



AVALIAÇÃO PRELIMINAR DO DESEMPENHO DE UM DESTILADOR SOLAR PIRAMIDAL PARA PRODUÇÃO DE ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO

Preliminary performance evaluation of a pyramidal solar still for the production of water for human consumption

Evaluación preliminar del desempeño de un destilador solar piramidal para la producción de agua para consumo humano

Cassiano Gonçalves Simões do Carmo  

Departamento de Engenharia e Tecnologia Ambiental/Universidade Federal de Santa Maria
cassiano.simoes@unesp.br

Marcus Bruno Domingues Soares  

Departamento de Engenharia e Tecnologia Ambiental/Universidade Federal de Santa Maria
marcus.soares@ufsm.br

Resumo: Por diferentes circunstâncias e épocas do ano, o acesso à água por um sistema de captação subterrânea e superficial podem ser cessados, sujeitando a população local a recorrer a fontes não viáveis para sanar a escassez de água temporária. O presente estudo, que foi realizado de outubro de 2019 a março de 2020, tem como objetivo avaliar a possibilidade do uso de um destilador solar piramidal para produção de água e sua qualidade para consumo humano em situações emergenciais. O destilador solar piramidal foi construído com área de cobertura de vidro de 0,25 m², e operado com base em recomendações já conhecidas para maximizar sua produtividade, por meio da energia solar. As variáveis meteorológicas radiação solar, temperatura ambiente, velocidade dos ventos e umidade relativa foram monitoradas para avaliar as potencialidades da eficiência de produção para características locais. Foram realizadas 67 coletas de produção de água destilada para evidenciar que o presente destilador solar foi capaz de produzir uma média de 3,22 L/m².dia e com 31% de eficiência. Também, foram realizadas 7 bateladas de análise da qualidade da água bruta e destilada, sendo que, dentro dos parâmetros analisados, a água destilada foi sempre considerada própria para consumo humano.

Palavras-chave: Destilador solar piramidal. Tratamento de água. Situações emergenciais.

Abstract: For different circumstances and times of the year, access to water by a surface or underground catchment system may be ceased, subjecting the local population to resort to non-viable sources to overcome temporary water shortages. This study, which was conducted from October/2019 to March/2020, aims to evaluate the possibility of using a pyramidal solar distiller to produce water and its

quality for human consumption in emergencies. The pyramidal solar distiller was built with a glass covering an area of 0.25 m² and operated based on recommendations already known to maximize its productivity using solar energy. The meteorological variables solar radiation, ambient temperature, wind speed, and relative humidity were monitored to evaluate the potential production efficiency for local characteristics. 67 samples of distilled water production were collected to show that the current solar still was capable of producing an average of 3,22 L/m².day and with 31% efficiency. Also, 7 batches of analysis of the quality of raw and distilled water were performed, and within the parameters analyzed, the distilled water was always considered proper for human consumption.

Keywords: Pyramidal solar still. Water treatment. Emergency situations.

Resumen: En diferentes circunstancias de emergencia y épocas del año, el acceso al agua por un sistema de captación superficial o subterráneo puede detenerse, lo que obliga a la población local a recurrir a fuentes no viables para superar su escasez temporal. En este trabajo, que se fue realizado de octubre de 2019 a marzo de 2020, se estudió la posibilidad de utilizar un destilador solar piramidal para producir agua y su calidad para el consumo humano en situaciones de emergencia. El destilador fue construido con un área de cobertura de vidrio de 0,25 m² y operado con base en las recomendaciones ya conocidas para maximizar su productividad, mediante el uso de la energía solar. Las variables meteorológicas: radiación solar, temperatura ambiente, velocidad del viento y humedad relativa fueron monitoreadas para evaluar la capacidad potencial de producción para las características locales. A partir de 67 mediciones de producción de agua destilada se demostró que el destilador logró producir una media de 3,22 L/m².día, equivalente a una eficiencia del 31%. Además, mediante el análisis de calidad de agua en siete muestras de agua cruda y destilada, se determinó que el agua producida es apta para el consumo humano.

Palabras clave: Tratamiento del agua. Destilador solar piramidal. Situaciones de emergencia.

Submetido em: 31/05/2021

Aceito para publicação em: 20/01/2022

Publicado em: 16/02/2022

1. INTRODUÇÃO

No mundo, desastres e fenômenos naturais têm ocorrido ao longo de toda a história, influenciando a forma que a sociedade interage com a natureza. Esses podem afetar ou impedir o funcionamento dos sistemas de abastecimento de água e atribuir uma situação emergencial, temporária ou contínua, para a população afetada. Buscas por alternativas unifamiliares e comunitárias de tratamento de água em tais situações, para obtenção de água potável, demonstram-se crescentes. Assim, a busca por inovações tecnológicas e sustentáveis de baixo custo evidenciam-se extremamente promissoras.

O Brasil apresenta disponibilidade hídrica reduzida em algumas regiões, como no Semiárido, em que as crises hídricas têm ocorrido por períodos mais prolongados. Contudo, outras regiões que não demonstravam significativo desequilíbrio entre oferta e demanda, apresentaram deficiências no abastecimento, afetando milhões de pessoas nos anos recentes. Sob a pressão das recentes crises hídricas várias medidas foram tomadas, muitas delas de caráter contingencial, incluindo racionamento, alocação negociada de águas armazenadas em reservatórios, implantação de obras emergenciais e casos extremos de suspensão de usos da água. Para exemplificar, em dezembro de 2016, 132 cidades do Nordeste Setentrional, com uma população total de 1,5 milhões de habitantes, encontravam-se em colapso de abastecimento, e 812 municípios eram abastecidos por carros-pipa, gerando custos de mais de 1 bilhão de reais ao Governo Federal nesse ano (ANA, 2019).

Uma alternativa capaz de produzir água para consumo humano, que possui como fonte a energia solar, é a destilação solar. A destilação solar consiste no aquecimento da água pelos raios solares e, assim, propicia a produção de vapor d'água e esse vapor é então condensado numa superfície fria, e o condensado coletado como água-produto (SOARES, 2004). O principal uso dos destiladores solares está associado à dessalinização da água salobra, com salinidade superior a 0,5% e inferior a 30%, ou salina, com salinidade igual ou superior a 30% (BRASIL, 2005). No entanto, o uso da tecnologia não é excludente para destilação de água doce para produção de água potável, em situações emergenciais.

