

Artigos

Potabilização de água salobra por meio de um dessalinizador solar portátil com refletores de radiação integrados

Brackish water potabilization through a portable solar still with integrated radiation reflectors

Adriano Oliveira da Silva¹; Yohanna Jamilla Vilar de Brito¹; Vanessa Rosales Bezerra¹; Geralda Gilvânia Cavalcante de Lima¹; Keila Machado de Medeiros²; Carlos Antônio Pereira de Lima¹✉

¹ Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA), Campus de Campina Grande - PB

² Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Centro de Ciência e Tecnologia em Energia e Sustentabilidade (CETENS), Campus de Feira de Santana - BA.

✉ adrianoable22@gmail.com, yohannajvb@gmail.com, rosalesuepb@gmail.com, gilvania@uepb.edu.br, keilamedeiros@ufrb.edu.br, caplima@uepb.edu.br

Palavras-chave:

Escassez hídrica.
Dessalinizador solar.
Energia solar.
Potabilidade da água.

Keywords:

Water scarcity.
Solar desalter.
Solar energy.
Water potability.

Revisão por pares.
Recebido em: 24/06/2020.
Aprovado em: 11/08/2020.

Resumo

Um dessalinizador solar portátil com refletores de radiação integrados foi utilizado com o intuito de obter uma água tratada conforme os padrões de potabilidade para o consumo humano. Este trabalho teve como objetivo analisar o desempenho térmico do dessalinizador solar para produção de água dessalinizada e a qualidade físico-química da água antes e após o processo de dessalinização. A água salobra foi coletada no poço no Sítio Poço de Pedra, no município de Juazeirinho - PB. Foi observado uma produção máxima de água potável de 2730,8 mL m⁻² dia⁻¹ para um índice de radiação solar média de 660,42 W m⁻². Os resultados obtidos das análises físico-químicas das águas salobra e dessalinizada apresentaram reduções no teor de cloreto de 99,72%, o sódio de 99,88% e nos sólidos totais dissolvidos de 99,73% após o processo de dessalinização, atingindo valores de acordo com os padrões de potabilidade exigidos pela Portaria do Ministério da Saúde vigente no país.

Abstract

A portable solar still with integrated radiation reflectors was used to obtain treated water with human consumption standards. This article aimed to analyze the thermal performance of the solar still to produce desalinated water and the physical-chemical quality of the water before and after the desalination process. The brackish water sampled in the well at Poço de Pedra Farm, in the municipality of Juazeirinho - PB. Maximum drinking water production of 2730.8 mL m⁻² day⁻¹ observed for an average solar radiation index of 660.42 W m⁻². The results obtained from the physical-chemical analysis of brackish and desalinated waters showed reductions in the chloride content of 99.72%, sodium of 99.88% and total dissolved solids of 99.73%, reaching values in accordance with the standards of potability required by the Ministry of Health.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v34i3.29923>

1. INTRODUÇÃO

As tecnologias de dessalinização de água assistida por energia renovável estão se tornando atraentes como uma solução para crise da escassez de água doce. O crescimento populacional, o desenvolvimento industrial e agrícola juntamente a poluição e contaminação das águas, as quais são descartadas se não houverem tratamento adequado, resultaram no aumento da taxa de consumo de água (MOLLAHOSSEINI *et al.*, 2019).

O fornecimento de água potável é o maior desafio das comunidades rurais da região semiárida do Brasil (OLIVEIRA *et al.*, 2017) que são caracterizadas pela disponibilidade limitada e irregular de recursos hídricos (MARINHO *et al.*, 2012). A perfuração de poços é uma alternativa para suprir a escassez de água, no entanto a água encontrada nos poços geralmente é salobra ou salina devido à formação da rocha cristalina na maior parte do semiárido brasileiro, correspondendo cerca de 80% do território (SILVA e SHARQAWY, 2020).

De maneira a solucionar esta problemática, sucessivas tecnologias de dessalinização têm sido utilizadas para a potabilização de águas salinas e salobras, tais como: osmose inversa, eletrodialise, destilação multiestágio, destilação multiefeito, destilação solar, etc.

A dessalinização é uma técnica que consiste em tratar a água salobra e ou salina, na qual remove os sais, tornando a água adequada/própria para irrigação ou abastecimento. Além disso, os processos de dessalinização por osmose inversa, eletrodialise, destilação multiestágio e destilação multiefeito implicam em um dos maiores gastos de energia elétrica e/ou térmica na área de tratamento de água e, portanto, regiões que dispõem de pequena capacidade de energia têm uma considerável dificuldade para implantar essas operações (FONSECA *et al.*, 2020).

Em contrapartida, as zonas descentralizadas, com pouca infraestrutura e carentes de água potável, como o semiárido nordestino, geralmente possuem elevada incidência de radiação solar. Essas características aparentam sugerir como alternativa a aplicação de processos de dessalinização por energia solar, pois demonstram condições apropriadas para a implantação desses métodos alternativos que são barreiras para os tradicionais (CAMPOS *et al.*, 2019).

A dessalinização via energia solar evidencia ser uma técnica promissora para os problemas de escassez de água doce em comunidades isoladas, pois apresentam maior sustentabilidade a essa operação, por utilizar uma energia limpa e renovável para a potabilização da água, sendo assim uma solução composta tanto para a carência de água potável, quanto para os problemas energéticos e ambientais igualmente enfrentados.

Atualmente, os dessalinizadores solares de bandeja plana são equipamentos convenientes para a produção de água potável por sua fácil fabricação, além de ter baixo custo comparado a outros dessalinizadores solares. No entanto, esse dessalinizador solar apresenta um rendimento menor do que outros tipos de dessalinizadores solares. Por esta razão, pesquisadores buscam aumentar a eficiência e o desempenho desse tipo de dispositivo. Uma das modificações em sua configuração consiste na substituição da bandeja plana por uma bandeja subdividida em patamares, que é característica do dessalinizador cascata (BOUZAIID *et al.*, 2019).

O dessalinizador solar tipo cascata possui duas qualidades significativas para aumentar a eficiência e produção de água dessalinizada, sendo a estrutura inclinada com bandeja escalonada e um único canal de condensado para obter a água dessalinizada (ARUNKUMAR *et al.*, 2019). De acordo Bouzaid *et al.* (2019), os dessalinizadores solares escalonados ainda com defletores têm maior produtividade em comparação aos dessalinizadores tipo bandeja, porque a placa absorvedora é feita em várias etapas, oferecendo profundidade mínima de água salobra.

