

Artigos

Estudo experimental de um dessalinizador solar do tipo bandeja com dupla inclinação para potabilização de água no semiárido paraibano

Experimental study of a double slope solar still for water potabilization in the semiarid of Paraíba, Brazil

Yohanna Jamilla Vilar de Brito¹; Maria Karolina Borba Cardoso¹; Karyna Steffane da Silva¹; Camylla Barbosa Silva¹; 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.

✉ yohannajvb@gmail.com, mariakarolinac@hotmail.com, karynasteffane@hotmail.com, camyllabsilva@hotmail.com, keilamedeiros@ufrb.edu.br, caplima@uepb.edu.br

Palavras-chave:

Escassez hídrica.
Dessalinização.
Energia solar.
Água salobra.

Keywords:

Water scarcity.
Desalination.
Solar energy.
Brackish water.

Revisado por pares.

Recebido em: 06/01/2020.

Aprovado em: 17/05/2020.

Resumo

A escassez hídrica tem atingido significativamente a região nordeste do Brasil. Embora esta região não possua grande disponibilidade de água potável para o consumo humano, há águas salobras, que ao passar por processo de dessalinização tornam-se adequadas para o consumo humano. Um dessalinizador solar tipo bandeja com dupla inclinação foi utilizado com o intuito de obter uma água tratada conforme os padrões de potabilidade para o consumo humano. O objetivo deste trabalho foi analisar o desempenho térmico e a qualidade da água antes e após o processo de dessalinização. As águas brutas foram oriundas de três poços de comunidades rurais, Sítio Escurinha do Meio (Poço P1), Sítio Poço da Pedra (Poço P2) e Sítio Escurinha de Baixo (Poço P3) no município de Juazeirinho - PB. Foi observado uma produção média de água potável de 1583,3 mL.m⁻².dia⁻¹ para um índice de radiação solar média de 1.005,4 W.m⁻². Os parâmetros físico-químicos da água bruta e dessalinizada foram monitorados, ocorrendo reduções significativas, principalmente no teor de sódio de 98,33%, 99,92% e 97,83% e na condutividade elétrica de 97,79%, 99,13% e 97,69%, para os poços P1, P2 e P3 respectivamente.

Abstract

Water scarcity has significantly affected the northeastern region of Brazil. Although this region does not have a great availability of drinking water for human consumption, there are brackish waters that, when undergoes desalination process, become suitable for human consumption. A double tilt tray solar desalination was used to obtain standard drinking water. The objective of this work was to analyze the thermal performance and water quality before and after the desalination process. The raw water came from three wells of rural communities, Escurinha do Meio Farm (Well P1), Poço da Pedra Farm (Well P2) and Escurinha de Baixo Farm (Well P3) in the city of Juazeirinho - PB. An average drinking water production of 158.3 mL.m⁻².day⁻¹ was observed for an average solar radiation index of 1,005.4 W.m⁻². The physicochemical parameters of raw and desalinated water were monitored, with significant reductions, mainly in the sodium content - 98.33%, 99.92% and 97.83% - and electrical conductivity - 97.79%, 99.13% and 97.69% - for P1, P2 and P3 wells, respectively.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v34i2.29773>

1. INTRODUÇÃO

A água é fundamental à saúde das populações e constitui um fator determinante do saneamento básico. A distribuição pública de água potável, juntamente com o uso e disseminação de práticas higiênicas adequadas, é considerada uma condição prévia para a redução das taxas de morbidade e mortalidade dos grupos humanos. Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS), em 2015, cerca de 663 milhões de pessoas não tinham acesso à água potável, de uma forma sustentável e

240 milhões não dispunham de sistemas sanitários integrados (WHO, 2015).

O aumento do estresse hídrico continua a afetar cada vez mais partes do mundo. De acordo com o Relatório Mundial de Desenvolvimento da Água da Organização das Nações Unidas (ONU), 3,7 bilhões de pessoas estão atualmente afetadas pela escassez de água. De acordo com projeções realizadas, ficou constatado que, em 2050, esse número poderá aumentar para 5,7 bilhões. Atualmente, 3,5 milhões de pessoas morrem

anualmente como resultado do fornecimento inadequado de água e saneamento, reforçando o papel da água como um recurso global crítico (WWAP, 2018).

Devido à escassez de águas, o uso de águas subterrâneas tem aumentado significativamente em todo mundo. Estimativas apontam que 300 milhões de poços foram perfurados no mundo nas três últimas décadas. Praticamente todos os países do mundo, desenvolvidos ou não, utilizam água subterrânea para suprir suas necessidades. A Europa, por exemplo, tem 75% de sua população atendida com água do subsolo, percentual passível de atingir 90% em países como Suécia, Holanda e Bélgica (MEDEIROS *et al.*, 2011; OSTER *et al.*, 2012). No Brasil, 5.570 municípios tem o abastecimento de água potável fornecido por recursos hídricos subterrâneos (HIDRATA *et al.*, 2020).

Nas últimas décadas, o crescimento da população e o êxodo rural concentrado em alguns municípios, principalmente as capitais, tiveram como consequência o aumento pela demanda de água potável para consumo humano, fazendo com que haja a procura por métodos alternativos para obter essa água potável, já que, de acordo com Bicudo *et al.* (2010), o Brasil possui aproximadamente 12% de água doce do planeta. Apenas 3% do total de água existente no país estão na região Nordeste, sendo que 63% estão localizados na bacia hidrográfica do rio São Francisco e 15% na bacia do rio Parnaíba, que juntos detêm 78% da água da região. Logo, essa água não está disponível para toda região do Nordeste.

As águas subterrâneas oriundas de poços são as principais fontes de água potável nas regiões com déficit de água superficial ou em localidades sem sistema centralizado de abastecimento de água. Em muitos locais ela é um complemento às águas superficiais, sendo muitas vezes consumida indiscriminadamente pela população, não levando em conta sua qualidade, o que acaba causando prejuízos para o bem-estar dos consumidores. Geralmente, os problemas com a qualidade da água extraída dos poços são maiores em regiões rurais devido à infiltração de agrotóxicos, fertilizantes, esgotos domésticos e excrementos de animais. Nestas regiões, os efeitos são mais significativos em seus consumidores, devido à ausência de outras opções de abastecimento (MIRLEAN *et al.* 2005).