Um dos sistemas mais conhecidos é o destilador solar piramidal. A produção de água desses sistemas ocorre de forma passiva, em função dos processos envolvidos da destilação dependerem apenas de variáveis meteorológicas. Os principais parâmetros meteorológicos

que influenciam no processo de produção são: radiação solar, temperatura ambiente, velocidade dos ventos e umidade relativa do ar. De forma particular, a radiação acaba por influenciar a produção de forma condicional à eficiência de produção, pois sem radiação solar não há como transmitir energia capaz de aquecer a água bruta (VELMURUGAN *et al.*, 2008; WASSOUF *et al.*, 2011; KIANIFAR; HERIS; MAHIAN, 2012; SARAVANAN; MURUGAN, 2020).

A maximização da eficiência de um destilador solar depende de os seguintes parâmetros estarem aprimorados para as condições locais e próprias do destilador: ângulo de inclinação da placa de cobertura, menores espessuras do material de cobertura, altura da água do tanque, temperatura da placa de cobertura, orientação do destilador solar com relação ao Sol, transferência convectiva de calor da placa de cobertura e das paredes laterais, material do tanque raso e isolamento (TAAMNEH; TAAMNEH, 2012; SHARSHIR *et al.*, 2019; KABEEL *et al.*, 2020). Todo o desempenho do destilador é dependente, de forma primordial, do fluxo de água evaporada do tanque raso e de sua condensação. Este desempenho pode ser avaliado com base nos seguintes parâmetros: taxa de transferência de calor entre a placa de cobertura e a água do tanque, diferença de temperatura entre o ar interno e a placa de cobertura, quantidade de água produzida e eficiência térmica (KIANIFAR, HERIS; MAHIAN, 2012; DAS *et al.*, 2020; SARAVANAN; MURUGAN, 2020).

A temperatura ambiente acaba por influenciar diretamente na temperatura do material de cobertura, que age como coletor e condensador do vapor de água. Quanto menor for a temperatura do ambiente, maior será a taxa de transferência de calor, para que assim se condense, em função da placa de cobertura perder calor para o ambiente. Com o mesmo efeito, a umidade relativa do ar e a velocidade dos ventos implicam à contribuição da taxa de transferência de calor, por influenciarem na diminuição da temperatura do material de cobertura que se aquece pela radiação, convecção e condução (DEV; ABDUL-WAHAB; TIWARI, 2011; KABEEL; OMARA; YOUNES, 2015; SHARSHIR *et al.*, 2016; DAS *et al.*, 2020). Como recomendam Chandrashekara e Yadav (2017), a utilização e instalação de destiladores que produzem água de forma passiva é mais produtiva quando esses estão situados próximos a áreas litorâneas, por serem locais que possuem alta umidade relativa e intenso fluxo de ventos.

Em sua estrutura, os sistemas são comumente compostos por um tanque raso, que armazena a água a ser evaporada, e por uma cobertura, tendo vidro como material mais utilizado pois este material é resistente, pouco dilatável e possui grande capacidade de transmitir radiação solar para dentro do sistema (KABEEL; OMARA; YOUNES, 2015; SARAVANAN; MURUGAN, 2020).

Segundo Maluf (2005), a distância entre a cobertura de vidro à superfície da água dentro da pirâmide não deve ser maior que cinco ou sete centímetros, para que o destilador opere com maior eficiência, evitando perdas térmicas por convecção. O ângulo de inclinação da cobertura de vidro tem influência na quantidade de radiação solar que entra no destilador, influenciando também sua eficiência de produção. Assim, os destiladores devem possuir área máxima útil, de modo que a mesma acompanhe as melhores inclinações com relação à latitude em que o destilador está sendo operado (DEV; ABDUL-WAHAB; TIWARI, 2011; WASSOUF *et al.*, 2011).

Recomenda-se que o tanque raso, que armazena a água bruta dentro do destilador, seja pintado de uma cor escura, preferencialmente preta, para que possa absorver melhor a radiação solar e transformá-la em calor. O mesmo deve ser de material com boa capacidade térmica, para que seja capaz de aquecer-se rapidamente e, por consequência, aquecer a água bruta para acelerar e manter o processo de destilação (VELMURUGAN *et al.*, 2008; WASSOUF *et al.*, 2011; DAS *et al.*, 2020).

Outra componente complementar à produção, é o uso de isolamento em todos os contatos dos diferentes materiais que compõem o sistema, e em especial de baixo do tanque raso para maximizar a eficiência, por evitar perdas de calor (SHARSHIR *et al.*, 2016; CHANDRASHEKARA; YADAV, 2017; MANOKAR *et al.*, 2020).

No que tange a qualidade da água produzida por destiladores, o êxito do sistema em produzir água potável e com baixíssimas concentrações de sais está relacionado com a temperatura necessária para que estes sólidos dissolvidos e suspensos possam ser volatilizados, fazendo com que uma grande quantidade fique retida no tanque raso (VELMURUGAN *et al.*, 2008; WASSOUF *et al.*, 2011; SARAVANAN; MURUGAN, 2020). Das *et al.* (2020) salientam que, em geral, a temperatura medida da água e do ar dentro dos sistemas convencionais de destilação solar não chegam a 90° C, enquanto a temperatura necessária para volatilizar a maioria dos materiais presentes na água são superiores a 100° C.

Portanto, parâmetros associados à presença de sólidos, como por exemplo turbidez, condutividade elétrica e cor, apresentam acentuada remoção.