Os dessalinizadores solares integrados a refletores são um dos mais eficientes para um bom comportamento térmico na produção de água dessalinizada. Os refletores externos ou in-

ternos são modificações de baixo custo para aumentar a incidência de irradiação solar para o revestimento da bandeja e a água, proporcionando maior produtividade de água dessalinizada (OMARA; KABEEL e ABDULLAH, 2017).

Segundo Omara *et al.* (2016), a produtividade da água de dessalinizadores solares com espelhos refletores aumenta em cerca de 145% em relação aos modelos convencionais. Estabanati *et al.* (2016) relataram que a instalação de refletores em todas as paredes laterais do dessalinizador, em comparação com um dessalinizador sem refletores, pode aumentar a produção de água dessalinizada no período de inverno, verão e ano inteiro em 65%, 22% e 34%, respectivamente.

Neste contexto, o presente trabalho buscou analisar o desempenho térmico de um dessalinizador solar portátil do tipo ondular com refletores de radiação integrados para a produção de água dessalinizada e que atenda os padrões vigentes de potabilidade para o consumo humano.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A construção do protótipo e os experimentos do dessalinizador solar foram realizados na cidade de Campina Grande - PB, situada a 126 Km da capital João Pessoa, a 551 m acima do nível do mar, tendo como coordenadas 7° 13' 50" sul e 35° 52' 52" oeste, no Laboratório de Pesquisa em Ciências Ambientais - LAPECA, do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - DESA do Centro de Ciências e Tecnologia - CCT da Universidade Estadual da Paraíba - UEPB.

2.1 Dessalinizador solar

O dessalinizador solar é constituído por uma placa absorvedora de calor que tem o formato ondular de composto de fibrocimento na sua confecção, de 6 mm de espessura, possuindo 1,43 m de comprimento e 0,543 m de largura, tendo uma área útil para dessalinização de 0,78 m² e pintada de preto fosco para melhor absorção da radiação solar. Além disso, o dessalinizador possui uma cobertura de vidro de 3 mm de espessura e refletores de radiação de chapas de alumínio com dimensões de 0,704 m de comprimento e 0,545 m de largura na parte superior e nas laterais possuem 1,49 m de comprimento e 0,55 m de largura cada.

Os materiais empregados no dessalinizador solar foram estabelecidos visando o maior custo-benefício, além de assegurar um bom isolamento, resistência à temperatura e durabilidade. Outro aspecto relevante foi a disponibilidade dos materiais na região, com vistas a facilitar a construção do equipamento.

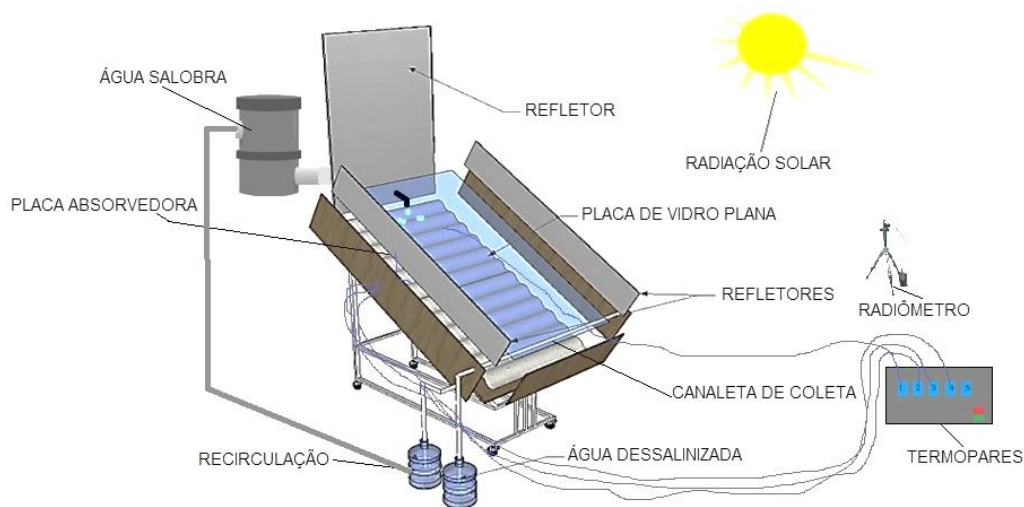
2.2 Descrição do sistema

O sistema foi alimentado por gravidade com uma vazão de 30,6 mL min⁻¹ de água salobra na parte superior do dessalinizador operando em modo contínuo, percorrendo por toda a placa absorvedora. Com a irradiação direta e refletida para a placa absorvedora de calor através da cobertura de vidro inclinada, rapidamente a superfície da placa absorvedora é aquecida, transferindo o calor por meio de convecção para a água, provocando o aumento na taxa de evaporação. O vapor de

água é condensado ao entrar em contato com a superfície interna da cobertura de vidro e, por meio da gravidade, a água

dessalinizada escorre e é recolhida na parte inferior pela canaleta de coleta, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Dessalinizador solar portátil tipo ondular com refletores



2.3 Procedimento do ensaio e coleta de dados

A água salobra foi coletada em um poço no Sítio Poço de Pedra, no município de Juazeirinho – PB. Esse poço foi selecionado por ser utilizado como fonte de abastecimento de água para consumo humano e animal na comunidade local.

Com o intuito de realizar o teste de desempenho do dessalinizador solar, foram realizados dois ensaios (experimento 1 e experimento 2) em dias diferentes no período de março de 2020, em que houveram variação apenas das condições climáticas, iniciado às 07h00min e finalizado às 17h00min. A cada 30 minutos foi medido o volume da água dessalinizada obtida e no final o volume total, para a caracterização das propriedades físico-químicas e também calculada a eficiência térmica do dessalinizador.

Foram realizadas medições de temperatura na água salobra, no vidro, no isolante, na placa absorvedora do dessalinizador e também a temperatura ambiente, a cada 30 minutos, utilizando termopares do tipo PT-100 de ligas metálicas. A medição da radiação global foi efetuada de modo ininterrupto durante todo o funcionamento do dessalinizador por meio do radiômetro SL 200 17957 da marca KIMO.

