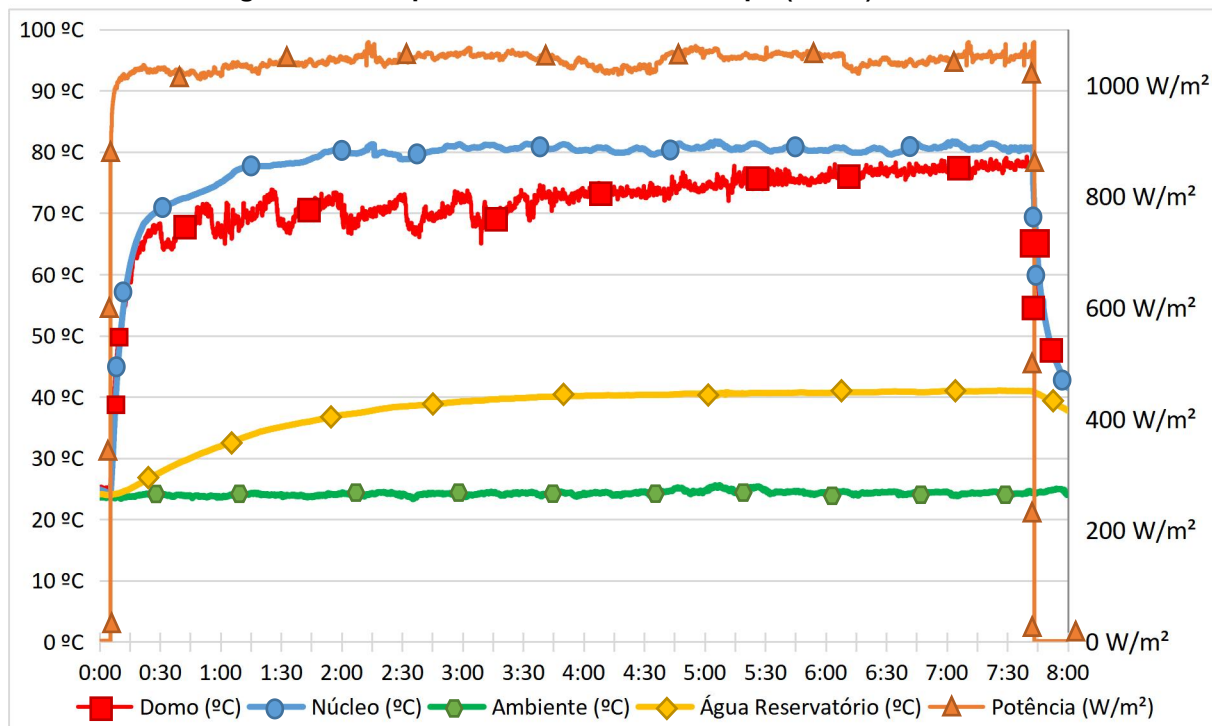
Os gráficos apresentados a seguir, nas Figuras 18, 19 e 20, apresentam o experimento realizado com os modelos A (menor espessura), B (espessura intermediária) e C (maior espessura), conforme descrito na seção 6.2. Nos gráficos de Temperatura (eixo y à esquerda) e Potência (eixo y à direita) x Tempo, é possível ver a variação de temperatura conforme o tempo, sendo utilizado para identificar o momento em que as temperaturas se estabilizam, caracterizando um regime semi permanente e portanto, o momento que começa a contabilizar a variação da massa.

Figura 18 - Temperatura e Potência x Tempo (horas) DOMO A.