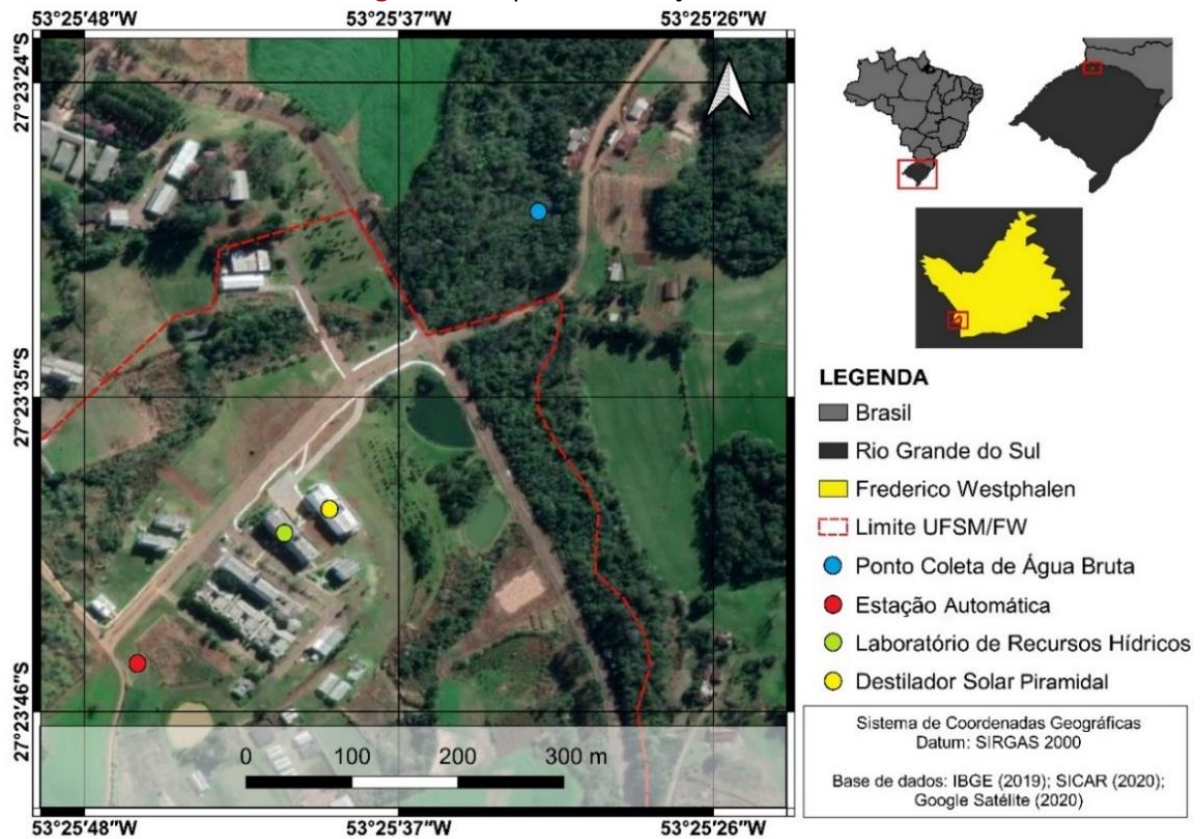
O presente estudo preliminar avaliou a eficiência de um modelo de destilador solar piramidal capaz de destilar água doce de origem fluvial, sobretudo no tocante ao volume de sua produção, com base na influência das variáveis climáticas de radiação solar, temperatura ambiente, umidade relativa do ar e velocidade dos ventos. Para a avaliação da qualidade da água produzida, os parâmetros selecionados foram turbidez, temperatura, pH, condutividade elétrica, cores aparente e verdadeira, oxigênio dissolvido, coliformes totais e *Escherichia coli*, e comparados com as recomendações da Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Todo o estudo foi conduzido ao longo dos meses de outubro de 2019 a março de 2020. Também foram realizados comparativos do presente destilador, com outros da mesma categoria instalados no Brasil e no mundo quanto à produtividade, e de outros destiladores em geral, quanto ao aspecto da tratabilidade.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Local do estudo

O presente estudo foi desenvolvido no segundo semestre de 2019 e primeiro de 2020, na Universidade Federal de Santa Maria (RS), no *campus* Frederico Westphalen (Figura 1), que possui uma área de 190,1 ha (BREUNING *et al.*, 2013). O estudo foi realizado no município de Frederico Westphalen, que se localiza na região do Médio Alto Uruguai, no noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, cuja sede encontra-se à 566 metros de altitude (27°21'33" de latitude sul; 53°23'40" de longitude oeste). O município conta com uma população estimada de 31.498 habitantes e uma área territorial de 265,181 km². Pertence ao bioma Mata Atlântica e faz parte da Bacia do Rio Uruguai (IBGE, 2021). A localidade apresenta pluviosidade significativa ao longo do ano. O clima é classificado como Cfa, de acordo com a classificação de Köppen-Geiger (CLIMATE DATA, 2021).

Figura 1 - Mapa de localização do estudo



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

2.2. Construção do destilador solar piramidal

As decisões sobre os critérios de seleção das dimensões e composições dos materiais foram executadas a partir da disponibilidade, facilidade de montagem e do custo e, ainda, com base nas recomendações de autores como: Velmurugan *et al.* (2008), Wassouf *et al.* (2011), Taamneh e Taamneh (2012), Sharshir *et al.* (2019), Kabeel *et al.* (2020), Saravanan e Murugan (2020) e Das *et al.* (2020). O arranjo do destilador solar piramidal foi dividido pelas componentes de cobertura, módulo acoplado, tanque raso (no interior do destilador), isolamento e sistema de alimentação e coleta.

A cobertura selecionada para compor o destilador solar foi do tipo piramidal, da qual se consiste em 4 placas de triângulos isósceles de vidro comum de 4 mm de espessura, e 0,5 m de aresta na base. A angulação da cobertura é de 25° e sua área de cobertura é de 0,25 m². As placas foram unidas pelas arestas laterais com silicone, que também serve para isolamento.

O módulo acoplado é a estrutura na qual a cobertura é acoplada, e possui a função de contenção do calor e direcionar, por meio das calhas, a água condensada até os reservatórios de água tratada. O material escolhido para esta estrutura foi o Polímero Reforçado com Fibra de Vidro (fibra de vidro), em função do seu custo e fácil manipulação. Sua espessura é de 4 mm, que também acompanha a área da cobertura de 0,25 m², e possui altura de 7 cm.

O material utilizado para confecção do tanque raso foi uma placa de aço galvanizado com espessura de 2 mm, que foi soldada para montar uma bandeja quadrada com aresta de 40 cm, que formam uma área de 0,16 m² e altura de 5 cm em suas laterais. A superfície foi pintada de preto para maximizar a absorção da radiação solar.

O isolamento foi montado colando em uma placa de fibra de vidro, que abrange toda a área inferior do módulo acoplado (0,25 m²), com duas camadas de 2 cm de poliuretano macio. O sistema completo do destilador solar piramidal em operação está representado na Figura 2.

Figura 2 - Arranjo do destilador solar piramidal experimental em operação no *campus* Frederico Westphalen da Universidade Federal de Santa Maria (RS)



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

2.3. Operação do destilador solar piramidal para avaliação da produtividade e tratabilidade

A operação do destilador piramidal se inicia com a introdução semanal de 15 litros de água bruta doce em seu sistema de alimentação, coletados da microbacia hidrográfica do córrego Lajeado Pardo, que se localiza nas proximidades do *campus*.

Com base nos índices de radiação solar e o início da produção de água destilada, a água destilada era coletada diariamente, sempre que possível, nos primeiros horários da manhã. O volume coletado dos reservatórios de água destilada era medido em uma proveta volumétrica, que indicava o quanto foi produzido ao todo do dia anterior. Água bruta e destilada eram levadas ao laboratório para análise, que se examinavam os parâmetros de turbidez, temperatura, pH, condutividade elétrica, cores aparente e verdadeira, oxigênio dissolvido, coliformes totais e *Escherichia coli*, para comparar o desempenho do tratamento da água produzida.