2.4 Eficiência térmica

Existem dois tipos de eficiência térmica para o dessalinizador solar: a eficiência horária e a eficiência diária. A eficiência horária reflete a razão entre o calor latente de vaporização de água médio gerado pela água produzida de hora em hora e a quantidade total de energia solar absorvida. A variação da irradiância solar durante o dia gera, obviamente, uma variação horária da eficiência térmica (RABHI *et al.*, 2017).

A eficiência horária e diária pode ser obtida pelas Equações (1) e (2), respectivamente (EL-AGOUZ, 2014).

$$\eta_H = \frac{(M * L)/3600}{A_v * I(t)} * 100 \quad (1)$$

$$\eta_D = \frac{1}{n} \sum_n \eta_H * 100 \quad (2)$$

onde, M [kg] corresponde a produção horária de água, L [W s kg⁻¹] é o calor latente de vapor de água, A_v [m²] é a área de cobertura do vidro e $I(t)$ [W m⁻²] é a intensidade de irradiação solar.

2.5 Parâmetros para análise da água

A eficiência do dessalinizador está relacionada a qualidade da água dessalinizada, visto que essa é a real finalidade do dessalinizador solar. Dessa forma, tanto a água salobra, como a água dessalinizada foram submetidas a testes para verificar alguns parâmetros físico-químicos que são determinantes segundo a legislação de potabilidade da água de acordo com a Portaria de Consolidação nº 005/2017 do Ministério da Saúde – MS (BRASIL, 2017).

As análises ocorreram nos laboratórios de Pesquisa em Ciências Ambientais e o de Referência em Tecnologias de Águas, ambos na UEPB. As metodologias utilizadas para obter todos os parâmetros físico-químicos das águas provenientes da alimentação e do destilado estão preconizadas no *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (BAIRD, EATON e RICE, 2017). O Quadro 1 apresenta os parâmetros físico-químicos analisados juntamente com a metodologia utilizada.

Quadro 1 – Parâmetros físico-químicos analisados e equipamentos utilizados

Parâmetro	Unidade	Metodologia
pH	adimensional	pHmetria
Condutividade elétrica	μScm^{-1}	Condutimetria
Cor aparente	uH	Colorimetria
Cloreto	$\text{mg Cl}^{-1}\text{L}^{-1}$	Titulometria - Mohr
Dureza	$\text{mg CaCO}_3\text{L}^{-1}$	Titulometria - EDTA
Alcalinidade	$\text{mg CaCO}_3\text{L}^{-1}$	Titulometria com indicador
Turbidez	NTU	Nefelometria
Sódio	$\text{mg Na}^+\text{L}^{-1}$	Fotometria de chama
Potássio	$\text{mg K}^+\text{L}^{-1}$	Fotometria de chama
STD	mgL^{-1}	Método instrumental

STD= Sólidos Totais Dissolvidos

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

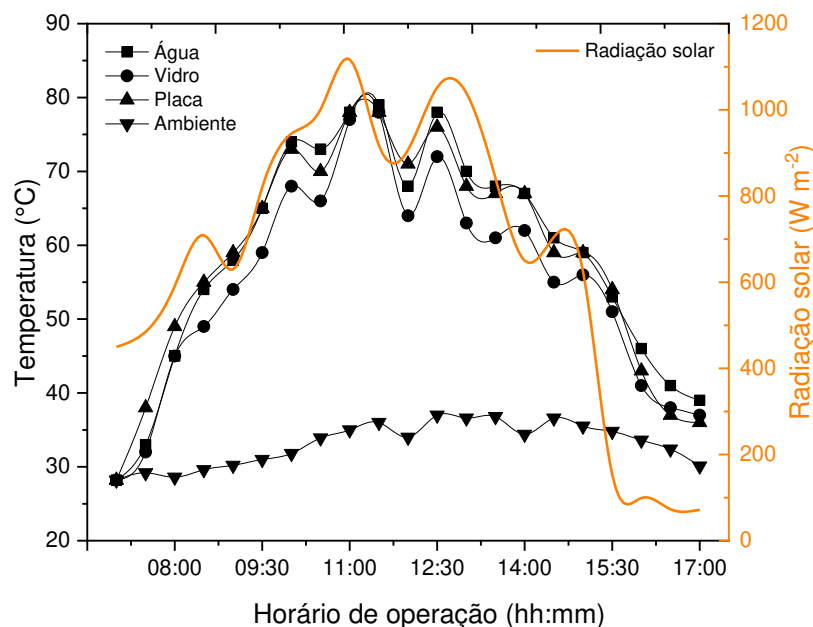
3.1 Desempenho térmico do protótipo do dessalinizador solar

Com o intuito de avaliar o desempenho térmico e do volume de água dessalinizada, foram realizadas diversas medições de temperaturas nos principais componentes do dessalinizador. Simultaneamente, foi feito o acompanhamento das condições climáticas e dos níveis diários de radiação solar, observando parâmetros térmicos para este tipo de equipamento.

A Figura 2 apresenta as variações de temperatura interna da

cobertura de vidro, temperatura da água, temperatura da placa absorvedora e a temperatura ambiente, e da radiação solar incidente em função do horário de operação do dessalinizador no experimento 1. Ao analisar os valores, é possível verificar o aumento gradativo dos perfis de temperatura até às 11h30min, onde os valores da temperatura interna da cobertura de vidro mantiveram-se inferiores às demais temperaturas, e isso de fato ocorre porque o vidro se encontra com uma temperatura inferior ao do vapor d'água, o que garante que ocorra o processo de condensação (AL-GARNI, 2012).

