

UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA - CCT/UEPB PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL-PPGCTA

YOHANNA JAMILLA VILAR DE BRITO

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM DESSALINIZADOR SOLAR TIPO PARABÓLICO MODIFICADO PARA POTABILIZAÇÃO DE ÁGUA

CAMPINA GRANDE, PB 2020



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA - CCT/UEPB PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL-PPGCTA ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE ÁGUA E DE RESÍDUOS

YOHANNA JAMILLA VILAR DE BRITO

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM DESSALINIZADOR SOLAR TIPO PARABÓLICO MODIFICADO PARA POTABILIZAÇÃO DE ÁGUA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Ciências e Tecnologia Ambiental -PPGCTA, em cumprimento às exigências necessárias para obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Carlos Antônio Pereira de Lima.

Coorientadora: Profa. Dra. Keila Machado de Medeiros

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

B862a	Brito, Yohanna Jamilla Vilar de. Análise de desempenho de um dessalinizador solar tipo parabólico modificado para potabilização de água [manuscrito] / Yohanna Jamilla Vilar de Brito 2020. 86 p. : il. colorido.
	Digitado. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia , 2020. "Orientação : Prof. Dr. Carlos Antônio Pereira de Lima , Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT."
	 Dessalinização solar. 2. Transferência de calor. 3. Análise térmica. 4. Qualidade de água. 5. Semiárido paraibano. I. Título
	21. ed. CDD 628.167

Elaborada por Kênia O. de Araújo - CRB - 15/649

BC/UEPB

VOHANNA JAMILLA VILAR DE BRITO

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM DESSALINIZADOR SOLAR TIPO PARABÓLICO MODIFICADO PARA POTABILIZAÇÃO DE ÁGUA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Ciências e Tecnologia Ambiental -PPGCTA, em cumprimento às exigências necessárias para obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental.

Data: 03/02/2020

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Antônio Pereira de Lima (Orientador) Universidade Estadual da Paraíba

Keila Machadad. Modo

Profa. Dra. Keila Machado de Medeiros (Coorientadora) Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

- Das

Profa. Dra. Joelda Dantas (Examinador Externo) Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira (Examinador Interno) Universidade Estadual da Paraíba

Profa. Dra. Geralda Gilvânia Cavalcante de Lima (Examinador Interno) Universidade Estadual da Paraíba

CAMPINA GRANDE, PB 2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço,

A Deus e minha família, sobretudo, pelo alicerce concreto que muito contribuiu em minha formação pessoal.

Ao meu companheiro, Rogério, por tantas experiências felizes e significantes, ao compartilhar de sentimentos que harmonizam a plenitude de viver.

Aos meus padrinhos, pela experiência de vida incrível.

Aos amigos do mestrado, pela convivência nessa caminhada e também por persistirem nesta conquista, que é nossa.

A Carlos, meu professor e orientador, pela dedicação, pela atenção e oportunidades, pela confiança, pelo compartilhar de conhecimentos que engradeceram este relato.

A Keila, por toda presteza e prontidão, pelos ensinamentos e auxílio para que a construção deste trabalho se tornasse possível.

Aos colegas do GRUTAA, em especial Adriano, Camylla, Karol e Karyna, por toda ajuda para realização deste estudo.

A concretização deste trabalho agradeço a todos que estiveram comigo e contribuíram para sua construção de maneira direta ou indireta, ao compartilhar deste contexto.

RESUMO

A região Nordeste apresenta um bom potencial de desenvolvimento para exploração da energia solar, utilizando os processos para dessalinização para obtenção de água potável. O semiárido brasileiro além de apresentar limitada disponibilidade de recursos hídricos possui elevado teor de sais no solo e na água, deste modo, a dessalinização solar é cada vez mais uma solução competitiva e sustentável. Nesta pesquisa, foi realizado um estudo térmico de um dessalinizador solar tipo parabólico modificado, com o intuito de obter uma água tratada com padrões de potabilidade para o consumo humano e aplicação no semiárido paraibano. Foi projetado e construído um novo modelo de dessalinizador solar do tipo parabólico modificado e para fins de comparação, foi construído um outro do tipo dupla inclinação. As águas brutas foram coletetadas no Sítio Poco de Pedra e Sítio Escurinha de Baixo, no município de Juazeirinho – PB, e caracterizadas, antes e após o processo de dessalinização, pelas seguintes análises físico-químicas: pH, condutividade elétrica, temperatura, turbidez, cor, cloretos, dureza, sódio e potássio. Para análise térmica, foram medidas as temperaturas na água, no vidro e na bandeja dos dessalinizadores, a temperatura ambiente, radiação solar e velocidade do vento. A temperatura da água máxima alcançada foi de 90°C no dessalinizador tipo parabólico modificado, com índice de radiação solar de 1172 W.m⁻², apresentando uma produção de água dessalinizada de 4.133,3 mL.m⁻².dia⁻¹. A análise térmica realizada nos componentes dos dessalinizadores, evidenciaram que os modelos teóricos se ajustaram aos dados experimentais. Após o processo de dessalinização, todas os parâmetros físico-químicos foram reduzidos, com destaque para o teor de cloretos e sódio que reduziram 99,36% e 100%, respectivamente. Deste modo, conlui-se que o protótipo desenvolvido foi viável e eficiente para utilização no semiárido paraibano, visto que foi possível dessalinizar a água salobra, deixando-a dentro dos padrões de potabilidade exigidos pela Portaria do Ministério da Saúde vigente no país.

Palavras-chave: Dessalinização solar; Transferência de calor; Análise térmica; Qualidade de água; Semiárido paraibano.

Abstract

The Northeast region has a good development potential for the exploitation of solar energy, using desalination processes for the use of drinking water. The Brazilian semi-arid region, in addition to having a limited availability of water resources, has a high water content in the soil and water, thus, solar desalination is increasingly a competitive and sustainable solution. In this research, a thermal study of a modified parabolic solar desalinator was carried out, in order to obtain a water treated with power standards for human consumption and application in the semi-arid region of Paraíba. A new model of modified parabolic solar desalinator was designed and built and for comparison purposes, another type of double slope was built. As raw waters were collected at Sítio Poco de Pedra and Sítio Escurinha de Baixo, in the city of Juazeirinho - PB, and characterized, before and after the desalination process, by the following physical-chemical conditions: pH, electrical conductivity, temperature, turbidity, color, chlorides, hardness, sodium and potassium. For thermal analysis, measurements such as temperatures in the water, the glass and the desalination tray, the ambient temperature, the solar ventilation and the wind speed. The maximum water temperature reached was 90 ° C in the modified parabolic desalinator, with a solar pressure index of 1172 W.m-², presenting a desalinated water production of 4,133.3 mL.m-2.day-1. A thermal analysis carried out on the components of the desalinators, shows that the theoretical models fit the experimental data. After the desalination process, all physical and chemical parameters were reduced, with emphasis on the chloride and absorbed content, which reduced 99.36% and 100%, respectively. In this way, get to know the developed and viable and efficient prototype for use in the semi-arid region of Paraíba, since it was possible to desalinate brackish water, leaving it within the potability standards required by the Ministry of Health Ordinance in force in the country.

Keywords: Solar desalination; Heat transfer; Thermal analysis; Water quality; Semi-arid from Paraíba.