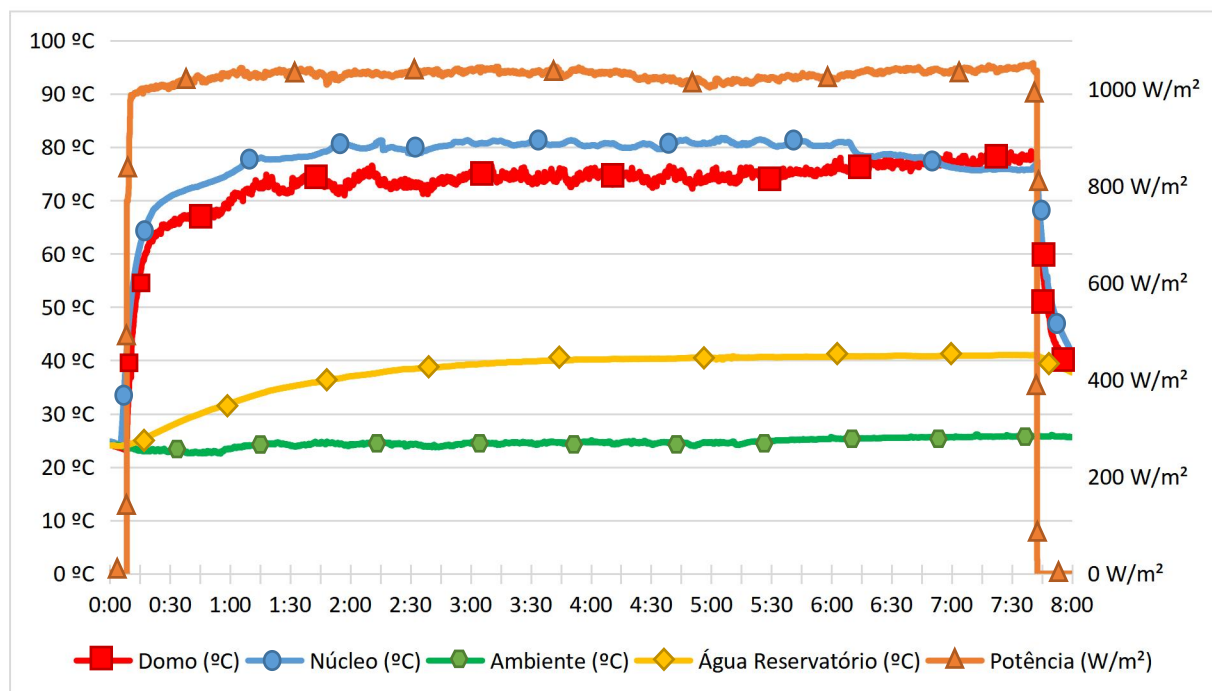
Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 19 - Temperatura e Potência x Tempo (horas) DOMO B.



Fonte: Autoria própria (2022)

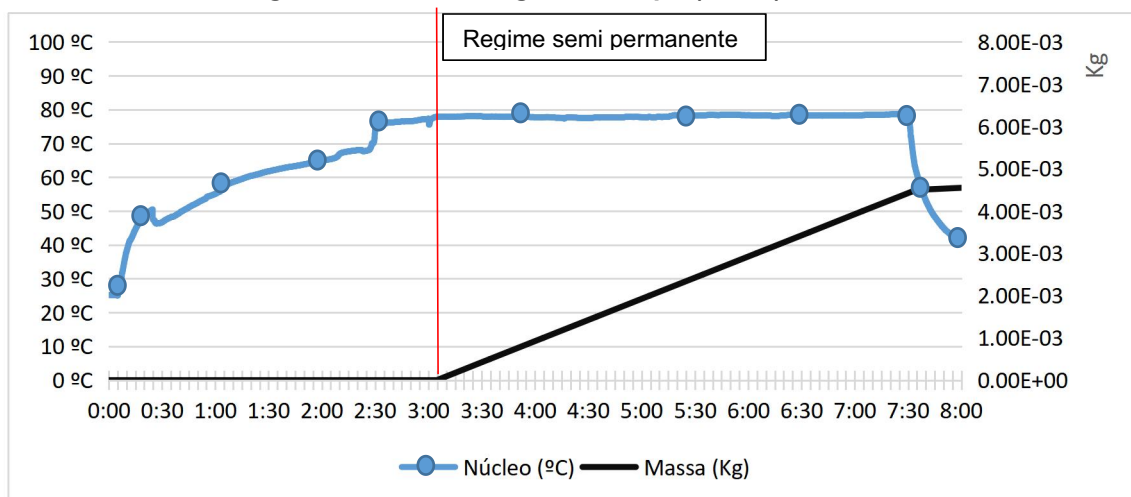
Figura 20 - Temperatura e Potência x Tempo DOMO C (horas).



