



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA

FABRICAÇÃO E ESTUDO DE UM DESTILADOR
SOLAR DE BAIXO CUSTO COM COBERTURA
MÓVEL

GIOVANNA MARIA DE OLIVEIRA FIN
NATAL- RN, 2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA

FABRICAÇÃO E ESTUDO DE UM DESTILADOR
SOLAR DE BAIXO CUSTO COM COBERTURA
MÓVEL

GIOVANNA MARIA DE OLIVEIRA FIN

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**, orientado pelo Prof. Dr. Luiz Guilherme de Meira Souza.

NATAL - RN

2023

FABRICAÇÃO E ESTUDO DE UM DESTILADOR SOLAR DE BAIXO CUSTO COM COBERTURA MÓVEL

GIOVANNA MARIA DE OLIVEIRA FIN

Dissertação **APROVADA** pelo Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica (PPGEM) da Universidade Federal do Rio
Grande do Norte

Banca Examinadora da Dissertação

Prof. Dr. Luiz Guilherme de Meira Souza _____

Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Orientador e Presidente da Banca
Examinadora

Prof. Dr. Marcos Silva de Aquino _____

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Avaliador Externo

Prof. Dr. Salomão Sávio Batista _____

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte - Avaliador
Externo

NATAL, 18 de OUTUBRO de 2023.

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Fin, Giovanna Maria de Oliveira.

Fabricação e estudo de um destilador solar de baixo custo com cobertura móvel / Giovanna Maria de Oliveira Fin. - 2023.

93 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Natal, RN, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza.

1. Energia solar - Dissertação. 2. Destilador solar - Dissertação. 3. Água - Dissertação. 4. Custo-benefício - Dissertação. 5. Fabricação - Dissertação. 6. Montagem e operação - Dissertação. I. Souza, Luiz Guilherme Meira de. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 621.472

Agradecimentos

Ao bom Deus, que sempre tem me dado forças em minha caminhada.

Ao meu orientador, o Prof. Dr. Luiz Guilherme de Meira Souza, pela paciência, conselhos e por ser um docente incrivelmente inteligente e humano, contribuindo para uma ambiência acadêmica saudável e respeitosa.

Ao técnico do LMHES Aldo Paulino de Medeiros Júnior, meu parceiro de construção do dispositivo e contribuinte de diversas sugestões de melhoria.

À banca examinadora, professores Marcos Aquino da Silva e Salomão Sávio Batista, pelas correções.

Ao meu colega de mestrado e amigo José Weverton, cujo apoio foi imprescindível para que eu tivesse concluído este trabalho.

À minha família, por me conceder apoio emocional, em especial à minha mãe e minha avó "Mariola".

Aos meus coordenadores da PETROBRAS pelo incentivo: Sérgio Saraiva e João Paulo Nunes, bem como os demais colegas da CINT.

Por fim, a Prince Azsebergh, pelo incentivo nos momentos finais e pelas orientações acadêmicas.

“É surpreendente o que um raio de sol pode fazer com a alma humana!”

Fiódor Dostoiévski

Fin, G. M. de O. **Fabricação e estudo de um destilador solar de baixo custo com cobertura móvel**. 2023. 87 p. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2023.

Resumo

Este trabalho foi realizado com o intuito de desenvolver uma tecnologia de baixo custo para alcançar comunidades atingidas pela falta de água potável e própria para consumo doméstico – o destilador solar com cobertura móvel. São apresentados os processos de fabricação, montagem e operação do destilador solar, que tem como principal característica sua boa relação custo-benefício. Os ensaios realizados demonstraram a significativa viabilidade de uso do destilador solar para a obtenção de água destilada. O sistema de destilador foi estudado para se obter o rendimento e o volume destilado em três principais configurações: a convencional; com adição de algumas pedras e com resfriamento dos vitrais utilizando água. Das três configurações, a que apresentou um maior rendimento e maior volume destilado foi a que utilizou resfriamento dos vitrais à base de água, em torno de 38,60% e 4,275L, respectivamente.

Palavras-chave: energia solar, destilador solar, água, custo-benefício, fabricação, montagem e operação.

Fin, G. M. de O. **Fabricação e estudo de um destilador solar de baixo custo com cobertura móvel**. 2023. 87 p. Master's Dissertation in Mechanical Engineering - Federal University of Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2023.

Abstract

This work was thoroughly prepared with the aim of developing low-cost technology to reach communities affected by the lack of safe and suitable water for household consumption - the solar distiller with a movable cover. The construction methodology was mentioned, in which market research was conducted to determine the manufacturing cost, and tests were performed with the already-made distiller to obtain its performance and the volume distilled in three main configurations: the conventional one, with the addition of some crushed stones, and with cooling of the glass covers using water. Of the three configurations, the one that showed the highest performance and the greatest volume distilled was the one that used water-based panel cooling, approximately 38.60% and 4.275 liters, respectively.

Keywords: solar distiller, water stress, irradiation

Lista de Ilustrações

Figura 1: Irradiação Global Horizontal (GHI) do Brasil	3
Figura 2: Simulação feita de aquisição de sistema fotovoltaico em uma companhia elétrica no Brasil.....	4
Figura 3: Consumo de energia mundial primária pelas principais fontes disponíveis entre 2012-2021	7
Figura 4: Geração de eletricidade por energias renováveis entre 2018-2021	7
Figura 5 : Como a radiação solar age no Planeta Terra.....	9
Figura 6 – Formas de aproveitamento da energia solar.....	9
Figura 7: Tipos de radiação.....	11
Figura 8 : Ângulo zenital.....	12
Figura 9: Principais configurações de medição da irradiação solar.....	13
Figura 10: Processos de transferência de calor em uma parede plana	14
Figura 11: Destilador de bandeja multiestágios.....	16
Figura 12: Destilador solar piramidal.....	16
Figura 13: Destilador tipo filme capilar	17
Figura 14: Destilador tipo mecha.....	17
Figura 15: Destilador solar tipo cascata	18
Figura 16: Tipos e comparações de destiladores.....	18
Figura 17: Esquema simplificado do destilador utilizado no trabalho	19
Figura 18: Materiais dos tanques e algumas propriedades.....	20
Figura 19: Tipos de vidro para coberturas.....	21
Figura 20: Materiais utilizados para vedação	22

Figura 21: Trabalhos publicados sobre energia solar no mundo de 1966-2015.....	23
Figura 22: Dimensões do vidro do destilador construído em Minas Gerais	27
Figura 23: Comportamento do destilador ao longo do dia de maior destilação.....	27
Figura 24 : Destilador construído em Minas Gerais	28
Figura 25: Destilador produzido na UTFPR.....	28
Figura 26: Destilador solar de duas águas produzido pela UFG	29
Figura 27: Destilador solar produzido na UEPB	30
Figura 28: Destiladores produzidos na POLI/UPE	31
Figura 29 : Produção diária do destilador utilizando nanopartículas	31
Figura 30 : Protótipo de destilador solar construído no estado do Amazonas	32
Figura 31: Destilador construído na UFRN pelo PPGEQ	32
Figura 32: Destilador Solar construído pela UFERSA no estado do RN	33
Figura 33: Vista isométrica do modelo do destilador solar de cobertura móvel	34
Figura 34: Base de compensado utilizada para o fundo do destilador	35
Figura 35: Construção da parede lateral do destilador.....	36
Figura 36 : Montagem do isolamento	36
Figura 37: Fixação das paredes e do fundo do destilador.....	36
Figura 38: Bandeja com superfície enegrecida – placa absorvedora.....	37
Figura 39: Inserção das cantoneiras nas laterais e das vedações	38
Figura 40: Fixação das canaletas.....	38
Figura 41: Fixação do restante do isolamento.....	39
Figura 42: Vitrais e destilador pronto.....	39
Figura 43: Instrumentos utilizados nos ensaios.....	40

Figura 44: Destilador pronto para entrar em regime.....	41
Figura 45: Temperaturas medidas externamente.....	43
Figura 46: Medição da temperatura da água na placa absorvedora e no ar interno .	43
Figura 47 : Termopar para medição de temperatura do vidro interno	44
Figura 48: Destilador operando convencionalmente	45
Figura 49: Inserido as pedras no destilador	45
Figura 50: Molhamento manual da superfície vitral do destilador	46
Figura 51: Mecanismos de transferência de calor em um destilador convencional...	49
Figura 52: Temperaturas atingidas x Irradiância pelo ensaio de estagnação	53
Figura 53 – Gráfico das temperaturas laterais e no fundo do destilador	54
Figura 54 : Comparativo das temperaturas internas e externas do vidro	55
Figura 55: Diferença entre as temperaturas interna e externa	56
Figura 56: Temperaturas atingidas x Irradiância pelo ensaio convencional	57
Figura 57: Comparativo das temperaturas internas e externas do vidro	57
Figura 58: Diferença entre as temperaturas interna e externa	58
Figura 59: Volumes destilados e rendimento do destilador convencional	59
Figura 60: Temperaturas atingidas x Irradiância pelo ensaio com pedras	60
Figura 61: Volumes destilados e rendimento r na configuração com pedras	62
Figura 62: Temperaturas x Irradiância pelo ensaio com resfriamento à água.....	63
Figura 63 : Gráficos de diferenças de temperaturas depois de molhar os vitrais	64
Figura 64: Volumes destilados e rendimento do destilador com resfriamento	65
Figura 65 : Gráfico com o volume destilado por todas as configurações	66
Figura 66: Gráfico com o rendimento obtido por todas as configurações	66

Figura 67: Volumes totais obtidos em todas as configurações.....67

Lista de Tabelas

Tabela 1: Dez maiores capacidades instaladas de utilização de energia solar para obtenção de energia elétrica por países (individuais) do mundo.....	2
Tabela 2 : Valores de GHI e GTIopta dos dez países com maiores capacidades instaladas de energia solar no mundo.....	2
Tabela 3: Custo de fabricação do destilador solar convencional de duas águas	35
Tabela 4: Temperaturas medidas no ensaio de estagnação.....	42
Tabela 5 : Temperaturas analisadas nos ensaios com pedras	46
Tabela 6: Temperaturas e dados coletados no ensaio de resfriamento à água	47
Tabela 7: Temperaturas coletadas após o molhamento	47
Tabela 8 : Temperaturas e dados obtidos no ensaio de estagnação	52
Tabela 9 : Dados obtidos pelo ensaio convencional	56
Tabela 10 : Dados obtidos nos ensaios com pedras.....	60
Tabela 11 : Dados obtidos no ensaio com resfriamento à água.....	62
Tabela 12: Temperaturas após o molhamento.....	63

Sumário

1	Introdução.....	1
2	Revisão Bibliográfica	6
2.1	Energias Renováveis	6
2.2	Energia Solar	8
2.3	Destilação Solar	14
2.4	Destilador solar de bandeja com cobertura prismática – principais componentes	19
2.4.1	Tanque ou bandeja.....	19
2.4.2	Cobertura.....	20
2.4.3	Canaleta de coleta.....	21
2.4.4	Outras partes.....	21
3	Estado da Arte	23
3.1	Cenário Mundial	23
3.2	Cenário Brasileiro.....	26
4	Materiais e métodos	34
4.1	Fabricação do destilador solar	34
4.2	Equipamentos utilizados para aquisição de dados dos ensaios	39
4.3	Materiais e Procedimentos Experimentais dos Ensaios.....	41
4.3.1	Ensaio de Estagnação.....	41
4.3.2	Ensaio Convencional de Capacidade de Destilação	44
4.3.3	Ensaio de Capacidade de Destilação Utilizando Pedras.....	45
4.3.4	Ensaio de de Destilação Utilizando Resfriamento à Água.....	46
4.3.5	Balanco Energético e Eficiência de um Destilador Convencional.....	48
5	Resultados e Discussões	52
5.1	Ensaio de Estagnação	52
5.2	Ensaio Convencional	56

5.3 Ensaio utilizando pedras (britas).....	59
5.4 Ensaio utilizando resfriamento à água em temperatura ambiente	62
5.5 Comparação do destilado e rendimento entre as configurações	65
6 Conclusões e sugestões.....	68
7 Referências	70

1 INTRODUÇÃO

1.1 Aspectos gerais

De acordo com estudo realizado pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS (2019), cerca de 35 milhões de brasileiros não têm acesso à água tratada, sendo o Nordeste a segunda região a ser mais impactada com a falta deste recurso (em primeiro lugar está a região Norte). Nos últimos anos, inúmeros esforços vêm sendo adotados no país para que comunidades rurais, isoladas ou em situações críticas como as de estresse hídrico tenham acesso a água apropriada para consumo.

A água do mar não é a única muito mineralizada que pode ser utilizada como fonte de água doce. Existem também as águas salobras, onde o teor de sal é inferior ao da água do mar, de origem superficial ou subterrânea, mas acima do limite de uso doméstico e potável. É a famosa água de poço, que não faz espuma quando se lava alguma coisa com ela. São geralmente encontradas nas mais áridas regiões da terra, e no Brasil, especialmente no Nordeste (SOARES, 2004 *apud* UNIAGUA, 2003).

Uma das tecnologias acessíveis e de baixo custo para a obtenção de água potável é a destilação solar. Existem vários tipos de destiladores, porém, o foco deste trabalho é um destilador solar convencional de duas faces fabricado na UFRN.

Este se baseia majoritariamente em um dos principais mecanismos de transferência de calor: a radiação, neste caso solar, que adentra o destilador passando pela fronteira das faces de vidro, atingindo a bandeja absorvedora, que aquece e provoca a evaporação da água, que ao entrar em contato com uma superfície de menor temperatura condensa-se, sendo recolhida e pronta para uso.

O Brasil, por sua vez, é privilegiado por ter bastante incidência de raios solares ao longo do ano. De acordo com a *International Renewable Energy Agency*, IRENA (2022), em 2022 o país chegou a ser o 8º maior em capacidade líquida máxima (capacidade instalada) de obtenção de energia solar para produzir eletricidade. Vide Tabela 1.

Tabela 1: Dez maiores capacidades instaladas de utilização de energia solar para obtenção de energia elétrica por países (individuais) do mundo

Ranking ¹	País	Capacidade Instalada (MW)
1º	China	393.032
2º	EUA	113.015
3º	Japão	78.833
4º	Alemanha	66.554
5º	Índia	63.146
6º	Austrália	26.792
7º	Itália	25.083
8º	Brasil	24.079
9º	Holanda	22.590
10º	Coreia do Sul	20.975

Fonte: Adaptado de IRENA (2022)

Vale ressaltar que, se os dez maiores líderes na “produção” de energia solar para geração de eletricidade fossem colocados em ordem de quantidade de Irradiação Solar Global Horizontal (GHI) em seu território, de acordo com o Global Solar Atlas (2023), que utiliza o software SolarGIS, o novo *ranking* mundial seria como o explicitado na Tabela 2.

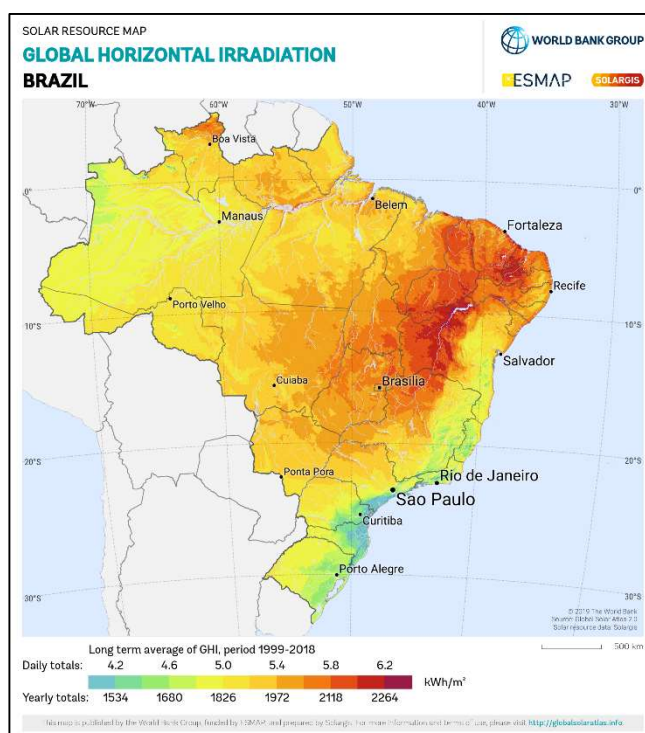
Tabela 2 : Valores de GHI e GTIopta dos dez países com maiores capacidades instaladas de energia solar no mundo

Ranking ¹	País	Irradiação Global Horizontal (GHI) por dia (kWh/m ²)	Irradiação Global Inclinada (GTI) no Ângulo Ideal (kWh/m ²)
1º	Austrália	3,770-6,370	4,320-6,870
2º	China	2,640-5,930	2,700-6,930
3º	Índia	3,770-5,640	4,130-6,260
4º	Brasil	5,562	5,753
5º	EUA	4,646	5,559
6º	Itália	4,135	4,883
7º	Coreia do Sul	3,865	4,445
8º	Japão	3,845	4,496
9º	Alemanha	2,982	3,498
10º	Holanda	2,802	3,298

Fonte: Adaptado do Global Solar Atlas (2023)

O Brasil então, poderia ser uma das cinco maiores potências do ramo de energia solar. Porém, para alcançar esse fim, pode-se considerar como alternativas investimentos massivos em tecnologia e educação, além da conscientização da população sobre a necessidade de implantação de sistemas que visam o aproveitamento desta fonte renovável. Países como o Japão e a Alemanha, de acordo com a Tabela 2, detêm hoje capacidade instalada altíssima comparada à do Brasil, com condições solarimétricas inferiores.

Figura 1: Irradiação Global Horizontal (GHI) do Brasil



Fonte: Adaptado de Solar Gis (2019)

Por outro lado, outro continente como a África, possui excelentes condições solarimétricas, de acordo com o mapa levantado pelo software SolarGIS (2023), porém, sua capacidade instalada de todo o continente é inferior à do Brasil, ou seja, cerca de 12.641 MW.

É importante ressaltar que, os órgãos oficiais responsáveis pelas estatísticas geralmente calculam um potencial em relação ao aproveitamento da energia solar para geração de energia elétrica, ou seja, a energia fotovoltaica é a mais visada.

Porém necessita de um sistema de conversão, que em se tratando da realidade brasileira, é de difícil aquisição pelas famílias mais carentes (de acordo com uma

simulação feita no Brasil, estado do Rio Grande do Norte, pela companhia de energia elétrica do estado, a Neenergia, o custo de um sistema fotovoltaico é de R\$18.062,00 para uma residência cujo consumo é de até 200kWh). (NEONERGIA, 2023)

Figura 2: Simulação feita de aquisição de sistema fotovoltaico em uma companhia elétrica no Brasil



Fonte: NEONERGIA (2023)

Baseando-se nisso, torna-se interessante, então, aproveitar outra forma da energia solar: a térmica, que é o foco deste trabalho. Através desse tipo de energia, pode-se pensar em tecnologias mais acessíveis e de baixo custo para substituir ou complementar a demanda energética da grande parte das famílias brasileiras, como os fornos, secadores, destiladores, coletores e fogões solares.

Assim, sob a justificativa de contribuir para a sociedade brasileira, em especial para as regiões semiáridas do Nordeste, produzindo água potável com destiladores solares de baixo custo e de fácil operação, montagem e desmontagem para transporte é que este trabalho foi realizado.

1.2 Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

Demonstrar a viabilidade de utilização de um destilador solar na produção de água destilada com um baixo custo e facilidades de fabricação, montagem e operação.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Dimensionar o destilador solar de cobertura móvel;
- Fabricar e montar o destilador proposto;
- Testar o destilador em três configurações: convencional; a que utiliza pedras na bandeja absorvedora e com resfriamento;
- Calcular a eficiência do destilador e verificar seu desempenho nas três configurações;
- Analisar a viabilidade técnica e econômica do protótipo;
- Servir de embasamento teórico para pesquisas futuras nessa temática.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Energias Renováveis

Recursos naturais renováveis são recursos naturais que, depois de sua exploração, podem voltar para seus níveis de estoque anteriores por um processo natural de crescimento ou reabastecimento, como por exemplo a energia solar, o ar, a água e os vegetais. (BARBOSA, 2023 *apud* OECD,1997)

Ainda conforme o autor, Barbosa, 2023 *apud* OECD,1997, outro conceito a ser explorado é o de energia renovável, cujo conceito define-se como uma energia derivada de processos naturais que são ou podem ser constantemente reabastecidos e incluem energia solar, eólica, biomassa, geotérmica, hidrelétrica, energia maremotriz e biocombustíveis (SCHOLTEN e BOSMAN, 2013, p. 12; IEA, 2004, p. 12).

As energias renováveis estão sendo utilizadas no mundo todo como uma forma de compor a matriz energética mundial, promovendo uma diminuição da porcentagem de participação de energias e recursos naturais não-renováveis, para que não se dependa exclusivamente destes últimos, uma vez que eles são esgotáveis.

Tem-se como exemplo de recursos naturais renováveis a luz solar, o vento e os vegetais; estes são utilizados para produzir, respectivamente as energias solares, eólica e biomassa/biocombustíveis.

Conforme estudo desenvolvido por Yolcan (2023), abrangendo os anos de 2012 a 2021, a potência instalada e o consumo de energias renováveis aumentaram neste período, apesar dos combustíveis fósseis ainda terem maior participação no consumo de energia primária.

Em 2012, de acordo com a Figura 3 - uma tabela traduzida ainda de Yolcan (2023) - 0,24 Gtep do consumo mundial de energia primária foi atendido por fontes renováveis de energia; este valor aumentou para 0,95 Gtep em 2021. Ainda pode-se ver, de acordo com esta tabela, que no cenário mundial, enquanto o Petróleo teve um aumento de 6,53%, as energias renováveis tiveram um aumento de 295% de 2012 a 2021.