Os dados meteorológicos foram coletados a partir dos dados registrados pela Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática da Universidade Federal de Santa Maria – *campus* Frederico Westphalen, localizada a 100 metros do destilador, aproximadamente. Para este estudo, as variáveis influenciadoras para o processo de produção de água destilada obtidas da estação meteorológica foram a radiação solar (kJ/m^2), temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa do ar (%) e velocidade dos ventos (m/s).

2.4. Análise de eficiência e desempenho térmico

Com o objetivo de comparar os dados obtidos com outros autores, para a análise de eficiência e desempenho, utilizou-se da metodologia adaptada de Sharshir *et al.* (2016). Por 67 dias foi possível avaliar a eficiência de produção pela seguinte equação (1):

$$(1) \quad \eta = \frac{P \times L}{H_s \times C}$$

Onde: η = Eficiência de produção (%); P = Produção de água destilada (kg/m^2); L = Calor latente de vaporização da água (2252 kJ/kg); H_s = Balanço de radiação durante operação (kW/m^2); C = Constante de conversão do calor latente para Watts (3600).

No dia 09/10/2019 a temperatura da água e a temperatura interna do destilador, juntamente com o volume produzido, foram anotadas de hora em hora, das 10 horas às 18 horas, para analisar o desempenho térmico do destilador durante seu processo de produção no período de maior produtividade esperado, com base na disponibilidade de radiação solar local e no comportamento térmico-produtivo observado nos trabalhos de Velmurugan *et al.* (2008), Wassouf *et al.* (2011), Taamneh e Taamneh (2012), Sharshir *et al.* (2019), Kabeel *et al.* (2020), Saravanan e Murugan (2020) e Das *et al.* (2020).

2.5. Análise da tratabilidade

Para avaliar a eficiência de remoção, foram analisadas as seguintes variáveis: turbidez (DLT – 2500 com ± 2 %), condutividade elétrica (HQ40D), cor aparente (SPECORD® 50 PLUS com $\pm 0,05$ %), cor verdadeira (SPECORD® 50 PLUS com $\pm 0,05$ %) e presença de coliformes totais e *E. coli* (Colilert®). Tais características, de acordo com Soares (2004), necessitam ser removidas ou diminuídas para tornar a água mais pura e, de acordo com a normativa vigente para potabilidade da água dentre os parâmetros analisados, própria para consumo humano. Diferentemente, a característica física temperatura (HQ40D $\pm 0,3$ °C), e as características químicas pH (HQ40D) e oxigênio dissolvido (HQ40D $\pm 0,1$ mg/L), não apresentam objetivo de serem removidos, apenas de que permaneçam em conformidade com a normativa. As metodologias de cada parâmetro foram realizadas de acordo com métodos aprovados segundo o APHA (2012) (*Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*).

As análises de qualidade da água foram realizadas com a finalidade de avaliar as características da água bruta e não do corpo hídrico de onde se coletou a água bruta, para que as análises se aproximassem ao máximo da aplicabilidade que a tecnologia pode vir a oferecer. Da mesma forma, as análises da qualidade da água destilada foram realizadas rotineiramente, mas não de forma contínua e imediata conforme produção.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análise da produtividade de água e eficiência de produção do destilador solar piramidal

A Tabela 1 resume os resultados obtidos e a Figura 4 mostra a variação da produção e eficiência do destilador, durante todo o período de coleta, para diferentes categorias de análise dos aspectos produtivos. A média de produção, durante os 67 dias avaliados, nos meses da primavera de outubro a dezembro de 2019 e do verão de março de 2020, foi de 3,22 L/m².dia, e eficiência de 31%. A produção máxima registrada foi superior em 1,46 L/m².dia, porém apresentou apenas 2% de eficiência a mais que a média de produção, mesmo apresentando balanço de radiação de 2,51 kWh/m².dia. Com apenas 18% de eficiência e balanço de radiação de 0,96 kWh/m².dia, o dia de menor produção registrado produziu apenas 0,28 L/m².dia em um dia que se configurou como bastante chuvoso, e demonstra a relação da dependência de produção com a radiação disponível.

Tabela 1 - Resumo da produtividade do destilador

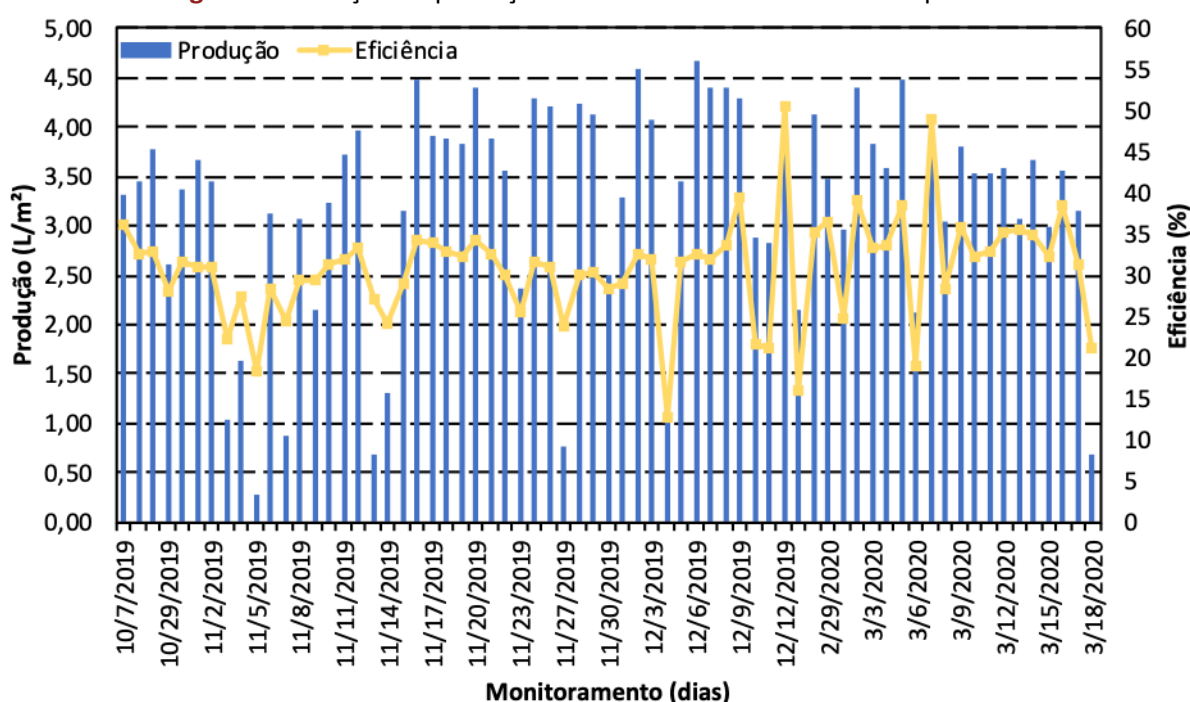
Categoria de avaliação	Contagem ou data	Produção (L/m ² .dia)	Radiação (kWh/m ² .dia)	Temp. Amb. (°C)	Umidade rel. (%)	Vento (m/s)	Eficiência (%)
Média de produção	67	3,22	6,45	25,11	58,62	2,06	31
Produção máxima	06/12/2019	4,68	8,96	22,50	47,86	1,36	33
Produção mínima	05/11/2019	0,28	0,96	20,44	93,20	1,67	18
Maior radiação	06/12/2019	4,68	8,96	22,50	47,86	1,36	33
Menor radiação	05/11/2019	0,28	0,96	20,44	93,20	1,67	18
Maior temperatura	14/03/2020	3,68	6,59	29,88	33,14	1,49	35
Menor temperatura	13/11/2019	0,68	1,57	20,19	80,71	2,12	27
Maior umidade	05/11/2019	0,28	0,96	20,44	93,20	1,67	18
Menor umidade	14/03/2020	3,68	6,59	29,88	33,14	1,49	35
Maior veloc. do vento	23/11/2019	2,36	5,77	23,95	64,07	4,55	26
Menor veloc. do vento	13/03/2020	3,08	5,41	29,71	44,21	0,96	36
Maior eficiência	12/12/2019	3,80	4,69	23,28	77,00	2,59	51
Menor eficiência	04/12/2019	1,16	5,70	22,70	82,64	2,42	13