Fonte: Autoria própria (2022)

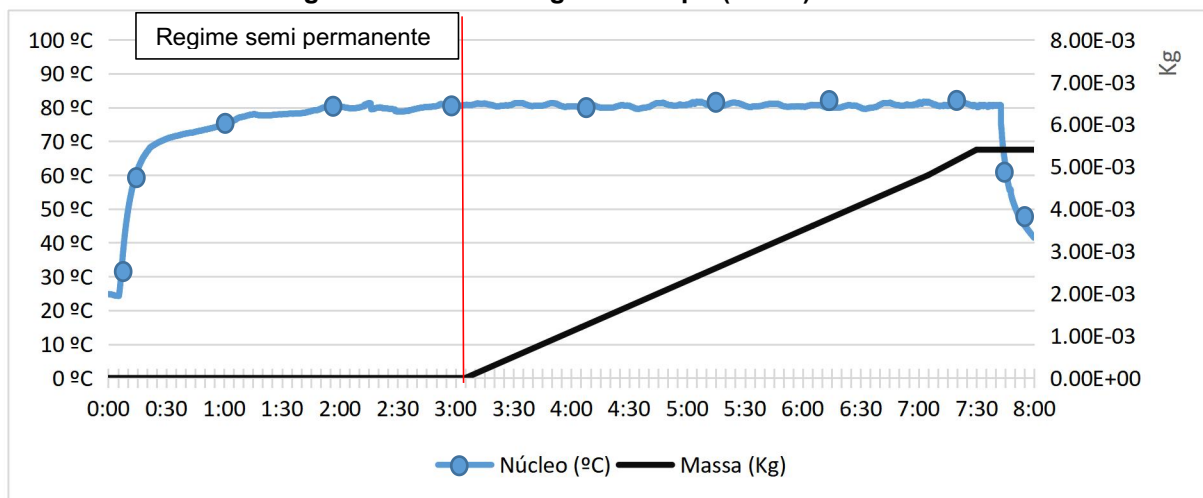
As Figuras 21, 22 e 23 mostram os gráficos de Temperatura (eixo y à esquerda) e Massa d'água (eixo y à direita) x Tempo. Acompanha-se a variação mássica pelo tempo, utilizado para extrair uma taxa mássica de água média.

Figura 21 - Massa d'água x Tempo (horas) DOMO A.



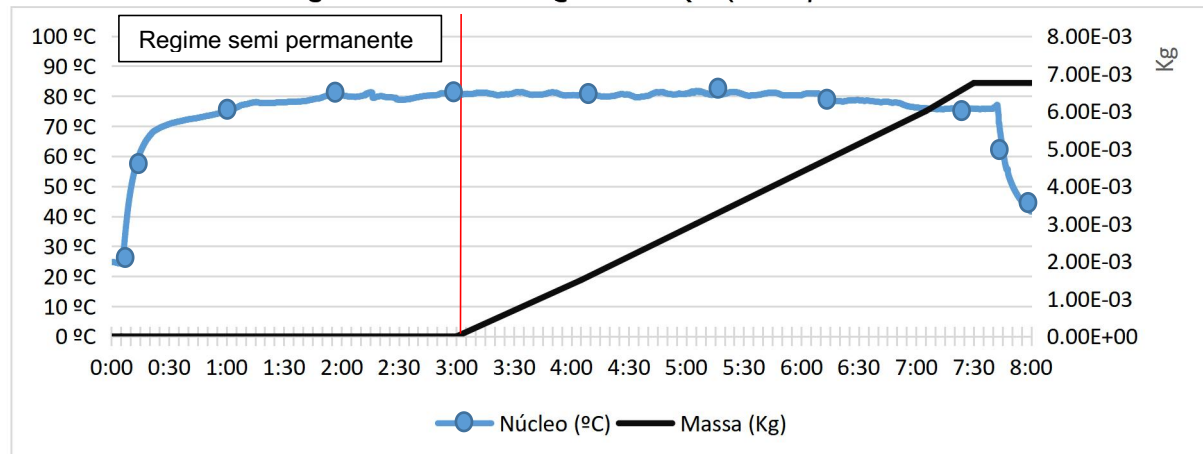
Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 22 - Massa d'água x Tempo (horas) DOMO B.



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 23 - Massa d'água x Tempo (horas) DOMO C.



Fonte: Autoria própria (2022)

Os gráficos das Figuras 21, 22 e 23 mostram que, ao entrar em regime semi permanente, a taxa de vaporização fica constante, até que se interrompa o fornecimento de energia térmica e as temperaturas começam a cair.

Além disso, comparando os dados dos três modelos, observa-se que conforme a razão de aspecto relacionada à espessura aumenta, a temperatura interna do sistema também aumenta, mesmo que a temperatura da superfície do domo não varie muito de modelo para modelo.