Figura 2 – Perfis de temperatura e radiação solar no experimento 1



Ao longo do experimento, a temperatura da água salobra sofre variações. Inicia às 07h00min com a temperatura de 28,2 °C e atinge maior temperatura às 11h30min, alcançando 79 °C, trinta minutos depois do momento de maior incidência de radiação solar, de 1117 W m⁻². Rashidi *et al.* (2018) em seu estudo relatou atingir a temperatura máxima da água salobra e

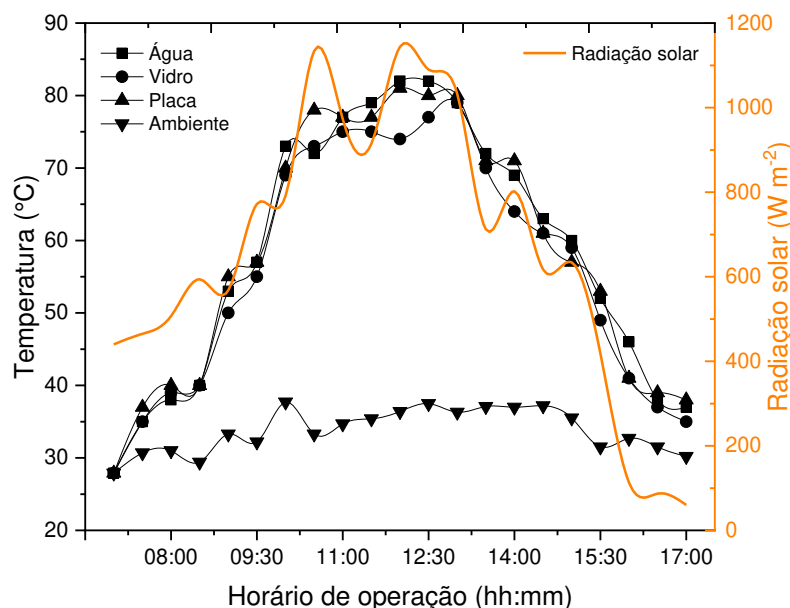
temperatura ambiente 73 °C e 38 °C, respectivamente, e intensidade de radiação solar de 943,5 W m⁻² no dessalinizador solar inclinado modificado.

A Figura 3 exhibe as variações de temperatura interna da cobertura de vidro, temperatura da água, temperatura da placa absorvedora e a temperatura ambiente em função da radia-

ção solar incidente no dessalinizador no experimento 2. Os valores de temperatura interna da cobertura de vidro também se mantiveram inferior às demais temperaturas. Ao longo do experimento, a temperatura da água salobra também sofre variações e atinge maior temperatura às 12h00min, alcançando 82 °C no momento de maior incidência de radiação solar, 1144 W m⁻². No trabalho de Mulftah, Sopian e Alghoul (2018)

a temperatura da água salobra alcançou cerca de 62 °C no dessalinizador solar escalonado sem modificação, e após a modificação com adição de refletores a temperatura da água chegou a, aproximadamente, 70 °C. Portanto, no estudo realizado do experimento 2 foi obtido um valor superior de temperatura, resultando em uma maior produção de água dessalinizada.

Figura 3 – Perfis de temperatura e radiação solar no experimento 2



Observa-se que os perfis de temperatura no experimento 1 e no experimento 2 acompanha a intensidade de radiação solar no dessalinizador, devido à decorrência da radiação solar direta e refletida no dessalinizador. O perfil da temperatura ambiente variou de 28,2 °C a 37 °C no decorrer do dia para o experimento 1 e 27,9 °C a 37,7 °C para o experimento 2, e os perfis de temperatura do vidro acompanharam o perfil da temperatura da água salobra durante todo o experimento. No estudo de Matrawy, Alosaimy e Mahrous (2015) com dessalinizador solar simples com um refletor inclinado, a temperatura ambiente correspondeu a 35 °C e radiação solar a, aproximadamente, 1150 W m⁻², valores semelhantes aos encontrados neste estudo.

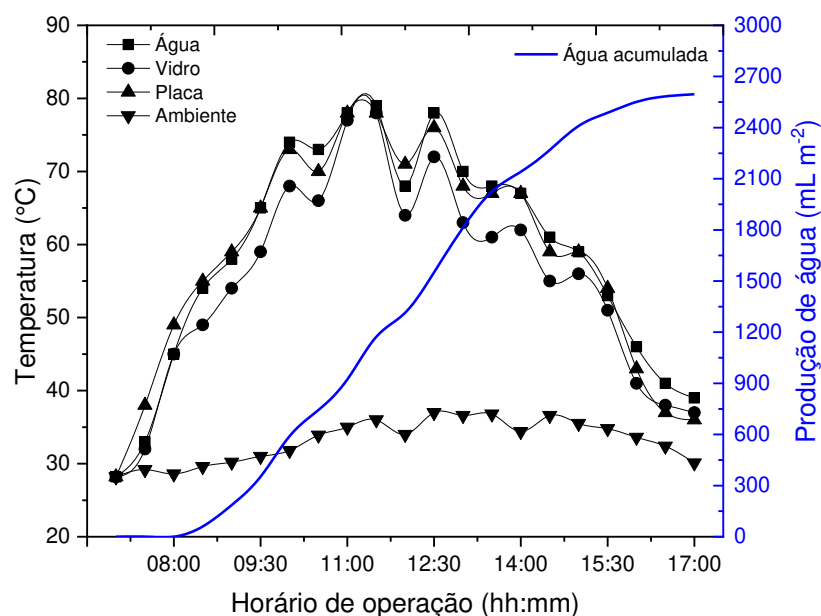
3.2 Produção de água dessalinizada

A Figura 4 apresenta a variação da produção de água dessalinizada com o tempo de operação e em função dos perfis de

temperatura da água, temperatura do vidro, temperatura da placa absorvedora e temperatura do ambiente. Observa-se no experimento 1 que o volume de água dessalinizada acompanha a variação das temperaturas da água, do vidro e da placa, onde há o acumulo gradativo da produção de água dessalinizada.

Com base nos valores obtidos, percebeu-se que durante o ensaio a temperatura do ambiente estava favorável ao experimento, apresentando valores acima da média de 31 °C da região nordeste (INMET, 2019). Outro fato observado foi ausência de alterações bruscas de temperatura ao longo do dia, obtendo-se ao final uma temperatura média de 33,11 °C, influenciando diretamente no aumento da temperatura interna do dessalinizador, que é um fator importante no processo de dessalinização. E com isso, a produção de água dessalinizada acumulada durante o dia do experimento 1 foi de 2596,1 mL m⁻².