A escassez hídrica tem atingido regularmente a região nordeste do Brasil, onde há os maiores índices de radiação solar. Tendo em vista essa grande incidência de radiação, foram desenvolvidos estudos relacionando a escassez de água e a radiação solar de forma positiva. Um desses exemplos é o uso da radiação, que é fonte de energia permanente mais abundante na terra para dessalinização de águas subterrâneas salobras e salinas, onde essa dessalinização de água é considerada como uma tecnologia limpa e de baixo impacto ao meio ambiente. Isso se deve ao fato de causar o mínimo de prejuízo ao meio ambiente e usufruir da fonte energética mais abundante e gratuita, a Energia Solar (THANGAVEL & SRIDEVI, 2014). Esse processo térmico de dessalinização é muito antigo e imita o ciclo natural da água no planeta. Caracteriza-se por um tanque com uma lâmina rasa de água e coberto com vidro ou outro material transparente. A luz solar que atravessa o vidro provoca aquecimento da água, gerando vapores que, ao se condensarem na parte interna do vidro, retornam ao estado líquido, escorrendo para um sistema de coleta e armazenamento (LUNA, 2016).

No semiárido do Nordeste brasileiro é notória a relação do excesso de radiação com a carência de água, afetando o comportamento da biota e das comunidades que vivem nessa região. Os problemas existentes comumente estão relacionados com o funcionamento das políticas públicas direcionadas à gestão dos recursos hídricos (ANA, 2012).

Zarasvand *et al.* (2013) alegaram que uma dessalinização via energia solar é um processo ecologicamente correto, pois utiliza energia natural da luz do sol para purificar a água salobra e produzir água limpa. Este processo de dessalinização é capaz de substituir os combustíveis fósseis ou a energia hidrelétrica. Um sistema de dessalinização solar não requer mão de obra qualificada, pode ser fabricado localmente e ser facilmente reparado usando materiais de fácil obtenção. Deste modo, um sistema solar exige poucos investimentos, minimiza o desperdício e é altamente eficiente na dessalinização de água salobra ou salina (VELMURUGAN & SRITHAR, 2011).

Alguns modelos de dessalinizadores a base de radiação solar já foram desenvolvidos ao redor do mundo, dentre os quais o dessalinizador solar vertical (KIATSIRIROAT *et al.*, 1987), dessalinizador solar do tipo bandeja de duplo efeito (SUNEJA *et al.*, 1997), dessalinizador solar tubular (MURASE *et al.*, 2006), dessalinizador solar tipo pirâmide (TAAMNEH & TAAMNEH, 2012), dessalinizador solar tipo cascata (ZIABARI *et al.* 2013), dessalinizador solar tipo bandeja com duplo efeito e dupla inclinação (ELANGO & MURUGAVEL, 2015), onde cada tipo tem suas vantagens e desvantagens com relação ao outro. Esta é uma solução indispensável, pois esse tipo de equipamento pode ser construído com materiais de baixo custo e com certa orientação técnica pela própria comunidade. Além do mais, a maioria das áreas remotas e rurais, especialmente aquelas em regiões áridas, têm fontes abundantes de radiação solar que podem ser usadas para a dessalinização e fornecer água fresca (EL-SEBAILI & EL-BIALY, 2015).

Nas comunidades rurais do Nordeste brasileiro, a utilização de águas subterrâneas de poços tubulares é uma alternativa ao abastecimento d'água. No entanto, há uma grande limitação na utilização desses poços para enfrentamento da escassez hídrica, que é o elevado teor de sais dissolvidos (SILVA *et al.*, 2007; FERNANDES *et al.*, 2010; SANTOS *et al.*, 2011). Desse modo, tem se notado um crescimento nas pesquisas que envolvam métodos para o fornecimento de água potável a partir de águas salinas e salobras. Como exemplo pode-se citar a dessalinização de águas por meio de dessalinizadores que utilizam radiação solar. Um dos locais consideráveis para instalação de sistemas de dessalinização solar é o nordeste brasileiro, região que é a mais castigada pela seca. E devido ao seu grande potencial de incidência de radiação solar que é mais favorável que outras regiões do país (BEZERRA, 2018).

De maneira a combater este problema, sucessivas tecnologias têm sido implantadas na região, a exemplo do uso de cisternas, que aproveitam as águas de chuva. Alternativas estas que apresentam aspectos positivos e negativos, o que reforça ainda mais a necessidade de utilização de tecnologias mais adequadas para a situação. A dessalinização de águas salobras e salinas emprega energia solar que é considerada uma tecnologia alternativa eficaz e limpa.

Nesse contexto, como a região nordeste apresenta baixa pluviosidade, falta de água potável, e a pouca água existente

apresenta alta salinidade, associado ao alto índice de radiação solar, objetivou-se analisar o desempenho térmico de um dessalinizador solar com dupla inclinação e a qualidade da água antes e após o processo de dessalinização, com o intuito de obter uma água tratada conforme os padrões de potabilidade para o consumo humano.

2. MATERIAL E MÉTODOS

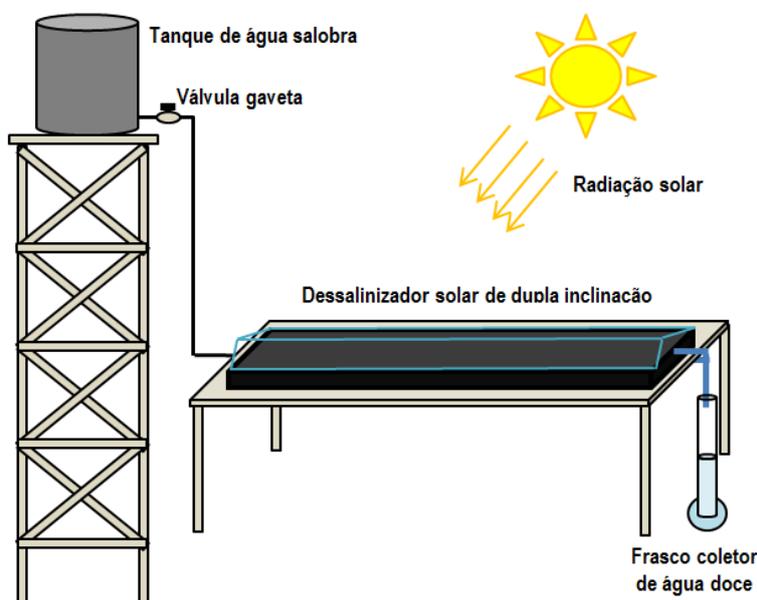
Os experimentos foram realizados na cidade de Campina Grande - Paraíba, a uma latitude $7^{\circ}13'11''$ sul e longitude $35^{\circ}52'31''$ oeste, com altitude média de 550 m, no Laboratório de Pesquisa em Ciências Ambientais (LAPECA), do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA) do Centro de Ciências e Tecnologia (CCT) da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB).