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

A partir da análise dos dados contidos no gráfico da Figura 3, e em contraste com a Equação 1, é possível identificar que a eficiência não apresenta uma relação diretamente

proporcional com o volume ponderado produzido. A produção pode ser influenciada pelas variáveis meteorológicas, que não possuem entrada direta na equação, tais como: vento, umidade relativa e temperatura ambiente. Neste aspecto, a Equação 1 leva em consideração para o cálculo de eficiência apenas as variáveis do quanto foi produzido e do balanço da radiação. Portanto, é possível que a tecnologia apresente produção acentuada e com menor eficiência, assim como menor produção e maior eficiência, pela influência dessas variáveis meteorológicas que não são introduzidas diretamente no cálculo da eficiência.

Figura 3 - Variação da produção e eficiência do destilador solar piramidal



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

3.2. Comparação entre diferentes destiladores solares piramidais similares ao deste estudo

A Tabela 2 apresenta a produção média e máxima, eficiência e respectivo local de estudo de diferentes autores que também avaliaram a produtividade de um destilador solar piramidal comum.

Tabela 2 - Comparação de produção e eficiência de diferentes destiladores piramidais do tipo comum

Autores	Local	Produção média (L/m².dia)	Eficiência média (%)	Produção máxima (L/m².dia)
Algaim <i>et al.</i> (2013)	Irã	5,26	43,0	7,36
Saravanan e Murugan (2020)	Índia	4,30	23,0	4,30
Kabeel <i>et al.</i> (2020)	Índia	4,02	32,2	4,02
Shashir <i>et al.</i> (2019)	Egito	3,60	54,5	3,80
Fath <i>et al.</i> (2003)	Egito	2,60	30,0	4,25
Kumar <i>et al.</i> (2020)	Índia	2,60	NI	2,60
Taamneh e Taamneh (2012)	Jordânia	2,49	40,2	2,49
Kianifar, Heris e Mahian (2012)	Irã	2,20	NI	3,14
Faria <i>et al.</i> (2015)	Brasil	2,04	31,9	2,86
Wassouf <i>et al.</i> (2011)	Austrália	1,80	NI	7,00
Presente estudo (2021)	Brasil	3,22	31,0	4,68

Legenda: NI: Não informado.

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

O presente destilador se demonstrou eficiente, em comparação com os outros destiladores, ainda levando em consideração que de forma favorável os países dos diferentes locais estudados possuem radiação solar anual maior que a do Brasil. Além disso, os estudos como Saravanan e Murugan (2020), Kabeel *et al.* (2020), Kumar *et al.* (2020) e Taamneh e Taamneh (2012) possuem amostragem de apenas um dia de produção, que pode favorecer positivamente seus resultados para comparar com a produção média.

A produção média deste destilador foi 2,04 L/m², inferior à do destilador de Algaim *et al.* (2013) e 12% menos eficiente. Comparado com Shashir *et al.* (2019) a sua eficiência em comparação a deste estudo foi 23,5% superior. A disparidade da eficiência entre estes diferentes destiladores piramidais pode indicar que o presente destilador apresenta maiores perdas de calor em função da sua configuração geométrica, espessura e qualidade do material utilizado no isolamento ou/e ainda influência das variáveis climatológicas, tais como velocidade dos ventos, temperatura ambiente e umidade de cada região.

3.3. Análise do comportamento térmico de um dia de ensaio do destilador solar piramidal

A Figura 4 representa a análise do comportamento térmico de um dia de ensaio (09/10/2019) do destilador solar piramidal, considerando as principais variáveis ambientais. Entre as horas avaliadas, a produção, em L/m^2 , foi de 3,44, indicando que o restante de 0,34 L/m^2 que foram produzidos para completar o montante do dia (3,78 L/m^2), foram produzidos após às 18:00 horas.

Como pode ser observado na Figura 4A, ao iniciar o monitoramento (10:00 horas), a temperatura ambiente encontrava-se em $16,1^\circ C$, com radiação solar incidente de $668 W/m^2$, da qual representa uma parcela da energia envolvida no processo de destilação solar da água bruta. O pico da temperatura ($27,8^\circ C$) ocorre às 18:00 horas, porém com radiação solar registrada de apenas $190 W/m^2$, enquanto o pico da radiação solar registrado de $975 W/m^2$ ocorreu às 13:00 horas e nesse horário a temperatura era de $22,9^\circ C$. A distribuição da radiação do dia de ensaio comportou-se de forma similar aos resultados dispostos por Fath *et al.* (2003), Kabeel *et al.* (2020) e Manokar *et al.* (2020), porém a temperatura ambiente desses autores apresentou distribuição ao longo do dia em forma de sino, com pico às 13:00 horas, de modo a acompanhar suas radiações registradas, diferentemente do dia de ensaio desse estudo, cuja a temperatura cresce ao longo do dia, resultante possivelmente do acúmulo de radiação e decréscimo da umidade relativa do ar.