Lista de Figuras

Figura 1 - Incidência das secas em algumas localidades no nordeste brasileiro	14
Figura 2 - Constante Solar	16
Figura 3 - Espectro eletromagnético	17
Figura 4 - Balanço de energia solar	18
Figura 5 - Potencial anual médio de energia solar das regiões brasileiras	19
Figura 6 - Dessalinizador solar tipo pirâmide	25
Figura 7 - Dessalinizador tipo multiestágio	26
Figura 8 - Dessalinizador tipo filme capilar	27
Figura 9 - Dessalinizador tipo mecha	28
Figura 10 - Configurações de coletores solares: (a) refletor plano, (b) refletor parabólico, (c))
refletor tipo Fresnel e (d) refletor tipo torre	31
Figura 11 - Parâmetros geométricos do coletor parabólico	33
Figura 12 - Pontos de uma parábola	33
Figura 13 - Rastreamento do sol leste/oeste	35
Figura 14 - Balanço geral de D1	40
Figura 15 - Balanço de energia térmica para a cobertura de vidro de D1	41
Figura 16 - Balanço de energia térmica para a água salobra do D1	42
Figura 17 - Balanço de energia térmica para a bandeja de D1	43
Figura 18 - Balanço de energia térmica para o isolante de D1	44
Figura 19 - Balanço geral do dessalinizador passivo modificado acoplado ao concentrador	
parabólico	44
Figura 20 - Balanço de energia térmica para a bandeja de D2	45
Figura 21 - Dessalinizador passivo com cobertura tipo dupla inclinação totalmente isolado	49
Figura 22 - Dessalinizador passivo do tipo dupla inclinação acoplado a um concentrador	
parabólico	51
Figura 23 - Perfis de temperatura e radiação, com lâmina de 1 cm, para D1	52
Figura 24 - Perfis de temperatura e radiação, com lâmina de 1 cm, para D2	53
Figura 25 - Perfis de temperatura e radiação, com lâmina de 1,5 cm, para D1	54
Figura 26 - Perfis de temperatura e radiação, com lâmina de 1,5 cm, para o D2	54
Figura 27 - Perfis de temperatura e radiação, com lâmina de 2,0 cm, para D1	55
Figura 28 - Perfis de temperatura e radiação, com lâmina de 2,0 cm, para D2	55
Figura 29 – Produção de água dessalinizada, com lâmina de 1cm, para D1	56
Figura 30 - Produção de água dessalinizada, com lâmina de 1cm, para D2	57
Figura 31 - Produção de água dessalinizada, com lâmina de 1,5 cm, para D1	58
Figura 32 - Produção de água dessalinizada, com lâmina de 1,5 cm, para D2	
	58
Figura 33 - Produção de água dessalinizada, com lâmina de 2,0 cm, para D1	58 59
Figura 33 - Produção de água dessalinizada, com lâmina de 2,0 cm, para D1 Figura 34 - Produção de água dessalinizada, com lâmina de 2,0 cm, para D2	58 59 59
Figura 33 - Produção de água dessalinizada, com lâmina de 2,0 cm, para D1 Figura 34 - Produção de água dessalinizada, com lâmina de 2,0 cm, para D2 Figura 35 - Produção e radiação, com lâmina de 1cm	58 59 59 60
Figura 33 - Produção de água dessalinizada, com lâmina de 2,0 cm, para D1 Figura 34 - Produção de água dessalinizada, com lâmina de 2,0 cm, para D2 Figura 35 - Produção e radiação, com lâmina de 1cm Figura 36 - Produção e radiação, com lâmina de 1,5 cm	58 59 59 60 61
Figura 33 - Produção de água dessalinizada, com lâmina de 2,0 cm, para D1 Figura 34 - Produção de água dessalinizada, com lâmina de 2,0 cm, para D2 Figura 35 - Produção e radiação, com lâmina de 1cm Figura 36 - Produção e radiação, com lâmina de 1,5 cm Figura 37 - Produção e radiação, com lâmina de 2,0 cm.	58 59 60 61 62
Figura 33 - Produção de água dessalinizada, com lâmina de 2,0 cm, para D1 Figura 34 - Produção de água dessalinizada, com lâmina de 2,0 cm, para D2 Figura 35 - Produção e radiação, com lâmina de 1cm Figura 36 - Produção e radiação, com lâmina de 1,5 cm Figura 37 - Produção e radiação, com lâmina de 2,0 cm. Figura 38 - Coeficientes de convecção, radiação e evaporação, com lâmina de 1,0 cm	58 59 60 61 62 63
Figura 33 - Produção de água dessalinizada, com lâmina de 2,0 cm, para D1 Figura 34 - Produção de água dessalinizada, com lâmina de 2,0 cm, para D2 Figura 35 - Produção e radiação, com lâmina de 1cm Figura 36 - Produção e radiação, com lâmina de 1,5 cm Figura 37 - Produção e radiação, com lâmina de 2,0 cm Figura 38 - Coeficientes de convecção, radiação e evaporação, com lâmina de 1,0 cm Figura 39 - Coeficientes de convecção, radiação e evaporação, com lâmina de 1,5 cm	58 59 60 61 62 63 64
 Figura 33 - Produção de água dessalinizada, com lâmina de 2,0 cm, para D1. Figura 34 - Produção de água dessalinizada, com lâmina de 2,0 cm, para D2. Figura 35 - Produção e radiação, com lâmina de 1cm. Figura 36 - Produção e radiação, com lâmina de 1,5 cm. Figura 37 - Produção e radiação, com lâmina de 2,0 cm. Figura 38 - Coeficientes de convecção, radiação e evaporação, com lâmina de 1,5 cm. Figura 39 - Coeficientes de convecção, radiação e evaporação, com lâmina de 1,5 cm. Figura 40 - Coeficientes de convecção, radiação e evaporação, com lâmina de 2,0 cm. 	58 59 60 61 62 63 64 65

Figura 42 - Perfis de temperatura em D1 da bandeja: (O) teórico e (Δ) experimental	66
Figura 43 - Perfis de temperatura em D1 da água: (O) teórico e (Δ) experimental	67
Figura 44 - Perfis de temperatura em D2 do vidro: (O) teórico e (Δ) experimental	67
Figura 45 - Perfis de temperatura em D2 da bandeja: (O) teórico e (Δ) experimental	68
Figura 46 - Perfis de temperatura em D2 da água: (O) teórico e (Δ) experimental	68
Figura 47 - Produção de água teórica versus experimental para lâmina de 1,0 cm	69
Figura 48 - Produção de água teórica versus experimental para lâmina de 1,5 cm	70
Figura 49 - Produção de água teórica versus experimental para lâmina de 2,0 cm	70

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	12
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
3.1 Estresse Hídrico e Necessidade de Fontes Alternativas	13
3.2 Energia e Radiação Solar	15
3.3. Processos de Dessalinização	20
3.3.1. Processos de Dessalinização por Membranas	20
3.3.2. Processos de Dessalinização Térmicos	21
3.4. Dessalinização Solar	23
3.4.1 Tipos de Dessalinizadores Solares	24
3.4.2 Fatores que afetam a produtividade dos dessalinizadores solares	
3.5 Concentradores Solares	30
3.5.1 Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico (CSP)	31
3.5.2 Sistema de Rastreamento do Sol	35
4. MODELAGEM MATEMÁTICA DO DESSALINIZADOR	
4.1 Fundamentos de Transferência de Calor no processo de dessalinização	
4.1.1 Processos de Condução de Calor	
4.1.2 Processos de Convecção de Calor	37
4.1.3 Processos de Radiação Térmica	
4.1.4 Evaporação	
4.2 Análise Térmica dos Dessalinizadores Solar	
4.2.1 Balanço de Energia Térmica no D1	40
4.2.2 Balanço de Energia Térmica no D2	44
5. MATERIAIS E MÉTODOS	47
5.1 Caracterização Físico-químicas das Águas	47
5.2 Protótipo dos Dessalinizadores Solar	48
5.2.1 Construção do Dessalinizador D1	48
5.2.2 Construção do Dessalinizador D2	49
5.3 Operação do Sistema	51
6.1 Perfis de Temperatura em Função da Espessura da Lâmina de Água	
6.2 Produção de água dessalinizada	56
6.3 Produção de Água em Função da Radiação Solar	60
6.4 Coeficientes de Transferência de Calor Convectivo, Evaporativo e Radiativo nos	60
Dessaminzau01es	

Sumário

 6.6. Produção de Água Teórica	6.5 Análise térmica dos dessalinizadores solar	65
 6.7 Monitoramento da qualidade da água obtida	6.6. Produção de Água Teórica	68
7. CONCLUSÕES	6.7 Monitoramento da qualidade da água obtida	71
REFERÊNCIAS	7. CONCLUSÕES	74
ANEXO I81	REFERÊNCIAS	75
	ANEXO I	81

1. INTRODUÇÃO

A água doce é indispensável para a sobrevivência da humanidade. Embora a água cubra aproximadamente 70% do mundo, mais de 90% da água constitui água salgada e não é adequada para beber (MANOKAR, 2014). Além do consumo humano, a água também é necessária para fins industriais e agrícolas. Com o aumento da população e do crescimento industrial, o aumento correspondente no consumo de água doce levou inevitavelmente a um desequilíbrio mundial entre a demanda e a oferta de água potável. Isto é agravado pelo fato de que a maior parte da água disponível é naturalmente impura ou não potável e requer tratamento prévio antes de ser utilizada pela população (EL-SEBAII, 2015).