Figura 4 – Produção de água em função dos perfis de temperatura no experimento 1

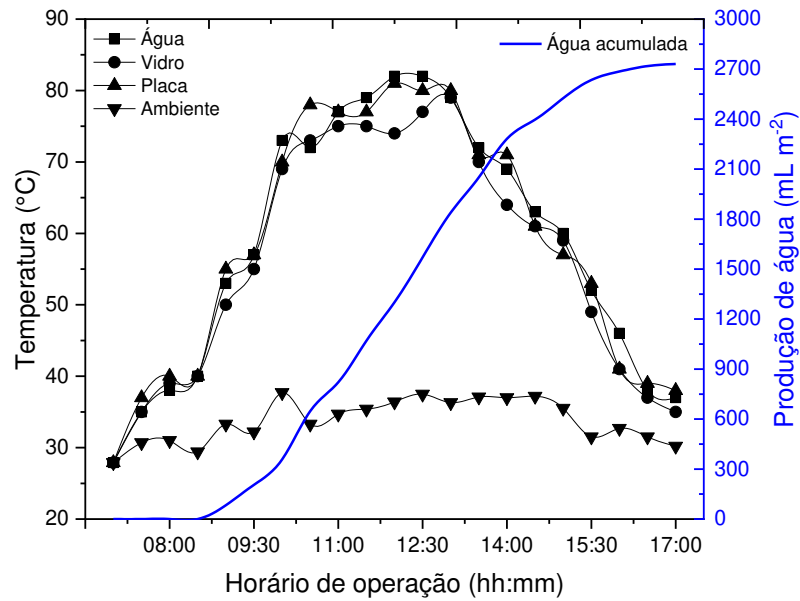


Na Figura 5 pode-se observar os valores de temperatura da água salobra do experimento 2, em que o estudo desse parâmetro relaciona a radiação solar incidente sobre o dessalinizador com a capacidade do sistema de direcionar e conservar essa energia para aquecer a água salobra. Ao se analisar os valores obtidos de temperatura da água salobra e temperatura da placa absorvedora, percebeu-se que o comportamento do sistema, especialmente o da placa absorvedora, isolamento e vedação foram satisfatórios, pois a temperatura da água salobra elevou-se até às 12h30min, chegando ao ápice de 82 °C, decaindo somente na última hora de medição, pois houve uma diminuição da radiação solar incidente em 94,49%. Resultado mais próximo ao obtido no experimento 2, foi retratado por Bouzaid *et al.* (2019) que estudaram um dessalinizador solar tipo cascata com defletores, em que a temperatura da água salobra e temperatura da placa absorvedora atingiram 72 °C e 74 °C, respectivamente.

Ao fim do período de análise se obteve uma temperatura mé-

dia da placa absorvedora e da água salobra, respectivamente, de 58,61 °C e 58,66 °C para o experimento 2. Enquanto no experimento 1 as temperaturas médias da placa absorvedora e da água salobra foram de 58,58 °C e 58,91 °C, valores próximos do experimento 2. A produção de água dessalinizada acumulada acompanhou as temperaturas no sistema, atingindo um valor de 2730,8 mL m⁻². Observa-se que o aumento na produção de água dessalinizada é diretamente influenciado pela radiação solar e a temperatura alcançada pela água. Dessa forma, observa-se que a produção de água dessalinizada no período das 7h00min às 17h00min do experimento 2 foi um pouco maior do que o valor de 2596,1 mL m⁻² obtido no experimento 1, e esta diferença volumétrica foi devido o valor da radiação do experimento 2 ter sido maior do que o experimento 1. Além disso, estes valores foram muito próximo ao valor reportado por Rajamanickam e Ragupathy (2012) para o dessalinizador solar de dupla inclinação.

Figura 5 – Produção de água em função dos perfis de temperatura no experimento 2



3.3 Eficiência térmica do dessalinizador solar

A evolução da eficiência térmica horária em função da radiação solar no dessalinizador para o experimento 1 está apresentada na Figura 6. Observa-se que a eficiência térmica horária acompanha o comportamento da radiação solar devido ao aumento dos perfis de temperatura no sistema. Uma eficiência máxima de 70,5% é alcançada às 16h00min mesmo com o decaimento da intensidade da radiação solar, e isso ocorre devido ao acúmulo de energia térmica anteriormente armazenada no interior do dessalinizador. Salinas-Freire, Pé-

rez-Ones e Rodríguez-Muñoz (2019) realizaram análises comparativas de dessalinizadores solares passivos e apreciaram que a eficiência teórica máxima atinge valores entre 25% e 63%, enquanto os dados experimentais atingiram entre 1% e 45%, valores ainda inferiores, ressaltando uma melhor eficiência térmica do dessalinizador solar.

Na Figura 7 está apresentada a evolução da eficiência térmica horária em função da radiação solar no dessalinizador para o experimento 2. A eficiência térmica horária variou entre 0,4% e 62,7% durante o tempo de operação do experimento.

Figura 6 – Eficiência térmica horária em função da radiação solar no experimento 1

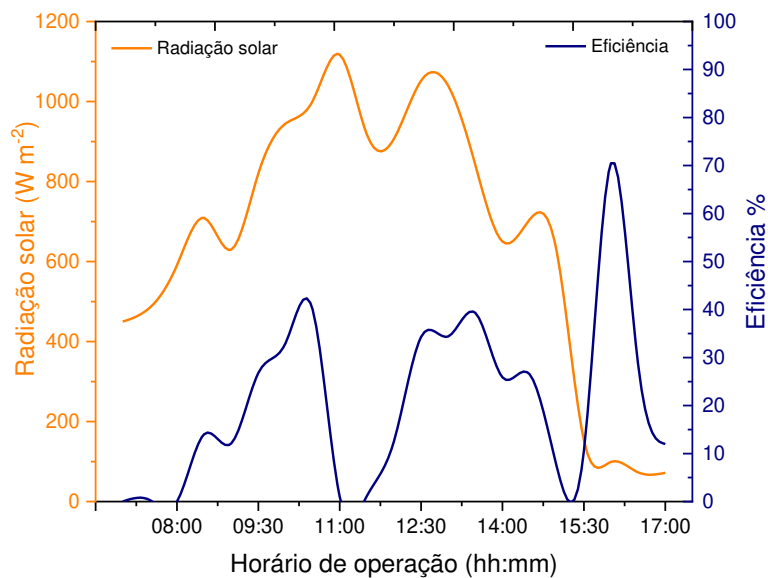
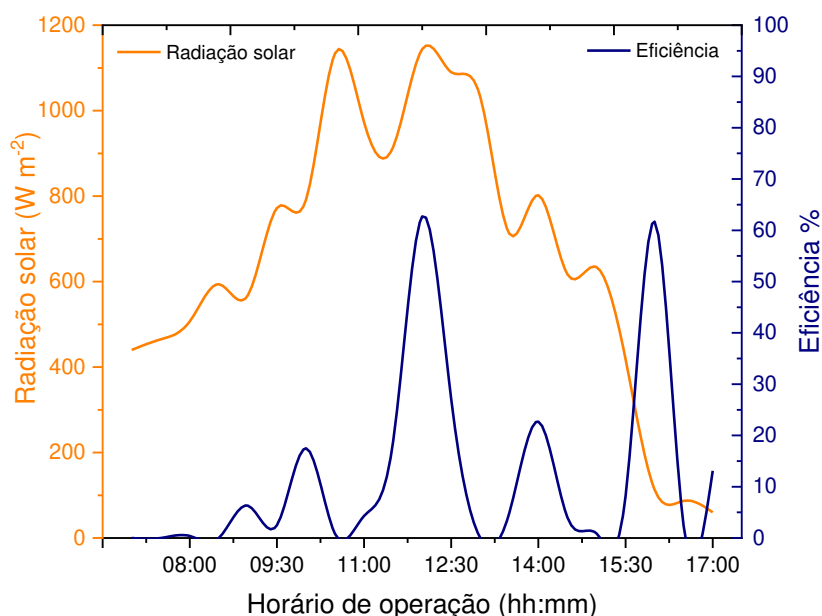