Tal efeito físico pode ser justificado pelo fato da argila ser um meio poroso e, portanto, quanto maior a espessura, mais ar tem entre a superfície interna e externa do domo, sendo assim um melhor isolante térmico, o que poderia aumentar o efeito estufa dentro do sistema.

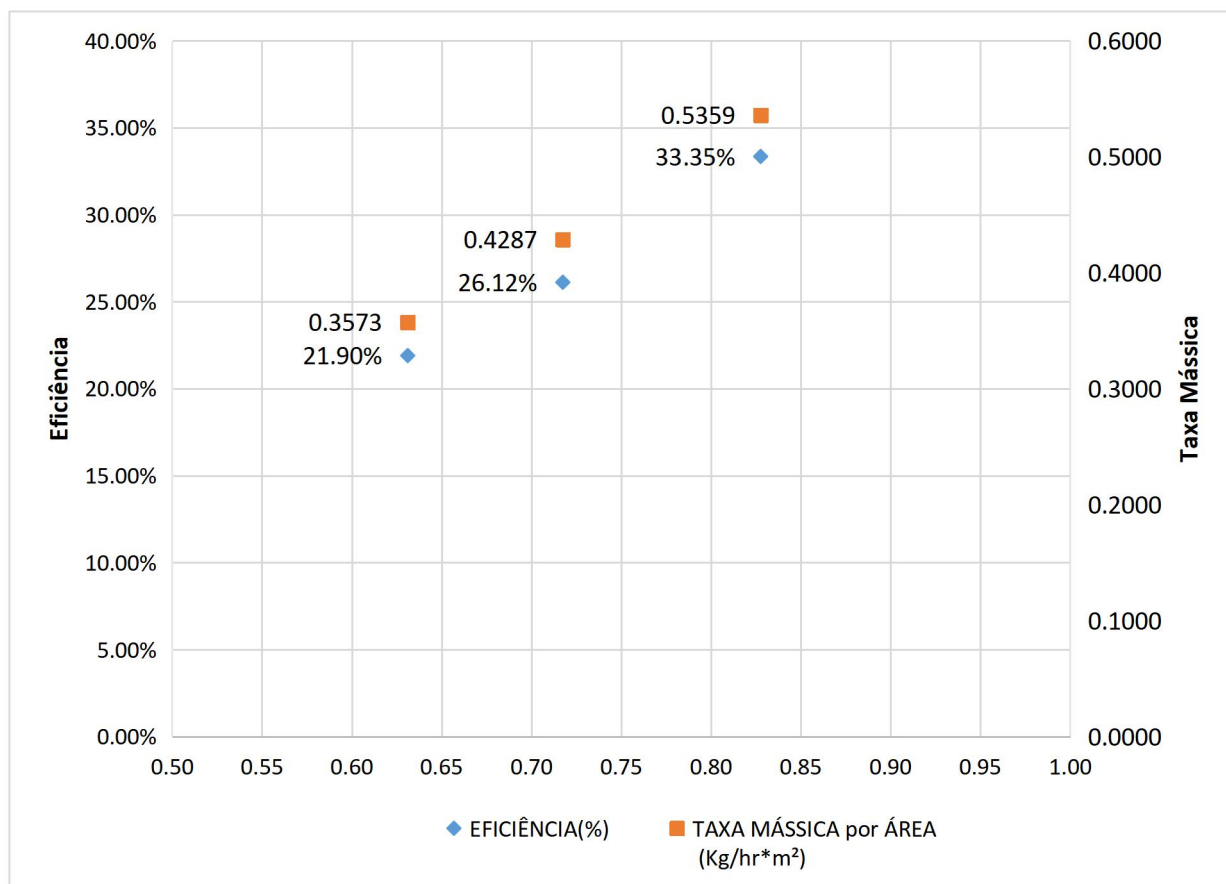
Quadro 2 - Relação das propriedades físicas por modelo.

Modelos	A	B	C
DENSIDADE (Kg/m³)	2000	2000	2000
MASSA (Kg)	0,0212	0,0241	0,0278
DIÂMETRO (m)	0,06	0,06	0,06
DIAMETRO FURO (m)	0,006	0,006	0,006
ÁREA (m²)	0,002799	0,002799	0,002799
ESPESSURA (m)	3,79E-03	4,30E-03	4,97E-03
ASPECTO GEOMÉTRICO DE ESPESSURA	0,63	0,72	0,83
TAXA MÁSSICA POR ÁREA (Kg/hr m²)	0,3573	0,4287	0,5359
TEMPERATURA DOMO (°C)	77,38	74,74	75,52
TEMPERATURA VAPORIZAÇÃO (°C)	78,07	80,64	79,43
ENTALPIA VAPORIZAÇÃO (KJ/Kg)	2313,66	2297,14	2308,46
POTÊNCIA (W/m²)	1048,37	1047,45	1030,38
EFICIÊNCIA (%)	21,90%	26,12%	33,35%

Fonte: Autoria própria (2022)

No gráfico de comparação, Figura 24, baseado no Quadro 2, é possível comparar a eficiência e a taxa mássica horária por metro quadrado entre cada modelo.