O dessalinizador foi alimentado com água salobra coletada em três poços, de comunidades distintas, Sítio Escurinha do Meio (Poço P1), Sítio Poço da Pedra (Poço P2) e Sítio de Bai-

xo (Poço P3), todos na cidade de Juazeirinho-PB (latitude $7^{\circ}4'1''$ Sul e longitude $36^{\circ}24'42''$ Oeste). Esses poços foram selecionados por serem considerados fontes de abastecimento hídrico para a comunidade local.

O dessalinizador é composto por uma bandeja de alumínio, com 1,50 m de comprimento, 0,20 m de largura e 0,10 m de altura, apresentando uma área útil para dessalinização de 0,3 m², pintada com preto fosco para melhor absorção da radiação solar, é coberto com dois vidros de 3 mm de espessura, formando assim a dupla inclinação, nas laterais internas há calhas para o recolhimento da água condensada nos vidros, conforme apresentado na Figura 1. A água dessalinizada é recolhida pela calha e contabilizada em uma proveta. As laterais externas e a base do dessalinizador são isoladas utilizando o poliestireno expandido (EPS, também conhecido como EPS Isopor®) com 25 mm de espessura, para evitar perdas de calor para o ambiente.

Figura 1 – Dessalinizador solar do tipo bandeja com dupla inclinação



Foram feitas medições de temperatura na água, no vidro, na bandeja do dessalinizador e também foi medida a temperatura ambiente, utilizando termopares do tipo PT-100 de ligas metálicas. A medição da radiação global foi realizada de modo contínuo durante todo o funcionamento do dessalinizador, por meio do radiômetro SL 200 17957, da marca KIMO.

A operação do dessalinizador foi realizada em batelada, com uma lâmina de água salobra de 1,0 cm, o que equivale a um volume de 3 litros. As águas brutas utilizadas apresentavam alto teor de sais, cujas características físico-químicas foram determinadas antes de ser alimentada no dessalinizador. Os experimentos foram realizados nos dias 10, 24 e 25 de setembro de 2019, das 7:30 às 16:30 horas, em que foi medido o volume da água destilada obtida e levada para determinação das propriedades físico-químicas.

A caracterização da água a ser dessalinizada foi feita por meio das análises de pH, condutividade elétrica, temperatura, turbidez, cor, cloretos, dureza, sódio e potássio. As

metodologias utilizadas para obter todos os parâmetros físico-químicos provenientes da alimentação e do destilado são preconizadas no *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (BAIRD *et al.*, 2017). Os resultados foram comparados com os padrões de potabilidade exigidos pela Portaria de Consolidação nº 005/2017/MS (BRASIL, 2017), principalmente sódio e cloretos, pois estão relacionados diretamente com o grau de salinidade da água. Vale salientar que este tipo de dessalinizador solar não produz lodo ou efluentes poluentes, mas sim uma película de sal no fundo da bandeja. A quantidade de sal é proporcional ao teor salino da água de alimentação, que geralmente se encontra entre 0,5 e 30 gramas de sal por litro (JESUS *et al.* 2015).

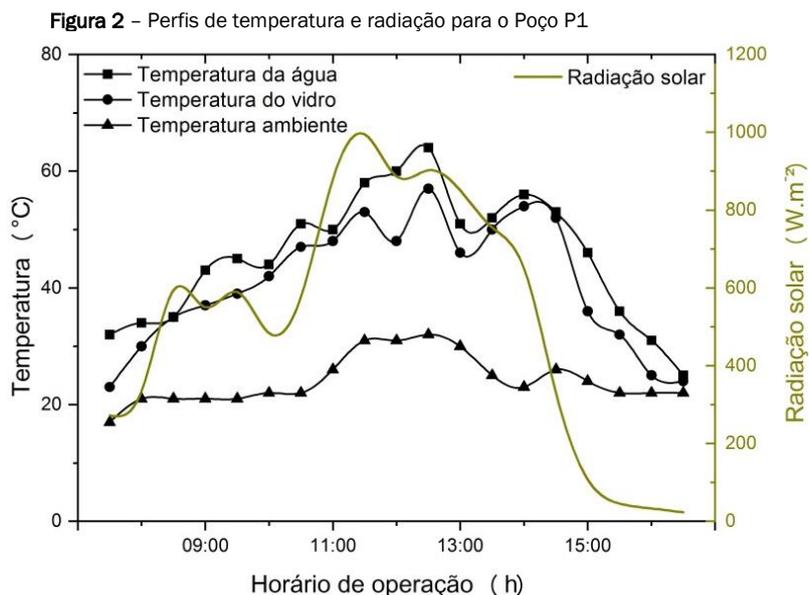
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Desempenho térmico do dessalinizador

A fim de acompanhar o desempenho do dessalinizador, medidas de temperatura foram efetuadas em vários pontos e a produção da água foi acompanhada por meio de medi-

ções instantâneas. No Poço P1 foram verificadas as variações de temperatura interna da cobertura de vidro, da temperatura da água e a temperatura ambiente em função da

radiação incidente no dessalinizador, conforme apresentadas na Figura 2.



Ao longo do experimento, a temperatura da água salobra passou por variações. Iniciou-se às 07:30 horas com a temperatura de 32°C e atingiu a maior temperatura às 12:30 horas, alcançando 64°C, uma hora após o momento de maior incidência de radiação solar, 994,6 W.m⁻². As temperaturas da água e do vidro apresentaram valores próximos, ocasionando perfis similares, devido à decorrência da radiação solar direta. Rabhi *et al.* (2017) fizeram um estudo experimental de um dessalinizador solar com dupla inclinação, e obtiveram temperatura da água de 70°C às 13:00h, valores estes, semelhantes ao encontrado nesse estudo.

ção de temperatura da água, sendo evidenciado às 12:30 horas em que a temperatura da água chegou a 64°C, e a produção instantânea, foi a maior no mesmo horário, alcançando 193,3 mL.m⁻² de água dessalinizada. Observou-se, também, que a produção diária de destilado nesse dia foi de 1.583,3 mL.m⁻², atingindo esse valor pelo fato de ter sido um dia com boa incidência de radiação solar. Gnanaraj & Velmurugan (2019) fizeram um estudo do dessalinizador solar de bandeja com dupla inclinação e obtiveram uma produtividade de 1.880 mL.m⁻².dia⁻¹, valor este bem próximo ao encontrado nesse estudo.