Figura 7 – Eficiência térmica horária em função da radiação solar no experimento 2



No estudo realizado por Mulftah, Sopian e Alghoul (2018) o dessalinizador escalonado antes e após a modificação com refletores, a eficiência térmica horária máxima relatada foi de 52,3% e 60,2%, respectivamente, bem próximo ao encontrado nesse estudo. A eficiência térmica diária do experimento 1 foi de 21,67%, enquanto do experimento 2 foi de 16,39%. Comparando as eficiências encontradas no dessalinizador com absorvedor e condensador de pinos desenvolvido por Rabhi et al. (2017), no qual obteve, respectivamente, 21,93% e 25,39%, é possível analisar que os valores obtidos neste estudo se encontram dentro de uma faixa aceitável de eficiência

tornando o sistema viável para obtenção de água dessalinizada.

3.4 Estudo da potabilidade da água

Após verificar a produtividade de água tratada no dessalinizador solar, o presente estudo se deteve também a verificar a potabilidade da água doce gerada pelo sistema proposto. A Tabela 1 apresenta um comparativo entre a água salobra bruta e a água dessalinizada com relação aos parâmetros de potabilidade. Além disso, também são apresentados os valores máximos permitidos pela legislação vigente no país.

Tabela 1 – Parâmetros físico-químicos da água salobra e da água dessalinizada

Parâmetro de controle	Água salobra	Água dessalinizada	V.M.P.*
pH	8,0	7,4	6,0 – 9,5
Condutividade elétrica (μScm^{-1})	8316,0	28,0	-
Cor aparente (uH)	6,7	3,5	15,0
Cloreto ($\text{mg Cl}^{-1} \text{L}^{-1}$)	2577,3	7,1	250,0
Dureza ($\text{mg CaCO}_3 \text{L}^{-1}$)	360,0	50,0	500,0
Alcalinidade ($\text{mg CaCO}_3 \text{L}^{-1}$)	28,0	2,0	-
Turbidez (NTU)	0,6	0,5	5,0
Sódio ($\text{mg Na}^{+} \text{L}^{-1}$)	810,0	1,0	200,0
Potássio ($\text{mg K}^{+} \text{L}^{-1}$)	4,0	0,0	-
STD (mgL^{-1})	4130,0	11,0	1000,0

*V.M.P. = Valor Máximo Permitido segundo a RDC nº 5, de 28 de setembro de 2017, Anexo XX

Os resultados obtidos das análises qualificaram o potencial hidrogeniônico da água como básico, devido à apresentação de um valor superior a 7. Na amostra para a água bruta foi encontrado o pH 8,0 e após o processo de dessalinização o pH diminuiu para 7,39. Brito et al. (2020) analisaram águas

de poços em comunidades rurais também no município de Juazeirinho – PB, e encontraram valores de pH na faixa de 7,5 a 7,8, considerado de neutro a moderadamente alcalino. Comparando esses dados com a Portaria de Consolidação nº 005/2017 do MS (BRASIL, 2017), que estabelece os índices

ideais de pH entre 6,0 e 9,5, observa-se que as amostras apresentam valores dentro do padrão de potabilidade.

A condutividade elétrica determina a capacidade da água em conduzir a corrente elétrica na presença de substâncias dissolvidas que se dissociam em ânions e cátions, assim sendo exatamente proporcional à concentração iônica (LIBÂNIO, 2010). O valor encontrado foi de 8316 $\mu\text{S cm}^{-1}$ para a água bruta, e que foi superior ao encontrado por Silva *et al.* (2016) de 5140 $\mu\text{S cm}^{-1}$ em poço artesiano do Assentamento Belo Monte, município de Pedra Lavrada-PB. Com a aplicação da dessalinização foi possível observar uma redução de 99,67% da condutividade elétrica na água. De acordo com dados da CETESB (2009) a baixa condutividade inferior a 200 $\mu\text{S cm}^{-1}$ pode indicar água potável por apresentar concentrações baixas de sais dissolvidos. No presente estudo apenas a água obtida no processo de dessalinização apresentou nível inferior de 200 $\mu\text{S cm}^{-1}$ de condutividade elétrica, sendo aceitável a qualidade da água para consumo humano para este parâmetro.

O valor obtido na análise de sólidos totais dissolvidos (STD) na água bruta foi de 4130,0 mg L^{-1} , na qual encontra-se fora dos padrões exigidos pela legislação brasileira, que delimita valor máximo de 1000 mg L^{-1} para água potável. A concentração em excesso de STD pode oferecer risco, tornando a água desagradável ao paladar e o seu consumo pode causar o acúmulo de sais na corrente sanguínea, possibilitando a formação de cálculos renais (SANTOS e MOHR, 2013). Quanto ao valor obtido de STD da água dessalinizada foi de 11 mg L^{-1} , tendo uma redução de 99,73% de STD que estavam presentes na amostra bruta, e, portanto, o parâmetro atendeu o valor referenciado pela legislação vigente.

Os parâmetros de cor, turbidez, dureza e alcalinidade das amostras de água salobra e de água dessalinizada apresentaram-se dentro dos padrões de potabilidade de acordo com a Portaria de Consolidação nº 005/2017 do MS (BRASIL, 2017) antes e após o processo de dessalinização.