Figura 3: Consumo de energia mundial primária pelas principais fontes disponíveis entre 2012-2021

		2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
OECD	Oil	2.07	2.06	2.03	2.06	2.09	2.20	2.20	2.15	1.88	2.00
	NG	1.43	1.46	1.43	1.46	1.50	1.44	1.51	1.55	1.51	1.54
	Coal	1.05	1.07	1.05	0.97	0.91	0.89	0.86	0.77	0.66	0.71
	NE	0.44	0.45	0.45	0.45	0.45	0.44	0.45	0.42	0.40	0.41
	HE	0.32	0.32	0.32	0.31	0.32	0.31	0.32	0.31	0.31	0.32
Non-OECD	Ren.	0.17	0.20	0.22	0.25	0.27	0.30	0.33	0.40	0.43	0.50
	Oil	2.06	2.12	2.18	2.28	2.33	2.41	2.46	2.43	2.29	2.40
	NG	1.55	1.59	1.63	1.68	1.71	1.71	1.80	1.81	1.78	1.93
	Coal	2.68	2.80	2.83	2.81	2.82	2.83	2.91	2.99	2.96	3.11
	NE	0.12	0.12	0.12	0.14	0.15	0.15	0.17	0.17	0.17	0.19
EU	HE	0.52	0.54	0.56	0.57	0.59	0.61	0.63	0.59	0.60	0.64
	Ren.	0.07	0.09	0.10	0.12	0.15	0.19	0.23	0.29	0.33	0.45
	Oil	0.61	0.60	0.59	0.60	0.61	0.65	0.65	0.55	0.48	0.51
	NG	0.40	0.39	0.35	0.36	0.39	0.40	0.39	0.34	0.33	0.34
	Coal	0.29	0.29	0.27	0.26	0.24	0.23	0.22	0.17	0.14	0.16
World	NE	0.20	0.20	0.20	0.19	0.19	0.19	0.19	0.16	0.15	0.16
	HE	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.08	0.07	0.07	0.08
	Ren.	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.16	0.17	0.19
	Oil	4.13	4.18	4.21	4.34	4.42	4.61	4.66	4.58	4.16	4.40
	NG	2.99	3.05	3.07	3.15	3.20	3.14	3.31	3.36	3.29	3.47
	Coal	3.73	3.87	3.88	3.78	3.73	3.72	3.77	3.77	3.62	3.82
	NE	0.56	0.56	0.57	0.58	0.59	0.60	0.61	0.60	0.57	0.60
	HE	0.83	0.86	0.88	0.88	0.91	0.92	0.95	0.90	0.91	0.96
	Ren	0.24	0.28	0.32	0.37	0.42	0.49	0.56	0.69	0.76	0.95

Fonte: Yolcan (2023)

As principais energias renováveis mais utilizadas no mundo são a energia eólica (*wind energy*), a principal, e em segundo lugar a energia solar (*solar energy*), e estas contribuem para a geração de eletricidade para suprir a demanda mundial. A Figura 4, também proposta por Yolcan (2023) apresenta, em TWh, a energia gerada por essas duas fontes e por outras energias renováveis.

Figura 4: Geração de eletricidade por energias renováveis entre 2018-2021

Electricity generation by renewables for 2018–2021 (TWh).		2018	2019	2020	2021
OECD	Wind	745.4	841.8	935.4	976.7
	Solar	329.9	387.2	442.5	523.3
	Other	367	387.8	388.2	410.1
Non-OECD	Wind	524.7	587.9	661.1	885.2
	Solar	252.8	336.9	403.8	509.2
	Other	248	264	315.7	352.7
EU	Wind	376.9	430.7	397.3	389.5
	Solar	127.5	138.4	143.3	160.6
	Other	196.4	199.1	170	180.1
World	Wind	1270.2	1429.6	1596.4	1861.9
	Solar	582.8	724.1	846.2	1032.5
	Other	615	651.8	703.9	762.8

Fonte: Yolcan (2023)

2.2 Energia Solar

2.2.1 Aspectos Gerais

O foco deste trabalho é a utilização de energia solar. Entende-se que esta, num contexto tecnológico, é aquela expelida da superfície do Sol na forma de luz e calor e que chega à superfície terrestre para ser aproveitada em diversos processos químicos, físicos e biológicos.

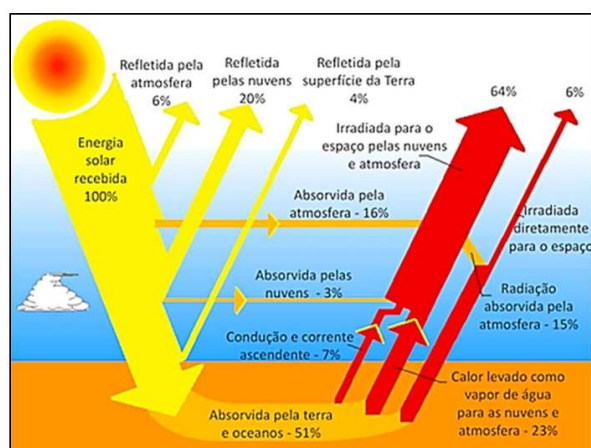
De acordo com Lopes (2004), reações de fusão nuclear ocorrem no núcleo do Sol, a uma temperatura de $1,5 \times 10^7$ °C e pressão 340 bilhões de vezes maior que a pressão atmosférica terrestre no nível do mar.

A massa do Sol contém aproximadamente 98% da massa total do sistema solar, e é composta por Hidrogênio, Hélio, Oxigênio e alguns elementos pesados como o Chumbo. Átomos de hidrogênio se fundem no núcleo do Sol, formando átomos de Hélio (BOUÇANOVA, 2021).

A diferença de massa obtida nas reações termonucleares é expelida na forma de energia e transportada até a superfície solar por convecção e é finalmente liberada em forma de luz e calor (LOPES, 2004).

A energia solar, sob a forma de luz e calor, alcança o planeta Terra e apenas uma parcela chega à troposfera, uma vez que parte é refletida e/ou absorvida pela massa de ar da atmosfera terrestre, por nuvens, vapor d'água e outros "obstáculos" e aerossóis que desviam a radiação solar. Na superfície terrestre, há variabilidade da irradiância solar, e isso pode ser devido a fatores como a homogeneidade da atmosfera e a topografia da superfície terrestre (BOUÇANOVA, 2021).

Figura 5 : Como a radiação solar age no Planeta Terra

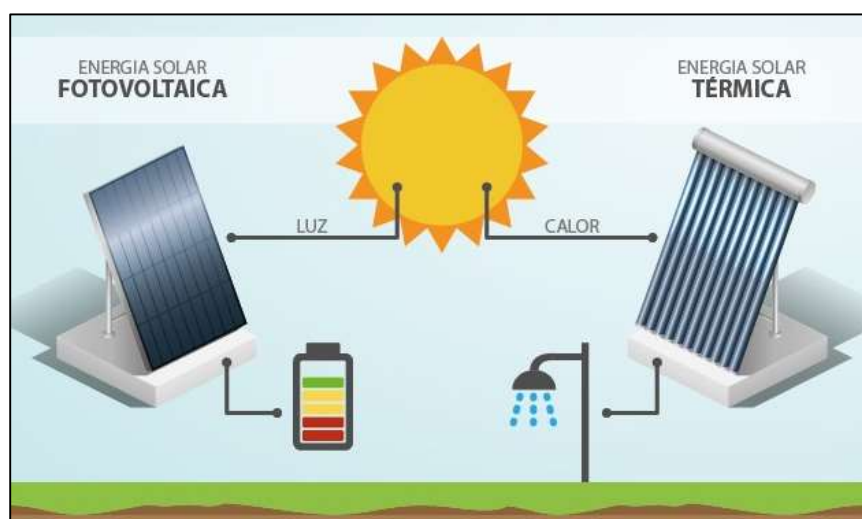


Fonte: Bouçanova (2021 apud NASA, 2016)

Esta energia é renovável, limpa e traz benefícios ao meio-ambiente, pois não é fonte de emissões poluentes. Além disso, a energia solar é abundante e inesgotável, e atingiu quase a 50% de sua existência, de acordo com o Clube de Astronomia e Ciências de Rondônia (CAR,2022).

As principais tecnologias que utilizam energia solar são aquecimento solar, energia solar fotovoltaica, energia heliotérmica, arquitetura solar e fotossíntese artificial (ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY, 2023).

Figura 6 – Formas de aproveitamento da energia solar



Fonte: Adaptado de Ocaenergia (2016)

2.2.2 Componentes da radiação solar

Boland, Huang e Ridley (2013) afirmam que as medições de radiação solar são tipicamente as de radiação global em superfícies horizontais e este tipo de medição é requerida para se avaliar a performance de sistemas que trabalham com o aproveitamento térmico, como é o caso de aquecedores solares e para geração de energia elétrica, como as células fotovoltaicas.

Reis et. al (2013) define o saldo de radiação (R_n) como a contabilidade da radiação de ondas curtas (R_c) e de ondas longas (R_l) incidentes na superfície, ou seja:

$$R_n = R_c + R_l, (1)$$

sendo a radiação de ondas curtas (R_c) a diferença entre a Irradiação solar global incidente (R_g) e a irradiação refletida pela superfície (R_r). O albedo, que é a relação entre a irradiação refletida e incidente (R_r/R_g) é definido por α :

$$R_c = R_g - R_r = (1-\alpha) * R_g (2)$$

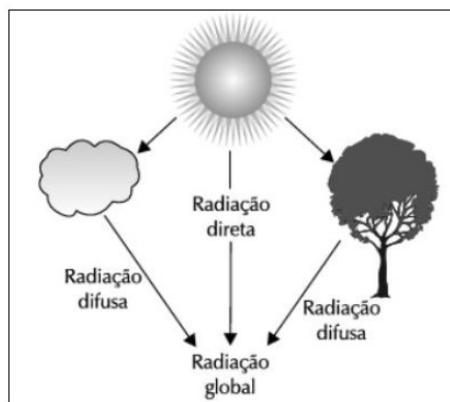
A radiação de onda curta, portanto, refere-se à energia radiante com comprimento de onda próximos aos da luz visível, incluindo ultravioleta e infravermelhos próximos. Já a radiação de onda longa pode ser definida como o fluxo radiante de energia resultante da emissão dos gases atmosféricos e de superfícies líquidas e sólidas da terra. Ela é denominada assim devido aos comprimentos de onda das radiações emitidas por todos os materiais sobre a Terra serem maiores do que os da radiação solar global (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2023).

As nuvens também influenciam na medição das temperaturas na superfície terrestre. A propagação da radiação solar na atmosfera, de acordo com Stephens e Platt (1987) é um fenômeno complexo e difícil de modelar quando a atmosfera está parcialmente nublada. Conforme Rawlins (1989), os modelos climáticos são altamente sensíveis à representação de propriedades radiativas de nuvens.

Em suma, a radiação que chega à superfície terrestre horizontal é uma composição de raios solares que chegam de todas as direções e são absorvidos, refletivos e espalhados por nuvens, massa de ar, vapor d'água, aerossóis e poeiras.

Divide-se em dois tipos: radiação difusa e direta. A soma desses tipos de radiação é definida como radiação global (SILVA,2023).

Figura 7: Tipos de radiação solar



Fonte: Villalva e Gazoli (2012)

Já a irradiância, de acordo com a definição da NASA (2016), trata-se da quantidade de energia eletromagnética incidente em uma superfície por unidade de tempo por unidade de área. No passado, esta quantidade era muitas vezes referida como “fluxo”.

A irradiância pode ser medida obtida em várias configurações, sendo as principais:

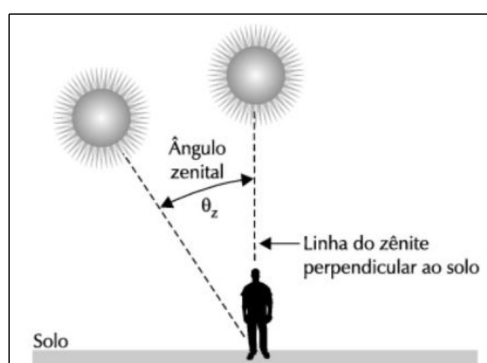
- Direct Normal Irradiance (DNI) - DNI é a sigla para Irradiância Normal Difusa, que representa a quantidade de luz que está vindo perpendicularmente à superfície. A superfície aqui representa o solo ou algo paralelo ao solo. Esse tipo de irradiância pertence aos raios que vêm em linha reta da direção do sol em sua posição atual no céu. Coletores solares e painéis maximizam este DHI por meio de inclinação ou rotação com ângulo de sol;
- Diffuse Horizontal Irradiance (DHI) - DHI é a sigla para Irradiância Horizontal Difusa, que representa a radiação solar que não chega em um caminho direto do sol, mas foi espalhada por nuvens e partículas na atmosfera e vem igualmente de todas as direções;
- Global Horizontal Irradiance (GHI) - GHI é a sigla para Global Horizontal Irradiance, que representa a quantidade total de radiação de ondas

curtas recebidas de cima por uma superfície que é horizontal (paralela) ao solo. GHI é o parâmetro mais importante para o cálculo do rendimento de eletricidade nos painéis fotovoltaicos. Ambos DHI & DNI são, na verdade, componentes do GHI:

$$GHI = DHI + DNI * \cos \theta , (3)$$

onde θ é o ângulo do zênite solar, ou seja, o ângulo entre os raios do sol e a direção vertical. (SINGH,2023)

Figura 8 : Determinação do Ângulo zenital

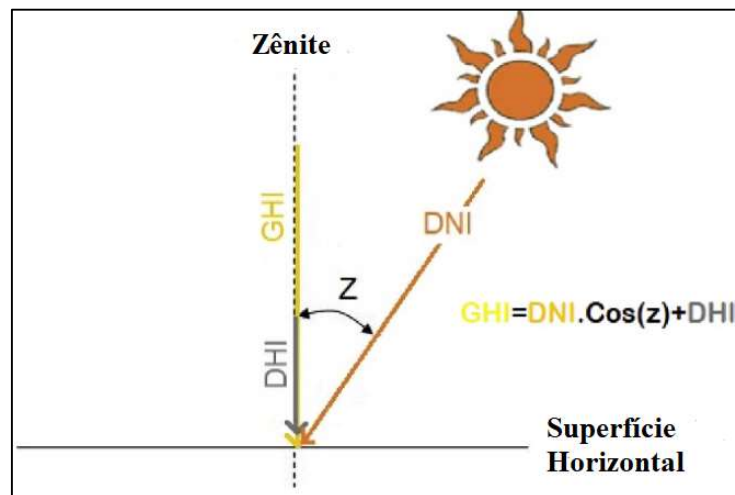


Fonte: Villalva e Gazoli (2012)

A irradiação solar diária varia ao longo do dia de acordo com a posição do sol, com valores crescendo rapidamente de acordo com a variação do ângulo zenital de 0° , o nascer do sol, até o meio-dia, onde o ângulo zenital do sol com a superfície terrestre é de 90° (Figura 8). E depois, vai decrescendo até o pôr do sol, onde o ângulo zenital é 0° . (SILVA,2023)

Outras componentes podem ser obtidas também, como o GTI – Global Tilted Irradiance, ou Irradiância Global Inclinada, a qual é a radiação total recebida em uma superfície com inclinação e azimute definidos, fixa ou com rastreamento solar, amplamente utilizadas no campo de energia fotovoltaica. (KIPP AND ZONEN, 2017)

Figura 9: Principais configurações de medição da irradiação solar



Fonte: Adaptado de Ouria and Sevinc (2018)

2.2.3 Transferência de Calor

A transferência de calor naturalmente ocorre de partículas mais energéticas para menos energéticas (ÇENGEL,2012). Ainda, em consonância com as ideias de Çengel e Kreith e Bohn (2011), há três principais formas de transmissão do calor:

- CONDUÇÃO – necessita de um meio para haver a propagação do calor, sendo a taxa de transferência por condução, considerando uma parede plana:

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx}, (4)$$

onde k é condutividade térmica, A é a área de transferência do calor, T é a temperatura através da parede e x refere-se à espessura da parede onde a condução ocorre;

- CONVECÇÃO – é a combinação da condução + o movimento do fluido, sendo sua taxa dada por;

$$\dot{Q}_{conv} = hA (T - T_{\infty}), (5)$$

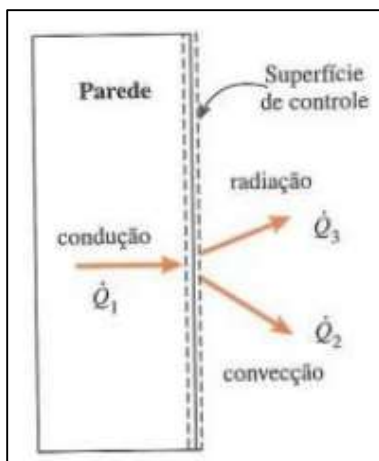
onde h é o coeficiente de transferência de calor por convecção, A é a área da superfície pela qual a transferência de calor por convecção ocorre e $T - T_\infty$ é a diferença entre a Temperatura da superfície e a Temperatura do fluido suficientemente longe da superfície;

- **RADIAÇÃO** – não necessita de um meio material e QUALQUER corpo em uma temperatura diferente de 0K emite radiação e a energia liberada é devido às oscilações ou transições dos elétrons que constituem a matéria. A taxa de radiação que pode ser emitida, numa temperatura termodinâmica T , é dada por: (INCROPERA,2008)

$$\dot{Q}_{emit} = \varepsilon \sigma A T^4, \quad (6)$$

onde ε é a emissividade da superfície e σ é a constante de Stefan-Boltzmann. A superfície idealizada que emite radiação a essa taxa máxima é chamada de corpo negro. Aquela emitida por todas as superfícies reais é menor do que a emitida por um corpo negro com essa mesma temperatura. (ÇENGEL,2012)

Figura 10: Processos de transferência de calor em uma parede plana



Fonte: ÇENGEL (2012)

2.3 Destilação Solar

O processo de destilação de água pode ser feito através de: destilação feita com fontes de energia como combustíveis fósseis ou eletricidade, que corresponde a

65% da capacidade instalada mundial; osmose reversa, que corresponde a 30% capacidade instalada; eletrodialise, que corresponde a 5% da capacidade instalada, por congelamento e dessalinização solar, que tem uma participação quase insignificante em relação aos outros processos (MALUF, 2005).

Ainda conforme o autor, Maluf (2005), este último pode ser feito mediante três processos: a destilação solar, a destilação feita com o auxílio de coletor solar e a separação fotovoltaica.

Este último processo – a destilação solar, é definida como o processo em que através do aquecimento da água salobra ou salgada pelos raios solares, ocorre a produção de vapor d'água que é condensado em uma superfície e coletado como água purificada (SOARES,2004).

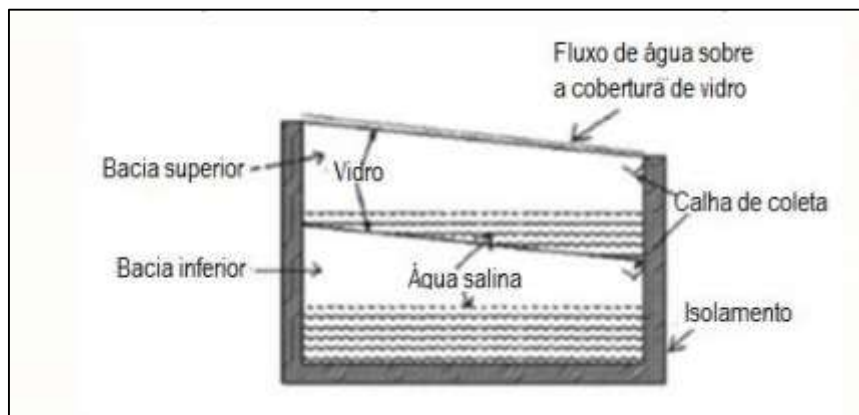
O equipamento responsável pela destilação é o destilador solar. Esse dispositivo é formado basicamente e mais usualmente por um tanque raso em conjunto com uma tampa de vidro, onde ele pode ser de diversos tamanhos e formatos (SÁ, JUCÁ e MOTTA SOBRINHO, 2012).

Os destiladores solares podem diferir entre si quanto às coberturas, os materiais de fabricação, a quantidade de estágios e o uso ou não de concentradores de calor.

Os principais destiladores, de acordo com Silva e Lima (2019), Sarmento et. al. (2020) e Ibrahim, Allam e Elshamarka (2015) são:

- Destilador solar tipo **bandeja**: dispositivo barato onde a água a ser destilada fica dentro de um recinto fechado e é evaporada usando o calor retido absorvido do sol. Esse vapor de água, então, é condensado nas paredes do vidro do destilador, e depois é acumulado.