A Figura 3 ilustra os perfis de temperatura ambiente, da água e do vidro em relação a produção de água instantânea e a produção de água acumulada no dia 10 de setembro de 2019.

Para o dia 24 de setembro de 2019, as variações de temperatura ambiente, da água e do vidro em função da radiação, para o Poço P2, são apresentadas na Figura 4.

Ao longo do dia, o volume de destilado acompanhou a varia-

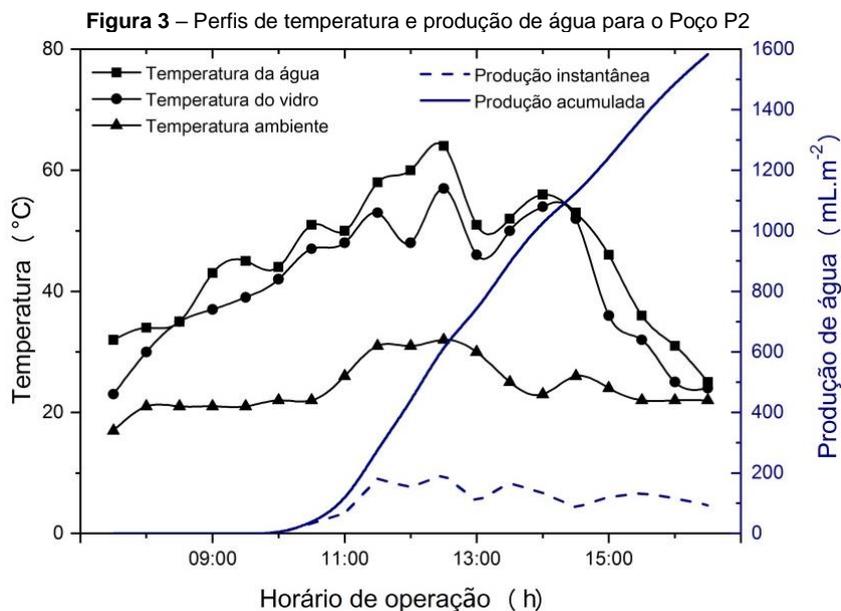
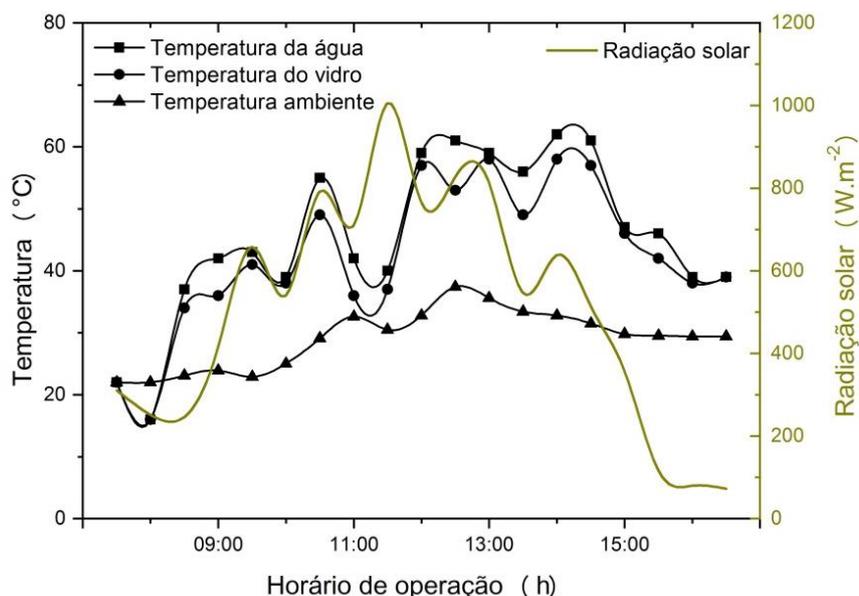


Figura 4 – Perfis de Temperatura e incidência de radiação solar para o Poço P2



Na Figura 4, no decorrer do dia, a temperatura da água e do vidro acompanharam a incidência de radiação solar. A temperatura da água apresentou um valor de 22 °C às 07:30 horas e atingiu o valor máximo de 62 °C às 14:00 horas. Abderachid & Abdenacer (2013), em estudo similar, detectaram que o dessalinizador solar atingiu 58 °C na temperatura da água. A temperatura do vidro e da água apresentaram perfis parecidos por ter sido um dia com maior incidência de radiação direta. Tanto o vidro quanto a água apresentaram valores iguais de temperatura, no início e no final dos experimentos. A radiação solar foi mais intensa, durante este dia de experimento, às 11:00 horas, atingindo 1.005,4 W.m⁻².

A Figura 5 apresenta a comparação entre a temperatura da água, temperatura do vidro, temperatura do ambiente com o volume de destilado (produção) e o volume de destilado ac-

mulado (produção acumulada de água) para o dia 24 de setembro de 2019.

Na Figura 5, a maior produção pontual ocorreu às 10:30 horas, no valor de 166,67 mL.m⁻², horário próximo ao de maior incidência de radiação solar. A produção de água acumulada neste dia atingiu 1.046,0 mL.m⁻². Rajaseenivasan et al. (2013) fizeram um estudo em um dessalinizador com dupla inclinação com várias lâminas de água, com a lâmina de 6 cm alcançaram uma produtividade de 1.395 mL.m⁻².dia⁻¹.

No dia 25 de setembro de 2019, os ensaios foram realizados nas águas provenientes do Poço P3. As variações de temperatura da água, do vidro e a ambiente em função da radiação é ilustrado na Figura 6.