Os cloretos estão presentes em quase todas as águas subterrâneas e são provenientes da dissolução de minerais, estando normalmente associado ao sódio (SILVA e MIGLIORINI, 2014). Logo, analisando a amostra de água bruta, observou-se níveis altíssimos de cloreto com 2577,3 mg L^{-1} , um valor 10 vezes maior que o permitido pela Portaria de Consolidação nº 005/2017 do MS (BRASIL, 2017) e valor superior ao encontrado por Silva *et al.* (2016) de 1370,3 mg L^{-1} em poço artesiano no município de Pedra Lavrada-PB. Entretanto, ao analisar a mesma água após o processo de dessalinização solar, obteve-se uma redução de 99,72% de cloreto, resultado compatível com o parâmetro de potabilidade estabelecido pelo Ministério da Saúde (BRASIL, 2017).

Além disso, um dos parâmetros mais significativo foi o sódio, que apresentou na amostra de água bruta alto teor, no valor de 810,0 mg L^{-1} e, após o processo de dessalinização obteve um valor de 1,0 mg L^{-1} , tendo uma redução de 99,88% de sódio na água. Comparando esses dados com a Portaria de Consolidação nº 005/2017 do MS (BRASIL, 2017), que estabelece o valor máximo de 200 mg L^{-1} de sódio, observa-

se que apenas a amostra de água dessalinizada apresenta valor dentro do padrão de potabilidade. No estudo de Cardoso *et al.* (2020), um dessalinizador tipo cascata foi desenvolvido, e analisaram águas de poços no município de Juazeirinho – PB com valores de sódio na água salobra de 520,0 mg L^{-1} , que pós-dessalinização, constataram valores baixos e próximos reportado neste estudo para fins de potabilidade.

Com relação ao parâmetro potássio, a Portaria de Consolidação nº 005/2017 do MS não estabelece limites em água de abastecimento humano. O potássio foi encontrado apenas na água bruta com concentração de 4,0 mg L^{-1} (Tabela 1). O potássio é um elemento importante para o corpo humano e, juntamente com o sódio, participam de trocas intracelulares (QUEIROZ e OLIVEIRA, 2018). Segundo dados da CETESB (2009), as concentrações de potássio em águas naturais não excedem 10 mg L^{-1} , indicando que as águas bruta e dessalinizada do estudo encontram-se dentro do padrão esperado para esse elemento.

Devido aos baixos níveis de salinidade da água dessalinizada obtida, faz-se necessária a adição de sais minerais para adequá-la ao consumo humano de acordo com a Resolução da Diretoria Colegiada – RDC N° 316, de 17 de outubro de 2019, do Ministério da Saúde e Agência Nacional de Vigilância Sanitária (BRASIL, 2019). Uma forma é misturar a água dessalinizada obtida com a água salobra utilizada. Por meio dessa mistura, a produção diária do dessalinizador solar é maior, atendendo a um maior número de pessoas. Ainda de acordo com a RDC n° 316, a água após o processo de dessalinização precisa conter o mínimo de 30 mg L^{-1} de sais e no máximo de 600 mg L^{-1} de sódio, e deve atender aos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria de Consolidação nº 005/2017 do MS (BRASIL, 2017). Desse modo, para atender aos padrões de potabilidade, deve-se acrescentar na água dessalinizada um percentual de 0,9% do volume de água bruta, desde que a mesma se encontre dentro dos padrões microbiológicos estabelecidos pela Portaria de Consolidação nº 005/2017 do MS (BRASIL, 2017).

5. CONCLUSÕES

O dessalinizador solar portátil tipo ondular com refletores de radiação integrados apresentou resultados eficientes na produção de água dessalinizada, atendendo alguns padrões de potabilidade de água vigente para consumo humano. Os níveis de incidência de radiação solar sobre o dessalinizador foram essenciais para o aumento dos perfis de temperatura e evaporação da água salobra, que promoveram o processo de dessalinização. Os resultados obtidos das análises físico-químicas das águas salobra e dessalinizada foram satisfatórios, apresentando valores de cloreto, sódio, STD entre outros após o processo de dessalinização, dentro dos valores máximos permitidos pela Portaria de Consolidação nº 005/2017 do MS, o que confirma a eficiência do dessalinizador solar para a obtenção de água dessalinizada. Portanto, foi possível concluir que o processo de dessalinização solar se configura uma boa alternativa para a produção de água dessalinizada para comunidades isoladas, em que a demanda de água não é elevada, e onde existe alta incidência de radiação solar.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão das bolsas.

REFERÊNCIAS

AL-GARNI, A. Z. Productivity enhancement of solar still using water heater and cooling fan. *Journal of solar energy engineering*, v. 134, n. 3, 2012. <https://doi.org/10.1115/1.4005760>

ARUNKUMAR, T.; RAJ, K.; RUFUSS, D. D. W.; DENKENBERGER, D.; TINGTING, G.; XUAN, L.; VELRAJ, R. A review of efficient high productivity solar stills. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 101, p. 197-220, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.013>

BAIRD, R. B.; EATON, A. D.; RICE, E. W. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 1496 p. 23th edition. Washington, USA: American Public Health Association, 2017.

BOUZAI, M.; ANSARI, O.; TAHA-JANAN, M.; MOUHSIN, N.; OUBREK, M. Numerical Analysis of Thermal Performances for a Novel Cascade Solar Desalination Still Design. *Energy Procedia*, v. 157, p. 1071-1082, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.274>

BRASIL. *Portaria de consolidação de nº 5 de 28 de setembro de 2017 do Ministério da Saúde*. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

BRASIL. *Resolução da Diretoria Colegiada - RDC Nº 316, de 17 de outubro de 2019 do Ministério da Saúde e Agência Nacional de Vigilância Sanitária*. Dispõe sobre os requisitos sanitários da água do mar dessalinizada, potável e envasada.