No Nordeste brasileiro, região de clima predominantemente semiárido, a disponibilidade de água para abastecimento da população é na sua maioria de poços e açudes, distribuída de forma limitada e irregular, além disso, apresenta elevado nível de salinidade (água salobra). Os maiores problemas de escassez hídrica ocorrem principalmente no semiárido brasileiro durante os períodos de estiagem, fato agravado pela presença de grande quantidade de sais dissolvidos nos mananciais disponíveis, provindos naturalmente de rochas que compõem o solo da região e das características de aridez do clima. Em nosso país, apesar do grande potencial hídrico existente, todas as regiões têm sofrido com o problema da escassez provocado pelas mudanças climáticas (FORMOSO, 2010). De maneira geral, o solo do semiárido é composto por rochas cristalinas e rasas, baixas porosidade e permeabilidade, resultando em lençóis freáticos com elevada salinidade. A água salobra proveniente dos poços perfurados nesse tipo de formação, sem o devido tratamento é imprópria ao consumo, podendo inclusive causar diversas doenças.

Para uma área remota onde há escassez de água potável, mas com uma quantidade abundante de radiação solar, o uso de energia solar é a fonte de energia alternativa viável. Portanto, a dessalinização solar é a forma mais adequada de energia que pode ser aproveitada para fornecer água potável barata usando métodos descentralizados. Esta é uma solução fundamental porque a maioria das áreas remotas e rurais, especialmente aquelas em regiões áridas, têm fontes abundantes de radiação solar é um recurso natural limpo, abundantemente disponível e mais acessível em todo o mundo. A dessalinização solar é uma técnica baseada em energia térmica usada para a remoção de contaminantes de água salobra usando energia solar, proporcionando água de qualidade para essas regiões.

De maneira a combater este problema, sucessivas tecnologias têm sido implantadas na região a exemplo do uso de cisternas e aproveitamento das 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 solar é considerada uma alternativa eficaz de tecnologia limpa ao se tratar de dessalinização de águas salobras e salinas, água encontrada com maior incidência no semiárido nordestino. Isso se deve ao fato de causar o mínimo de prejuízo ao meio ambiente e usufrui a fonte energética mais abundante e gratuita encontrada lá, a energia solar.

Dependendo do modo de aproveitamento da energia solar, a técnica de dessalinização solar é classificada em duas maneiras: passiva e ativa. A técnica de dessalinização solar passiva utiliza energia solar direta para seu funcionamento, enquanto a dessalinização solar ativa utiliza algumas fontes externas de energia térmica (concentradores solares, coletor térmico, painéis fotovoltaicos) juntamente com radiação solar direta para o processo a ser realizado.

Os refletores internos e externos, concentradores, são usados para focar a radiação solar dispersa em dessalinizadores solares para melhorar seu desempenho. O dessalinizador ao ser acoplado a um concentrador solar parabólico, objeto deste estudo, têm muitas vantagens, como alta densidade de potência, alta eficiência, modularidade e versatilidade. O concentrador solar pode atingir altas faixas de temperatura para o receptor, quanto maior a temperatura do receptor, maior a eficiência do sistema de dessalinização.

Nesta pesquisa, construiu-se um novo modelo de dessalinizador solar do tipo parabólico modificado e para fins de comparação, foi construído um outro do tipo dupla inclinação, com o intuito de obter uma água tratada com padrões de potabilidade para o consumo humano. Além disso, o tratamento de água com a remoção de sais inorgânicos é viável não apenas por ser uma fonte alternativa de abastecimento, mas principalmente por permitir a diminuição dos problemas hídricos.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Analisar o desempenho do dessalinizador solar do tipo parabólico modificado e comparálo com um do tipo dupla inclinação, no intuito de obter água potável no semiárido paraibano.

2.2 Objetivos específicos

- Projetar, construir e monitorar o desempenho do protótipo, através de um estudo térmico;
- Verificar a influência da lâmina de água e da incidência de radiação solar sobre o desempenho do equipamento;
- Fazer análises físico-químicas da água antes e após o processo de dessalinização;
- Avaliar a eficiência do dessalinizador proposto na produção de água potável.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Estresse Hídrico e Necessidade de Fontes Alternativas

O aumento do estresse hídrico continua a afetar mais e mais partes do mundo. De acordo com o Relatório Mundial de Desenvolvimento da Água da ONU, 3,7 bilhões de pessoas estão atualmente afetadas pela escassez de água. Em 2050, esse número poderá aumentar para até 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).

Com o esgotamento das fontes de água doce causando uma ameaça iminente, o foco na dessalinização como meio de atender à demanda global de água nunca foi tão grande. O aumento da população e o subsequente aumento na demanda por água consumível foram citados como os principais impulsionadores do mercado global de dessalinização. Para dar uma visão, o mercado de dessalinização global deverá acelerar a uma taxa de 9% de 2018 a 2022 (TECHNAVIO, 2018).

Estudos destacaram que algumas das regiões mais áridas do mundo que dependem da dessalinização para atender às suas necessidades de água também têm alta irradiação solar. Pugsley et al. (2016) desenvolveram um método que correlaciona a escassez de água, os recursos de água salina e a insolação solar em vários países para sugerir a aplicabilidade da dessalinização solar. É por isso que as tecnologias de dessalinização movidas à energia solar têm sido amplamente investigadas e empregadas em muitas partes do mundo, tanto para sistemas de pequena e grande escala.

O Nordeste brasileiro é vulnerável aos extremos observados da variabilidade climática interanual, além disso, cenários globais e regionais de mudanças climáticas indicam que no próximo século, a região será afetada por déficit de precipitação e aumento da aridez (MARENGO et al.; VIEIRA et al., 2015). Embora o Brasil tenha uma posição privilegiada no mundo em relação à disponibilidade de Recursos hídricos, na região nordeste, existem áreas cuja disponibilidade de água por habitante/ano é menor que o mínimo de 2.000 litros/ano recomendados pela ONU.

No Brasil, as terras secas concentram-se principalmente na região Nordeste, representando 18,26% do território brasileiro. Inclui os estados do Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e norte de Minas Gerais. Portanto, estas regiões que são afetadas regularmente por secas por isso passaram a referirem-se como o Polígono das Secas, conforme ilustrado na Figura 1 (MARENGO e BERNASCONI, 2015). Nestas regiões ocorrem os maiores índices de escassez hídrica provocada por fatores naturais, como tipo de massa de ar aliado ao relevo impedindo que as massas de ar quente e úmidas cheguem ao local e provoquem chuvas.



Figura 1 - Incidência das secas em algumas localidades no nordeste brasileiro.

Fonte: ANA, 2012.

O interesse na área de energia solar para a dessalinização aumentou nos últimos 25 anos, como é indicado pelo forte aumento no número de publicações sobre este tema. Yadav (2018) realizou uma revisão sobre energia solar utilizada para tecnologias de dessalinização térmica. Sharon e Reddy (2015) também analisaram as tecnologias de dessalinização movidas à energia solar e constataram que as mesmas foram mais eficientes que os processos de separação por membranas. Pouyfaucon e García Rodríguez (2018) revisaram especificamente a dessalinização movida a energia solar térmica na perspectiva de encontrar uma solução viável, dependendo da demanda e localização da água. Apesar dos estudos frequentes, a energia solar e a dessalinização continuam sendo áreas de pesquisa em crescimento, impulsionadas pela necessidade de reduzir o consumo de energia e os gases do efeito estufa.