Figura 5 – Perfis de Temperatura e Produção para o Poço P2

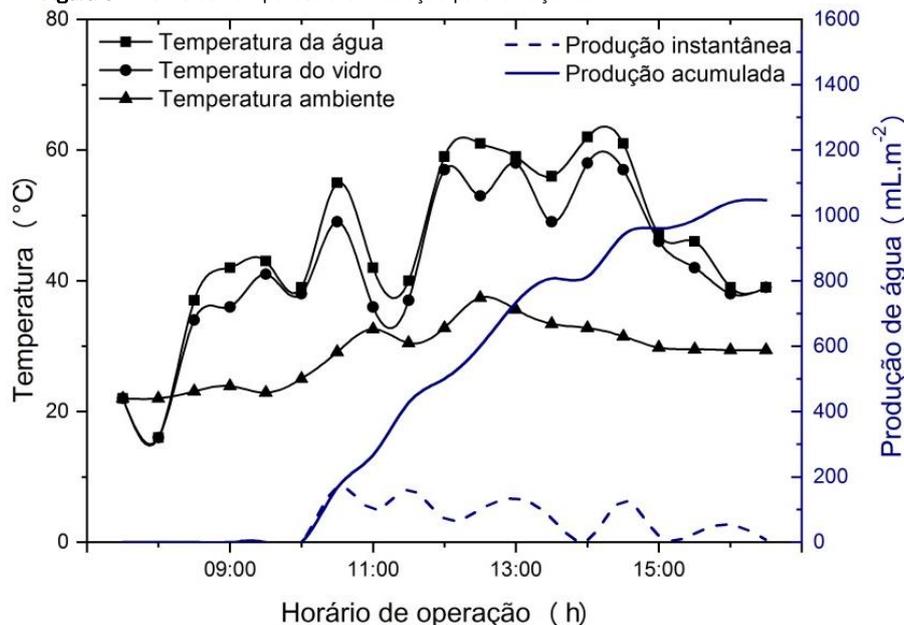
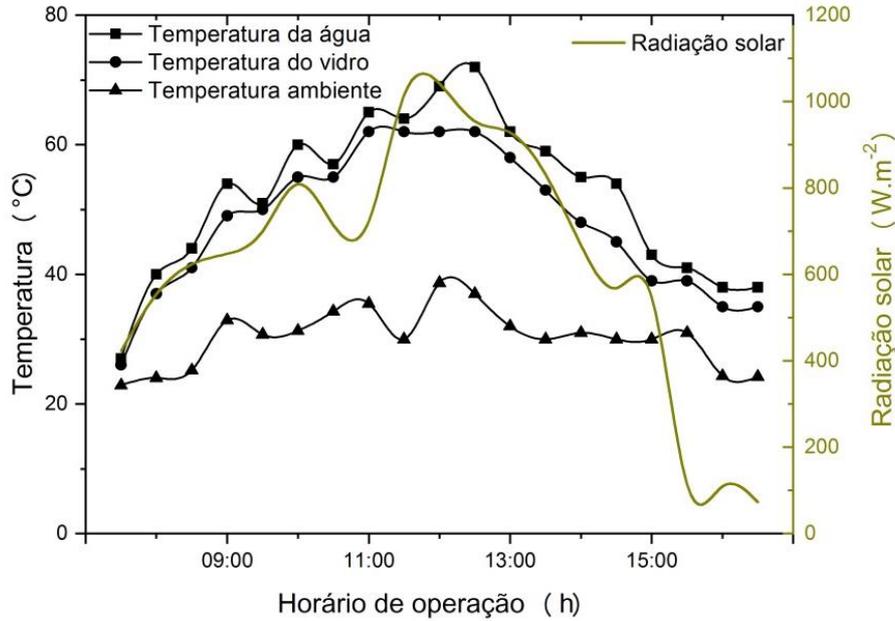


Figura 6 - Perfis de Temperatura e incidência de radiação solar para o Poço P3

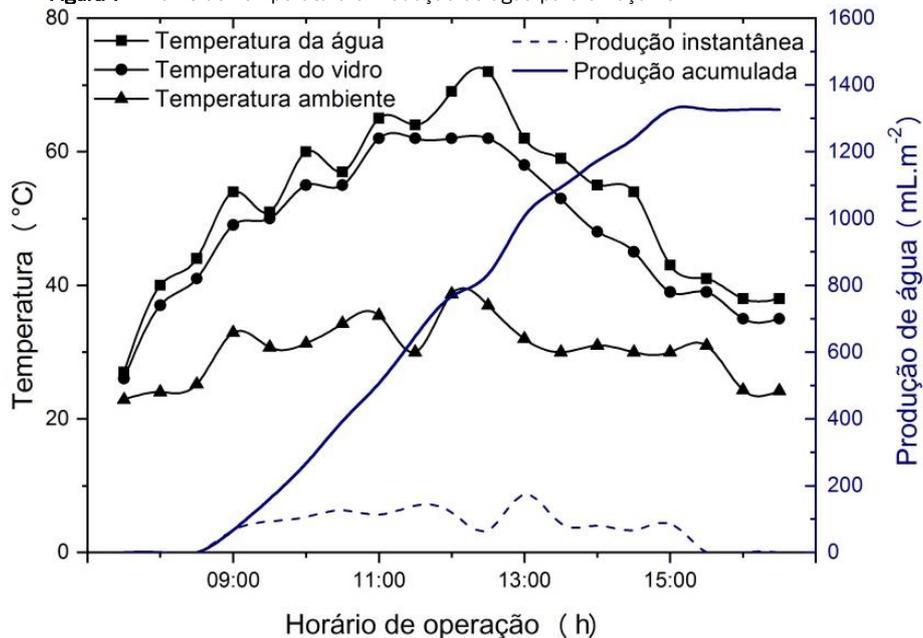


Neste dia, como observado na Figura 6, a temperatura ambiente alterou bastante durante o experimento. A temperatura da água variou de 27 °C as 07:30 horas para 72 °C as 12:30 horas, meia hora após a maior incidência de radiação solar no dessalinizador naquele dia, atingindo 1.041,6 W.m⁻¹. A temperatura do vidro teve valor máximo de 62 °C das 11:00 às 12:30 horas. Observando os dados dos dias anteriores, esse não foi um dos dias com maior incidência da radiação solar.

Al-Sultani *et al.* (2017) estudaram um dessalinizador solar com dupla inclinação e a medição da temperatura da água atingiu 70 °C às 14:00 h, semelhante a encontrada nesse estudo.

A Figura 7 apresenta as variações da temperatura da água, temperatura do vidro, temperatura do ambiente pela produção de água e a produção acumulada de água.

Figura 7 - Perfis de Temperatura e Produção de água para o Poço P3



Na Figura 7, ficou evidenciado que as temperaturas da água e do vidro permaneceram próximas no decorrer do dia. A maior produção instantânea ocorreu às 13:00 horas atingindo 173,3 mL.m⁻² e a produção acumulada neste dia chegou à 1.326,67 mL.m⁻². Rajaseenivasan *et al.* (2013) estudaram um dessalinizador semelhante com uma lâmina de água de 8 cm, apresentando uma produtividade de

1.330 mL. m⁻².dia⁻¹, valor equiparado ao estudo.

A partir das análises, independente do local realizado, foi constatada que a produção de água dessalinizada, de maneira geral, foi diretamente proporcional, e dependente de fatores como a temperatura da água, temperatura do ambiente e a radiação solar.