Figura 24 - Comparação entre modelos.



Fonte: Autoria própria (2022)

Pelo estudo em questão se limitar apenas a uma abordagem de geometria, entende-se que são necessários mais estudos para se obter conclusões mais assertivas sobre o efeito da variação geométrica na eficiência do sistema.

8 CONCLUSÃO

Levando em conta o objetivo secundário 6 descrito na seção 3 do presente trabalho, se considerou uma condição de aplicação mais próxima ao que se propõem o projeto, sendo essa uma região litorânea ou semi-árida, com temperaturas médias mais elevadas e um sistema em escala real.

Para o tamanho do sistema, toma-se como base o diâmetro de um filtro de barro convencional, como o modelo SÃO JOÃO fabricado pela STEFANI CERÂMICA, com $d=240\text{mm}$ e um furo central $d_f=54\text{mm}$, considerando um galão de 20L, a área de exposição em escala real seria $A_r=0,042949\text{ m}^2$. Assim, considerando o modelo mais eficiente, a taxa de produção de água seria em média de $0,01852\text{ Kg/hr}$.

Para a análise do custo, faz-se uma relação entre a massa do sistema com o custo da matéria prima por quilo. Considerando uma abordagem mais ecológica e sustentável, o custo da argila reaproveitada da indústria de cerâmica vermelha é R\$17,50 para cada 1000Kg (mil quilos)(CABRAL JUNIOR; DE AZEVEDO, 2017). Extrapolando a massa do protótipo para a massa em escala real, estima-se que o custo de matéria prima do sistema seria R\$1,75.

Em termos gerais, o sistema se apresenta limitado em relação a taxa de água produzida, porém apresenta um custo extremamente baixo, uma fácil replicação e uma vida longa vida útil com rendimento estável. O fato o sal acumular na parte superior do núcleo, como mostra a Figura 25, facilita a manutenção e permite que o sistema opere em eficiência estável por mais tempo, além de ser possível utilizar o sal como sub produto do sistema.

Comparando os três modelos propostos, nota-se que a eficiência do modelo C, com maior razão de aspecto e por tanto maior espessura, é mais eficiente que os dois modelos, apresentando uma eficiência média de 33% e uma taxa de $0,5359\text{ Kg/m}^2\text{ h}$. Se considerar as condições propostas na seção 3, pode-se estimar uma taxa aproximada de $4,3\text{ Kg/m}^2\text{ dia}$, levando em conta 8 horas de exposição ao sol.

Figura 25 - Condição do sistema após 8 horas de operação.



Fonte: Autoria própria (2022)

A teor de comparação, o Quadro 3 apresenta o desempenho do modelo C em comparação ao desempenho dos sistemas da revisão bibliográfica apresentados na seção 4.2.

Quadro 3 - Relação entre os sistemas apresentados no trabalho.

Sistema	Autores e ano	Caracterização	Eficiência (%)	Taxa de produção (Kg/m ² hr) *
1	Cooper et al (2018)	Geração de vapor super aquecido	24,60%	0,1041 ¹
2	Jia et al (2019)	Sistema feito em argila carbonizada	85%	1,2 ¹
3	Kuang et al (2019)	Sistema feito em madeira carbonizada	75%	1,04 ¹
4	Wu et al (2020)	Sistema em resina baseado em biomimese	96%	2,63 ¹
5	Wang et al (2021)	Sistema invertido de estágio único	70%	1,063 ²
6	Marsico(2022)	Sistema feito em argila	33%	0,5359 ²

* Índice: 1 - Taxa de vapor gerado 2 - Taxa de água coletada

Para o aprimoramento do desempenho do sistema, propõe-se abordar diferentes métodos de produção com controle de poros; possibilidade de aplicação de matéria orgânica na produção do domo, possibilitando um processo de carbonização; mistura de metais na composição da argila pós sinterização, como prata, para aumentar a absorção solar; aumento na área exposta, entre outros.