Nesse contexto, visando o aproveitamento da grande incidência de radiação solar, a utilização de técnicas que empregam energia solar é considerada satisfatória e possui rendimentos favoráveis para sua aplicação. O fornecimento de água por sistemas solares permite que a população consiga água de qualidade proporcionando diversas utilidades e benefícios.

3.2 Energia e Radiação Solar

Energia solar é o termo utilizado quando se refere à energia proveniente do calor ou luz do sol. O sol é a estrela mais próxima da terra e sua energia radiante é praticamente a única fonte de energia que influencia os movimentos atmosféricos e o clima (IQBAL, 1983). A densidade média do sol de 1,4 g.cm⁻³ é ligeiramente maior que a da água que é de 1,0 g.cm⁻³. Esta baixa densidade é devido ao fato de o sol ser composto predominantemente pelos mais leves elementos químicos, o hidrogênio (70%) e o hélio (27%), e o restante da matéria solar é formada por elementos desconhecidos (SEN, 2004).

O aproveitamento da energia gerada pelo sol, inesgotável na escala terrestre de tempo, tanto como fonte de calor quanto de luz, é hoje uma das alternativas energéticas mais promissoras para prover a energia necessária ao desenvolvimento humano. Quando se fala em energia, deve-se lembrar de que o Sol é responsável pela origem de praticamente todas as outras fontes de energia na terra (PINHO; GALDINO, 2014). O balanço global de radiação controla o clima da terra e, portanto, desempenha um papel importante no funcionamento de todos os ecossistemas. Os dois principais componentes do balanço de radiação global são a radiação solar, emitida pelo sol, e a radiação terrestre, emitida pela superfície e atmosfera da terra. Além de regular o clima, a radiação solar é vital para sustentar a vida em nosso planeta, uma vez que quase todos os organismos vivos precisam da luz solar para o seu bem-estar.

O sol é uma esfera de matéria gasosa e intensamente quente, com um diâmetro de 1,39 x 10^6 km com uma massa de $2x10^{30}$ kg. Está, em média, a 1,5 x 10^8 km de distância da terra. Sua superfície atinge uma temperatura de cerca de 6.000 °C, podendo chegar à ordem de $40x10^6$ °C no centro (DUFFIE e BECKMAN, 2013).

Contudo, o que realmente importa é a quantidade dessa radiação que de fato chega até o planeta terra. Assim sendo, o parâmetro mais importante ao estudo de meios de aproveitamento da energia solar, é a constante solar que é definida como um fluxo de energia solar incidente sobre uma superfície localizada na entrada da atmosfera e orientada normalmente aos raios solares, conforme visualizada na Figura 2. A mesma pode ser determinada usando uma abordagem de conservação da energia.



Figura 2 - Constante Solar.

Segundo Villalva e Gazoli (2012), a energia captada na forma de calor é a conversão da energia eletromagnética em energia térmica pelos corpos e materiais que recebem sua radiação, ou seja, esta energia eletromagnética é convertida em energia cinética (energia de movimentação de um corpo) a partir do momento que a radiação atinge um corpo a qual é transmitida para as moléculas e átomos que compõem esse corpo, quanto maior o estado da agitação das moléculas ou átomos, maior é a temperatura do corpo. Implica que sua temperatura vai depender do índice da radiação solar de maior ou de menor intensidade.

Segundo Duffie e Beckman (2013) o espectro eletromagnético pode ser dividido em faixas conforme os comprimentos de onda (λ) das radiações. A radiação eletromagnética, vinda do Sol, é composta pela sua maior parte de radiação invisível, e o espectro de radiação de maior interesse para a produção de energia elétrica ou térmica. Essa radiação é distribuída em 3% de raios ultravioletas ($\lambda < 0,38 \mu$ m), 42% de luz visível (0,38 μ m $< \lambda < 0,78 \mu$ m) e 55% de raios infravermelhos ($\lambda > 0,78$ mm), conforme pode ser observado na Figura 03.

Fonte: GUNTHER, 2011.



Figura 3 - Espectro eletromagnético.

Fonte: DUFFIE e BECKMAN, 2013.

A radiação solar global, composta pela radiação difusa e direta, é utilizada tradicionalmente como fonte de energia térmica para aquecimento de fluidos, iluminação de ambientes e para a geração de energia mecânica ou elétrica. A radiação direta é aquela medida por um elemento na superfície terrestre perpendicular aos raios do sol, ou seja, é a radiação que chega à superfície vinda diretamente do disco solar, excluindo a insolação difusa, que é originada pelos raios não diretos e dispersos pela atmosfera, refratada ou refletida por componentes atmosféricos como nuvens e poeiras em suspensão. A radiação refletida pela superfície do planeta é chamada de albedo, quanto maior o albedo, menor a quantidade de energia solar absorvida pela superfície.

A medição da radiação global, soma da contribuição da radiação direta e difusa, é extremamente importante, podendo ser medida através de instrumentos que registram a energia que chega até o solo, como os piranômetros e os pireliômetros. À medida que se propaga pela atmosfera, a radiação solar sofre dispersão e absorção por gases, aerossóis e nuvens, e o mesmo fenômeno ocorre na superfície do planeta. A fração da radiação solar que atinge a superfície é parcialmente refletida de volta à atmosfera, o restante é absorvido pela superfície, sendo as nuvens, os gases, as partículas atmosféricas responsáveis pela reflexão de cerca de 25% e absorção de 25% da radiação incidente. Os outros 50% chegam superfície terrestre, sendo 45% absorvido e uma pequena porção, 5%, refletida (LIMA et al., 2013). A Figura 4 ilustra a estimativa do balanço de energia.



Figura 4 - Balanço de energia solar.

Fonte: PEREIRA et al., 2017.

Villalva e Gazoli (2012) consideram que irradiação é a medida de potência por metro quadrado, ou seja, uma grandeza para quantificar a radiação solar W.m⁻² e quando a energia solar incide sobre uma determinada área de superfície plana ao longo de um determinado intervalo de tempo é denominado de insolação, expressa em Wh.m⁻²dia⁻¹. A principal radiação incidente em uma área estudada para o aproveitamento da energia solar é a radiação direta, quanto maior melhor para o processo de dessalinização.

Dados reportados por Pereira et al. (2017) considera que o Brasil tem sua posição privilegiada no globo terrestre, em toda sua grande extensão territorial, e por ser um país tropical onde algumas regiões apresentam temperaturas elevadas na maior parte do ano. Os níveis de radiação que chegam à terra não são constantes, isso irá depender da localização (latitude/longitude) e das condições climáticas que variam o ano todo de região para região. Na Figura 5 apresenta o potencial anual médio de energia. O nordeste, em especial, apresentou irradiação de 5,49kWh.m⁻².dia⁻¹, sendo considerado uma região com grande potencial de aproveitamento de energia solar, seguindo região centro-oeste do país com 5,07kWh.m⁻².dia⁻¹, e com menor irradiação a região sul com 4,53kWh.m⁻².dia⁻¹.

Com os dados obtidos pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017), a região nordeste apresenta um bom potencial de desenvolvimento para exploração da energia solar. Na região há utilização dessa energia principalmente em processos para dessalinização solar para obtenção de água potável. O semiárido brasileiro além de apresentar limitada disponibilidade de recursos hídricos possui elevado teor de sais no solo e na água. É cada vez mais uma solução competitiva e sustentável (SHATAT et al., 2013), e tem sido alternativa para se produzir água potável que é praticada em vários países. Por se tratar de uma tecnologia limpa e sustentável e considerando o constante aumento nos custos de energia, para produção de água potável, a dessalinização solar apresenta uma boa aceitação familiar. (AKASH et al., 1998; ELKADER, 1998; BOUKAR e HARMIN, 2001).