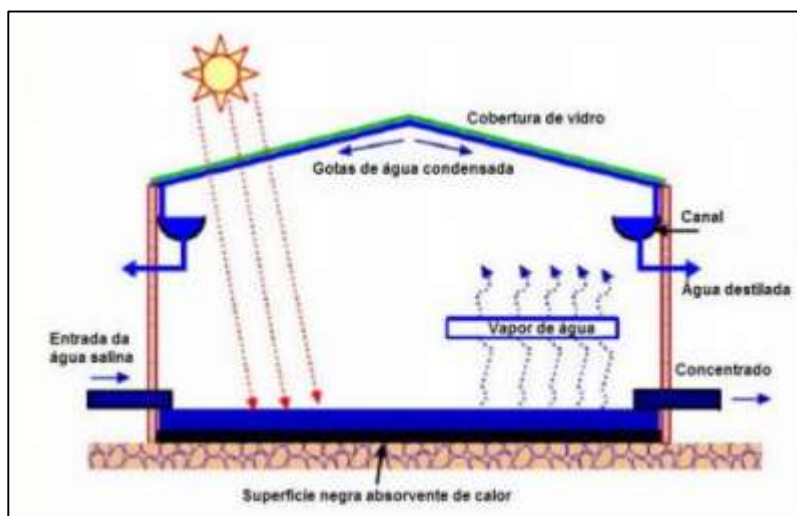
Figura 11: Destilador de bandeja multiestágios



Fonte: Silva e Lima (2019)

- Destilador tipo **pirâmide**: possui as mesmas características do tipo bandeja, porém com a cobertura superior em forma de pirâmide (triangular ou quadrada);

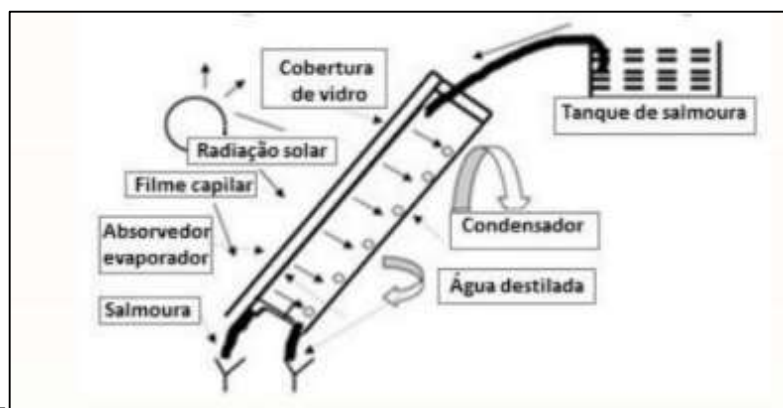
Figura 12: Desilador solar piramidal



Fonte: Clayton (2006)

- Destilador tipo **filme capilar**: faz a destilação através da propriedade de capilaridade da água;

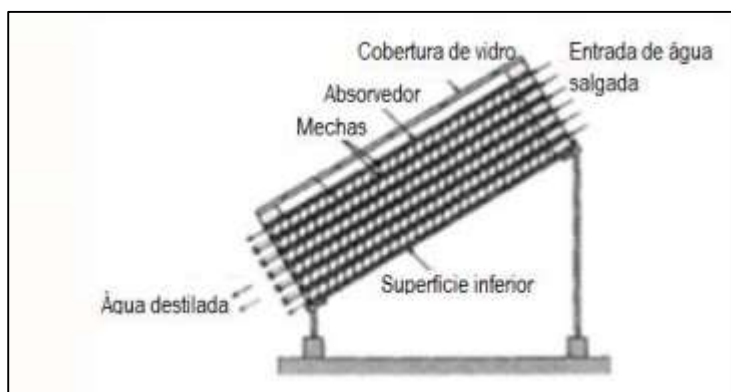
Figura 13: Destilador tipo filme capilar



Fonte: Carvalho (2015)

- Destilador solar tipo **mecha**: espécie de tecido recobrendo a superfície de evaporação, e este fica cheio de água a ser destilada. A água, então, passa lentamente através desse tecido poroso chamado mecha, absorvendo a radiação solar;

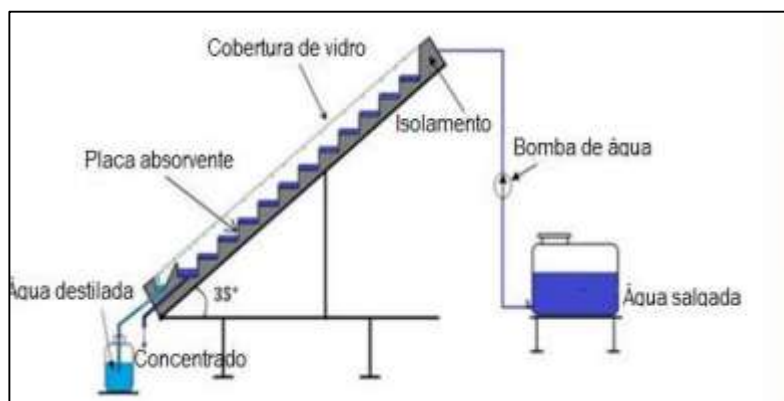
Figura 14: Destilador tipo mecha



Fonte: Kaviti, Yadav e Shukla (2016)

- Destilador tipo **cascata**: a radiação solar aquece a água que evapora e é coletada na parte inferior da tampa de vidro, devido à pequena distância entre a tampa e a placa absorvedora de calor, o destilador fica rapidamente saturado com a água (CARDOSO, 2020). Este destilador apresenta maior produtividade e eficiência se comparado com outros modelos.

Figura 15: Destilador solar tipo cascata



Fonte: Adaptado de Montazeri, Banakar e Ghobadian (2017)

Outros destiladores desenvolvidos por pesquisas acadêmicas também podem ser mencionados na Figura 16:

Figura 16: Tipos e comparações de destiladores

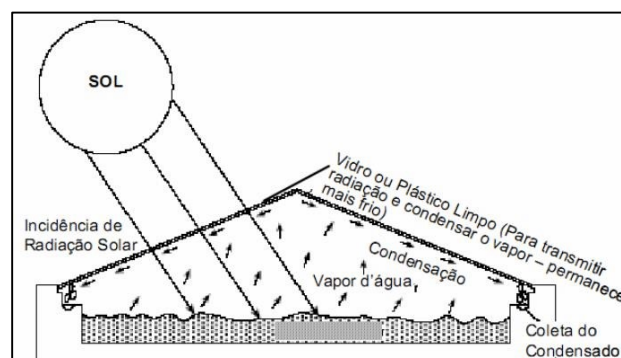
Tipo	Autores	Especificações	Resultados Experimentais	Comentários
Destilador solar acoplado a tubos coletores	Tiwari <i>et al.</i> (2007)	Área: 1m ² Massa de água: 50kg Área tubo coletor: 2m ² Fluxo: 0,035 kg·s ⁻¹	Produção: 4,0kg·m ⁻¹ /dia Eficiência térmica: 17%	Opção mais viável para aquecimento e destilação simultânea de água
Destilador solar com superfície côncava	Kabeel (2009)	Superfície da bacia côncava com quatro lados em forma de pirâmide	Eficiência média de 30% para produtividade horária máxima de 0.5 l/m ² .h após o meio dia	O sistema apresentou um custo de R\$0.1225 por litro destilado
Destilador solar em forma de pirâmide	Vala; Kanabar (2017)	0.82 m × 0.81 m × 0.75 me testado com diferentes profundidades de água (2 a 4 cm)	Apresentou produtividade 48% maior do que a convencional	Tem a forma geométrica apropriada e aumenta a produção de água fresca comparado à outros destiladores
Destilador solar tipo cascata com defletores	Bouzaid <i>et al.</i> (2019)	Cobertura de vidro inclinado com ângulo de 30°	Produtividade pode atingir 1,6kg/m ² .h de 900 W·m ⁻² intensidade de energia solar	O desempenho térmico do destilador pode ser melhorado com a nova modificação

Fonte: Silva e Lima (2019)

O destilador solar utilizado neste trabalho consiste em um destilador com bandeja em estágio simples com uma cobertura de duas águas, em forma de prisma triangular, cujo princípio de funcionamento se baseia no seguinte, em consonância com as ideias de Carvalho (2015):

- a radiação solar aquece a lâmina d'água contida em uma bandeja ou recipiente raso de material condutor revestido por uma superfície negra;
- com a absorção da radiação e elevação da temperatura, a água se transforma em vapor e condensa ao entrar em contato com as faces da superfície da cobertura de vidro, que apresenta menor temperatura;
- a lâmina de água destilada é então coletada na parte lateral do destilador. Ao evaporar, ficam contidos na bandeja os sais e as impurezas que haviam na água.

Figura 17: Esquema simplificado do destilador utilizado no trabalho



Fonte: Silva et. al. (2016)

2.4 Destilador solar de bandeja com cobertura prismática – principais componentes

2.4.1 Tanque ou bandeja

O tanque contém a água de alimentação, que será destilada. Em geral essa base é pintada com uma tinta preta ou com um material impermeável preto, a fim de favorecer a absorção da maior quantidade possível de radiação solar e transformá-la em calor. O tanque deve possuir uma profundidade entre 1,5 a 2,5cm – a depender da quantidade de efluente a ser tratada por ciclo (AL-HAYEK, 2004)

Sua superfície deverá ser lisa para facilitar a limpeza. O líquido pode ser alimentado continuamente ou de forma intermitente, mas a quantidade de líquido na cuba (base) deve ser mantida constante de forma a evitar perdas bruscas de quantidade de calor (SAMME, 2007).

Maluf (2005) apresenta um comparativo de materiais e suas propriedades para a fabricação do tanque.

Figura 18: Materiais dos tanques e algumas propriedades

Tipo de material	Durabilidade	Custo	Disponibilidade	Limpeza	Portabilidade	Toxicidade
			local			
Aço esmaltado	alta	Alto	baixa	alta	média	baixa
Borracha EPDM	alta	Alto	baixa	alta	alta	baixa
Borracha butil	alta	Alto	baixa	alta	alta	baixa
Manta asfáltica	alta	Médio	média	média	média	[a]
Cimento amianto	alta	Médio	baixa	média	média	alta
Polietileno	média	Baixo	baixa	média	alta	baixa
Concreto	média	Baixo	alta	média	baixa	baixa
Madeira	baixa	[a]	[a]	média	média	baixa
Fibra de vidro	média	Médio	baixa	alta	média	baixa

[a] não conhecido ou depende de condições locais

Fonte: Maluf (2005)

2.4.2 Cobertura

A cobertura é o segundo componente mais crítico do destilador, deve ser constituída de material transparente às radiações solares, para que sejam transmitidas pela tampa e absorvidas pela base do destilador, aumentando a temperatura do líquido e a pressão do vapor (MALUF, 2005).

De acordo com Pereira (2007) *apud* Holanda (2019), o material da tampa deve resistir às altas exposições ultravioletas e a pressão gerada no interior do destilador, a fim de evitar uma expansão e destruir a vedação. Deve também resistir às constantes trocas térmicas e às intempéries. O ideal é ter uma superfície com baixo índice de rugosidade, a fim de evitar a formação de gotas localizadas, bem como facilitar a formação de uma lâmina do destilado que possa fluir de forma contínua e sem dificuldades. Outros aspectos como custo, vida útil, efetividade, resistência a altas temperaturas e, principalmente, boa transmissão para a faixa do espectro solar na região do ultravioleta.

Os vidros são os materiais mais utilizados por serem eficientes em vários desses aspectos, contudo materiais plásticos laminados como polietileno de alta densidade, polipropileno e policarbonato também podem ser utilizados. (HOLANDA, 2019)

Um material como o vidro simples, por exemplo, é semitransparente em comprimentos de onda pequenos, mas é opaco em maiores comprimentos de onda devido ao teor de ferro; quanto maior essa porcentagem maior serão as perdas de absorvidade e menor a porcentagem de transmissibilidade (LOPES, 2013).

Figura 19: Tipos de vidro para coberturas

PROPRIEDADE	TIPOS DE VIDRO		
	Vidro Comum	Vidro Lima	Vidro Cristal/branco
Índice de refração	1,52	1,51	1,50
Transmitância normal(%)	81 – 85	85 - 87	90,50
Espessura (Pol)	0,175 – 0,187	0,125 – 0,187	0,187
Perdas por reflexão(%)	8,0 – 8,2	8,0 – 8,1	8,00
Perda por absorção (%)	6,8 – 11,0	4,9 – 7,0	1,50
Óxido de ferro	0,1 – 0,13	0,05	0,01

Fonte: Lopes (2013)

2.4.3 Canaleta de coleta

A canaleta de coleta encontra-se nas laterais do destilador, normalmente na base da cobertura de vidro, e tem como finalidade a coleta do líquido destilado e seu envio para um recipiente de coleta. Sua dimensão não pode ser exagerada, a fim de evitar que uma região grande do destilador seja sombreada (MALUF, 2005).

Ainda em consonância com as ideias do autor e de Holanda (2019), o material mais indicado é o aço inoxidável, apesar de seu alto custo. O alumínio não deve ser corroído na presença de água destilada, mas é aconselhável revesti-lo, a fim de protegê-lo melhor. Ferro galvanizado não deverá durar mais que uns poucos anos, e cobre ou latão não devem ser usados pois podem trazer riscos à saúde. O polietileno não é indicado pois ele gera gosto e cheiro na água. O PVC tem sido usado, mas seu uso é restrito devido à grande exposição ao calor e à luz solar. O material deve também estar devidamente limpo para evitar contaminação.

2.4.4 Outras partes

Para a vedação do destilador, como a temperatura não ultrapassa dos 90° em destiladores solares convencionais, conforme Sousa (2010), podem ser utilizados vários materiais, sendo seu uso comumente definido pela relação custo/benefício e durabilidade (SOUZA JÚNIOR, 2017).

Sem o isolamento adequado a eficiência do destilador pode diminuir cerca de 14% para tanques rasos, mostrando a grande importância desse componente (SAMME, 2007).

A utilização de emborrachado é muito eficaz. A área de contato entre o emborrachado e o vidro é pequena, e o material EVA (Etil, Vinil e Acetato) apesar de apresentar baixa resistência ao calor suporta as apresentadas dentro do destilador solar. (ASHBY, 2012)

Figura 20: Materiais utilizados para vedação

Materiais	Índice	Comentário
EVA elastomérico	0,7-1	A escolha natural; baixa resistência ao calor e a alguns solventes
Poliuretanos	2-5	Amplamente usados para vedações
Borrachas de silicone	0,2-0,5	Capacidade à temperatura mais alta do que à dos elastômeros de cadeia de carbono, quimicamente inertes
PTFE	0,05-0,1	Caro, porém quimicamente estável e com capacidade à alta temperatura
Poliétilenos	0,02-0,05	Baratos porém sujeitos a adquirir deformação permanente
Polipropilenos	0,2-0,04	Baratos porém sujeitos a adquirir deformação permanente
Náilon	0,02-0,03	Próximos do limite superior para a pressão de contato
Cortiça	0,03-0,06	Baixa tensão de contato, quimicamente estável
Espumas rígidas de polímeros	Até 0,03	Pressão de contato muito baixa; vedações delicadas

Fonte: Ashby (2012) apud Souza Júnior (2017)

3 ESTADO DA ARTE

3.1 Cenário Mundial

Existem vários tipos de destiladores em todo o globo terrestre. Holanda (2019) *apud* Destefani (2019) elenca que eles diferem entre si principalmente nos materiais utilizados, nas geometrias, nos métodos de segurar e apoiar a cobertura transparente e os arranjos para admissão e descarga da água.

Vasconcelos (2015) apresenta uma prospecção com a temática “destilação solar”, utilizando a base da Scopus®, uma das maiores do mundo e obteve-se os seguintes números (considerando até o ano de 2015):

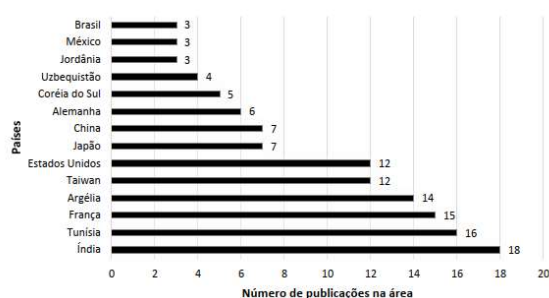
- 50 milhões de registros;
- 21.000 títulos;
- 20.000 periódicos revisados por pares;
- 25,2 milhões de patentes de 5 escritórios de parentes.

Ainda segundo o autor, os três indicadores da plataforma utilizados para esta prospecção foram:

- Países que mais contribuem na publicação de trabalhos na área;
- Evolução temporal no número de publicações, compreendendo o período de 1966 a 2015;
- Contribuição das principais revistas/periódicos especializadas da área.

Segue-se abaixo um levantamento (base SCOPUS) dos países mais relevantes em pesquisas com destiladores solares (VASCONCELOS, 2015).

Figura 21: Número de trabalhos publicados sobre energia solar no mundo de 1966-2015



Fonte: Vasconcelos (2015)

A dessalinização solar ganhou significativa atenção e esforços de pesquisa devido ao seu potencial para enfrentar a escassez de água e fornecer soluções sustentáveis para regiões com acesso limitado à água doce. Embora a dessalinização seja uma solução valiosa para crises globais de água, é importante reconhecer que existem desafios associados à implementação de melhorias desta tecnologia, incluindo custos iniciais de instalação e operação quando se utilizam recursos mais avançados como biofluidos e nanopartículas.

Em um estudo recente, Cheng et al. (2023) apresentaram uma abordagem sustentável para a produção de água doce por meio da energia solar, utilizando um concentrador solar semicircular multiefeito com estrutura de resfriamento central (RFSD). Os autores destacaram que a RFSD aprimora a eficiência de produção de água, reduzindo a capacidade térmica da água do mar e otimizando a temperatura da superfície de evaporação. Os resultados indicaram que a eficiência de produção de água doce da RFSD foi de 2,2 kg/m²h, com um custo de produção de água doce de 0,6-0,8 \$/m³, demonstrando vantagens em relação a outros destiladores solares. Além disso, compararam os resultados teóricos e experimentais da RFSD em condições climáticas reais.

Em outra pesquisa, El Hadi Attia et al. (2023) realizaram uma análise completa de um destilador solar hemisférico modificado, que incorpora um coletor convexo, camadas de pávio de tecido de juta e materiais de mudança de fase para otimizar o desempenho. Os resultados mostraram melhorias significativas na taxa de evaporação e condensação, aumentando a eficiência energética em até 38,5%, a eficiência exergética em até 47,5% e a eficiência econômica em até 33,3%. O estudo também explorou o potencial de materiais de armazenamento de energia, como nano compósitos de mudança de fase e tubos de calor, para aprimorar ainda mais o destilador solar hemisférico.

Além disso, Kadhim Hussein et al. (2023) realizaram um estudo experimental sobre materiais de armazenamento de energia de baixo custo e seu impacto no desempenho de destiladores solares em diferentes profundidades de água. Os experimentos foram realizados em dois casos diferentes: um destilador solar

modificado com 25 bolas de sal e 17 esponjas com uma profundidade de água de 1,5 cm, e outro com a mesma quantidade de bolas de sal e esponjas, mas com uma profundidade de água de 2 cm. Os resultados desses casos foram comparados com um destilador solar convencional com uma profundidade de água de 1,5 cm.

Eles mostraram que o destilador solar modificado com bolas de sal e esponjas com uma profundidade de água de 1,5 cm teve uma produtividade de 44,32%, enquanto o mesmo destilador com uma profundidade de água de 2 cm teve uma produtividade de 23,51%. Outros métodos de aprimoramento, como o uso de sacos de areia, bolas de alumínio e aletas, também foram testados e comparados. Concluiu-se que o uso de materiais de armazenamento de energia de baixo custo pode melhorar significativamente o desempenho dos destiladores solares, mas a profundidade da água é um fator crítico a ser considerado.

Djaballah et al. (2023) conduziram um estudo experimental que explorou o papel da tensão superficial na melhoria do desempenho de destiladores solares, utilizando diferentes designs de aletas plásticas. Foram testados quatro destiladores solares com diferentes designs de aletas plásticas: um destilador solar simples (RSS) sem aletas, um destilador solar com uma aleta (MSS1), um destilador solar com duas aletas (MSS2) e um destilador solar com três aletas (MSS3). Durante o experimento, foram registradas as temperaturas em diferentes locais da água do reservatório, da cobertura, da água destilada e do ar ambiente, bem como a intensidade solar. Além disso, foi utilizado um cilindro graduado para medir a quantidade de água destilada produzida pelos quatro destiladores solares.

Durante o experimento, o destilador solar com três aletas (MSS3) produziu a maior quantidade de água destilada, com uma média de 1,2 litros por dia, seguido pelo destilador solar com duas aletas (MSS2), com uma média de 1,1 litros por dia, o destilador solar com uma aleta (MSS1), com uma média de 0,9 litros por dia, e o destilador solar simples (RSS), com uma média de 0,7 litros por dia.

A análise da qualidade da água destilada mostrou que todos os destiladores solares produziram água destilada de alta qualidade, com valores de pH variando de 6,84 a 8,82, condutividade elétrica variando de 28 a 5955 $\mu\text{S}/\text{cm}$, cálcio variando de 8,03 a 210,2 mg/L, magnésio variando de 4,861 a 951,1 mg/L, cloreto variando de

15,271 a 500,212 mg/L e amônio variando de 0,01 a 0,010 mg/L. Em geral, este estudo demonstrou que o uso de aletas plásticas pode melhorar significativamente o desempenho de destiladores para a purificação de água (DJABALLAH ET AL., 2023).

Finalmente, Sharshir et al. (2023) focaram na melhoria do desempenho de unidades de dessalinização solar integradas com materiais de armazenamento de energia nano-baseados. Foram realizadas modificações sequenciais na unidade de dessalinização solar, incluindo o uso de cobre corrugado coberto com tecido de algodão preto como absorvedor, parafina como material de mudança de fase (PCM), gordura de carneiro, nanofluido de grafite e gordura de carneiro nano-baseada com nanopartículas de grafite dispersas.

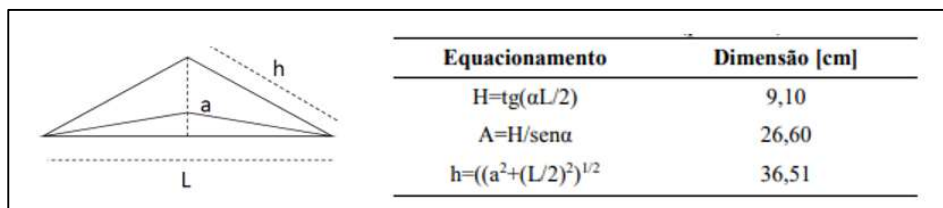
Os dados experimentais foram usados para calcular os indicadores termo-enviroeconômicos. Os resultados mostraram que a razão de aumento diário de rendimento foi de 43%, 59,77%, 78,77% e 95,2% para os quatro casos, respectivamente. O melhor desempenho termo econômico foi alcançado usando-se o último caso, com eficiências térmicas e exergéticas de 61,7% e 5,8%, respectivamente, e melhorias equivalentes de 94,76% e 110,1%. Além disso, o preço da água doce foi reduzido para 0,0106 \$/L, o que representa uma redução de custos de 33,90%. Os resultados foram obtidos por meio de comparações entre a unidade de dessalinização solar modificada e uma convencional, medindo várias temperaturas, rendimento horário, eficiência térmica e exergética, preço da água doce e parâmetros ambientais e enviroeconômicos. (SHARSHIR ET AL., 2023)

3.2 Cenário Brasileiro

De acordo com Lopes (2013), o interesse sobre destiladores solares cresceu devido às condições impostas aos militares, quando a falta de água potável naquela época era uma barreira a ser ultrapassada. Logo, desenvolveram-se estudos na área solar para necessidades militares no mar concebendo diversas patentes durante as publicações. Em território brasileiro, os primeiros indícios de estudos por destiladores solares foram em meados da década de 70, pelo Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA). A Petrobras, pioneiramente em 1987, iniciou-se seu programa de dessalinização de água do mar, mas utilizando outro processo, o de osmose reversa.