3.2 Características físico-químicas das águas

Os resultados dos parâmetros físico-químicos descritos na análise da água dessalinizada obtida são apresentados na Tabela 1. As amostras utilizadas nos dessalinizadores foram coletadas nos Poços P1, P2 e P3. De acordo com os

parâmetros físico-químicos, constatou-se que o tratamento de água salobra pelo processo de dessalinização solar foi eficaz, visto que, a condutividade elétrica, alcalinidade, cloretos, dureza total, turbidez, pH (potencial de hidrogênio iônico) e sódio não ultrapassaram os padrões de potabilidade após a dessalinização.

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

Parâmetros	Poço P1		Poço P2		Poço P3		V.M.P.**
	A.B.*	A.D.*	A.B.	A.D.	A.B.	A.D.	
pH	7,5	6,5	7,7	6,85	7,8	7,2	6,0 - 9,5
Condutividade elétrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	3.190,0	70,3	11.160,0	96,6	11.030,0	253,8	-
Cloreto ($\text{mg Cl}\cdot\text{L}^{-1}$)	1.349,0	21,3	5.538,0	21,3	4.260,0	99,4	250,0
Dureza ($\text{mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$)	310,0	25,0	375,0	50,0	570,0	30,0	500,0
Alcalinidade ($\text{mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$)	658,0	57,0	531,0	70,0	480,0	60,0	100,0
Turbidez (uT)	2,0	3,0	2,0	3,0	2,0	4,0	5,0
Sódio ($\text{mg Na}^+\cdot\text{L}^{-1}$)	420,0	7,0	1200,0	1,0	1200,0	26,0	200,0
Cor (uC)	15,7	8,8	6,7	5,8	8,1	7,6	15,0

*A.B. = Água Bruta; A.D. = Água Dessalinizada;

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

Ao término dos ensaios realizados, foi possível observar a eficiência da dessalinização da água salobra coletada a partir do dessalinizador solar do tipo bacia com dupla inclinação, pois os parâmetros levados em consideração obtiveram resultados que se enquadram nas legislações vigentes para potabilidade de água. Segundo Von Sperling (2005), o potencial hidrogeniônico (pH) evidencia a concentração de íons de hidrogênio, relacionando-o com a alcalinidade, neutralidade ou acidez da água. Os valores encontrados para a água bruta de 7,48 (Poço P1), 7,66 (Poço P2) e 7,83 (Poço P3) estão de acordo com os valores estabelecidos pela Portaria de Consolidação nº 005/2017 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017), que estabelece os índices ideais de pH entre 6 e 9,5. Oliveira *et al.* (2017) analisaram águas de poços em comunidades rurais no oeste Potiguar, e encontraram valores de pH na faixa de 7,0 a 7,5, considerado de neutro a moderadamente alcalino. Os valores de pH após o processo de dessalinização também se enquadram nos valores estabelecidos pela norma vigente.

A condutividade elétrica está relacionada com a capacidade da água em conduzir corrente elétrica, em consequência da quantidade de sais dissolvidos na água. Os valores encontrados foram de 3.190,0; 11.160,0 e 11.030,0 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ para a água bruta, e que foram superiores ao encontrado por Filho *et al.* (2019) de 1.321,3 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ em poços na cidade de Lagoa Seca – PB. Foi possível observar uma baixa condutividade elétrica nas águas após o processo de dessalinização, atingindo uma redução de 97,79% no Poço P1, 99,13% no Poço P2 e de 97,69% no Poço P3.

A turbidez é um parâmetro que está relacionado com a presença de sólidos em suspensão na água, que são os sólidos não dissolvidos. Todos os valores encontrados, tanto da água bruta quanto os da água após o processo de dessalinização, estão dentro dos valores permissíveis pela Portaria de consolidação que é de 5 uT.

De maneira geral, os cloretos encontrados nas águas subter-

râneas são provenientes da dissolução de minerais. O teor de cloretos pode conferir as águas, um sabor salgado podendo essas águas também apresentarem propriedades laxativas (SILVA, 2011). A redução deste parâmetro foi bastante satisfatória. No Poço P1, o valor para a água bruta foi reduzido de 1349 $\text{mg Cl}\cdot\text{L}^{-1}$ para 21,3 $\text{mg Cl}\cdot\text{L}^{-1}$, chegando a uma redução de 98,43%. No Poço P2, a água bruta obteve 5538 $\text{mg Cl}\cdot\text{L}^{-1}$ e a água dessalinizada 21,3 $\text{mg Cl}\cdot\text{L}^{-1}$, uma redução de 99,61% do teor de cloretos na água. Já o Poço P3 a redução foi de 97,66%, o teor de cloretos na água bruta foi 4260 $\text{mg Cl}\cdot\text{L}^{-1}$ e na água dessalinizada 99,4 $\text{mg Cl}\cdot\text{L}^{-1}$.

A dureza está relacionada com a presença de sais de cálcio e magnésio na água. Este parâmetro pode causar sabor desagradável, efeitos laxativos e também reduzir a formação de espuma de sabão (BRASIL, 2008). Na análise de dureza total, o máximo permitido pela Portaria é de 500 $\text{mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$. Com isso, a única água bruta que estava fora do padrão foi a do Poço P3, no valor de 570 $\text{mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$. Os Poços P1 e P2 apresentaram valores de 310 $\text{mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ e 375 $\text{mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ respectivamente, havendo uma redução de 91,93% da dureza na água do Poço P1, 86,87% no Poço P2 e 94,74% no Poço P3. Desta forma, após o processo de dessalinização, todas as águas se enquadraram nos valores permitidos pela Portaria. Filho *et al.* (2019), em um poço artesiano no semiárido paraibano, encontraram um valor médio de 415 $\text{mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$, que representa um valor inferior ao máximo permitido pela Portaria.

Levando em consideração a alcalinidade após o processo de dessalinização, todas as amostras atendem aos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria de Consolidação nº 005/2017 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017), que é de 100 $\text{mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$. As águas brutas apresentaram os seguintes valores: 658 $\text{mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$, 531 $\text{mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ e 480 $\text{mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ para os poços P1, P2 e P3 respectivamente, havendo uma redução de 91,34% para o Poço 1, 86,82% para o Poço 2 e 87,50% para o Poço 3. De acordo com Filho *et al.*

(2019), a maioria das águas naturais apresentam os valores de alcalinidade entre 30 e 500 mg CaCO₃.L⁻¹.