Figura 5 - Potencial anual médio de energia solar das regiões brasileiras.

Fonte: PEREIRA et al., 2017.

3.3. Processos de Dessalinização

Os processos para dessalinização de água são classificados de acordo com a fonte de utilização da energia para que ocorra o processo e também pela utilização ou não de membranas. Podem ser divididos em processos térmicos, como os que têm por princípio a dessalinização; e os processos de separação por membranas, como a eletrodiálise e osmose inversa (SOUSA, 2006).

3.3.1. Processos de Dessalinização por Membranas

Os processos por membranas envolvem a utilização de membranas sintéticas, porosas ou semipermeáveis. Para a ocorrência do processo, se faz necessário um gradiente de pressão hidráulica ou um campo elétrico (MACÊDO, 2007). As tecnologias por membranas podem ser utilizadas não só para dessalinizar a água, mas também auxiliam no tratamento de águas residuais buscando sua reutilização, pois as membranas também possuem a capacidade de remover contaminantes orgânicos, bactérias e vírus (NRC, 2008).

Osmose Inversa (OI)

O princípio básico da OI é o bombeamento sob pressão da água salobra ou salina para que, ao atravessar as membranas, os sais sejam retidos. Compreende-se o processo da seguinte forma: primeiramente ocorre o bombeamento da fonte, seja ela o mar ou um poço profundo, depois essa água passa por filtros de areia e de carvão para que sejam retirados sólidos suspensos e componentes químicos. Em segundo lugar a água é bombeada sob pressão pelas membranas retendo a nível molecular os sais; essas membranas geralmente são da ordem de 0,0001 \Box m de espessura. O rejeito é uma solução extremamente salina que não pode ser lançada sem prejudicar o ecossistema (KOPSCH, 2015).

Eletrodiálise (ED)

O processo ED é considerado eletroquímico embasado na separação dos íons de soluções com salinidades diferentes, em que os íons são transportados através de membranas íon seletivas de uma solução para outra devido à existência de um campo elétrico. Estas membranas são arrumadas alternadamente com uma membrana seletiva de ânions seguida de uma membrana seletiva de cátions e dispostas alternadamente em uma montagem tipo filtro-

prensa, de maneira a formar canais entre as membranas por onde circula a solução a ser tratada. Este transporte de íons faz com que haja formação de duas novas soluções uma mais diluída e outra mais concentrada que a original (TRINDADE et al., 2015).

3.3.2. Processos de Dessalinização Térmicos

Os processos térmicos procuram imitar o ciclo natural da água, ou seja, através da energia solar a água em estado líquido é aquecida, o processo de evaporação transforma a água de estado líquido para gasoso e as partículas sólidas ficam retidas, enquanto o vapor de água é captado pelo sistema de resfriamento e ao ser submetido a temperaturas mais baixas, o vapor d'água condensa, retornando ao estado líquido. Diferentes arranjos caracterizam os tipos de processos de dessalinização, sendo os principais processos: Flash de Múltiplo Estágio, Efeito Múltiplo e Compressão de Vapor.

Flash de Múltiplo Estágio – Multi-Stage Flash (MSF)

No processo MSF, a água salina é aquecida em um recipiente geralmente condensando-se o vapor em uma série de tubos que passam através do recipiente. Logo após esta água salina aquecida flui então para outro recipiente, esse denominado de estágio, onde a pressão favorece a água ferver imediatamente. A entrada brusca da água aquecida na câmara faz com que a mesma ferva rapidamente, provocando uma quase explosão ou transformação rapidamente em vapor. Comumente uma pequena parcela desta água é convertida em vapor d'água, pois dependerá da pressão mantida no estágio, já a ebulição irá continuar apenas até o ponto em que a água resfriará. O vapor gerado pelo *"flashing"* será convertido em água doce através da condensação em tubos de troca de calor que correm através de cada estágio. O resfriamento dos tubos ocorrerá através da entrada de água que vai para o aquecedor de água salgada. Isto aquece a água de forma que a quantidade de energia térmica necessária no aquecedor para aumentar a temperatura da água salgada seja minimizada (SOUSA, 2006).

Múltiplo Efeito – Multi-Effect Distillation (MED)

O processo MED ocorre em uma série de recipientes (efeitos) e utiliza o princípio de redução de pressão interna nos vários efeitos. A água salina entra no primeiro efeito até entrar em ebulição após ser pré-aquecida nos tubos, só então é vaporizada sobre a superfície dos tubos evaporadores numa película fina para promover ebulição e evaporação rápida. Os tubos são aquecidos pelo vapor por meio de um aquecedor que é condensado durante o processo de transferência de calor. O condensado do vapor é reciclado para reutilização. Apenas uma parcela da água salina será aplicada aos tubos do primeiro efeito que é evaporada. A água remanescente é levada para o segundo efeito, onde é aplicada novamente a uma série de tubos. Os tubos serão aquecidos pelos vapores criados no primeiro efeito. Este vapor é condensado formando o produto água doce, enquanto o calor é liberado para evaporar uma porção de água marinha remanescente no próximo efeito. Isto continua pelos vários efeitos, nos grandes sistemas, geralmente são encontrados de 8 a 16 efeitos (SOUSA, 2006).

Compressão de Vapor – Vapor Compression (VC)

O processo VC é comumente utilizado para unidades de dessalinização de água salina em larga e média escala. O calor para evaporação da água vem da compressão do vapor. Na unidade em que ocorre a compressão do vapor do tipo jato de vapor, um orifício no jato de vapor cria e extrai vapor de água do recipiente principal, criando uma pressão ambiente mais baixa na unidade. O jato de vapor comprime o vapor de água extraído. Esta mistura é condensada nas paredes do tubo para fornecer energia (calor de condensação) para evaporar a água salina que é aplicada no lado externo das paredes do tubo no recipiente (SOUSA, 2006).

Dessalinizador Solar

A dessalinização solar é um processo para a evaporação e condensação da água e é semelhante a um ciclo hidrológico natural. Um destilador solar usa um processo de energia verde que usa radiação natural livre para purificar a água contaminada em água destilada usando o processo de transferência de energia. Em um dessalinizador solar, o sistema é preenchido com água impura e aquecido pela radiação solar que penetra a uma cobertura de condensação e aquecendo a massa de água até a evaporação. O vapor de água resultante é separado dos contaminantes e impurezas e subsequentemente resfriado e condensado na cobertura de condensação inclinada. As gotas de água fluem em direção a um canal de coleta e são armazenadas. Portanto, a radiação solar incidente é considerada o principal parâmetro ambiental que afeta a taxa de produtividade de um sistema de dessalinização solar (XIAO et al., 2013; PRAKASH e VELMURUGAN, 2015).

Conforme a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA nº 357 de 2005 que rege 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 (CONAMA, 2005). Sendo definido como:

- Águas doces: águas com salinidade igual ou inferior a 0,5 ‰;
- Águas salobras: águas com salinidade superior a 0,5 ‰ e inferior a 30 ‰;
- Águas salinas: águas com salinidade igual ou superior a 30 ‰;

O procedimento utilizado para a dessalinazação remove ou reduz a concentração de sais na água salgada e/ou salobra com o intuito de torná-la doce, assim como também retira outros componentes químicos, orgânicos e biológicos (ARAÚJO, 2013). Ao término do processo, tem-se como produtos a água doce, também chamada de destilado, e um rejeito com alto teor de salinidade.

3.4. Dessalinização Solar

Existem relatos históricos de que na Antiguidade os gregos, persas e egípcios pela observação do ciclo hidrológico, perceberam que era possível destilar a água salgada fervendo-a, assim utilizaram um método simples para a obtenção de água potável. Acredita-se que o primeiro uso de dessalinizadores solares foi em 1551, quando alquimistas árabes utilizaram recipientes de vidro e espelhos côncavos para destilar água (MALIK et al., 1982).