Da década de 70 até os dias atuais, foram desenvolvidos muitos tipos de destiladores solares em todas as regiões do Brasil. Na região Sudeste, em Minas Gerais, Faria et al. (2015) construiu um destilador de estrutura piramidal de base quadrada de 50cm de lado e cobertura de vidro com dimensões previstas na Figura 22, considerando o ângulo de inclinação (faces) 20°. Este utilizou uma água salinizada produzida em laboratório.

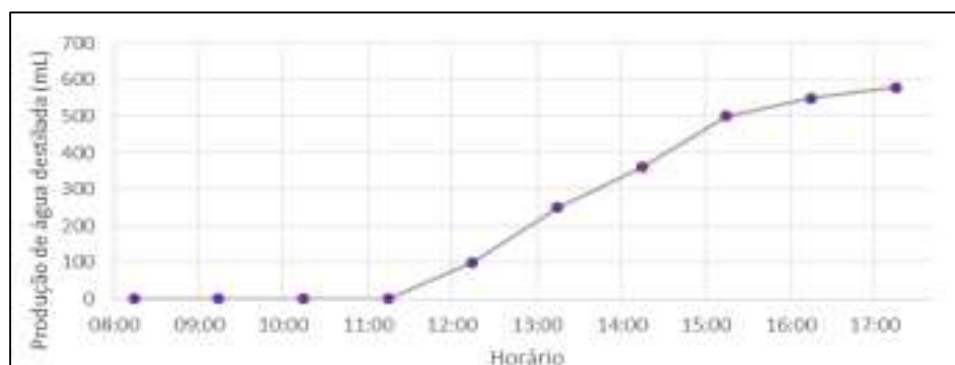
Figura 22: Dimensões do vidro do destilador construído em Minas Gerais



Fonte: Faria et al. (2015)

Os testes do destilador foram realizados de 8h às 16h, produzindo um valor máximo de volume destilado de 580 mL/d, com eficiência de 56,5% (Figura 23).

Figura 23: Comportamento do destilador ao longo do dia de maior destilação



Fonte: Faria et al. (2015)

Figura 24 : Destilador fabricado em Minas Gerais



Fonte: Faria et al. (2015)

Apesar de ser conhecida como a região de temperaturas mais amenas, na região Sul também foram desenvolvidos destiladores solares. A Universidade Federal Tecnológica do Paraná, conforme Vasconcelos (2015), desenvolveu o destilador da Figura 25, cujo volume destilado diário máximo foi de 0,93 L/m². dia e rendimento variando entre 30% e 50% (porém, os baixos valores também foram adquiridos devido a um vazamento).

Figura 25: Destilador produzido na UTFPR



Fonte: Vasconcelos (2015)

Conforme Damasceno (2016 apud Dimri et al, 2008), foi realizado um experimento testando um sistema de destilação ativo e outro passivo, e foi detectado que no ativo houve um aumento da temperatura na água da bandeja do destilador, resultando num maior rendimento para o sistema ativo; contudo, a utilização do sistema passivo torna-se mais viável economicamente, mostrando-se eficiente também na qualidade da produção.

No estado de Goiás, na Região Centro-Oeste, foi construído na UFG um destilador de vidro que conseguiu destilar 1,51 kg/m² em 10h de experimento (8h às 18h), atingindo uma máxima eficiência de 41,33%, às 17h (DAMESCENO, 2016).

Figura 26: Destilador solar de duas águas produzido pela UFG



Fonte: Damasceno (2016)

Já na região Nordeste, segundo Marinho et al. (2012), a UEPB desenvolveu um protótipo em Campina Grande, na Paraíba, feito de uma caixa de PVC de 0,5m³, pintada em preto fosco e elevada a 100cm do solo, ligada a um coletor solar de 9m² produzido com garrafas PET e caixas Tetra Pak. Este sistema conseguiu destilar 9,27L de água por dia no período diurno, considerando 7h de funcionamento. O artigo contendo tal protótipo não mencionou o custo de produção de tal aparato e nem o seu rendimento.

Figura 27: Destilador solar produzido na UEPB



Fonte: Marinho et al. (2012)

Segundo Rai (1982), se uma parcela extra de energia térmica é adicionada por meio de coletores solares ou por meio de aproveitamento de energia de outros processos, trata-se de um destilador ativo. Porém, se não houver energia extra, trata-se de uma destilação passiva.

Em 2021, em Recife/PE, foram estudados na Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco (POBLI/UPE), dois destiladores, um utilizando nanopartículas de forma a aumentar eficiência dos destiladores passivos convencionais e outro convencional, destilando apenas água.

Os protótipos foram fabricados com uma estrutura externa de madeira MDF de 6mm de espessura, enteladas com filme adesivo de vinil preto. Foram colocadas massas epóxi para colagem das chapas de MDF e utilizado silicone para eventuais vazamentos. Para a cobertura, utilizou-se um filme de vinil transparente. Concluiu-se que o destilador aumentou sua eficiência em 28,94% com a utilização de nanofluido de ouro sintetizado em laboratório, 28,25% com o nanofluido de cobre e 22,21% com o nanofluido de prata e a produção de água destilada também aumentou em 28,12%, 21,74% e 19,23% para os nanofluidos de ouro, cobre e prata, respectivamente (BOUÇANOVA, 2021).

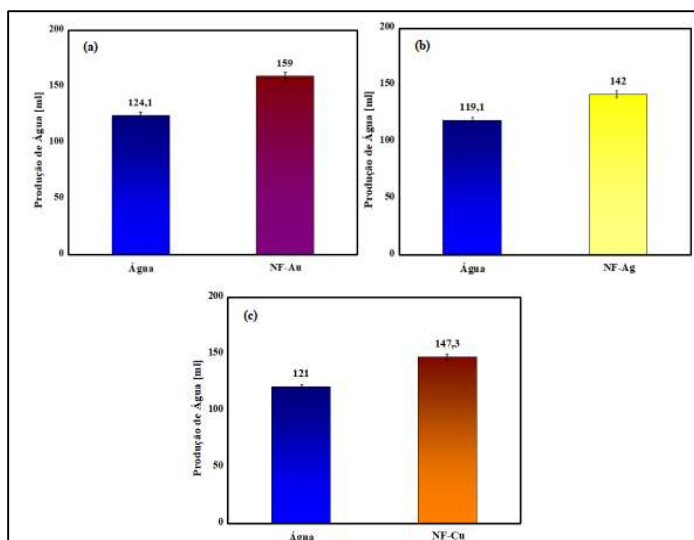
Figura 28: Destiladores produzidos na POLI/UPE



Fonte: Bouçanova (2021)

Ainda conforme Bouçanova (2021), os volumes máximos destilados foram de 159 mL utilizando o nanofluido de ouro, 147,3 mL com o de cobre e 142 mL com o de prata. Os ensaios foram realizados das 6h às 17h, com placa absorvedora de alumínio com 1mm de espessura e 0,06m² de área de captação.

Figura 29 : Produção diária do destilador utilizando nanopartículas



Fonte: Bouçanova (2021)

Na região Norte do Brasil, foi encontrada uma matéria sobre um protótipo de destilador solar construído pela Universidade Federal do Amazonas (Figura 30), porém, o trabalho configurou-se apenas como Trabalho de Conclusão de Curso e sem publicações acadêmicas.

Figura 30 : Protótipo de destilador solar construído no estado do Amazonas



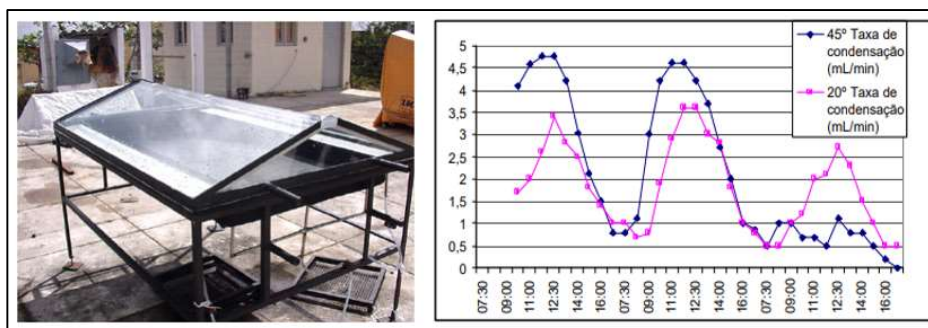
Fonte: UFAM (2015)

Por fim, no estado do Rio Grande do Norte, existem dois principais destiladores solares além deste construídos pelo departamento de Engenharia Química da UFRN e da Universidade Federal Rural do Semiárido.

O primeiro é um destilador de base feita de fibra de vidro negra (coloração obtida pela adição de gel negro a base de nitratos a massa da fibra) e está suportada em armação de ferro comercial. O suporte do destilador possui dispositivos que permitem variar sua inclinação.

O isolamento do fundo de destilador é resíduo de lã com 0,01 m de espessura (a base apresenta um comprimento de 1,5 m e largura de 0,72 m). As canaletas possuem, cada uma, 0,10 m de diâmetro, totalizando uma largura externa de 1 m se somadas as espessuras das paredes divisórias. Com essas dimensões o destilador pode utilizar um volume de água a ser destilada de 22,5 L, com lâmina de água de 0,02 m (BEZERRA, 2004).

Figura 31: Destilador construído na UFRN pelo PPGEQ



Fonte: Bezerra (2004)

Como é visto na Figura 31, este destilador conseguiu uma produção máxima de 2,304 L/d e esta pesquisa foi focada mais em parâmetros físico-químicos que termodinâmicos. Já o produzido pela Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), foi um do tipo piramidal de área 0,0576 m² com eficiência de 19,62%, custo de R\$80 e 100mL de volume destilado em 7h de funcionamento.

Figura 32: Destilador Solar construído pela UFERSA no estado do RN



Fonte: Carvalho (2019)

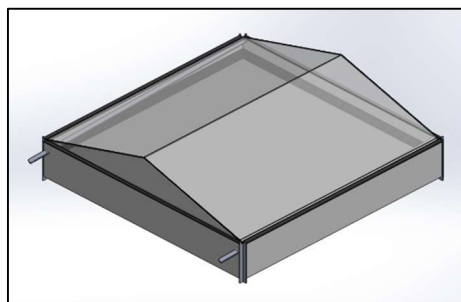
4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, serão mencionados os materiais e equipamentos utilizados na fabricação e nos testes realizados no mesmo, bem como a metodologia utilizada para análise dos dados coletados.

4.1 Fabricação do destilador solar

Utilizou-se como base os modelos descritos em protótipos nas literaturas vigentes, e procurou-se verificar quais eram os seus elementos construtivos e se eles estavam disponíveis no mercado, além de relacionar qual foi o custo total do material empregado (conforme Tabela 3). Desenhou-se o modelo em um software de CAD, o *Solidworks*, conforme a Figura 33.

Figura 33: Vista isométrica do modelo do destilador solar de cobertura móvel



Fonte: LHMES (2020)

Diante da dificuldade financeira de diversas famílias, que por sua vez irão utilizar esse tipo de equipamento, os materiais empregados foram selecionados a partir da premissa de menor custo e fácil disposição, como isopor, madeiras conhecidas como “compensados”, pregos, parafusos, cantoneiras, emborrachados, tintas à base de água, ou seja, não utilizando “solventes” (para não correrem o risco de interagirem quimicamente com o fluido e a qualidade da água), entre outros. A lista completa de materiais e seus custos para fabricação pode ser vista na Tabela 3.

Tabela 3: Custo de fabricação do destilador solar convencional de duas águas

Materiais	Preço
Compensado de Madeira	R\$ 100,00
Isopor	R\$ 30,00
Cantoneira+Corte	R\$ 24,00
Chapa Preta +Dobra	reaproveitada
Vidro+ Corte	R\$ 100,00
Pregos	R\$ 4,50
Parafusos+Broca	R\$ 6,00
Papel Borracha	R\$ 10,00
Emborrachado	R\$ 18,50
Tinta Preta	R\$ 25,00
Tinta Branca/Colorida	reaproveitada
Cola de Madeira	R\$ 9,00
Cola Branca	R\$ 4,50
Pincel	R\$ 3,50
Cola de Silicone	R\$ 6,00
Pincel de Rolo	R\$ 2,50
TOTAL:	R\$ 343,50

Fonte: Autoria Própria (2022)

Uma vez definidos o modelo e os materiais a serem utilizados, iniciou-se a construção do destilador. Inicialmente, montou-se uma base quadrada de 1m x1m, com o compensado de madeira (adquiriu-se uma folha de 2000mmX1000mm, de 17mm de espessura), conforme a Figura 34, e compensado nas laterais, escolhendo uma altura de aproximadamente 17cm, conforme a Figura 35.

Figura 34: Base de compensado utilizada para o fundo do destilador



Fonte: LMHES (2020)

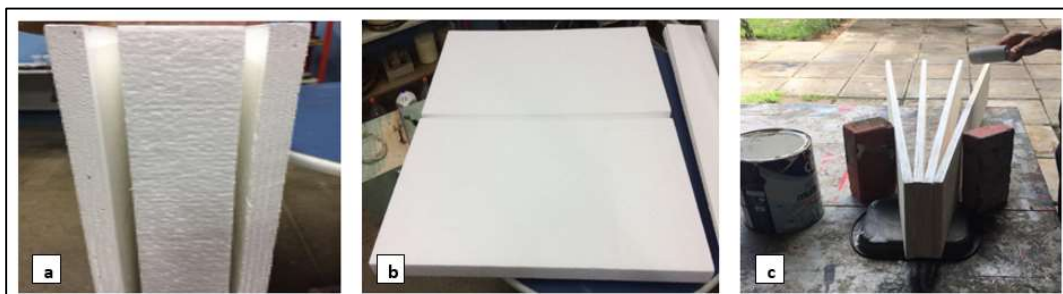
Figura 35: Fabricação da parede lateral do destilador



Fonte: LMHES (2020)

Para um melhor isolamento, foram inseridas chapas de madeira intercaladas com isopor na base (utilizou-se duas folhas de EPS, de 50mm de espessura, com dimensões de 1000mm x500 mm), conforme as Figuras 36a, 36b. A altura do conjunto isolante, (madeira+isopor+madeira), conforme a Figura 36c, foi de 84mm. Logo após, foram fixados à base, através de pregos, as laterais e pintadas com tinta branca, conforme as Figuras 36 e 37.

Figura 36 : Montagem do isolamento



Fonte: LMHES (2020)

Figura 37: Fixação das paredes e do fundo do destilador



Fonte: LMHES (2020)

Uma vez montada a base e as laterais, foi fabricada uma bandeja enegrecida para melhor absorção e emissão do calor e conseqüentemente melhoria da eficiência do destilador, feita com tinta preta à base de água e chapas de aço dobradas (de 1,5mm de espessura e com dimensões de 2000 mm x1200mm), mostrada na Figura 38.

Figura 38: Bandeja com superfície enegrecida – placa absorvedora



Fonte: LMHES (2020)

Para melhoria da vedação nas laterais e na parte superior, foram compradas dez folhas de emborrachados de cor preta de baixa espessura de EVA (3mm) para as laterais seguidos de cantoneiras, sendo estas últimas construídas de chapas de alumínio encontradas com facilidade no mercado, e estas foram fixadas onde existia o emborrachado de EVA, conforme está denotado nas Figuras 39a, 39b, 39c e 39d e na parte superior foi inserido um emborrachado de EVA de espessura maior (10mm de largura e 5mm de espessura, com comprimento 5000mm), conforme visto na Figura 39e.

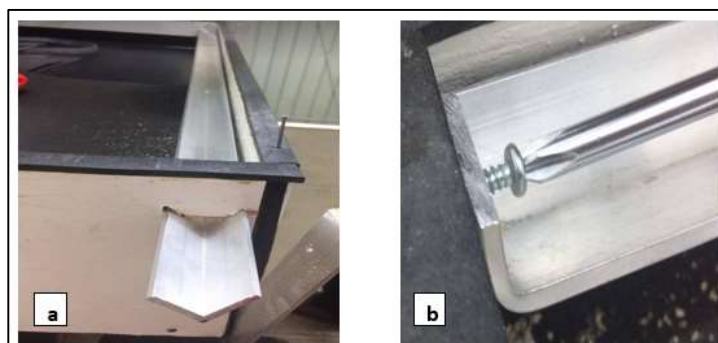
Figura 39: Colocação das cantoneiras nas laterais e das vedações



Fonte: LMHES (2020)

Procedeu-se, então, com a fixação de duas calhas (canaletas) de alumínio de 3000mm de comprimento por 19,05mm de largura (3/4") e espessura de 3,175mm (1/8"), para o escoamento do líquido a ser destilado, conforme as Figuras 40a e 40b.

Figura 40: Fixação das canaletas de recolhimento



Fonte: LMHES (2020)

Uma vez instaladas as canaletas de escoamento do fluido, isolou-se o restante do destilador com mais emborrachado de EVA de baixa espessura (3mm) de cor preta, para maior absorção de calor nas laterais do destilador, sendo esse processo realizado após a instalação das calhas coletoras, conforme mostrado na Figura 41.

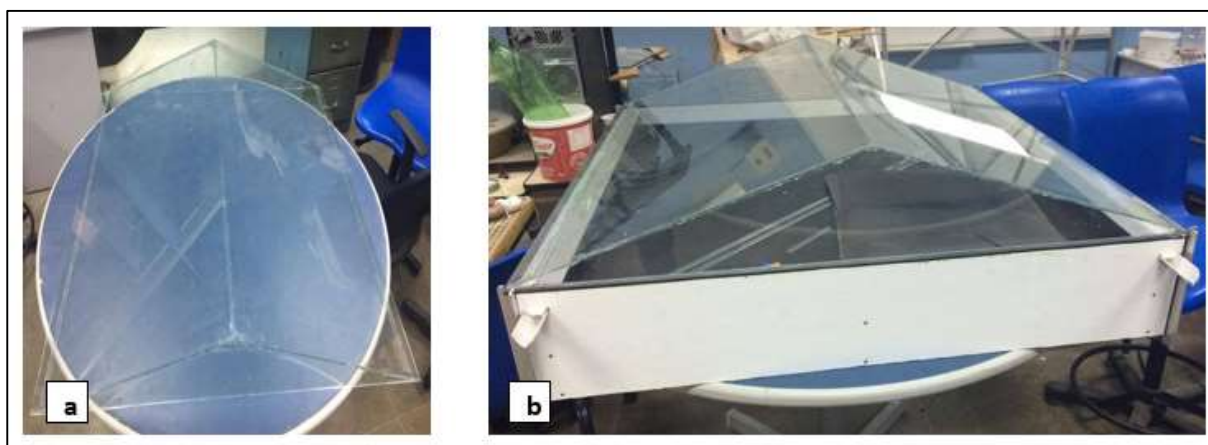
Figura 41: Fixação do restante do isolamento



Fonte: LMHES (2020)

Por fim, foi montada uma estrutura semelhante a um prisma triangular, com vidro plano de 3mm de espessura de espessura e cola, nas dimensões do destilador, para ser encaixada em sua base, conforme as figuras 42a e 42b.

Figura 42: Vitrais e destilador pronto



Fonte: LMHES (2020)

4.2 Equipamentos utilizados para aquisição de dados dos ensaios

Para analisar vários parâmetros do destilador, foram utilizados os seguintes materiais:

- Termômetro Digital à laser infravermelho TI-870 Instrutherm, com *range* de leitura entre -50°C e 550°C , cuja resolução é de $0,1^{\circ}\text{C}$ (Figura 43a), para verificar as temperaturas;

- Medidor de Energia Solar Portátil Digital modelo MES-100 da Instrutherm (Figura 43b), com resolução de 1 W/m^2 e escala até 2000 W/m^2 , para verificar a Irradiância Solar Global;
- Termopares tipo K conectados a um termômetro de modelo TH-060 RS232, com escala de -200°C a 1370°C e resolução $0,1^\circ\text{C}$ (Figura 43c);
- Anemômetro modelo AVM-07 PROVA para medir a velocidade dos ventos (resolução $0,01\text{m/s}$ e escala de 0 a 45 m/s) a temperatura ambiente (com escala variando de 0°C - 45°C) – Figura 43d;
- Becker de 100mL para contabilização do volume destilado -Figura 43e;
- Fitas de pH fabricante KASVI referência K36-014, escala 0-14. , para verificar se houve alteração;

Figura 43: Instrumentos utilizados nos ensaios



Fonte: LMHES (2021)

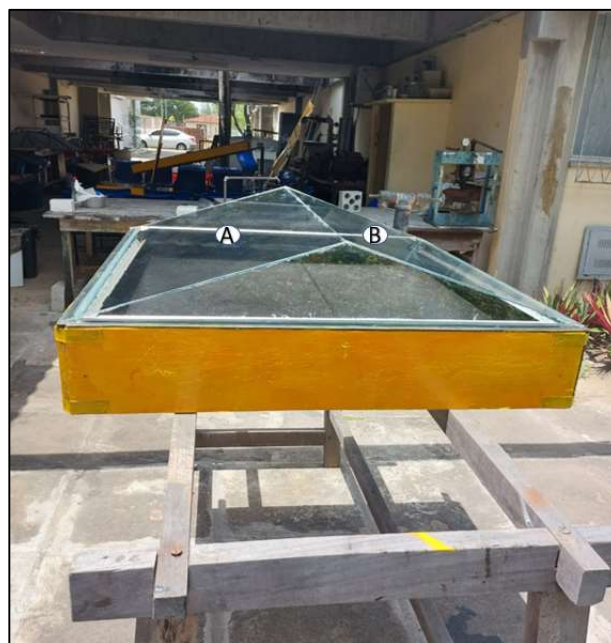
Em posse desses equipamentos, foram feitos os seguintes ensaios: ensaio de estagnação, ensaio convencional, ensaio utilizando pedras (britas) e ensaio com resfriamento à água.