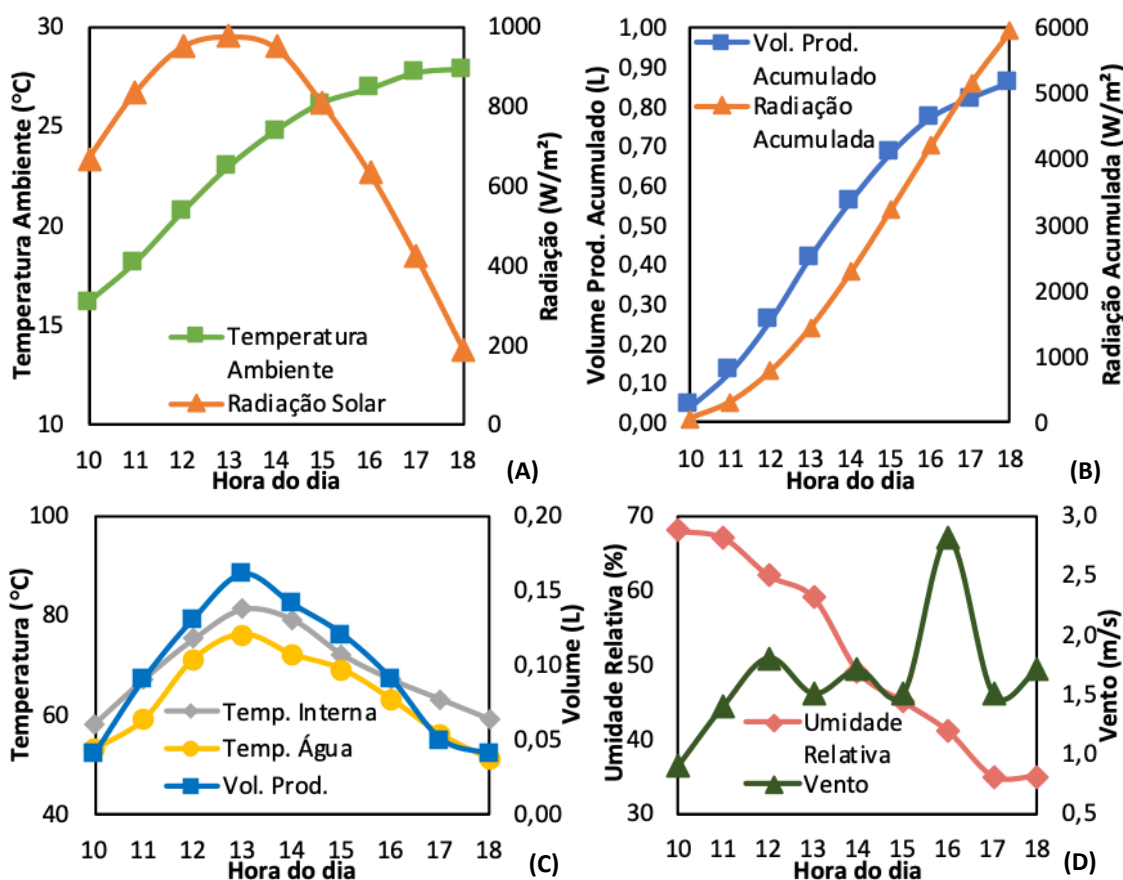
Na Figura 4B, a energia eletromagnética acumulada de quase $6.000 W/m^2$, representada pela radiação solar, foi capaz de produzir 0,86 litro de destilado em oito horas de monitoramento. O comportamento crescente do volume produzido acumulado desse ensaio apresenta-se com o mesmo padrão encontrado nos estudos de Kabeel *et al.* (2020) e Manokar *et al.* (2020).

Com base nos dados da Figura 4C, o aumento da produção acompanha o aumento da temperatura da água e da temperatura interna, assim como seu decréscimo. A análise dos gráficos permite confirmar, assim como também ocorre nos estudos de Soares (2004), Velmurugun *et al.* (2008), Sharshir *et al.* (2019), Kabeel *et al.* (2020), que a temperatura interna do destilador é sempre superior à temperatura da água bruta no tanque raso.

A partir da Figura 4D é possível observar o comportamento das variáveis meteorológicas influenciadoras do processo de destilação solar. O vento, que se apresentou

relativamente forte ao longo de todo o dia, o que favorece o resfriamento do vidro (cobertura) e, por consequência, aumento da taxa de condensação, se apresentou mais intenso nas horas finais analisadas (15:00 às 17:00 horas), mesmo horário em que há o decaimento da produção, que seria proveniente da redução da radiação solar incidente. Em seu estudo Sathyamurthy *et al.* (2014) demonstram que maiores velocidades dos ventos distribuídos ao longo de todo o dia são capazes de produzir maiores quantidades de água destilada. A umidade relativa apresentou-se mais elevada nas primeiras horas do dia favorecendo o resfriamento e, por consequência, aumentando a taxa de condensação. Há um decréscimo na umidade relativa ao longo do dia em função do aumento da radiação solar e da temperatura ambiente.

Figura 5 - Variação gradual da temperatura ambiente vs. radiação solar (A); Variação acumulada do volume produzido vs. radiação solar do dia 09/10/2019 (B); Variação gradual do volume produzido vs. temperaturas analisadas (C); Variação gradual da umidade relativa vs. velocidade dos ventos (D)



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

3.4. Avaliação da qualidade da água produzida

A Tabela 3 apresenta a média geral dos parâmetros medidos para água bruta e água destilada, juntamente com a remoção desta média, e seus respectivos desvios-padrão.

Tabela 3 - Resumo geral das médias dos parâmetros de controle analisados para água bruta e água destilada

Parâmetros	Valor		Remoção (%)
	Água bruta	Água destilada	
Turbidez (NTU)	6,78 ± 3,97	0,40 ± 0,18	93,06 ± 4,10
Temperatura (°C)	23,5 ± 1,21	24,4 ± 1,30	NV
pH	6,68 ± 0,40	6,62 ± 0,23	NV
Condutividade elétrica (µS/cm)	80,30 ± 10,13	17,54 ± 2,90	78,87 ± 3,99
Cor aparente (uC)	38,66 ± 14,82	10,19 ± 3,45	78,27 ± 7,41
Cor verdadeira (uC)	13,48 ± 3,73	AD	SI
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	8,39 ± 0,18	7,61 ± 0,42	NV
Coliformes totais (NMP/100mL)	808,2 ± 943,96	0 ± 0	100 ± 0
<i>Escherichia coli</i> (NMP/100mL)	256,7 ± 383,66	0 ± 0	100 ± 0

Legenda: NV: Não visado; AD: Abaixo do detectável; SI: Sem informação; NMP: Número mais provável.

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

As concentrações médias dos parâmetros da água bruta apresentam maiores desvios-padrão em detrimento da ocorrência de chuvas em dias anteriores à coleta da água bruta. A cor verdadeira sempre se apresentou abaixo do limite detectável proposto pela metodologia, valor de 5 uC.