O engenheiro sueco Charles Wilson fez a primeira aplicação moderna da dessalinização solar em 1872, construindo um dessalinizador solar no norte do Chile para abastecimento de água para população mineira. Este dessalinizador abrangia uma superfície total de 4.700 m², e produzindo 23.000 L de água potável por dia (TLEIMAT, 1979).

Durante a Segunda Guerra Mundial, usinas de dessalinização foram amplamente utilizadas. Em 1945 o interesse pela dessalinização solar em que desenvolveram dessalinizadores solares infláveis de plástico destinados às balsas salva-vidas. Com mais de 200.000 unidades, foi a maior produção de dessalinizadores solares ocorridas até hoje (HOWE et al., 1977).

Na Flórida entre 1958 e 1965, a "Estação de Pesquisa sobre Destilação Solar" (do inglês, *Solar Distillation Research Station*) testou um grande número de dessalinizadores solares, concluindo que os custos associados à construção de grandes dessalinizadores não

seriam compensados (CHAIBI, 2000). Atualmente a pesquisa foca para construção de dessalinizadores solares de pequeno porte.

Em 1961, foram publicados dois importantes trabalhos na área de dessalinização solar: o trabalho de Dunkle sobre dessalinizadores solares simples e múltiplo efeito e o trabalho de Lof, Eibling e Bloemer, sobre balanço de energia em dessalinizadores solares. Quanto ao Brasil, há registros de experiências com dessalinização solar realizada sob os auspícios do Instituto Tecnológico da Aeronáutica - ITA, em São José dos Campos na década de 70. Mais recentemente, em 1987, a Petrobrás iniciou o seu programa de dessalinização de água do mar, para atender às suas plataformas marítimas, usando o processo da osmose inversa (BEZERRA, 2010).

Na atualidade tem-se um panorama diferenciado. Em 2010, Israel inaugurou sua terceira usina de dessalinização com capacidade de 348.000 m³.dia⁻¹, o que é suficiente para abastecer 1,4 milhões de pessoas. Em abril de 2013, a Dubai *Electricity and Water Authority* concluiu a construção do complexo Jebel Ali, que é capaz de suprir água potável para 11 milhões de habitantes (ALVES, 2017).

3.4.1 Tipos de Dessalinizadores Solares

São vários os tipos de dessalinizadores solares desde os convencionais ou dessalinizadores de simples efeito, até modelos desenvolvidos a partir desses, a fim de otimizar e aumentar os rendimentos visando a diminuição dos custos. Desse modo, surgiram os dessalinizadores solares tipo pirâmide, solares de multiestágio, os do tipo filme capilar e os capilares com tecido ou tipo mecha, dentre outros modelos que se baseiam no aumento da taxa de evaporação de água pelo aquecimento através de energia solar e a condensação da água destilada e sua recuperação.

Dessalinizador Solar Tipo Pirâmide

A dessalinização solar realizada por um dessalinizador solar tipo pirâmide é considerada uma tecnologia simples, pois reproduz o ciclo natural da água: a radiação solar aquece a lâmina d'água contida em uma bandeja ou recipiente raso de material condutor revestido por uma superfície negra; com a absorção da radiação e elevação da temperatura a água se transforma em vapor; condensando ao entrar em contato com as faces da superfície da

cobertura de vidro, com temperatura mais baixa. Logo após, a lâmina de água destilada é então coletada na parte lateral do dessalinizador. Ao evaporar, ficam contidos na bandeja os sais e as impurezas que haviam na água, conforme ilustrado na Figura 6 (CARVALHO, 2015).





Fonte: Adaptado de Clayton (2006).

Dessalinizador Solar do Tipo Multiestágio

Os dessalinizadores do tipo multiestágio solar são projetados com o objetivo de utilizar o calor máximo dissipado. Estes tipos de dessalinizadores têm mais de uma camada de cobertura de vidro sobre a superfície da água, assim o calor latente de condensação é utilizado para aumentar a eficiência térmica da energia solar. Na Figura 7, pode ser observado um dos tipos de configuração que o dessalinizador pode ser encontrado.



Figura 7 - Dessalinizador tipo multiestágio.

Fonte: Adaptado de Kaviti, Yadav e Shukla (2016).

Dessalinizador Solar do Tipo Filme Capilar

Os dessalinizadores do tipo filme capilar são semelhantes ao do tipo multiestágio, no sentido em que há aproveitamento do calor latente, sua principal característica é a utilização da propriedade de capilaridade da água. A utilização deste material na energia solar aumenta o tempo de permanência da água na placa absorvedora, devido ao fato da água salgada atingir rapidamente uma temperatura mais elevada e, consequentemente, aumentar a taxa de evaporação. A vantagem do dessalinizador tipo capilar é manter a salmoura o mais superficial possível, evitando os pontos secos. A eficácia depende de parâmetros como absortividade, capilaridade e condutividade térmica do tecido (KAVITI, YADAV e SHUKLA, 2016). A Figura 8 apresenta o princípio de um dessalinizador tipo filme capilar.



Figura 8 - Dessalinizador tipo filme capilar.

Fonte: Adaptado de Carvalho (2015).

Dessalinizador Solar do Tipo Mecha

Os dessalinizadores do tipo mecha ou *multiwick* caracterizam-se por possuírem uma espécie de tecido na superfície de evaporação que ficam ensopados com água a ser dessalinizada. A água flui lentamente através do tecido poroso (mecha) que absorve a radiação. A superfície do pano molhada do dessalinizador solar tipo mecha provou ser uma ótima técnica para aumentar a produtividade do dessalinizador a baixo custo. Nessa extensão, os pesquisadores começaram a usar vários tecidos em sistemas solares, o que é uma técnica simples, altamente produtiva e de baixa manutenção. A vantagem em relação aos outros é que a mecha por onde flui a água pode ser inclinada obtendo-se melhor ângulo com o sol ocasionando menor reflexão e melhor aproveitamento da radiação, outra vantagem é que a mecha possibilita uma camada de água muito fina que pode ser aquecida mais rapidamente, conforme visualizado na Figura 9 (KAVITI, YADAV e SHUKLA, 2016).





Fonte: Adaptado de Kaviti, Yadav, Shukla (2016).

3.4.2 Fatores que afetam a produtividade dos dessalinizadores solares

Existem influências que afetam a produtividade dos dessalinizadores solares, como intensidade da radiação solar, velocidade do vento, temperatura ambiente, diferença de temperatura entre a água e o vidro, área superficial da água, profundidade da água, temperatura da água de entrada, área da placa absorvedora e ângulo da cobertura de vidro. A intensidade da radiação solar, a velocidade do vento e a temperatura ambiente não podem ser controladas porque são fatores metrológicos. Os outros parâmetros podem variar para aumentar a produtividade da energia solar (VELMURUGAN e SRITHAR, 2011).

Segundo Nafey et al. (2001) o aumento da radiação solar leva ao aumento da produtividade da energia solar, isto é, intensidades de radiação solar mais altas resultam em aumento da temperatura da massa de água e facilitam o processo de evaporação. Portanto, o material de cobertura de condensação desempenha um papel importante no processo de absorção de radiação solar, afetando a produtividade do sistema. O aumento da radiação solar resulta em aumento do rendimento solar, devido ao aumento das diferenças entre a temperatura da água a ser tratada e a da cobertura de vidro.

Aumentar a diferença de temperatura entre a cobertura de vidro e a água da bandeja leva a um aumento na circulação natural da massa de ar dentro do destilador solar. Além disso, aumenta a transferência de calor por evaporação e por convecção da água da bandeja para a cobertura de vidro. A diferença de temperatura entre a cobertura de vidro e a água é considerada como a força motriz do processo de condensação (SHARSHIR, 2016).