A cor indica a presença de substâncias dissolvidas na água, podendo ser oriunda da decomposição da matéria orgânica e presença de ferro e manganês. A portaria de consolidação de nº 05/2017, do Ministério da Saúde, estabelece para o parâmetro de cor aparente o valor máximo permitido de 15 uH (unidade de Hazen) como padrão de aceitação para o consumo humano. Nas águas desse estudo, excetuando a água bruta do Poço P1, todas as outras estão dentro dos padrões estabelecidos pela Portaria. Silva *et al.* (2017), analisando os parâmetros físico-químicos de águas utilizadas para consumo em poços artesianos na cidade de Remígio - PB, constataram que as amostras atenderam ao padrão vigente, com exceção de uma que apresentou um valor de 500 uH para cor, em que pode ser observado um valor de cor aparente muito alto.

Além disso, o parâmetro mais significativo foi o sódio, pois foi trabalhado com uma água com alto teor de salinidade, nos valores de 420 mg Na⁺.L⁻¹ no Poço P1 e 1200 mg Na⁺.L⁻¹ para os poços P2 e P3, havendo uma redução de 98,33%, 99,92% e 97,83% nos respectivos poços. Souza *et al.* (2018) analisaram águas de poços tubulares no cariri paraibano e encontraram, na cidade de Amparo - PB, um poço em que a água alcançou 850 mg Na⁺.L⁻¹, evidenciando alto valor de sódio nas águas da região.

4. ÁGUA PARA FINS DE POTABILIDADE

A redução na ingestão de cálcio e magnésio, devido ao consumo de água dessalinizada, podem, potencialmente, aumentar os riscos de anormalidades cardíacas, câibras musculares, hipertensão, osteoporose, pedras nos rins, diabetes tipo 2, síndrome metabólica, proteína C reativa elevada, enxaqueca, asma e câncer de cólon (ROSANOFF, 2012; RASIC-MILUTINOVIC, 2012; INSTITUTE OF MEDICINE, 1997). Assim, após o processo de dessalinização via energia solar, para a água tornar-se adequada para consumo humano, a mesma deverá ser acrescida de sais de acordo com a Resolução da Diretoria Colegiada - RDC N° 316, de 17 de outubro de 2019, do Ministério da Saúde.

Na Resolução RDC n° 316, a água após o processo de dessalinização, deve atender aos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria n° 2.914, de 12 de dezembro de 2011, em que a quantidade a ser adicionada de sais deve ser de pelo menos 30 mg.L⁻¹ e no máximo de 600 mg Na⁺.L⁻¹ de sódio.

Dessa maneira, para atender aos padrões de potabilidade, deve-se acrescentar um volume de água bruta na água dessalinizada. Para o Poço P1, deve ser adicionada um percentual de 5,47%, já no Poço P2 2,42% e no Poço P3 um acréscimo de 0,3%, assim atenderá aos valores estipulados pela Resolução da Diretoria Colegiada - RDC N° 316, de 17 de outubro de 2019, do Ministério da Saúde.

5. CONCLUSÕES

A partir dos parâmetros físico-químicos avaliados, as águas brutas foram consideradas adequadas para o consumo humano, após o processo de dessalinização. Após análises físico-químicas das águas bruta e dessalinizada, foi possível observar resultados satisfatórios, constatando uma boa eficiência na obtenção do produto final, que é a água doce. Além

disso, foi constatada uma redução no teor de sódio de 98,33%, 99,92% e 97,83%, para os poços P1, P2 e P3, respectivamente. E no teor de cloretos, uma redução de 98,43% para o Poço P1, 99,61% para o Poço P2 e 97,66%, para o Poço P3. Por fim, foi obtida uma produtividade de 1.583,3 mL.m⁻².dia⁻¹, atingindo uma temperatura de 62 °C para o Poço P1, 1.046,0 mL.m⁻².dia⁻¹ e 62 °C para o Poço P2 e 1.326,67 mL.m⁻².dia⁻¹ e 70 °C para o Poço P3. Desta forma, foi comprovada a eficiência do dessalinizador solar do tipo bandeja com dupla inclinação, para a obtenção de água doce que estão dentro dos padrões exigidos, podendo ser aplicado não apenas para fins de pesquisa, mas como alternativa de adquirir água de qualidade para comunidades mais isoladas através da água salobra.

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

- ABDERACHID, T.; ABDENACER, K. Effect of orientation on the performance of a symmetric solar still with a double effect solar still (comparison study). *Desalination*, v. 329, p. 68-77, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.09.011>
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. A questão da água no Nordeste. Brasília, DF: CGEE, 2012. 432 p.
- AL-SULTTANI, A.O.; AHSAN, A.; RAHMAN, A.; DAUD N.N.N, IDRUS, S. Heat transfer coefficients and yield analysis of a double-slope solar still hybrid with rubber scrapers: An experimental and theoretical study. *Desalination*, v. 407, p. 61-74, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.12.017>
- 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.
- BEZERRA, F.D. *Nordeste: futuro promissor para energia solar*, Caderno Setorial ETENE, Fortaleza, Brasil, 2018.
- BICUDO, C.E.M.; TUNDISI, J.G.; SCHEUENSTUHL, M.C.B. *Águas do Brasil: análises estratégicas*. Academia Brasileira de Ciências, Rio de Janeiro, Brasil, 2010.
- BRASIL. *Portaria n° 005 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 n° 396 de 3 de abril de 2008*. Brasília: Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2008.
- ELANGO, T.; MURUGAVEL, K.K. The effect of the water depth on the productivity for single and double basin double slope glass solar stills. *Desalination*, v.359, p. 82-91, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.12.036>
- EL-SEBAILI, A.A.; EL-BIALY, E. Advanced designs of solar desalination systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 49, p. 1198-1212, 2015 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.161>
- FERNANDES, F.B.P.; ANDRADE, E.M.; FONTENELE, S.B.; MEIRELES, A.C.M.; RIBEIRO, J.A. Análise de agrupamento como suporte à gestão qualitativa da água subterrânea no semiárido cearense. *Revista Agro@mbiente On-line*, v. 4, n. 2, p. 86-95, 2010. <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v4i2.402>