4.3 Materiais e Procedimentos Experimentais dos Ensaio

4.3.1 Ensaio de Estagnação

Neste ensaio, realizado entre 13 e 14/09/2022, foram inseridos 10L de água no destilador, e o dispositivo é então exposto à radiação solar e alinhadas as duas faces A e B, conforme demonstrado na Figura 44, sendo a face A apontada para o Leste e a B para o Oeste e posicionado na parte descoberta do LMHES para receber total incidência dos raios solares e consequentemente, maiores valores de irradiância. Este local foi escolhido por motivos logísticos, em virtude das proximidades do laboratório e aquisição dos instrumentos.

Figura 44: Destilador pronto para entrar em regime



Fonte: Autoria Própria (2022)

Este ensaio é realizado para que o destilador entre em regime e se tenha uma noção dos horários em que as quantidades de volume destilado sejam maiores; além disso, tomou-se como premissa de que ele também serviria para que, nos próximos testes, o destilador tenha uma maior eficiência e capacidade de destilação.

Não foi encontrado na American Society for Testing and Materials (ASTM) um padrão específico dedicado aos testes em destiladores solares; portanto, foi escolhido, para todos os ensaios, excluindo-se o de estagnação, um horário de medição de temperaturas, irradiância solar e volume destilado a cada 1h, iniciando-se às 09:00h da manhã e indo até as 17:00h, horário este em que havia transferência de calor significativa para o processo. Também foi contabilizado o volume destilado entre as 17:00h e 09:00h, mas percebeu-se que essa quantidade não é muito significativa, em virtude da baixa incidência de raios solares e diminuição das temperaturas no período da noite.

Este é o ensaio mais comumente encontrado na literatura. Após o destilador entrar em regime, consiste em começar a coletar os seguintes dados:

Tabela 4: Temperaturas medidas no ensaio de estagnação

Dia	Horário	Tágua (°C)	Tar_in t (°C)	Tvidro_ext_oeste (°C)	Tvidro_ext_leste (°C)	Tvidro_ext_norte (°C)	Tvidro_ext_sul (°C)	Tvidro_int (°C)	Tfundo (°C)	Irradiância (W/m ²)	pH	Vdestil (mL)
	17:00-09:00											
	09:00-10:00											
	10:00-11:00											
	11:00-12:00											
	12:00-13:00											
	13:00-14:00											
	14:00-15:00											
	15:00-16:00											
	16:00-17:00											
Vdestil (mL) total:												0,0

Fonte: Autoria Própria (2022)

Os dados a serem coletados são: o dia e a hora do ensaio, as temperaturas externas dos vitrais que recebem os raios solares (inicialmente mediu-se apenas as das principais direções, sendo a direção norte e sul medidas somente pela parte da tarde, uma vez que este ensaio era só para o destilador entrar em regime e as contribuições norte e sul são mínimas nesse período) – $T_{\text{vidro_ext_leste}}$, $T_{\text{vidro_ext_oeste}}$, $T_{\text{vidro_ext_norte}}$ e $T_{\text{vidro_ext_sul}}$ e temperaturas do fundo do destilador T_{fundo} , para verificar possíveis perdas de calor (instalado um termopar no vidro interno); a Irradiância (solar global), para verificar as condições solarimétricas e coletados os volumes destilados - V_{dest} em vasilhas plásticas e medidos em beckers de 100mL para contabilizar o destilado. As temperaturas medidas estão esquematizadas na Figura 45.

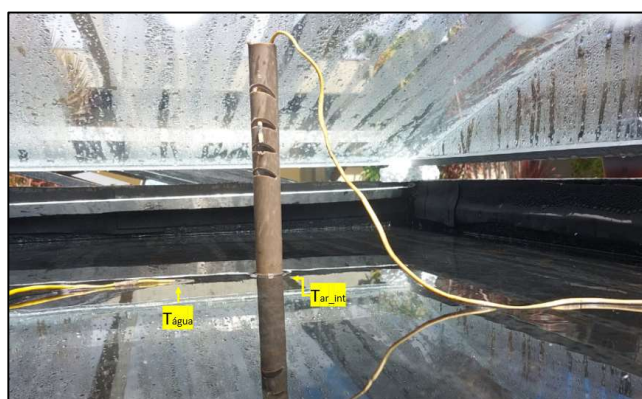
Figura 45: Temperaturas medidas externamente



Fonte: Autoria Própria (2022)

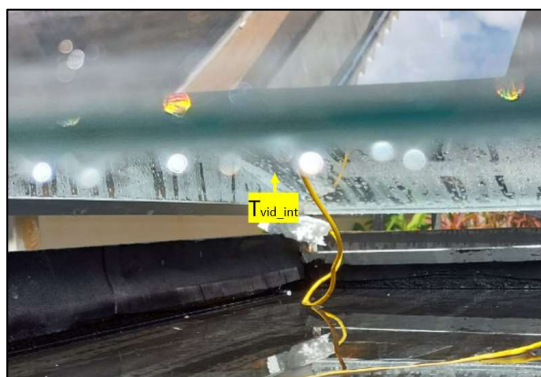
Foram medidas também a temperatura da água no fundo da bandeja (instala-se um termopar fixado no fundo da placa absorvedora, conforme Figura 46) – $T_{\text{água}}$, a temperatura interna do ar onde ocorre a convecção (instala-se outro termopar com uma extremidade livre, captando a temperatura do ar) – $T_{\text{ar_int}}$ e temperaturas internas do vidro - $T_{\text{vid_int}}$ (Figura 46).

Figura 46: Medição da temperatura da água na placa absorvedora e no ar interno



Fonte: Autoria Própria (2022)

Figura 47 : Termopar para medição de temperatura do vidro interno



Fonte: Autoria Própria (2022)

Após a medição das temperaturas, fez-se a média obtida dos dados destes dias. Mediu-se também a máxima velocidade do vento incidente às 14:00h, para verificar se a velocidade do vento estava dentro da normalidade para a cidade de Natal (disponível para consulta no site do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, 2023) e por conseguinte, a temperatura ambiente para comparar com as temperaturas externas, com o fim de verificar se houve perdas.

4.3.2 Ensaio Convencional de Capacidade de Destilação

No dia 15/09/2023, foi feito o ensaio convencional de capacidade de destilação, com o destilador operando em sua capacidade máxima. Este ensaio é feito de forma análoga ao ensaio de estagnação, utilizando os mesmos horários e coletando os mesmos dados, por isso, não será necessário explicitar novamente o procedimento.

Figura 48: Destilador operando convencionalmente



Fonte: Autoria Própria (2022)

4.3.3 Ensaio de Capacidade de Destilação Utilizando Pedras

Em virtude de pequeno vazamento detectado nos ensaios anteriores, foram feitas pequenas manutenções no destilador antes de realizar este ensaio. Foram utilizadas pedras no interior do destilador, depositadas na placa absorvedora (bandeja), pois estas pedras, por terem calor específico menor que água ($c = 4,18 \text{ kJ/kg.K}$), absorveriam o calor mais rapidamente e transmitiriam este para água, que elevaria a sua temperatura.

As pedras utilizadas foram britas do tipo nº1, por serem de fácil aquisição, com densidade de massa aparente $\rho = 1300 \text{ kg/m}^3$, condutividade térmica $\lambda = 0,70 \text{ W/m.K}$ e calor específico $c = 0,80 \text{ kJ/kg.K}$ (estes dados foram retirados do Projeto 02:135.07-002:2003 da ABNT (ABNT,2023). Vide Figura 49.

Figura 49: Inserido as pedras no destilador



Fonte: Autoria Própria (2022)

Foram inseridos 9,850 kg de britas no fundo do destilador, e realizou-se um ensaio de estagnação nesta configuração, mas somente para o destilador entrar em regime em sua capacidade máxima. Logo após, no dia 05/10/2023, iniciou-se os ensaios coletando as seguintes variáveis:

Tabela 5 : Temperaturas analisadas nos ensaios com pedras

Dia	Horário	Tágua (°C)	Tar_int (°C)	Tvidro_ext_oeste (°C)	Tvidro_ext_leste (°C)	Tfundo (°C)	Irradiância (W/m ²)	Vdestil (mL)
	17:00-09:00							
	09:00-10:00							
	10:00-11:00							
	11:00-12:00							
	12:00-13:00							
	13:00-14:00							
	14:00-15:00							
	15:00-16:00							
	16:00-17:00							
Vdest (mL) total:								0,0

Fonte: Autoria Própria (2022)

4.3.4 Ensaio de Capacidade de Destilação Utilizando Resfriamento à Água

Neste último ensaio, teve-se como premissa, verificar o comportamento do destilador quando obtivesse os seus vitrais resfriados, aumentando a troca de calor entre o meio externo e interno. Há algumas formas de resfriamento sugeridas na literatura, tais quais a utilização de ventiladores, porém, como o foco deste trabalho é a construção de um destilador de baixo custo, se torna inviável a utilização deste em uma zona rural aberta, por exemplo. Escolheu-se, portanto, água em temperatura ambiente, pois é fácil de ser encontrada até mesmo em riachos ou a própria água salobra.

Figura 50: Molhamento manual da superfície vitral do destilador



Fonte: Autoria Própria (2022)

Os dados coletados, no dia 16/10/2022, foram análogos aos dos ensaios anteriores, porém, neste, as temperaturas das superfícies molhadas, ou seja, os vidros, eram medidas de 20 em 20 min para observar o quanto estas haviam resfriado, e os volumes coletados convencionalmente de hora em hora, conforme as Tabelas 6 e 7 abaixo.

Tabela 6: Temperaturas e dados coletados no ensaio de resfriamento à água

Dia	Horário	Tágua (°C)	Tar_int (°C)	Tvidro_ext_oeste (°C)	Tvidro_ext_leste (°C)	Tvidro_ext_norte (°C)	Tvidro_ext_sul (°C)	Tfundo (°C)	Irradiância (W/m ²)	Vdestil (mL)
	17:00-09:00									
	09:00-10:00									
	10:00-11:00									
	11:00-12:00									
	12:00-13:00									
	13:00-14:00									
	14:00-15:00									
	15:00-16:00									
	16:00-17:00									
Vdest (mL) total:										0

Fonte: Autoria Própria (2022)

Tabela 7: Temperaturas coletadas após o molhamento

Dia	Horário	Tvidro_ext_antes_molhar(°C)				Tvidro_ext_depois_molhar(°C)			
		Oeste	Leste	Norte	Sul	Oeste	Leste	Norte	Sul
	10:20								
	10:40								
	11:00								
	11:20								
	11:40								
	12:00								
	12:20								
	12:40								
	13:00								
	13:20								
	13:40								
	14:00								
	14:20								
	14:40								
	15:00								
	15:20								
	15:40								
	16:00								
	16:20								
	16:40								
	17:00								

Fonte: Autoria Própria (2022)

Logo após a medição das temperaturas, foram plotados gráficos para análise dos resultados utilizando o software Excel.

4.3.5 Balanço Energético de um Destilador Convencional de Duas Águas e Cálculo do Rendimento (Eficiência)

Dunkle (1961) propõe balanços energéticos para destiladores convencionais de um estágio e de múltiplos.

Conforme a lei da conservação da energia aplicada à sistemas estacionários fechados (simplificando, considerando a massa constante), de acordo com Çengel (2012):

$$E_{entra} - E_{sai} = m * c_v * \Delta T \quad (7)$$

Em outras palavras, conforme Damasceno (2016), essa equação pode ser reescrita da seguinte forma:

$$q_{entra} - q_{sai} = m_{\acute{a}gua} * L_{\acute{a}gua} * \frac{\partial T}{\partial t} \quad (8)$$

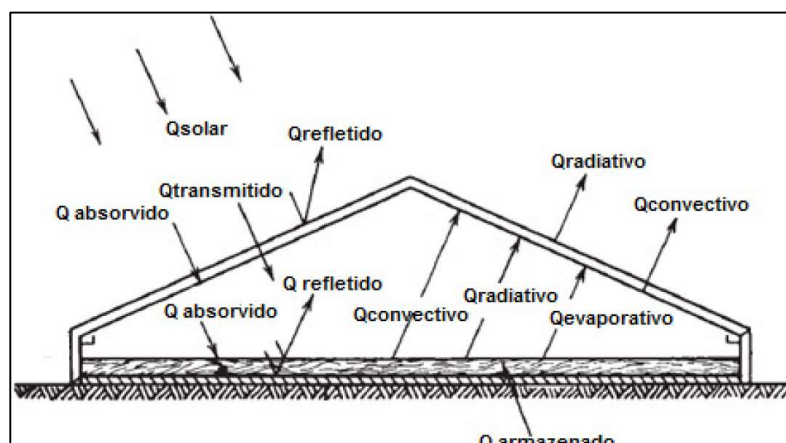
Ainda conforme o autor, adotando-se um ponto de água contida na bandeja (representado nas equações como w, “water”, “água”) como um volume de controle, tem-se:

$$\alpha * \tau_c * I_t = q_e + q_{r,w-g} + q_{c,w-g} + q_k + (mL)_{\acute{a}gua} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (9)$$

O subscrito “e” refere-se à evaporação, “r” à radiação, “c” à convecção e “k” à condução e “g” como sendo relativo à cobertura do destilador. O termo τ_c corresponde à transmitância no vidro, α é a absortividade no vidro, I_t é a radiação que entra na cobertura (W/m^2) e $L_{\acute{a}gua}$ o calor latente de vaporização (J/kg). (DAMASCENO, 2016)

Um modelo simplificado de como funciona o balanço energético de destilador solar de duas águas encontra-se na Figura 51 abaixo.

Figura 51: Mecanismos de transferência de calor em um destilador solar convencional de duas águas



Fonte: Adaptado de Damasceno (2016 *apud* Duffie e Beckman, 2013)

Aplicando-se os conhecimentos de transferência de calor (na equação 9), percebe-se que há transferência por convecção entre a água e a cobertura, podendo assim ser calculada a sua taxa de transferência e há transferência por radiação entre a cobertura e o ambiente, chegando-se a seguinte equação:

$$\alpha * \tau_c * I_g * A_g + h_{tw} * A_w (T_w - T_c) = \dot{m}_w * L_w \frac{\partial T}{\partial t} + h_{1g} * A_g (T_g - T_a) \quad (10)$$

Na equação acima, A_g apresenta a área da cobertura, em m^2 , A_w é a área da camada de água na bandeja, em m^2 , h_{tw} é o coeficiente total de transferência de calor da água para a cobertura, em $W/m^2 \text{ } ^\circ C$, h_{1g} é o coeficiente de transferência de calor convectivo e radiativo da cobertura para o meio ambiente ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$), \dot{m}_w é a taxa de condensação (kg/h) e as temperaturas são representadas por $T(^\circ C)$, sendo o subscrito a, a temperatura ambiente, o subscrito g a da cobertura e o subscrito w a da água.

Ainda conforme os conhecimentos de Damasceno (2016), para calcular o coeficiente de transferência total da água pra cobertura (h_{tw}), basta somar os coeficientes de convecção, radiação e evaporação, o qual podem ser chamados de h_{cw} , h_{rw} e h_{ew} , respectivamente.

$$h_{tw} = h_{cw} + h_{rw} + h_{ew} \quad (11)$$

Quanto à transferência de calor e massa no destilador e seus diversos números adimensionais, como o número de Grashof, Prandtl, Rayleigh e Nusselt, Dunkle (1961) propôs uma modificação no número de Rayleigh (este modelo, apesar

de ser da década de 60, ainda é comumente utilizado), uma vez que existem efeitos de flutuação (empuxo) devido às variações de densidade e ao gradiente de temperatura. O número de Rayleigh (produto dos números adimensionais de Grashof – G_r , pelo de Prandtl - G_p), convencionalmente, é definido por:

$$R_a = G_r * P_r = \frac{g * \beta * \Delta T * L^3 * \rho^2 * c_p}{\mu * k} \quad (12)$$

Porém, este número passa a ter uma diferença de temperatura equivalente, considerando as diferenças de densidade no vapor de água, ou seja, ΔT passa a ser:

$$\Delta T = (T_w - T_g) + \frac{T_w * (P_w - P_g)}{268,9 * 10^2 - P_w} \quad (13)$$

Ainda conforme o autor, P_w e P_g são as pressões parciais de vapor de água em função da temperatura T_w e T_g , respectivamente. Os valores de pressão são dados em Pa, e podem ser calculados por:

$$P_w = \exp \left[25,317 - \frac{(5144)}{T_w + 273} \right] \text{ e } P_g = \exp \left[25,317 - \frac{(5144)}{T_g + 273} \right] \quad (14)$$

É possível também obter o coeficiente de transferência de calor por convecção (h_{cw}), através de outro número adimensional, o de Nusselt.

$$N_u = \frac{h_{cw} * L}{k} = 0,075 * R_a^{1/2} \quad (15)$$

De acordo com as leis da termodinâmica, é possível achar também a taxa de calor por convecção:

$$q_{cw} = h_{cw} * (P_w - P_g) \quad (16)$$

Já o coeficiente evaporativo (h_{ew}) e o calor transferido por unidade de área e tempo por evaporação (Damasceno,2016 apud Dinkle,1961), podem ser calculados por:

$$h_{ew} = 0,016273 * h_{cw} * \frac{P_w - P_g}{T_w - T_g} \quad (17)$$

$$q_{ew} = h_{ew} * (T_w - T_e) \quad (18)$$

Ainda conforme ideias de Damasceno (2017) e Dinkle (1961), tomando-se como L_w o calor latente de vaporização (J/kg), a taxa de transferência de massa (\dot{m}_{ew}) é dada por:

$$\dot{m}_{ew} = \frac{q_{ew}}{L_w} \quad (19)$$

Por fim, a eficiência do equipamento pode ser obtida, portanto, como:

$$n_i = \frac{q_{ew}}{I_t} * 100 \text{ ou } \eta = \frac{m_p \times h_{fg}}{A \times I} \quad (20)$$

5 Resultados e Discussões

Neste capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos dos experimentos e feita uma comparação com os trabalhos já existentes. Serão também explicitados o balanço térmico de energia e a eficiência do destilador.

É interessante ressaltar que, devido à pandemia de COVID-19, houve uma paralisação de atividades em laboratórios na UFRN, sendo os experimentos retomados em 2022. No referido ano, procurou-se realizar os ensaios em períodos nos quais as condições solarimétricas eram mais favoráveis, então, os ensaios foram realizados no último trimestre de 2022, no LMHES.

5.1 Ensaio de Estagnação

Entre os dias 13/09/2022 e 14/09/2022, foram realizados os ensaios de estagnação, ou seja, o destilador foi colocado em regime. Neste dia, as condições solarimétricas estavam excelentes. Foram coletados os seguintes dados, de 1h em 1h, para verificar se o aparato estaria destilando as quantidades coerentes com o apontado em literatura:

Tabela 8 : Temperaturas e dados obtidos no ensaio de estagnação

Dia	Horário (h)	Tágua (°C)	Tar int (°C)	Tvext O (°C)	Tvext L (°C)	Tvext N (°C)	Tvext S (°C)	Tv_int (°C)	Tfundo (°C)	Irradiância (W/m ²)	Ph	Vdestil (mL)
13 e 14/09/2022 (médias)	09:00-10:00	51,6	50,9	42,7	42,7	-	-	45,4	28,3	1060,0	7-7,5	-
	10:00-11:00	58,5	58,3	47,6	42,1	-	-	52,5	31,3	1100,0	7-7,5	270,0
	11:00-12:00	67,0	65,9	52,1	42,2	-	-	59,0	34,4	1144,0	7-7,5	330,0
	12:00-13:00	73,3	71,6	57,0	57,8	58,9	59,0	64,0	33,9	1140,0	7-7,5	560,0
	13:00-14:00	69,7	67,3	55,9	55,7	54,7	53,2	60,3	32,3	1001,0	7-7,5	500,0
	14:00-15:00	64,9	60,5	46,3	55,5	51,8	51,0	55,5	33,8	897,0	7-7,5	420,0
	15:00-16:00	57,6	55,1	47,9	45,9	45,7	45,1	48,0	34,2	708,1	7-7,5	300,0
	16:00-17:00	44,5	40,5	33,7	35,7	35,8	36,6	39,2	31,5	265,4	7-7,5	120,0
	17:00-09:00	39,8	34,2	29,7	27,6	30,2	30,8	32,6	30,1	17,4	7-7,5	115,0
Vdestil (mL) total:		2615,0										

Fonte: Autoria Própria (2022)

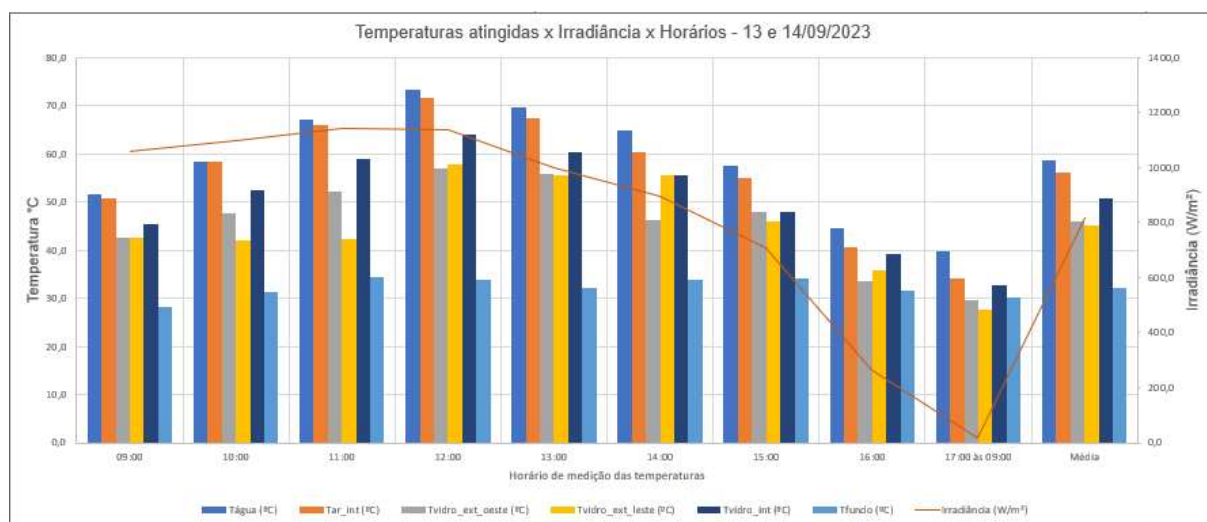
Logo após, calculou-se o rendimento geral do destilador para o ensaio de estagnação (desconsiderou-se o último horário e o volume destilado, pois quase não havia radiação solar):

$$\eta = \frac{m_p * h_{fg}}{A * I} = \frac{2,500 * 2,2565}{1 * 20,532} = 21,42\% \quad (21)$$

Uma vez verificado que o ensaio de estagnação produziu temperaturas e volumes destilados compatíveis com a de outros ensaios de destiladores presentes na literatura (vide artigos citados nas referências), apesar de um baixo rendimento, pois de acordo com Bezerra (2004), os destiladores podem chegar aos valores mínimos de 2,50L/m². d e máximo de 7,50 L/m²d e seus rendimentos raramente ultrapassam os 60%. Como o ensaio ainda que não tinha atingido a sua performance máxima, no dia anterior prosseguiu-se com o ensaio convencional.