BRITO, Y. J. V.; CARDOSO, M. K. B.; SILVA, K. S. S.; SILVA, C. B.; MEDEIROS, K. M.; LIMA, C. A. P. Estudo experimental de um dessalinizador solar do tipo bandeja com dupla inclinação para potabilização de água no semiárido paraibano. *Águas Subterrâneas*, v. 34, n. 2, p. 156-165, 2020. <https://doi.org/10.14295/ras.v34i2.29773>

CAMPOS, B. L. O.; FRAGA, M. M. C.; COSTA, A. O. S.; JUNIOR, E. F. C. Análise do processo de dessalinização solar com ênfase no método de umidificação e desumidificação. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 24, n. 5, p. 861-873, 2019. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522019177407>

CARDOSO, M. K. B.; BRITO, Y. J. M.; SILVA, K. S. S.; SILVA, C. B.; MEDEIROS, K. M.; LIMA, C. A. P. et al. Dessalinizador solar do tipo cascata aplicado em poços artesianos no interior da Paraíba. *Águas Subterrâneas*, v. 34, n. 2, p. 135-142, 2020. <https://doi.org/10.14295/ras.v34i2.29799>

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo*. São Paulo: CETESB. 44 p. 2009.

EL-AGOUZ, S. A. Experimental investigation of stepped solar still with continuous water circulation, *Energy Convers. Manag*

v. 86, p. 186–193, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.05.021>

ESTAHBANATI, M. R. K.; AHSAN, A.; FEILIZADEH, M.; JAFARPUR, K.; ASHRAFMANSOURI, S-S.; FEILIZADEH, M. Theoretical and experimental investigation on internal reflectors in a single-slope solar still. *Applied energy*, v. 165, p. 537-547, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.047>

FONSECA, F.; RODRÍGUEZ, J. C. R.; ACOSTA, F. F.; PERDOMO, E. M.; LOMBÁ, O. F. Software “SoftDest” y su Validación. *RTQ*, Santiago de Cuba, v. 40, n. 1, p. 68-80, abr., 2020.

INMET. *Instituto Nacional de Meteorologia. Ministério da agricultura, pecuária e abastecimento*. Brasília, DF: INMET, 2019. Disponível em: http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=sobre_tempo. Acesso em: 03 fev. 2020.

LIBÂNIO, M. *Fundamentos de qualidade e tratamento de água*. 3. ed. Campinas, SP: Átomo, 2010.

MARINHO, F. J. L.; TAVARES, A. C.; SANTOS, S. A. D.; MARCOVICZ, F.; CRUZ, M. P.; SOUTO, E. A.; ROCHA, E. N. D. Destilador solar destinado a fornecer água potável para as famílias de agricultores de base familiar. *Revista Brasileira de Agroecologia*, v. 7, n. 3, p. 53-60, 2012.

MATRAWY, K. K.; ALOSAIMY, A. S.; MAHROUS, A.-F. Modeling and experimental study of a corrugated wick type solar still: comparative study with a simple basin type. *Energy conversion and management*, v. 105, p. 1261-1268, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.09.006>

MOLLAHOSSEINI, A.; ABDELRASOUL, A.; SHEIBANY, S.; AMINI, M.; SALESTAN, S. K. Renewable energy-driven desalination opportunities—A case study. *Journal of environmental management*, 239, p.187-197, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.044>

MULFATAH, A. F.; SOPIAN, K.; ALGHOUL, M. A. Performance of basin type stepped solar still enhanced with superior design concepts. *Desalination*, v. 435, p. 198-209, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.07.017>

OLIVEIRA, A. M.; DIAS, N. S.; FREITAS, J. J. R.; MARTINS, D. F. F.; RABELO, L. N. Avaliação físico-química das águas do processo de dessalinização de poços salobros e salinos em comunidades rurais do oeste potiguar. *Águas subterrâneas*, v. 31, n. 2, p. 58-73, 2017. <https://doi.org/10.14295/ras.v31i2.28663>

OMARA, O.; KABEEL, A. E.; ABDULLAH, A. S.; ESSA, F. A. Experimental investigation of corrugated absorber solar still with wick and reflectors. *Desalination*, v. 381, p. 111-116, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.12.001>

OMARA, Z. M.; KABEEL, A. E.; ABDULLAH, A. S. A review of solar still performance with reflectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 68, p. 638-649, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.031>

QUEIROZ, T. M.; OLIVEIRA, L. C. P. Qualidade da água em comunidades quilombolas do Vão Grande, município de Barra do

- Bugres (MT). *Eng. sanit. ambient*, p. 173-180, 2018. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522018166375>
- RABHI, K.; NCIRI, R.; NASRI, F.; ALI, C.; BACHA, H. B. Experimental performance analysis of a modified single-basin single-slope solar still with pin fins absorber and condenser. *Desalination* v. 416, p. 86-93, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.04.023>
- RAJAMANICKAM, M. R.; RAGUPATHY, A. Influence of water depth on internal heat and mass transfer in a double slope solar still. *Energy Procedia*, v. 14, p. 1701-1708, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.12.1155>
- RASHIDI, S.; RAHBAR, N.; VALIPOUR, M. S.; ESFAHANI, J. B. Enhancement of solar still by reticular porous media: experimental investigation with exergy and economic analysis. *Applied Thermal Engineering*, v. 130, p. 1341-1348, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.089>
- SALINAS-FREIRE, H. A.; PÉREZ-ONES, O.; RODRÍGUEZ-MUÑOZ, S. Límites termodinámicos a la productividad de los destiladores solares pasivos. *Revista ION*, v. 32, n. 1, p. 7-20, 2019. <https://doi.org/10.18273/revion.v32n1-2019001>
- SANTOS, R. S.; MOHR, T. Saúde e qualidade da água: análises microbiológicas e físico-químicas em águas subterrâneas. *Revista Contexto & Saúde*, 13.24-25: 46-53, 2013.
- SILVA, J. J. F.; MIGLIORINI, R. B. Caracterização das águas subterrâneas do aquífero furnas na região sul do estado de Mato Grosso. *Geosciences= Geociências*, v. 33, n. 2, p. 261-277, 2014.
- SILVA, J. A. L.; MEDEIROS, M. C. S.; LIMA, V. L. A.; MARINHO, F. J. L.; AZEVEDODO, P. V.; UCHÔA, T. R.; OTONI, L. C. P. Obtenção de água potável a partir do uso da energia solar disponível na região do semiárido paraibano. *Revista ESPACIOS*. Vol. 37 (Nº 32), 2016.
- SILVA, G. D. P.; SHARQAWY, M. H. Techno-economic analysis of low impact solar brackish water desalination system in the Brazilian Semiarid region. *Journal of Cleaner Production*, v. 248, p. 119255, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119255>