O fluxo de evaporação da água no dessalinizador solar é diretamente proporcional à área de exposição à água. Como resultado, o aumento da área de superfície da água na bandeja melhora a produção de energia solar. A profundidade da água da bandeja influencia fortemente o rendimento do dessalinizador, uma vez que a profundidade da água é inversamente proporcional à produtividade do dessalinizador. Verificou-se que, para o mínimo de profundidade da água, a produtividade atingiu o máximo. Se a profundidade mínima no dessalinizador solar é mantida constante, ocorrendo locais que ficarão sem água dento do dessalinizador. Por esta razão, manter o mínimo de profundidade no sistema solar é considerado muito difícil (KHALIFA e HAMOOD, 2009; SHARSHIR, 2016).

A temperatura da água salina controla a taxa de evaporação à medida que esta aumenta com o aumento da temperatura da água. Concentradores parabólicos, coletor de placas solar são combinados com o dessalinizador solar para aumentar sua temperatura. Grandes quantidades de energia podem ser necessárias para aumentar a temperatura de toda a água. A taxa de evaporação é diretamente proporcional à temperatura da água e da área da superficial da água. (VELMURUGAN e SRITHAR, 2011). A quantidade de água condensada é significativamente dependente da diferença de temperatura entre a cobertura de vidro e a água no dessalinizador e em suas temperaturas individuais. Aumentar também a diferença de temperatura entre a cobertura de vidro e a do concentrado causa um aumento na produtividade (SETOODEH et al., 2011)

Pode ser que a redução da temperatura ambiente do ar ou o aumento da velocidade do vento leve a uma diferença de temperatura mais alta entre a cobertura de vidro e o concentrado. Além disso, a perda de calor para o ambiente é aumentada. Como resultado, a redução da temperatura ambiente tem um efeito positivo sobre a produtividade, enquanto o aumento da velocidade do vento tem um efeito negativo (SHARSHIR, 2016).

Singh e Tiwari (2004) relataram que o rendimento do dessalinizador solar atingia um valor máximo quando a inclinação da cobertura do vidro de condensação era igual à latitude do local. A transferência de calor através da cobertura de vidro melhorou quando a espessura diminuiu e a condutividade térmica aumentou. Identificaram também que a energia solar

aumenta em 16,5% com uma cobertura de 3 mm de espessura de vidro, se comparado com a espessura de vidro de 6 mm. Mostrou que há influencia na escolha do material da cobertura de vidro, que pode ser feita de plástico ou vidro. O vidro é o preferido por causa de sua maior transmitância solar para diferentes ângulos de incidência e seu uso a longo prazo, enquanto polímero (como por exemplo o polietileno) pode ser usado para uso a curto prazo.

A temperatura da cobertura é afetada pela velocidade do vento. A maior velocidade do vento provoca um aumento na transferência de calor convectivo da cobertura para a atmosfera, devido ao aumento do coeficiente convectivo de transferência de calor entre a cobertura e a atmosfera. Este efeito aumenta a evaporação, as taxas de condensação e o rendimento do dessalinizador (ZURIGAT e ABU-ARABI, 2004).

O material e a espessura do isolamento são significativos em um dessalinizador solar. Khalifa e Hamood (2009) sugeriram que um aumento de 80% na produtividade poderia ser alcançado pela seleção de isolamento apropriado.

3.5 Concentradores Solares

Os coletores de concentração solar produzem altas temperaturas através de espelhos ou lentes para concentrar a luz solar num ponto ou numa linha. São geralmente utilizados para produção de energia elétrica, mas também são utilizados em processos de dessalinização de água salobra (ALMEIDA, 2013).

Segundo Kalogirou (2009), coletores solares são trocadores de calor que transformam radiação solar em calor. O coletor capta a radiação solar, a converte em calor, e transfere esse calor para um fluido (ar, água ou óleo em geral).

Os concentradores podem ser refletores ou refratores, podem ser cilíndricos com foco linear, ou circulares com foco pontual, e podem ser contínuos ou segmentados. Os receptores podem ser convexos, planos ou côncavos como representados na Figura 10.

Figura 10 - Configurações de coletores solares: (a) refletor plano, (b) refletor parabólico, (c) refletor tipo Fresnel e (d) refletor tipo torre.



Fonte: DUFFIE e BECKMAN, 2013.

O item (a) tem receptores e refletores planos, são vistos como concentradores planos e possuem baixa taxa de concentração dos raios solares. O item (b) é o refletor de uma seção parabólica, podendo ter uma superfície cilíndrica com receptor tubular ou uma superfície de revolução com um receptor esférico ou hemisférico. O refletor (c) é um refletor do tipo Fresnel, que é caracterizado por um conjunto de refletores planos que se movem em uma matriz. O item (d) ilustra um refletor do tipo torre em que espelhos planos denominados helióstatos que são orientados segundo o sol em dois eixos para refletir a luz solar concentrada num ponto localizado no topo de uma torre.

3.5.1 Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico (CSP)

Os sistemas coletores de calha parabólicos solares recebem calor da radiação solar do sol. O coletor solar parabólico é usado diretamente em algumas aplicações como fogão solar ou bombeamento de água. Os CSP usam uma calha parabólica, que consiste de espelhos montados na estrutura de suporte para refletir e concentrar a radiação solar no foco da calha parabólica (o receptor) para atingir a temperatura necessária. O projeto da calha parabólica depende de muitos parâmetros tais como: fluxo de distribuição solar, material refletor do concentrador, diâmetro do concentrador de calha parabólica, dimensionamento da área de abertura do concentrador, distância focal da calha parabólica, diâmetro do ponto focal, dimensionamento da abertura área do receptor, material absorvente do receptor, relação de concentração geométrica ou área e ângulo do aro (HAFEZ, 2018).

Ainda segundo Hafez (2018) os sistemas de calha parabólica solar têm muitas vantagens, como alta densidade de potência, elevada eficiência, modularidade e versatilidade. Eles também são duráveis contra os efeitos da umidade e têm uma longa vida útil. Além disso, muitas peças do sistema podem ser confeccionadas por fabricantes locais. Seu baixo custo de construção leva investidores a acreditar em tecnologia solar parabólica para reduzir o custo de capital de uma estação CSP. A calha parabólica solar pode atingir altas faixas de temperatura do receptor. Quanto maior a temperatura do receptor, maior a eficiência do sistema e, consequentemente, melhor a geração e conversão de eletricidade. Assim, os sistemas de calhas solares podem fornecer uma fonte economicamente razoável de eletricidade e são candidatos a serem um dos melhores sistemas de energia renovável em poucos anos.

Geometria do coletor parabólico

O coletor, que é a calha parabólica, apresenta uma seção transversal que tem a forma de uma parte de uma parábola. Mais exatamente, é uma seção simétrica de uma parábola em torno de seu vértice (GUNTHER et al., 2011)

Para descrever geometricamente um coletor parabólico, a parábola deve ser determinada, a seção da parábola que é coberta pela superfície espelhada e o comprimento do coletor. Para caracterizar a forma e o tamanho de uma calha parabólica, quatro parâmetros geométricos devem ser compreendidos, conforme representados na Figura 11.

O parâmetro geométrico (a) é o comprimento do coletor, ele deve ser determinado a partir de uma análise técnica e econômica para atender o projeto, (b) é a distância focal do coletor, isto é, a distância entre o ponto focal e o vértice de uma parábola, o parâmetro (c) é a abertura do coletor e o parâmetro (d) é o ângulo de borda do coletor, que é o ângulo formado entre o eixo ótico e a linha do ponto focal.

A geometria parabólica genérica é representada na Figura 12, onde a linha fixa é chamada de diretriz e o ponto fixo F é o foco. A parábola cruza seu eixo em um ponto A, chamado de vértice (Stine e Geyer, 2001).



Figura 11 - Parâmetros geométricos do coletor parabólico.

Fonte: GUNTHER et al., 2011.

Figura 12 - Pontos de uma parábola.



Fonte: GUNTHER et al., 2011.