Em suma, notou-se algumas observações: algumas temperaturas iniciais não foram coletadas, em virtude de elas não corresponderem ainda à realidade do processo, bem como o volume destilado inicial do ensaio de estagnação não foram significativos.

Figura 52: Temperaturas atingidas x Irradiância pelo ensaio de estagnação



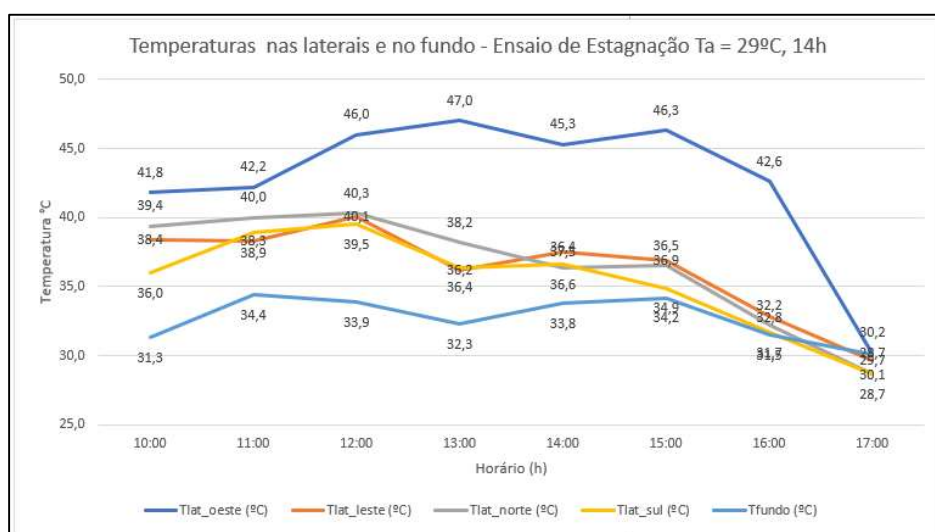
Fonte: Autoria Própria (2022)

No dia 13/09/2022, foram medidas as temperaturas em função do ensaio de estagnação ser apenas para que o destilador entre em regime. Os dados válidos para análise correspondem aos obtidos no dia 14/09/2023.

As temperaturas laterais obtidas foram necessárias para verificar se haveria perdas térmicas do destilador para o meio externo; como a temperatura ambiente na cidade de Natal no dia do ensaio às 14h estava em 29°C e as temperaturas de fundo correspondiam a 33,8°C no mesmo horário (14h), houve uma pequena transmissão de calor entre a bandeja contendo a água aquecida e o fundo isolante de madeira e isopor do destilador.

Já nas laterais (norte, sul, leste e oeste), houve uma maior diferença de temperatura (e consequentemente transferência de calor da parte interna do destilador para fora) no lado oeste, pois neste horário, às 14h, foi obtida uma temperatura de 45,3°C, conforme apontado no gráfico da Figura 53.

Figura 53 – Gráfico das temperaturas laterais e no fundo do destilador



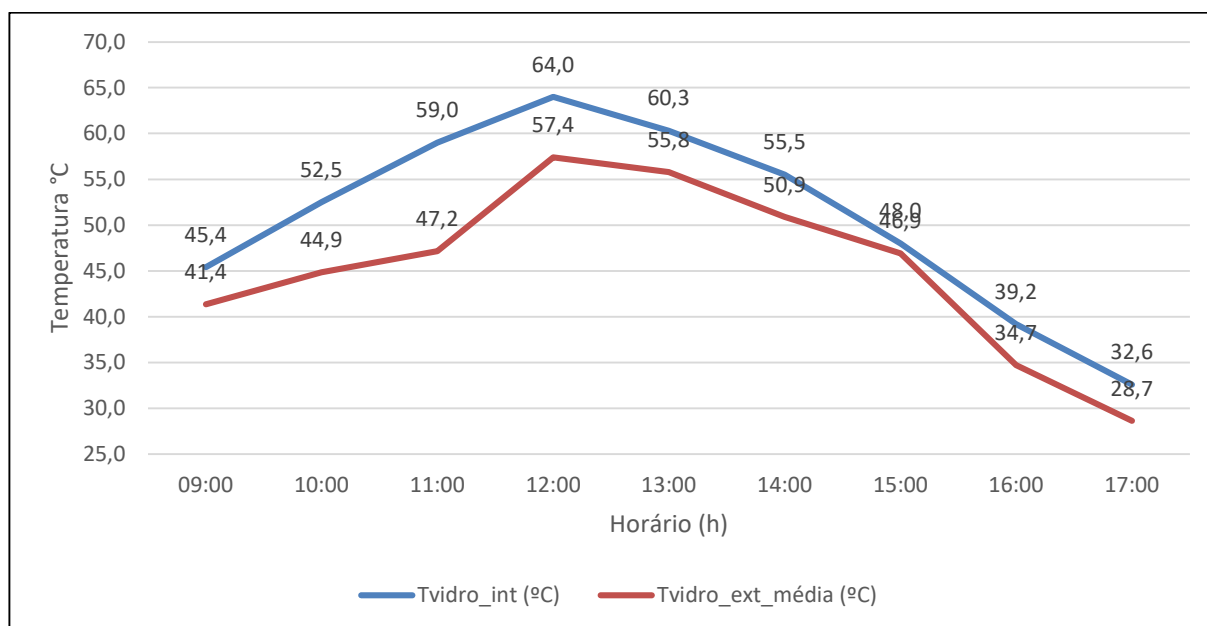
Fonte: Autoria Própria (2022)

Tomando-se o horário em que foi medida a temperatura ambiente T_a , às 14:00h, percebe-se que houve perda de calor nas laterais e no fundo, sendo a maior perda de calor localizada na lateral oeste e a menor no fundo. Isto explica-se porque o isolamento do fundo é mais eficiente (feito de camadas de madeira e isopor), e nas laterais leste e oeste são onde o destilador recebe a maior quantidade de radiação

solar (sendo que neste horário do dia, os raios solares tendem a incidir melhor no oeste, ou seja, próximos do horário deste se pôr) e tem um isolamento menos eficiente (com emborrachado de EVA).

Foi feita também uma comparação entre as temperaturas externas e internas do vidro, em média. Utilizou-se a média das temperaturas do vidro externo do lado oeste e leste e comparou-se esta com a do vidro interno, pois o termopar deste último localizava-se quase no centro.

Figura 54 : Comparativo das temperaturas internas e externas do vidro

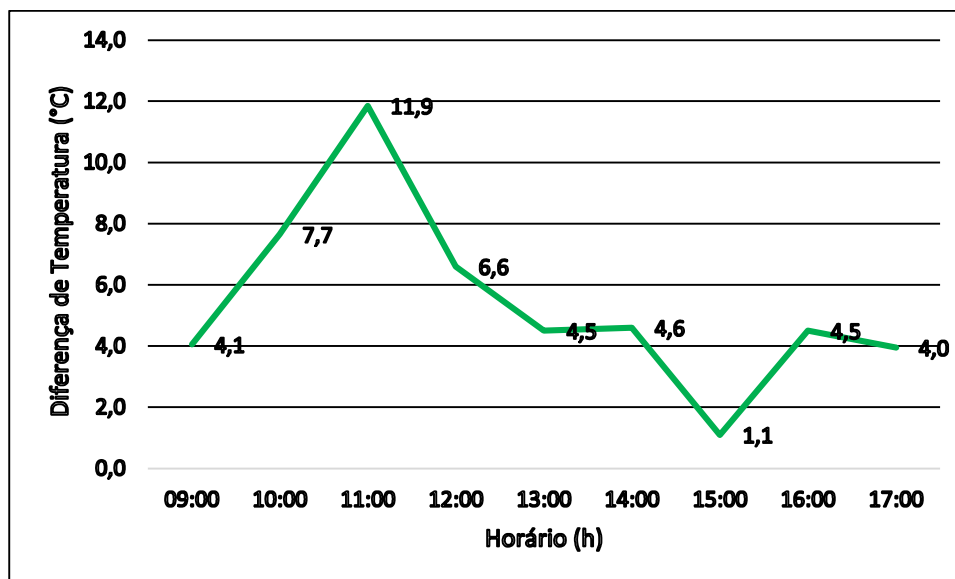


Fonte: Autoria Própria (2022)

Percebe-se que ocorre um maior fluxo de calor das 10:00h às 13:00h, com o pico de fluxo ocorrendo às 11:00h. Vale a pena ressaltar que o fluxo de calor está associado à diferença de temperaturas, conforme a Lei de Fourier apresentada na equação Y e valores de diferença de temperaturas apresentadas na Figura 55.

O fluxo de calor diminui a partir das 11:00h até aproximadamente às 15:00h, momento em que há uma tendência de equilíbrio térmico entre a parede externa e interna (o fluxo tende a ser nulo), e isto pode ser entendido devido à irradiância global ser significativa até este horário. Quando a irradiância tende a ser nula, o vidro externo tende a esfriar e a diferença de temperatura também aumenta até chegar num novo equilíbrio.

Figura 55: Diferença entre as temperaturas interna e externa



Fonte: Autoria Própria (2023)

5.2 Ensaio Convencional

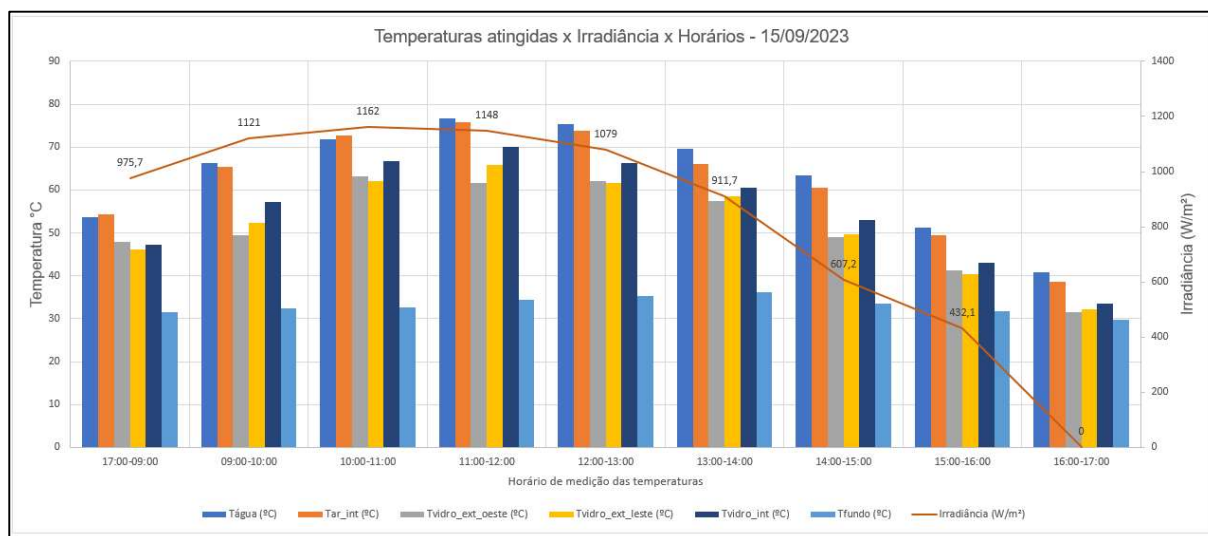
No dia 15/09/2023, foi feito um ensaio convencional válido, ou seja, o destilador já havia passado pelo ensaio de estagnação, e portanto, já estava com sua capacidade máxima de destilação. Obteve-se os seguintes resultados:

Tabela 9 : Dados obtidos pelo ensaio convencional

Dia	Horário	Tágua (°C)	Tar_in t (°C)	Tvidro_ext_oeste (°C)	Tvidro_ext_este (°C)	Tvidro_ext_norte (°C)	Tvidro_ext_sul (°C)	Tvidro_int (°C)	Tfundo (°C)	Irradiância (W/m²)	Rend (%)	Vdestil (mL)
15/09/2022	17:00-09:00	53,7	54,4	47,8	46,2	47,0	46,7	47,3	31,6	975,7	22,5	350,0
	09:00-10:00	66,3	65,3	49,5	52,4	53,4	52,1	57,3	32,4	1121,0	23,5	420,0
	10:00-11:00	71,8	72,8	63,1	62,1	63,3	62,3	66,8	32,7	1162,0	26,9	500,0
	11:00-12:00	76,6	75,8	61,7	65,9	66,0	66,0	70,0	34,4	1148,0	28,4	520,0
	12:00-13:00	75,4	73,7	62,1	61,6	62,2	60,7	66,3	35,3	1079,0	28,5	490,0
	13:00-14:00	69,6	66,0	57,5	58,5	41,4	39,3	60,6	36,1	911,7	30,9	450,0
	14:00-15:00	63,5	60,6	49,0	49,6	50,0	48,1	53,1	33,6	607,2	23,8	230,0
	15:00-16:00	51,3	49,4	41,3	40,3	40,0	39,5	43,0	31,8	432,1	20,3	140,0
16:00-17:00	40,8	38,6	31,6	32,2	31,2	31,2	33,6	29,7	-	-	150,0	
Vdestil (mL) total:		3250,0										

Fonte: Autoria Própria (2022)

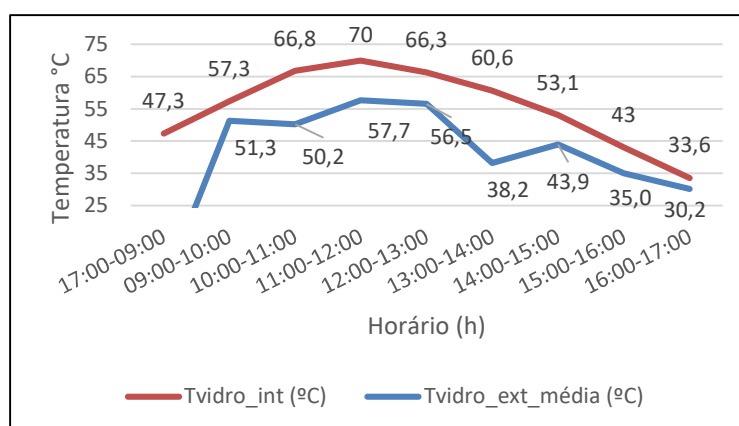
Figura 56: Temperaturas atingidas x Irradiância pelo ensaio convencional



Fonte: Autoria Própria (2023)

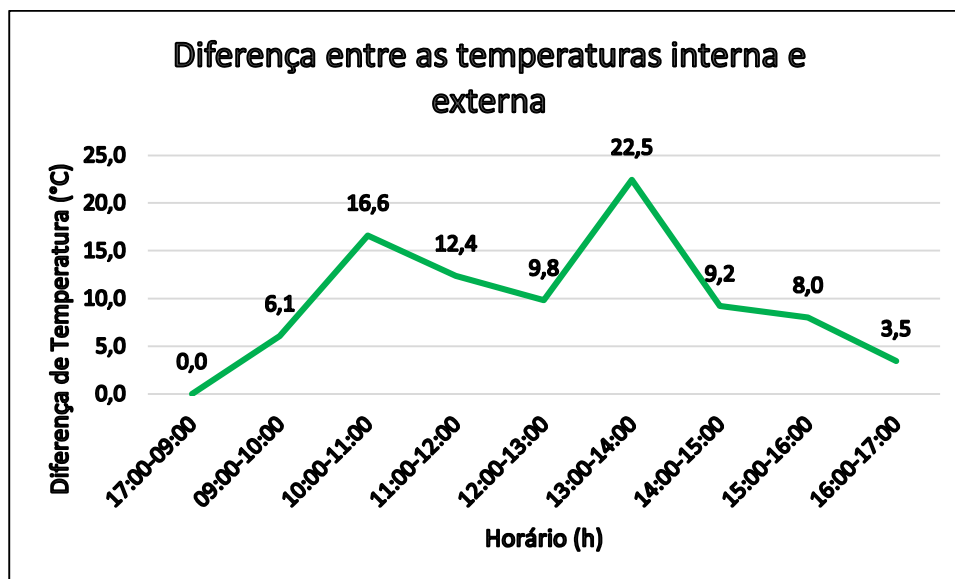
Percebeu-se que, após o destilador entrar em regime (realizar antes um ensaio de estagnação), a diferença entre as temperaturas diminuiu consideravelmente, ou seja, houve uma condição de estabilidade tendendo ao equilíbrio térmico. Viu-se também que as maiores diferenças de temperatura, e portanto, maior fluxo de calor, também ocorreu das 10:00h às 13:00h (Figuras 57 e 58) e foram diminuindo conforme também diminuía a irradiância solar. É importante ressaltar que, apesar das temperaturas serem próximas, elas nunca serão exatamente iguais em virtude da própria resistência térmica do material (vidro).

Figura 57: Comparativo das temperaturas internas e externas do vidro



Fonte: Autoria Própria (2023)

Figura 58: Diferença entre as temperaturas interna e externa



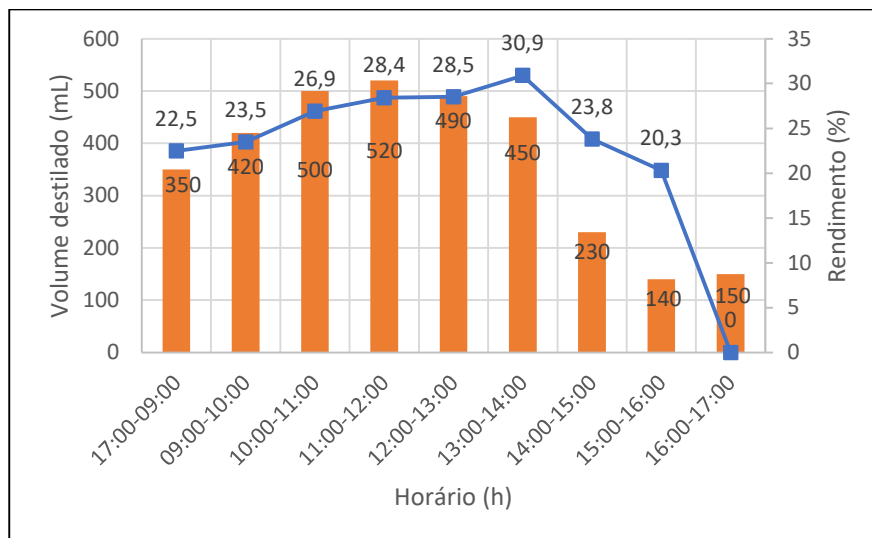
Fonte: Autoria Própria (2023)

Logo após, calculou-se o rendimento geral do destilador para o ensaio convencional, considerando 8h de funcionamento (desconsiderou-se a última irradiância, pois quase não havia radiação solar):

$$\eta = \frac{m_p \cdot h_{fg}}{A \cdot I} = \frac{3,250 \cdot 2,2565}{1 \cdot 26,77} = 27,39\%$$

Além do rendimento geral, calculou-se também os rendimentos parciais, uma vez que o destilador havia entrado em regime, para averiguar em quais horários este apresentava os maiores valores (Figura 59).

Figura 59: Volumes destilados e rendimento do destilador por hora na configuração convencional



Fonte: Autoria Própria (2023)

O horário de maior volume destilado nesta configuração foi de 520 mL, medido às 12:00h. Porém, o de maior rendimento foi medido às 14:00h, ou seja (30,9%). O valor de maior rendimento não necessariamente é o de maior volume, pois o rendimento depende não só da Irradiância Solar, mas também da massa destilada (equação X).

5.3 Ensaio utilizando pedras (britas)

Neste ensaio, realizado em 05/10/2022, foram adicionadas 9,851 kg de britas tipo nº1 (granulometria variando entre 9,5mm a 19mm) distribuídas uniformemente no destilador (Figura 49), cuja massa específica é de 1300 kg/m³, calor específico 0,80 kJ/(kg.K) e condutividade térmica 0,70 W/(m.K). Vale a pena ressaltar que esse ensaio foi feito após pequenas manutenções no destilador.