Dentro dos parâmetros avaliados, a água destilada pelo destilador solar piramidal apresenta-se de acordo com os padrões estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021, demonstrando a eficácia da tecnologia para o tratamento de água.

Quando comparado a outros estudos, é possível observar na Tabela 4 as diferentes remoções medidas de turbidez e condutividade elétrica, de autores que também avaliaram a tratabilidade que a tecnologia oferece para diferentes tipos de água.

Tabela 4 - Diferentes remoções de turbidez e condutividade elétrica de outros autores

Estudo	Tipo de água	Remoção (%)	
		Turbidez	Cond. elétrica
Soares (2004)	Doce	91,59	77,27
Soares (2004)	Salina	94,83	99,97
Velmurugan <i>et al.</i> (2008)	Residuária	95,35	NR
Mota e Andrade (2010)	Doce	41,12	96,09
Wassouf <i>et al.</i> (2011)	Salina	99,60	NR
Sá, Jucá e Sobrinho (2012)	Residuária	99,16	98,33
Hedayati-Mehdiabadi, Sarhaddi e Sobhnamayan (2020)	Salina	96,48	NR
Saravanan e Murugan (2020)	Salina	NR	99,98

Legenda: NR: Não realizado

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

A remoção média do presente destilador solar piramidal estudado para o parâmetro de turbidez foi de 93,06%, valor próximo disposto aos dos autores presentes. No mesmo tipo de água do presente estudo (doce), a remoção encontrada no estudo de Soares (2004) foi de 91,59% e de 41,12% para Mota e Andrade (2010), não sendo possível determinar a razão da baixa remoção da pesquisa de Mota e Andrade. Com base nas remoções encontradas de turbidez para diferentes tipos de água, é possível considerar que a tecnologia, se bem desenvolvida, é capaz de remover valores maiores de 90% da turbidez presente na água bruta.

Em outros estudos Saravanan e Murugan (2020) e Soares (2004) analisaram a remoção da condutividade elétrica de água salina, apresentando remoção maior que 99%. Isso se dá em função da grande quantidade de sais presentes na água bruta, que são removidos no processo de destilação pelos destiladores solares. Soares (2004), por exemplo, mediu valores de 54200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 57400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ em sua água bruta e 120 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente, em sua água destilada.

A remoção média do presente destilador solar piramidal estudado para o parâmetro de condutividade elétrica foi de 78,87%, valor variante ao disposto pelos outros autores. A variação da remoção dos diferentes tipos de água pode ser explicada em função da altíssima concentração de sais das águas salinas e residuárias, quando comparada com as águas do tipo doce. No mesmo tipo de água do presente estudo (doce), a remoção encontrada no

estudo de Soares (2004) foi de 77,27% e de 96,09% para Mota e Andrade (2010), não sendo possível determinar a razão da elevada remoção da pesquisa de Mota e Andrade.

No que se refere à remoção de coliformes totais, os outros estudos de Maroneze *et al.* (2014), Wassouf *et al.* (2011), Soares (2004) e Mota e Andrade (2010) encontraram remoção de 100% na contaminação de coliformes totais e *Escherichia coli*. Este resultado comum, entre o presente estudo e com o de diferentes autores, pode ser justificado pela facilidade e segurança de remoção dos microrganismos no processo de destilação solar da água, com princípios previamente explanados no referencial teórico. É possível considerar, portanto, que os destiladores solares, se bem projetados, são capazes de desinfetar águas contaminadas.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo realizado permitiu avaliar preliminarmente a produtividade de água, durante estações mais favoráveis à sua produção, para consumo humano a partir de água doce e sua tratabilidade por meio da tecnologia de destilação solar, por uma estrutura do tipo piramidal. Poucos estudos sobre a aplicabilidade da tecnologia para água doce foram realizados até o momento, sendo que a maioria tem como principal objetivo avaliar a produção de água para consumo a partir de água salina. A partir deste estudo, em contraste com os outros estudos relacionados a produção de água por destiladores solares, é possível concluir que:

- O destilador solar apresenta potencialidades razoáveis na região do estudo para produção de água para consumo humano capaz de suprir necessidades diárias de pequenas famílias, no entanto deve ser construído com área de cobertura de, pelo menos, 1 m².
- Dentro do período de produção estudado, a região recebeu boa intensidade de radiação e foi capaz de produzir uma média 3,22 L/m².dia com média de balanço diário de 6,45 kW/m² e média geral de produção de 31%. No entanto, as potencialidades da tecnologia não foram avaliadas durante o período de outono e inverno, estações que apresentam forte queda na radiação, quando comparadas com o resto do país.

- No que se refere à eficiência de remoção e tratamento da água para potabilidade da água dos parâmetros estudados, o destilador se demonstrou extremamente eficiente, contudo, ressalva-se que o processo de tratamento também diminui a quantidade de sais minerais presentes na água, que são essenciais para o bom funcionamento do metabolismo.
- Em comparação com outros destiladores solares piramidais, o presente destilador demonstrou eficiência razoável. Isso sugere que as configurações de cada componente poderiam ser ajustadas visando minimizar as perdas de calor, aumentando sua capacidade térmica interna, principalmente do módulo acoplado.
- Estudos deste tipo são fundamentais para analisar as potencialidades da tecnologia em locais com baixa estrutura hídrica, e frequente ocorrência de eventos que condicionam a dificuldade do acesso à água. Recomenda-se que estudos futuros busquem desenvolver estruturas com área útil de 1 m² e explorem o uso de diferentes materiais para a confecção do sistema, visando otimizar a eficiência térmica e os custos dos materiais.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Plano Nacional de Segurança Hídrica**. Brasília. 2019. Disponível em: <https://arquivos.ana.gov.br/pnsh/pnsh.pdf>. Acesso em: 25 out. 2021.

ALGAIM, H. R. M.; ALASDI, J. M.; MOHAMMED, A. J. Study of efficiency for the pyramidal solar still (PSS) in Basra city, Iraq. **Scholars Research Library Archives of Applied Science Research**, [s.l.], v. 5, n. 5, p. 62–67, 2013. Disponível em: <https://www.scholarsresearchlibrary.com/articles/study-of-efficiency-for-the-pyramidal-solar-still-pss-in-basra-city-iraq.pdf>. Acesso em: 25 maio 2021.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA); AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENT FEDERATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22 ed. Washington (D.C.): American public health association, 2012.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 04 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 7 maio 2021. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=07/05/2021&jornal=515&pagina=127>. Acesso em: 25 out. 2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357, de 15 de junho de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 18 mar 2005. Disponível em: http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=450.

Acesso em: 25 out. 2021.