REFERÊNCIAS

- [1] Organização Mundial da Saúde. **Fact sheets detail about drinking water**
Disponível em: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
Acesso em: 12/05/2022.
- [2] Organização das Nações Unidas. **Water and sanitation**. Disponível em:
<https://sdgs.un.org/topics/water-and-sanitation>.
Acesso em 20/03/2022..
- [3] Organização Mundial da Saúde. **Safe drinking-water from desalination**. Ed. 4.
Genebra, Suíça, 2011.
- [4] CHEN, Chaoji; KUANG, Yudi; HU, Liangbing. **Challenges and opportunities for solar evaporation**. Universidade de Maryland, Estados Unidos, 2019. Publicado em: *Joule, Vol 3, Issue 3*.
- [5] KUANG, Yudi; CHAOJI, Chen; HE, Shuaiming; HITZ, Emily M.; WANG, Yilin; GAN, Wentao; MI, Ruiyu; HU, Liangbing. **A high-performance self-regenerating solar evaporator for continuous water desalination**. Universidade de Maryland, Estados Unidos, 2019. Publicado em: *Advanced Materials, Vol 31, Issue 23*.
- [6] WU, Lei; DONG, Zhichao; CAI, Zheren; GANAPATHY, Turga; FANG, Niocholas X.; LI, Chuxin; YU, Cunlong; ZHANG, Yu; SONG, Yanlin. **Highly efficient three-dimensional solar evaporator for high salinity desalination by localized crystallization**. Chinese Academy of Sciences, China, 2020. Publicado em: *Nature Communications 11, Artigo 521*.
- [7] COOPER, Thomas A.; ZANDAVI, Seyed H.; NI, George W.; TSURIMAKI, Yoichiro; HUANG, Yi; BORINSKINA, Svetlana V.; CHEN, Gang. **Contactless steam generation and superheating under one sun illumination**. Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), Estados Unidos, 2018. Publicado em: *Nature Communications 9, Artigo 5086*
- [8] WANG, Fengyue; XU, Ning; ZHAO, Wei; ZHOU, Lin; ZHU, Pengcheng; WANG, Xueyang; ZHU, Bin; ZHU, Jia. **A high-performing single-staged inverted-**

structured solar water purifier through enhanced absorption and condensation. Universidade de Nanjing, China, 2021. Publicado em: *Joule, Vol 5, Issue 6.*

[9] JIA, Juan; LIANG, Weidong; SUN, Hanxue; ZHU, Zhaoqi; WANG, Chengjun; LI, An. **Fabrication of bilayered attapulgite for solar steam generation with high conversion efficiency.** Universidade Tecnológica de Lanzhou, China, 2019. Publicado em: *Chemical Engineering Journal, Vol 361.*

[10] FILLET, R.; NICOLAS, Vincent; FIERRO, A.; CEZARD, Alain. **A review of natural materials for solar evaporation.** Universidade de Lorraine, França, 2020. Publicado em: *Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol 219.*

[11] LI, Xiuqiang; NI, George; COOPER, Thomas A.; XU, Ning; LI, Jinlei; ZHOU, Lin; HU, Xiaozhen; ZHU, Bin; YAO, Pengcheng; ZHU, Jia. **Measuring conversion efficiency of solar vapor generation.** Universidade de Nanjing, China, 2019. Publicado em: *Joule, Vol 3, Issue 8.*

[12] MILLERO, Frank J.; FEISTEL, Rainer; WRIGHT, Daniel G.; MCDOUGALL, Trevor J. **The composition of standard seawater and the definition of the reference-composition salinity scale.** Rosentiel School of Marine and Atmospheric Science (RSMAS), Universidade de Miami, EUA, 2007. Publicado em: *Deep-Sea Research Part I, Vol 55, Issue 1.*

[13] KALOGIROU, Soteris A. **Engenharia de energia solar: processos e sistemas.** 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

[14] CABRAL JUNIOR, Marsis; DE AZEVEDO, Paulo B. M. **Potencial técnico e econômico do aproveitamento de resíduos da indústria da cerâmica vermelha.** Instituto de Pesquisas Tecnológicas de do Estado de São Paulo. Brasil, 2017.

[15] MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N.; BOETTNER, D. D.; BAILEY, M. B. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** LTC Editora: 7ª edição, Rio de Janeiro, 2014.