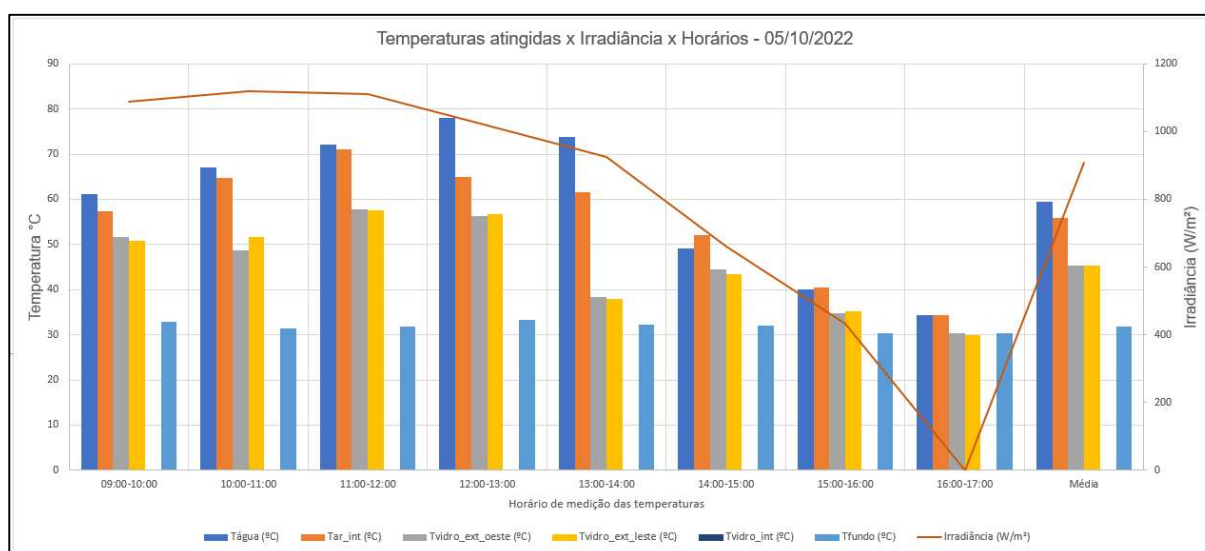
Logo após inseridos 10L de água, reposicionado o destilador para completa recepção dos raios solares, foram efetuadas as seguintes medições:

Tabela 10 : Dados obtidos nos ensaios com pedras

Dia	Horário	Tágua (°C)	Tar_int (°C)	Tvidro_ext_oeste (°C)	Tvidro_ext_este (°C)	Tfundo (°C)	Irradiância (W/m ²)	Rend (%)	Vdestil (mL)
05/10/2022	17:00-09:00	-	-	-	-	-	902,0	25,1	360,0
	09:00-10:00	61,2	57,4	51,7	50,8	32,9	1089,0	24,2	420,0
	10:00-11:00	67,0	64,8	48,8	51,6	31,5	1120,0	29,1	520,0
	11:00-12:00	72,2	71,1	57,7	57,6	31,8	1110,0	31,1	550,0
	12:00-13:00	78,0	64,9	56,3	56,7	33,4	1019,0	37,8	615,0
	13:00-14:00	73,8	61,6	38,4	37,9	32,2	924,0	13,9	205,0
	14:00-15:00	49,1	52,1	44,4	43,4	32,1	660,0	33,7	355,0
	15:00-16:00	40,0	40,4	34,8	35,2	30,3	432,0	22,5	155,0
16:00-17:00	34,3	34,4	30,4	29,9	30,3	-	-	83,0	
Vdest (mL) total:				3263,0					

Fonte: Autoria Própria (2022)

Figura 60: Temperaturas atingidas x Irradiância pelo ensaio com pedras



Fonte: Autoria Própria (2022)

A velocidade do vento neste dia era de $v = 1,23$ m/s e a temperatura ambiente $T_{amb} = 31^{\circ}\text{C}$ às 14h. Entre as 09:00h-10:00h da manhã, a medição foi desconsiderada por apresentar tempo nublado, mas não tão intenso com o fim de descaracterizar o ensaio; já de 16:00h-17:00h, o tempo novamente apresentou-se levemente nublado, por isso, a medição de temperatura para estes horários foi desconsiderada.

Uma vez que com o destilador em regime não há muitas diferenças significativas entre a temperatura do vidro interno e externo, conforme comprovado no ensaio convencional, não houve necessidade de medir as temperaturas do vidro

interno; apenas concentrou-se os esforços, para os próximos ensaios, em verificar as novas capacidades de destilação.

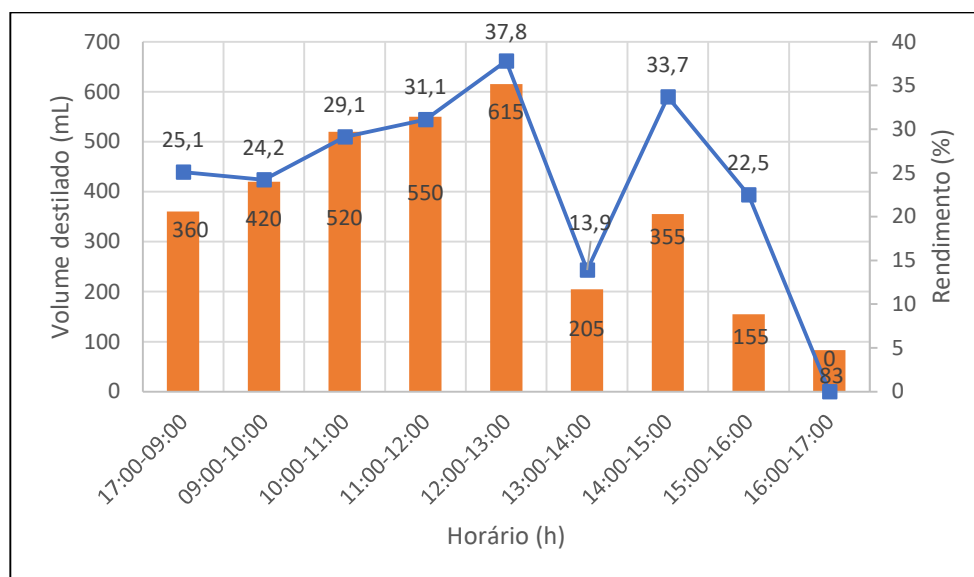
Percebe-se que houve um aumento do volume destilado em relação aos ensaio convencional e este aumento concentrou-se principalmente nos horários finais das medições, onde a irradiância solar estava com menores valores (entre 15:00h-17:00h). Entretanto, quanto ao rendimento geral do destilador, quase não houve diferença:

$$\eta = \frac{m_p * h_{fg}}{A * I} = \frac{3,263 * 2,2565}{1 * 26,63} = 27,64\%$$

Os resultados dos volumes destilados por hora e seu rendimento estão presentes no gráfico da 61. O maior volume destilado, de 615mL, foi medido às 13:00h e apresentou um valor maior comparado ao do ensaio convencional. Já o maior rendimento, de 37,8%, coincidiu também com o horário do maior volume destilado.

Notou-se também que nos momentos finais do experimento, os rendimentos também foram maiores em comparação aos do ensaio convencional, ou seja, as pedras reteram um pouco do calor nesses momentos finais, mas não de forma significativa, pois a diferença total de volume destilado em relação ao ensaio convencional foi de apenas 0,4%, não compensando o trabalho para se obter esta configuração e os possíveis danos oriundos de corrosões (como pôde ser visto na Figura 49) na placa absorvedora, a médio e longo prazo, pelo depósito de substâncias incrustantes provenientes das pedras.

Figura 61: Volumes destilados e rendimento do destilador por hora na configuração com pedras



Fonte: Autoria Própria (2022)

5.4 Ensaio utilizando resfriamento à água em temperatura ambiente

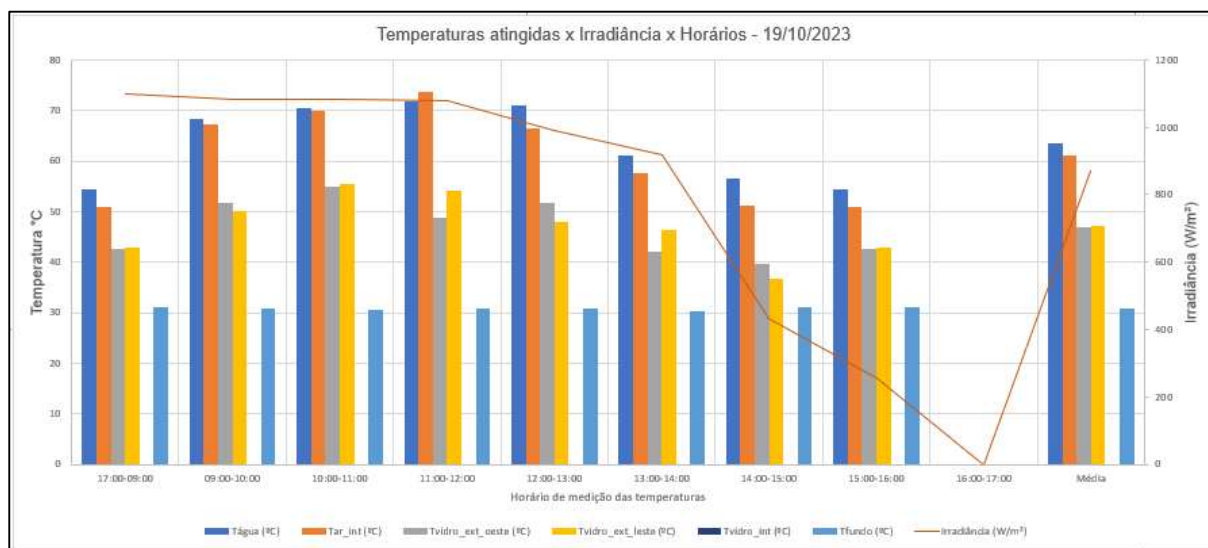
Neste ensaio, a superfície de vidro era molhada com água de 20 em 20 minutos, para verificar se o resfriamento da superfície de vidro teria algum efeito na destilação.

Tabela 11 : Dados obtidos no ensaio com resfriamento à água

Dia	Horário	Tágua (°C)	Tar_int (°C)	Tvidro_ext_oeste (°C)	Tvidro_ext_leste (°C)	Tvidro_ext_norte (°C)	Tvidro_ext_sul (°C)	Tfundo (°C)	Irradiância (W/m²)	Rend (%)	Vdestil (mL)
19/10/2022	17:00-09:00	54,5	50,9	42,6	42,9	42,5	44,5	31,1	1100,0	21,4	375,0
	09:00-10:00	68,3	67,3	51,8	50,0	48,0	47,7	30,7	1084,0	43,4	750,0
	10:00-11:00	70,5	70,0	54,9	55,5	50,6	47,6	30,5	1085,0	43,3	750,0
	11:00-12:00	71,8	73,8	48,8	54,2	54,4	48,4	30,7	1080,0	45,3	780,0
	12:00-13:00	71,1	66,5	51,8	47,9	50,4	48,3	30,7	990,0	41,2	650,0
	13:00-14:00	61,2	57,7	42,0	46,4	42,6	42,5	30,3	920,0	26,6	390,0
	14:00-15:00	56,4	51,1	39,6	36,8	39,6	37,7	31,0	432,0	33,4	230,0
	15:00-16:00	54,5	50,9	42,6	42,9	42,5	44,5	31,1	255,0	29,5	120,0
16:00-17:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	230,0
Vdes total:		4275,0									

Fonte: Autoria Própria (2022)

Figura 62: Temperaturas atingidas x Irradiância pelo ensaio com resfriamento à água



Fonte: Autoria Própria (2022)

Foram medidas também as temperaturas após o molhamento (Tabela 12).

Tabela 12: Temperaturas após o molhamento

Dia	Horário	Tvidro_ext_antes_molhar(°C)				Tvidro_ext_depois_molhar(°C)			
		Oeste	Leste	Norte	Sul	Oeste	Leste	Norte	Sul
19/10/2022	10:40	51,8	50,0	48,0	47,7	41,6	37,9	42,6	39,0
19/10/2022	11:00	54,9	55,5	50,6	47,6	42,7	41,5	43,0	42,4
19/10/2022	11:20	52,1	53,8	50,5	48,7	44,5	40,7	42,7	39,3
19/10/2022	11:40	48,0	51,9	52,4	49,0	37,7	42,9	41,7	44,8
19/10/2022	12:00	48,8	54,2	52,4	48,4	39,8	42,5	43,3	39,1
19/10/2022	12:20	51,7	47,6	52,3	48,8	39,0	39,2	44,2	42,0
20/10/2022	12:40	52,6	43,5	52,7	50,6	44,4	43,5	52,7	50,6
21/10/2022	13:00	51,8	47,9	50,4	48,3	39,3	41,0	42,7	42,8
22/10/2022	13:20	48,4	46,1	46,9	44,7	39,5	36,8	38,5	34,8
23/10/2022	13:40	45,6	46,7	44,8	44,1	37,6	37,7	36,8	38,1
24/10/2022	14:00	42,0	46,4	42,6	42,5	34,9	36,2	39,7	32,5
25/10/2022	14:20	37,8	37,8	37,8	33,6	31,1	33,2	33,2	31,7
26/10/2022	14:40	39,3	39,4	37,4	37,2	34,7	32,4	34,4	34,6
27/10/2022	15:00	39,6	36,8	39,6	38,8	33,6	33,8	36	37,3

Fonte: Autoria Própria (2022)

Observou-se as seguintes diferenças de temperaturas antes e depois de molhar os vitrais em todas as direções (Figura 63):

Figura 63 : Gráficos de diferenças de temperaturas obtidas antes e depois de molhar os vitrais em todas as direções



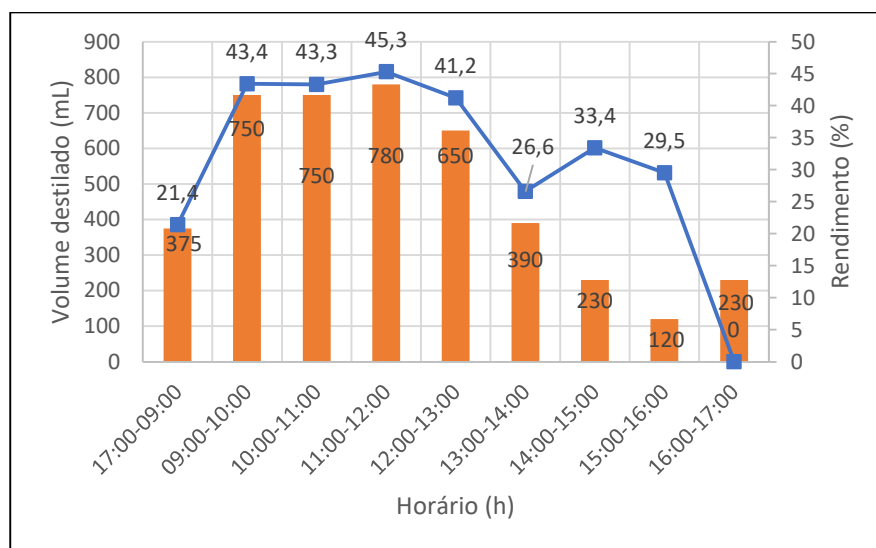
Logo após, foi calculado o rendimento geral para esta configuração:

$$\eta = \frac{m_p \cdot h_{fg}}{A \cdot I} = \frac{4,275 \cdot 2,2565}{1 \cdot 24,99} = 38,60\%$$

Os resultados dos volumes destilados por hora e seu rendimento estão presentes no gráfico da figura 63. O maior volume destilado, de 780mL, foi medido às 12:00h e apresentou um valor maior comparado ao do ensaio convencional e com as pedras. Já o maior rendimento, de 45,3%, coincidiu também com o horário do maior volume destilado.

Com relação aos momentos finais do ensaio, houve uma diferença no rendimento em relação às pedras: com o resfriamento à água, houve pouca variação do rendimento entre 14:00h e 16:00h, ou seja, este ensaio é vantajoso, em relação à configuração anterior, até para horas onde não há tanta irradiância solar.

Figura 64: Volumes destilados e rendimento do destilador por hora na configuração com resfriamento à água



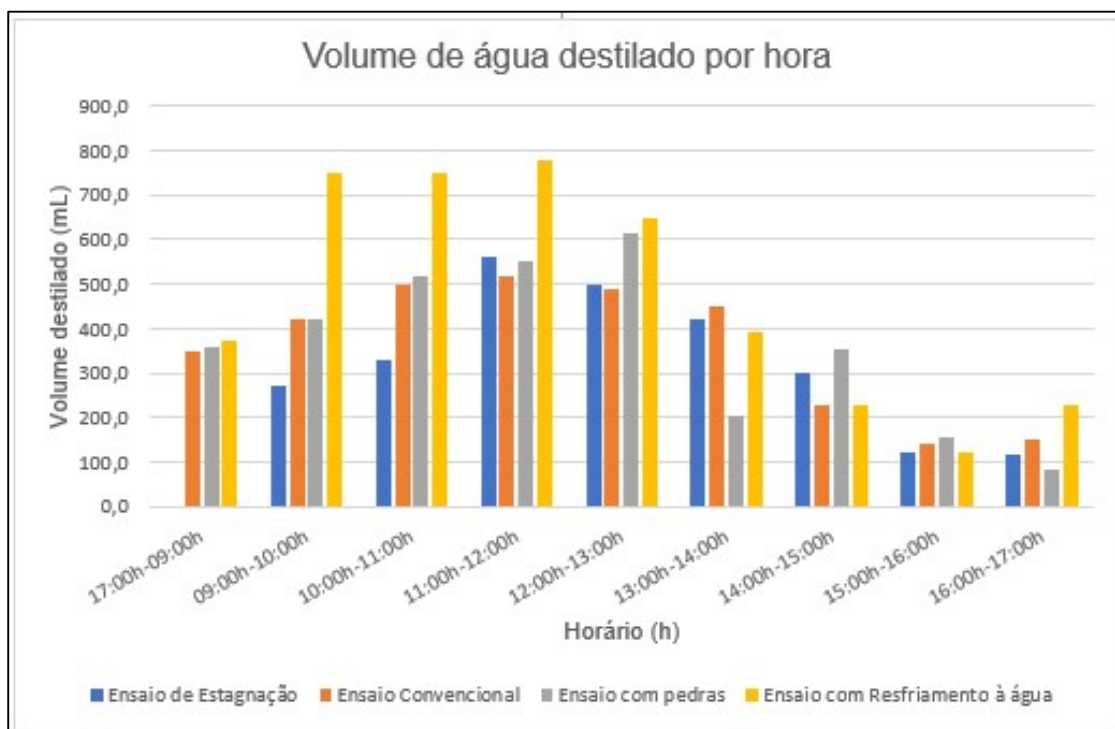
Fonte: Autoria Própria (2022)

Verificou-se que o volume destilado total, também para essa configuração, se apresentou maior (cerca de 31,53% maior em relação ao ensaio convencional e 31,01% em relação ao ensaio com pedras).

5.5 Comparação do volume destilado e rendimento entre as quatro configurações

No gráfico da Figura 65, pode-se ver a comparação do volume destilado das quatro configurações de ensaios.

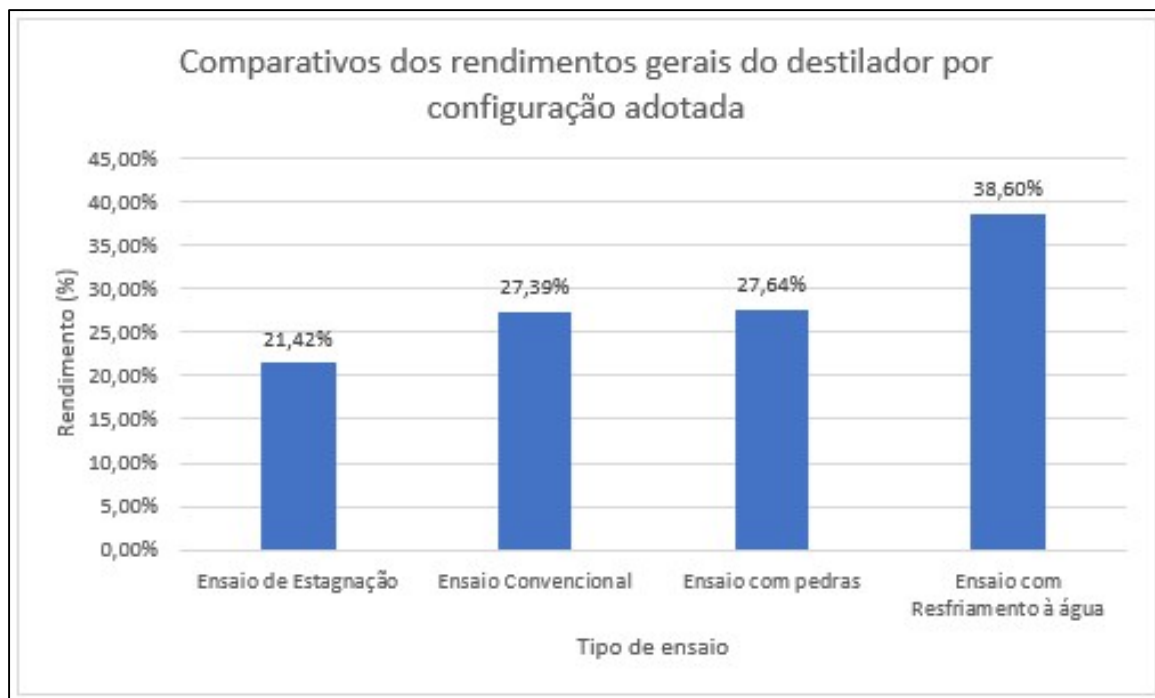
Figura 65 : Gráfico com o volume destilado por todas as configurações



Fonte: Autoria Própria (2022)

Já no gráfico da Figura 66, pode-se ver a comparação do rendimento do destilador obtido das quatro configurações de ensaios.