BREUNIG, F. M. *et al.* **Situação ambiental do campus da UFSM de Frederico Westphalen, RS.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu, Pr: Inpe, 2013. p. 7241–7248. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/rep/dpi.inpe.br/marte2/2013/05.28.23.07.49>. Acesso em: 25 out. 2021.

CHANDRASHEKARA, M.; YADAV, A. Water desalination system using solar heat: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 67, p. 1308–1330, 1 jan. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116304919>. Acesso em: 25 maio 2021.

CLIMATE DATA. **Clima Frederico Westphalen.** 2021. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/rio-grande-do-sul/frederico-westphalen-43585>. Acesso em: 25 de out. de 2021.

DAS, D. *et al.* Solar still distillate enhancement techniques and recent developments. **Groundwater for Sustainable Development**, [s.l.], v. 10, p. 100360, abr. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352801X19302140>. Acesso em: 25 maio 2021.

DEV, R.; ABDUL-WAHAB, S. A.; TIWARI, G. N. Performance study of the inverted absorber solar still with water depth and total dissolved solid. **Applied Energy**, [s.l.], v. 88, n. 1, p. 252–264, jan. 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261910003053>. Acesso em: 25 maio 2021.

FARIA, E. V. D. *et al.* **Desenvolvimento e construção de um destilador solar para dessalinização de água salgada em diferentes concentrações de sais.** Anais do XXXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. Anais [...]. In: XXXVII CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS. São Carlos, Brasil: Editora Edgard Blücher, out. 2015. Disponível em: <http://pdf.blucher.com.br.s3-sa-east-1.amazonaws.com/chemicalengineeringproceedings/enemp2015/TC-544.pdf>. Acesso em: 25 out. 2021

FATH, H. E. S. *et al.* Thermal-economic analysis and comparison between pyramid-shaped and single-slope solar still configurations. **Desalination**, [s.l.], v. 159, n. 1, p. 69–79, set. 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916403900464>. Acesso em: 25 maio 2021.

HEDAYATI-MEHDIABADI, E.; SARHADDI, F.; SOBHNAMAYAN, F. Exergy performance evaluation of a basin-type double-slope solar still equipped with phase-change material and

PV/T collector. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 145, p. 2409–2425, jan. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148119311802>. Acesso em: 25 maio 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades: Frederico Westphalen**. 2021. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/frederico-westphalen/panorama>. Acesso em: 25 out. 2021.

KABEEL, A. E. *et al.* Performance enhancement of pyramid-shaped solar stills using hollow circular fins and phase change materials. **Journal of Energy Storage**, [s.l.], v. 31, p. 101610, out. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X2031447X>. Acesso em: 25 maio 2021.

KABEEL, A. E.; OMARA, Z. M.; YOUNES, M. M. Techniques used to improve the performance of the stepped solar still—A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 46, p. 178–188, jun. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032115001410>. Acesso em: 25 maio 2021.

KIANIFAR, A.; ZEINALI HERIS, S.; MAHIAN, O. Exergy and economic analysis of a pyramid-shaped solar water purification system: Active and passive cases. **Energy**, [s.l.], v. 38, n. 1, p. 31–36, fev. 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544211008723>. Acesso em: 25 maio 2021.

KUMAR, A. S. *et al.* A study of life cycle conversion efficiency and CO₂ role in the pyramid shape solar stills – Comparative analysis. **Groundwater for Sustainable Development**, [s.l.], v. 11, p. 100413, out. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352801X19304060>. Acesso em: 25 maio 2021.

MALUF, A. P. **Destiladores solares no Brasil**. 2005. Monografia (Especialista em Fontes Alternativas de Energia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005. Disponível em: https://www.solenerg.com.br/files/monografia_alexandre.pdf. Acesso em: 25 maio 2021.

MANOKAR, A. M. *et al.* Effect of water depth and insulation on the productivity of an acrylic pyramid solar still – An experimental study. **Groundwater for Sustainable Development**, [s.l.], v. 10, p. 100319, abr. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352801X1930390X>. Acesso em: 25 maio 2021.

MOTA, S.; ANDRADE, M. A. N. Uso da destilação solar no tratamento de águas contaminadas por microorganismos. Aplicações à pequenas comunidades. **Revista Tecnologia**, [s.l.] v. 7, n. 1, p. 24-26, 2010. Disponível em: <https://periodicos.unifor.br/tec/article/view/1388/4205>. Acesso em: 25 maio 2021.

SÁ, L. F.; JUCÁ, J. F. T.; SOBRINHO, M. A. DA M. Treatment of landfill leachate using a solar destillar. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, Taubaté, v. 7,

n. 1, p. 204–217, 27 abr. 2012. Disponível em: www.ambi-agua.net/seer/index.php/ambi-agua/article/view/815/pdf_614. Acesso em: 25 maio 2021.

SARAVANAN, A.; MURUGAN, M. Performance evaluation of square pyramid solar still with various vertical wick materials – An experimental approach. **Thermal Science and Engineering Progress**, [s.l.], v. 19, p. 100581, out. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2451904920300998>. Acesso em: 25 maio 2021.

SATHYAMURTHY, R. *et al.* Factors affecting the performance of triangular pyramid solar still. **Desalination**, [s.l.], v. 344, p. 383–390, jul. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916414002082>. Acesso em: 25 maio 2021.

SHARSHIR, S. W. *et al.* A hybrid desalination system using humidification-dehumidification and solar stills integrated with evacuated solar water heater. **Energy Conversion and Management**, [s.l.], v. 124, p. 287–296, set. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890416306069>. Acesso em: 25 maio 2021.

SHARSHIR, S. W. *et al.* Augmentation of a pyramid solar still performance using evacuated tubes and nanofluid: Experimental approach. **Applied Thermal Engineering**, [s.l.], v. 160, p. 113997, set. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431119308658>. Acesso em: 25 maio 2021.

SOARES, C. **Tratamento de água unifamiliar através da destilação solar natural utilizando água salgada, salobra e doce contaminada**. 2004. Dissertação (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>. Acesso em: 25 maio 2021.

TAAMNEH, Y.; TAAMNEH, M. M. Performance of pyramid-shaped solar still: Experimental study. **Desalination**, [s.l.], v. 291, p. 65–68, abr. 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916412000744?via%3Dihub>. Acesso em: 25 maio 2021.

VELMURUGAN, V. *et al.* Desalination of effluent using fin type solar still. **Energy**, [s.l.], v. 33, n. 11, p. 1719–1727, nov. 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544208001643>. Acesso em: 25 maio 2021.

WASSOUF, P. *et al.* Novel and low cost designs of portable solar stills. **Desalination**, [s.l.], v. 276, n. 1–3, p. 294–302, ago. 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916411002876?via%3Dihub>. Acesso em: 25 maio 2021.