- FILHO, E.D.S.; SILVA, A.B.; GONZAGA, F.A.S.; MENEZES, W.M.S.; DANTAS, G.M.; SANTOS, J.S.; MADUREIRA, I.A. *Estudo da qualidade físico-química e microbiológica da água de poço tubular situado no sítio alegre no município de Lagoa Seca-PB. Águas Subterrâneas - Seção Estudos de Caso e Notas Técnicas*, 2019.
- GNANARAJ, S.J.P., VELMURUGAN, V. An experimental study on the efficacy of modifications in enhancing the performance of single basin double slope solar still. *Desalination*, v. 467, p. 12-28, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.05.015>
- HIDRATA, R., SUHOGUSOFF, A.V., MARCELLINI, S.S., VILLAR, P.C., MARCELLINI, L. *Estudo de águas subterrâneas*. Instituto Trata Brasil, 2020. Acesso em: 11 de maio de 2020.
- INSTITUTE OF MEDICINE. *Dietary Reference Intakes for Calcium, Phosphorus, Magnesium, Vitamin D, and Fluoride*. Washington DC: National Academies Press, 1997.
- JESUS, G.O.; FREIRAS, J.J.S.O.; SILVA, R.J.; FORTE, L.G.; MATTEDI, S.S.; FIUZA, R.P. Destilação de água por energia solar, *Cadernos de Prospecção*, v.8, n.3, p.469-477, 2015. <https://doi.org/10.9771/S.CPROSP.2015.008.052>
- KIATSIRIROAT, T.; BHATTACHARYA, S. C.; WIBUISWAS, P. Transient simulation of vertical solar still. *Energy Conversion and Management*, v. 27, n. 2, pp.247-252, 1987. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(87\)90081-1](https://doi.org/10.1016/0196-8904(87)90081-1)
- LUNA, F.M. *Desenvolvimento e testes de um dessalinizador solar com pré-aquecimento de água*. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Energias Renováveis, Universidade Federal da Paraíba, 2016, 101p.
- MEDEIROS, S.S.; GHEYI, H.R.; GALVÃO, C.O.; PAZ, V.P.S. *Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas*. Campina Grande: Instituto Nacional do Semiárido, 2011. 440p.
- MIRLEAN, N.; MACHADO, M.I.; OSINALDI, G.M.; DEMOLINER, A.; BAISCH, P. O impacto industrial na composição química das águas subterrâneas com enfoque de consumo humano (Rio Grande, RS). *Química Nova*, v. 28, n. 5, p. 788-791, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000500010>
- MURASE, K.; TOBATA, H.; ISHIKAWA, M.; TOYAMA, S. Experimental and numerical analysis of a tube-type networked solar still for desert technology. *Desalination*, v.190, p.137-146, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.07.018>
- 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>
- OSTER, J. D.; LETEY, J.; VAUGHAN, P.; WU, L.; QADIR, M. Comparison of transient state include salinity and matric stress effects on plant yield. *Agricultural Water Management*, v. 103, p. 167-175, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.11.011>
- RABHIA, K., NCIRIA,R., NASRIA,F., ALIA,C., BACHAE, 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>
- RAJASEENIVASAN, T.; ELANGO, T; MURUGAVEL, K.K. Comparative study of double basin and single basin solar stills. *Desalination*, v. 309, p. 27-31, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.09.014>
- RAJASEENIVASAN, T.; MURUGAVEL, K.K. Theoretical and experimental investigation on double basin double slope solar still. *Desalination*, v.319, p. 25-32, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.03.029>
- RASIC-MILUTINOVIC, Z.; PERUNICIC-PEKOVIC, G.; JOVANOVIC, D.; GLUVIC, Z.; CANKOVICKADIJEVIC, M. Association of blood pressure and metabolic syndrome components with magnesium levels in drinking water in some Serbian municipalities. *Journal Water Health*, v.10, p. 161-169, 2012. <https://doi.org/10.2166/wh.2012.028>
- ROSANOFF, A.; WEAVER, C.M.; RUDE, R.K. Suboptimal magnesium status in the United States: are the health consequences underestimated? *Nutrition Review* 2012; 70: 153-64. <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.2011.00465.x>
- SANTOS, A.N.; SILVA, E.F.F.; SOARES, T.M.; DANTAS, R.M.L.; SILVA, M.M. Produção de alface em NFT e Floating aproveitando água salobra e o rejeito da dessalinização. *Revista Ciência Agronômica*, v. 42, p. 319-326, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902011000200009>
- SILVA, A.B.; BRITO, J.M.; SILVA, R.A.; BRAZ, A.S.; SILVA FILHO, E.D. Parâmetros físico-químicos da água utilizada para consumo em poços artesianos na cidade de Remígio-PB. *Águas Subterrâneas*, v. 31, n. 2, p. 109-118, 2017. <https://doi.org/10.14295/ras.v31i2.28807>
- SILVA, F.J.A.; ARAÚJO, A.L.; SOUZA, R.O. Águas subterrâneas no Ceará – poços instalados e salinidade. *Revista Tecnologia*, v. 28, p. 136-159, 2007.
- SILVA, I.N. Agropecuária Científica no Semiárido, UFCG – Patos – PB. *ACSA - Agropecuária Científica no Semiárido*, v.07, n 03, p. 01 – 15, jul./set. 2011.
- SOUZA, Y.B.; SILVA, S.L.L.; SILVA FILHO, E.D.; GONZAGA, F.A.S.; OLIVEIRA, H.B.L.; SANTOS FILHO, J.I. Caracterização físico-química de água subterrânea de poço tubular localizado em quatro municípios da região do cariri paraibano. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 20., 2018 [Anais...] Campinas - SP. Anais. Campinas: 2018.
- SUNEJA, S.; TIWARI, G.N.; RAI, S.N. Parametric study of an inverted absorber double-effect solar distillation system. *Desalination*, v.109, p.177-186, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(97\)00063-5](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(97)00063-5)
- TAAMNEH, Y.; TAAMNEH, M.M. Performance of pyramid-shaped solar still: Experimental study. *Desalination*, v.291, p.65-68, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.01.026>
- THANGAVEL, P; SRIDEVI, G. *Environmental sustainability: role of green technologies*. Springer, India, 2014. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-2056-5>
- VELMURUGAN, V.; SRITHAR, K. Performance analysis of solar stills based on various factors affecting the productivity – a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, p. 1294-1304, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.10.012>
- VON SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas*. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais; v. 1, 2005.
- WHO – World Health Organization. *Guidelines for drinking-water quality*. Volume 1 Recommendations, WHO Library Cataloguing-in-Publication Data, Geneva, 2015.
- WWAP - The United Nations World Water Development Report 2018: *Nature-based Solutions*, UNESCO, Paris, 2018.

ZARASVAND, A.; SUJA, F.; RUSLAN, M.H.; JALIL, N.A. The application of a solar still in domestic and industrial wastewater treatment, *Solar Energy* v. 93, p. 63-71, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.03.024>

ZIABARI, F.B.; SHARAK, A.Z.; MOGHADAM, H.; TABRIZI, F.F. Theoretical and experimental study of cascade solar stills. *Solar Energy*, v.90, p. 205-211, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.12.019>