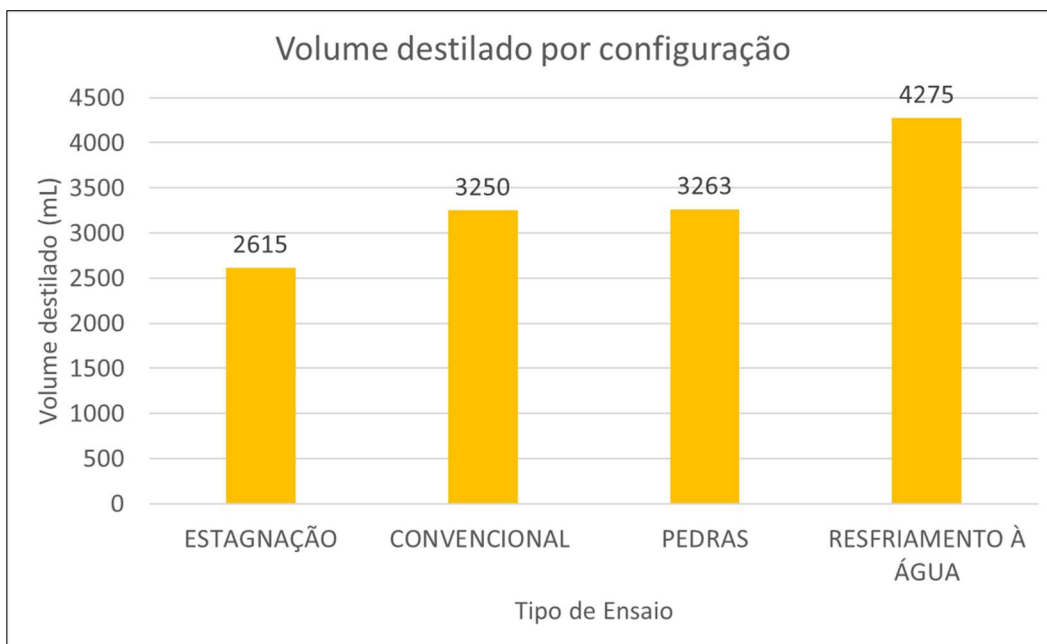
Figura 66: Gráfico com o rendimento obtido por todas as configurações



Fonte: Autoria Própria (2022)

Os volumes destilados totais obtidos por todos os ensaios podem ser vistos na Figura 67:

Figura 67: Volumes totais obtidos em todas as configurações



Fonte: Autoria Própria (2022)

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Em consonância com os objetivos propostos para este trabalho, apresentam-se as seguintes conclusões decorrentes das análises dos resultados dos testes realizados para as três configurações (convencional, com pedras e vitrais molhados), bem como também as sugestões para futuros estudos com o destilador solar com cobertura móvel:

- O destilador apresentou viabilidade de utilização para a produção de água destilada para as três configurações testadas;
- a configuração com pedras proporcionou um aumento pouco significativa em relação à normal;
- o destilador apresentou competitividade com vários outros apontados pela literatura solar para produção de água destilada, com volume de destilado acima de 3,0 l/m².dia;
- o destilador solar proposto apresenta simples processos de fabricação, montagem e operação podendo ter suas tecnologias de uso repassados para pessoas de quaisquer níveis sociais e intelectuais;
- a configuração com vitrais molhados trouxe um aumento significativo de volume destilado, em comparação com as outras duas configurações testadas e em relação aos destiladores mostrados pela literatura solar para destilação de água;
- a produção com vitrais molhados foi um pouco comprometida pela intensa nebulosidade na parte final do processo de ensaio;
- o custo de fabricação do destilador pode ser diminuído pelo reaproveitamento de materiais, madeira, vidro, chapas e outros;
- a utilização da brita no fundo interno do destilador trouxe uma pequena desvantagem de aumento da massa do destilador em torno de 10 kg;
- o processo de molhamento não produziu uma grande perda de água, uma vez que a massa de água derramada nos vitrais era de 2 litros por etapa, com total de 3 etapas por hora.
- as perdas térmicas do destilador foram de pequena magnitude demonstrando-se a eficiência do isolamento térmico utilizado.

Já como sugestões para trabalhos futuros, tem-se:

- o molhamento dos vitrais que aconteceu de forma manual artesanal pode ser aperfeiçoado, trazendo aumento de produção de destilado;
- otimizar o processo de molhamentos dos vitrais para aumentar a produção de água pura pelo destilador;
- experimentar o resfriamento do dos vitrais do destilador utilizando ventilador elétrico/eólico;
- acoplar um heliostato ao destilador para concentração da radiação solar na bandeja de destilação, para aumento da temperatura da água e conseqüente aumento das taxas de evaporação e condensação, com possível aumento da produção do protótipo solar;
- aquecer as pedras antes do processo de colocação no destilador.

7 REFERÊNCIAS

AL-HAYEK, I.; Badran, O. O.; **Desalination** , 2004

ASHBY, M. **Seleção de Materiais no Projeto Mecânico**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012. 673 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). PROJETO 02:135.07-001/2: Desempenho térmico de edificações Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 21 p.

ATTIA, Mohammed El Hadi; KABEEL, A.e.; ABDELGAIED, Mohamed; ESSA, F.A.; OMARA, Z.M.. Enhancement of hemispherical solar still productivity using iron, zinc and copper trays. **Solar Energy**, [S.L.], v. 216, p. 295-302, mar. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2021.01.038>.

ATLAS, Global Solar. **Energy Data Info**. Disponível em: <https://globalsolaratlas.info/map?c=21.943046,4.394531,3&r=SAU&s=26.823447,18.123672&m=site> . Acesso em 10 de maio de 2023.

BARBOSA, Gabriela Gonçalves. Recursos Naturais Renováveis e Produção de Energia. **Revista Política Hoje**, Recife, v. 23, n. 1, p. 193-215, 2014. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/politica hoje>. Acesso em: 01 fev. 2023.

BEZERRA, Magna Angélica dos Santos. Desenvolvimento de um Destilador solar para Tratamento de Águas de Produção de Petróleo com Vistas à Sua Utilização na Agricultura e Geração de Vapor, Dissertação de Mestrado, UFRN, Programa de Pós-Graduação na Engenharia Química, Área de Concentração: Aplicação da Engenharia Ambiental na Preservação de Recursos Naturais do Rio Grande do Norte. 106p.

BEZERRA, Virgínia de Fátima. **Análise de componentes da radiação solar observados por um avião laboratório**. 1997. 124f. (Dissertação de Mestrado em Meteorologia), Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande – PB – Brasil, 1997. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/2049>

BOLAND, John; HUANG, Jing; RIDLEY, Barbara. Decomposing global solar radiation into its direct and diffuse components. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 28, p. 749-756, dez. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.023>.

BOUÇANOVA, Marcelo de Paiva. **Eficiência Térmica de um destilador solar contendo nanopartículas metálicas**. 2021. 69 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Sistemas, Universidade de Pernambuco, Recife, 2021.

BRAYNER, A. R. A.; MEDEIROS, C. B. Incorporação do tempo em SGBD orientado a objetos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE BANCO DE DADOS, 9., 1994, São Paulo. **Anais...** São Paulo: USP, 1994. p. 16-29.

BUENO, Luis Gustavo de Lima DESTILADOR SOLAR PARA RECUPERAÇÃO DE ÁGUA E REDUÇÃO NO PESO DO EFLUENTE: UMA PROPOSTA DE TRATAMENTO E APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS LÍQUIDOS GERADOS NOS LABORATÓRIOS QUÍMICOS DA UTFPR - CÂMPUS PONTA GROSSA 2021. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia Química - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2021.

CAR, Clube de Astronomia de Rondônia. **O que vai acontecer quando o Sol chegar no fim de sua “vida”?** 2022. Disponível em: <https://astronomia.unir.br/noticia/exibir/20939#:~:text=O%20Sol%20j%C3%A1%20tem%20cerca,expandir%2C%20at%C3%A9%20o%20planeta%20Marte..>

CARDOSO, M. K. B. Análise Térmica e Hidrodinâmica de um Dessalinizador Solar Tipo Ondular. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2020.

CARVALHO, Bruno Soares de. **APERFEIÇOAMENTO E ANÁLISE TÉRMICA DE UM DESSALINIZADOR SOLAR COM COBERTURA PIRAMIDAL**. 2019. 10 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2019.

CARVALHO, E.K.F. Potabilização de água eutrofizada utilizando destilação solar. 2015. 84f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental). Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, UEPB, Campina Grande, PB. 2015.

ÇENGEL, YUNUS A; GHAJAR, A. J. Livro Transferência de Calor-Çengel (4a edição).pdf, 2012.

CHEMISTRY, Royal Society Of. **Energy**: supporting the chemical science community to help create a sustainable energy future. Supporting the chemical science community to help create a sustainable energy future. 2023. Disponível em: <https://www.rsc.org/policy-evidence-campaigns/environmental-sustainability/global-challenges/energy/>. Acesso em: 01 maio 2023.

CHENG, Haiying; ZHENG, Hongfei; WANG, Zhenzhen; ZHAO, Jinglian; LIANG, Shen; WANG, Lu; MA, Xinglong; KONG, Hui. A concentrating light multistage rising film solar distiller with a central cooling structure. **Solar Energy**, [S.L.], v. 257, p. 96-109, jun. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2023.04.020>.

CLAYTON, R. Desalination for Water Supply FR/R0013 (35p), Review of Current Knowledge, Foundation for Water Research, U.K, Feb. 2006.

DAMASCENO, C. T. Simulação de uma unidade piloto de destilação de água empregando energia solar. 2016. 55 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

DESTEFANI, A; CORREA, C. T.; BEHLING, E.E.; BAIFUS, W.C. **Destilador solar**. Disponível em: . Acesso em: 26 abril 2019.

DIMRI, V. et al. Effect of condensing cover material on yield of an active solar still: an experimental validation. *Desalination* v. 227 (2008), p. 178–189

DJABALLAH, Donia; BENHAOUA, Boubaker; KABEEL, Abd Elnaby; ABDULLAH, Abdelkader Saad; ABDELGAIED, Mohamed.; KHECHEKHOUCHE, Abderrahmane. Experimental study of the role of surface tension in enhancing the performance of solar stills using different designs of plastic fins. **Solar Energy**, [S.L.],

v. 262, p. 111835, set. 2023. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2023.111835>.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. Solar Engineering of Thermal Processes, 4ª edição, 2013. New York: John Wiley and Sons.

DUNKLE, R.V. Solar Water Distillation: The Roof Type Still and a Multiple Effect Diffusion Still. 1961. International Heat Transfers Conference, ASME, Part V, University of Colorado, Boulder, 895-902, 1961.

FARIA, E.V.; ALVES, I.F.B; ARAÚJO, B.S.A ; BONTEMPO L.H.S; LIMA, M.N; OLIVEIRA, L.C.C.B. . DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DE UM DESTILADOR SOLAR PARA DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA SALGADA EM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE SAIS. In: ENEMP 2015, 37., 2015, São Carlos. **Anais de evento**. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2015. p. 1-10.

FERNANDES, Josiane Maria de Macedo. **Controle inteligente de sistemas eletrohidráulicos utilizando redes neurais artificiais**. Natal, RN: 2012. 63 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

GUERRA, Fabiana Karla O. M. Varella et al. DESSALINIZADOR SOLAR PORTÁTIL PARA APLICAÇÃO EM COMUNIDADES RURAIS NO RIO GRANDE DO NORTE. In: VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 8., 2020, Fortaleza.

HOLANDA, Athayas Magalhães de. **ANÁLISE DO PROJETO DE UM DESTILADOR SOLAR CASEIRO**. 2019. 50 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

HUSSEIN, Ahmed Kadhim; ATTIA, Mohammed El Hadi; ABDUL-AMMER, Husham Jassim; ARĎĀ, Müslüm; HAMIDA, Mohamed Bechir Ben; YOUNIS, Obai; HOMOD, Raad Z.; ABIDI, Awatef. Experimental study of the impact of low-cost energy storage materials on the performance of solar distillers at different water depths. **Solar Energy**, [S.L.], v. 257, p. 221-230, jun. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2023.04.013>.

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

IEA. **International Energy Agency**. Disponível em: <<https://www.iea.org/>>. Acesso em: 2004.

INCROPERA, F. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 663 p.

INMET. **Previsão para capitais**. 202. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em: 10 ago. 2023.

IRENA. **Renewable capacity statistics 2023**. Disponível em: https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2023.pdf?rev=d2949151ee6a4625b65c82881403c2a7. Acesso em: 10 de maio de 2023.

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

KREITH, Frank, and M. S. Bohn. "Principles of heat transfer, St." Paul: West Publishing Company (1993).

LOPES, Joaquim Teixeira de. **Dimensionamento e Análise Térmica de um Dessalinizador Solar Híbrido**. 2004. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

_____. **DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE TÉRMICA DE UM DESSALINIZADOR SOLAR TIPO BACIA COM COBERTURA ASSIMÉTRICA**. 2013. 188 f. Tese (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica)- Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14754/1/DimensionamentoAnaliseTermica.pdf>>. Acesso em: 08 maio 2017.

MALUF, Alexandre Prata. **Destiladores Solares no Brasil**. 2005. 39 f. Monografia (Especialização) - Curso de Fontes Alternativas de Energia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005.

MARINHO, F. JOSÉ LOUREIRO; CARNEIRO TAVARES, A.; ALVES DOS SANTOS, S.; MARCOVICZ, F.; PEREIRA CRUZ, M.; SOUTO, E. A.; ROCHA, E. N. da. **Destilador Solar Destinado a Fornecer Água Potável**. Revista Brasileira de Agroecologia, Rio de Janeiro, v. 7, n. 3, 2012. Disponível em: <https://revistas.aba-agroecologia.org.br/rbagroecologia/article/view/10043>. Acesso em: 17 out. 2023.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Projeteee**: glossário. Glossário. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/projeteee/glossario/onda-longa/>. Acesso em: 10 jul. 2023.

MONTAZERI, Mehdi; BANAKAR, Ahmad; GHOBADIAN, Barat. **Enhancement of cascade solar still productivity with sloping absorber plate**. Maejo International Journal of Science and Technology, v. 11, n. 1, p. 35, 2017.

NASA. **Educational Brief**: solar radiation and the earth system. Solar Radiation and the Earth System. 2016. Disponível em: <https://web.archive.org/web/20160425164312/http://education.gsfc.nasa.gov/experimental/July61999siteupdate/inv99Project.Site/Pages/science-briefs/ed-stickler/ed-irradiance.html>. Acesso em: 06 jul. 2023.

NEONERGIA. **Simulador solar**. Disponível em: <https://simuladorsolar.neoenergiacomercializacao.com.br/>. Acesso em: 10 de maio de 2023.

OCAENERGIA. **Energia Solar Fotovoltaica e Energia Solar Térmica: Entenda a Diferença**. 2016. Disponível em: <https://www.ocaenergia.com/blog/energia-solar/energia-solar-fotovoltaica-energia-solar-termica-saiba-diferenca/>. Acesso em: 01 jun. 2023.

OECD. (1997), **Glossary of Environment Statistics, Studies in Methods**. Series F, No. 67, United Nations, New York, 1997. Disponível em: <http://stats.oecd.org/glossary/>

OURIA, Mahmoud; SEVINC, Harun. Evaluation of the potential of solar energy utilization in Famagusta, Cyprus. **Sustainable Cities And Society**, [S.L.], v. 37, p. 189-202, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2017.10.036>.

Rai, S. N., & Tiwari, G. N. (1982). Single Basin Solar Still Coupled with Flat Plate Collector. *Journal of Energy Conversion and Management*, 23, 145-150

RAWLINS, F.: Aircraft Measurements of the Solar Absorption by Broken Cloud Fields : A Case Study. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 115: 365-382, 198

REIS, Ligia S.; SOUZA, José L. de; AZEVEDO, Carlos A. V. de; LYRA, Gustavo B.; FERREIRA JUNIOR, Ricardo A.; LIMA, Vera L. A. de. Componentes da radiação solar em cultivo de tomate sob condições de ambiente protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.L.], v. 16, n. 7, p. 739-744, jul. 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1415-43662012000700006>.

SÁ, Lidiane Freire; JUCÁ, José Fernando Thomé; MOTTA SOBRINHO, Maurício Alves da. Tratamento do lixiviado de aterro sanitário usando destilador solar. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal Of Applied Science**, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 204-217, 30 abr. 2012. Instituto de Pesquisas Ambientais em Bacias Hidrograficas (IPABHi). <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.815>.

SAMME, M. A.; Mirza, U. K.; Majeed, T.; Ahmad, N.; *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007, 11, 543.

SARMENTO, Kênia Kelly Freitas; BEZERRA, Vanessa Rosales; SOUZA, José Everton Soares de; LIMA, Carlos Antônio Pereira de; MEDEIROS, Keila Machado de. **DIFERENTES TIPOS DE DESTILADORES SOLAR PARA POTABILIZAÇÃO DE ÁGUAS CONTAMINADAS**. Campina Grande: Realize Editora, 2020. p. 1-6. Disponível em: <<https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/72946>. Acesso em: 30 ago. 2023.

SCHOLTEN, D; BOSAMAN, R. (2013), **The Geopolitics of Renewable Energy: a mere shift of lanslide in energy dependencies?** Disponível em: <http://www.drift.eur.nl/wp-content/uploads/2013/11/Scholten-and-Bosman-2013-Geopolitics-of-Renewables.pdf>

SHARSHIR, Swellam W.; OMARA, M.A.; JOSEPH, Abanob; KANDEAL, A.W.; ELSAID, Ashraf Mimi; EL-SAID, Emad M.s.; ALATAWI, Ibrahim; ELASHMAWY, Mohamed; ABDELAZIZ, Gamal B.. Thermoenviroeconomic performance augmentation of solar desalination unit integrated with wick, nanofluid, and different nano-based energy storage materials. **Solar Energy**, [S.L.], v. 262, p. 111896, set. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2023.111896>.

SILVA, Adriano Oliveira da; LIMA, Carlos Antônio Pereira de. **ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS TIPOS DE DESTILADORES SOLARES PARA DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: REVISÃO DE LITERATURA**. In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM CIÊNCIAS, 4., 2019, Campina Grande. Anais de evento. Campina Grande: Realize Editora, 2019. p. 1-10.

SILVA, José & Lima, Vera Lucia & Marinho, Francisco & Pereira, Bárbara & Alexandria, Amonikele & Lima, Tiago. (2016). **Uso de destiladores solares para fornecer água potável no semiárido Paraibano**. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável. 11. 91. 10.18378/rvads.v11i3.4376.

SILVA, J. W. O. **Viabilidade de utilização de um forno solar tipo caixa para produzir o assamento de alimentos**. 2023. 60 p. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2022

SILVA, M.C.C. **ESTUDOS SOBRE SISTEMAS DE DESTILAÇÃO SOLAR DIRETA PARA POTABILIZAÇÃO DE ÁGUA**. 2014. 343 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/129581/328329.pdf?sequence=1&isAllowed=y> . Acesso em: 01 out. 2021.

SINGH, Shaurya. Solar Irradiance Concepts: DNI, DHI, GHI & GTI. 2023. Disponível em: <https://www.yellowhaze.in/solar-irradiance/>. Acesso em: 01 ago. 2023

SNIS. **Diagnósticos SNIS 2019**. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diagnosticos>. Acesso em: 30 set. 2021.

SOARES, C. **TRATAMENTO DE ÁGUA UNIFAMILIAR ATRAVÉS DA DESTILAÇÃO SOLAR NATURAL UTILIZANDO ÁGUA SALGADA, SALOBRE E DOCE CONTAMINADA.** 2004. 111 f. Tese (Mestrado em Engenharia Ambiental)- Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/87556/208790.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

SOLAR GIS. **Solar irradiance data.** Disponível em: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/brazil>. Acesso em: 01 de dez de 2019.

_____. **Solar irradiance data.** Disponível em: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/brazil>. Acesso em: 10 de maio de 2023.

SOUZA JÚNIOR, Clodoaldo Carneiro de. **FABRICAÇÃO E ESTUDO DE UM DESTILADOR SOLAR COM COBERTURA MÓVEL.** 2017. 75 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

STEPHENS, G. L. e PLATT, C. M. R. : Aircraft Observations of the Radiative and Microphysical Properties of Stratocumulus and Cumulus Cloud Fields . *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 26: 1243-1268, 1987.

TERRIER, M.; DUGAS, A.; HASCOËT, J.Y. Qualification of parallel kinematics machines in high-speed milling on free form surfaces. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 44, n. 7/8, p. 865-877, 2004.

UFAM. **Você está aqui: Início Notícias bloco esquerdo Aluno de Engenharia de Petróleo e Gás defende trabalho sobre o uso de dessalinizador solar no Amazonas Aluno de Engenharia de Petróleo e Gás defende trabalho sobre o uso de dessalinizador solar no Amazonas.** 2015. Disponível em: <https://antigo.ufam.edu.br/noticias-bloco-esquerdo/4251-aluno-de-engenharia-de-petroleo-e-gas-defende-trabalho-sobre-o-uso-de-dessalinizador-solar-no-amazonas>. Acesso em: 01 jan. 2023.

UNIÁGUA. Disponível em: www.uniagua.org.br. Acesso em: dez. de 2003.

VASCONCELOS, Adriel Barbosa de. **Utilização de um Destilador Solar Convencional para o Tratamento de Efluente de uma Agroindústria**. 2015. 57 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2015.

VILLALVA, Marcelo G; Gazoli Jonas R. Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações. 1. ed. São Paulo: Érica, 2012.

YOLCAN, Oguz Ozan. World energy outlook and state of renewable energy: 10-year evaluation. **Innovation And Green Development**, [S.L.], v. 2, n. 4, p. 100070, dez. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.igd.2023.100070>.

ZONEN, Kipp And. **The Difference between Horizontal and Tilted Global Solar Irradiance**. 2017. Disponível em: <https://www.kippzonen.com/News/408/The-Difference-between-Horizontal-and-Tilted-Global-Solar-Irradiance#.Whk1dUqWaHs>. Acesso em: 31 dez. 2017.