Calhas parabólicas têm uma linha focal, que consiste nos pontos focais das seções transversais parabólicas, a radiação que entra em um plano paralelo ao plano óptico é refletida de tal forma que passa através da linha focal. A equação da parábola, em termos do sistema de coordenadas é dada pela Equação (1) (GUNTHER et al., 2011):

$$y^2 = 4fx \tag{1}$$

Onde f é a distância do ponto focal ao vértice, representando pela letra (b) da Figura 11. Vale salientar que na expressão matemática mencionada de uma parábola, a distância focal f é o único parâmetro.

Representado pelo parâmetro (d), da Figura 11, o ângulo de borda é o ângulo entre o eixo óptico e a linha entre o ponto focal e o aro do espelho, tem as características interessantes que isoladamente determinam a forma da secção transversal de uma calha parabólica.

Os parâmetros (a) e (b), da Figura 11, são necessários para o cálculo do parâmetro (c). Este parâmetro é expresso como uma função da relação entre a largura da abertura e a distância focal, conforme apresentado na Equação (2) (GUNTHER et al., 2011):

$$\tan \psi = \frac{\frac{a}{f}}{2(\frac{1}{8})(\frac{a}{f})^2}$$
(2)

Onde, ψ é o ângulo de borda, *a* o comprimento de abertura e *f* a distância focal.

Outra maneira de calcular em função do ângulo de borda está representada na Equação (3):

$$\frac{a}{f} = -\frac{4}{\tan\psi} + \sqrt{\frac{16}{\tan\psi} + 16}$$
 (3)

Outra medida construtiva é a área da superfície, pois em determinada posição do sol, ela determina a captura de radiação. A área da superfície é calculada pelo produto entre a largura de abertura (*a*) e o comprimento do coletor (*l*), como pode ser visto na Figura 11 e representando na Equação (4):

$$A_{ap} = a.l \tag{4}$$

Índice de concentração

A definição mais comum de índice de concentração é sendo a relação entre a área de abertura e a área do receptor, como representando na Equação (5) (GUNTHER et al., 2011):

$$C = \frac{A_{ap}}{A_r} \tag{5}$$

Onde A_r é a área do receptor.
Esta relação tem um limite superior que depende da concentração do coletor. A relação da concentração máxima baseia-se na segunda lei da termodinâmica aplicada à troca de calor radiativo entre o sol e o receptor, conforme Equação (6) (GUNTHER et al., 2011):

$$\left(\frac{A_{ap}}{A_r}\right) = \frac{1}{sen^2\Theta_s} \tag{6}$$

Onde, θ_s é o ângulo submetido pelo sol.

3.5.2 Sistema de Rastreamento do Sol

As calhas parabólicas devem seguir o Sol para alcançar uma concentração contínua da radiação solar direta. Como coletores de concentração de linha, as calhas parabólicas têm um sistema de rastreamento de um eixo. A Figura 13 dá uma projeção geral do rastreamento de uma calha parabólica. O eixo de rotação é normalmente na linha do vértice da calha parabólica ou em uma posição paralela ligeiramente abaixo dela.





Caminho do sol de leste a oeste

Fonte: Adaptado de Gunther et.al (2011).

As calhas parabólicas no campo solar podem ter qualquer orientação horizontal. O rastreamento do sol é sempre possível. No entanto, há uma orientação preferencial, que é o alinhamento norte-sul com o respectivo rastreamento leste oeste para que haja radiação solar direta do concentrador (GUNTHER et al., 2011).

4. MODELAGEM MATEMÁTICA DO DESSALINIZADOR

4.1 Fundamentos de Transferência de Calor no processo de dessalinização

Os mecanismos internos e externos da dessalinização solar são originados da transferência de calor, em forma de radiação, convecção e condução, que são processos em que não há mudança de fase. Também existem outros fenômenos importantes neste processo, como a evaporação e a condensação, que são processos em que há mudança de fase (BIRD et al., 2010; INCROPERA 2014).

O comportamento do dessalinizador solar é caracterizado pelas diferentes transferências de massa e calor que ocorrem no seu interior a partir de três fenômenos distintos: a livre convecção existente entre o ar saturado úmido e a parte interna da cobertura do dessalinizador, a transferência de energia entre os processos de evaporação e condensação, emitida pelas superfícies internas e externas, lâmina de água e o vidro do dessalinizador (GAMEIRO, 2010).

4.1.1 Processos de Condução de Calor

A transferência de calor por condução é tida como a transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas de uma substância, que pode estar na fase sólida, líquida ou gasosa, e é devido às interações entre as partículas. A propagação do calor ocorre através dos choques das moléculas, sem que haja transporte de massa (INCROPERA, 2014). Se o material com gradiente de temperatura é um condutor, a transferência de energia se dá pelo movimento de translação dos elétrons livres também.

A transferência de calor por condução é regida pela Lei de Fourier, que estabelece que essa transferência é proporcional ao gradiente de temperatura e a área da seção perpendicular a transferência de calor e inversamente proporcional à distância, como representado na Equação (7):

$$q_k = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \tag{7}$$

Sendo q_k (W) a taxa de transferência de calor, k (W.m⁻¹. K⁻¹) a condutividade térmica característica do material em função da temperatura, A (m²) é a área de transferência de calor e $\frac{dT}{dx}$ (K.m⁻¹) é o gradiente da temperatura.

4.1.2 Processos de Convecção de Calor

A convecção ocorre devido ao movimento macroscópico da matéria que envolve pelo menos dois mecanismos: o difusivo, que é o transporte de energia devido o movimento molecular aleatório e o movimento macroscópico de fluido. Como se configura principalmente pelo movimento macroscópico, a convecção somente ocorre nos líquidos e nos gases (BEZERRA, 2010).

Segundo Bird (2010) a convecção pode ser classificada como natural ou livre e forçada. Na convecção natural o padrão de escoamento é determinado pela força de empuxo sobre o fluido aquecido, os perfis de velocidade são interdependentes e o número de Nusselt depende dos números de Grashof e Prandtl. Na convecção forçada, o padrão de escoamento é determinado pela força externa e o perfil de temperatura é em função do perfil de velocidade.

O tipo de convecção que acontece nos dessalinizadores solares passivos é a convecção natural, em que o movimento da água evaporando ocorre às forças de empuxo em seu interior. O empuxo é uma função devido a combinação de um gradiente de massa específica e de uma força de corpo (gravidade) proporcional a essa massa específica (INCROPERA, 2014).

A principal equação que rege os fenômenos de transferência de calor por convecção estabelece que o fluxo de calor é diretamente proporcional ao gradiente de temperatura, como ilustra a Equação 8, e é regida pela Lei de Resfriamento de Newton.

$$q_c = h_c \cdot A \cdot \Delta T \tag{8}$$

Onde, q_c (W) é a taxa de transferência de calor, h_c (W.m⁻². K⁻¹) é o coeficiente convectivo de transferência de calor, A (m²) é área de transferência de calor e ΔT (K) a diferença de temperatura entre o meio e a superfície.

4.1.3 Processos de Radiação Térmica

A transferência de calor por radiação ocorre pela emissão de ondas eletromagnéticas, gerada dos átomos e moléculas excitada pela agitação térmica que emitem fótons ao passar para o estado não excitado (BARBOSA, 2011).

Um corpo negro é um corpo que emite e absorve a radiação eletromagnética em todos os comprimentos de onda e em todas as direções. A lei que rege a taxa de transferência de calor por radiação é a Lei de Stefan- Boltzmann. Para um corpo real, a taxa liquida de radiação térmica emitida é expressa pela Equação (9):

$$q_r = \epsilon . \sigma . A . (T_1^4 - T_2^4)$$
(9)

Onde, q_r (W) é a taxa de calor, σ é a constante de Stefan-Boltzmann com o valor experimental de $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ (W.m⁻².K⁻⁴), ε é a emissividade da superfície do material, A(m²) é área de transferência de calor, T_2 (K) representa a temperatura do corpo que está posicionado externamente, isto é, que envolve, enquanto T_1 (K) representa o corpo que está internamente, envolvido ε é a emissividade da superfície.

4.1.4 Evaporação

O processo de evaporação ocorre quando as moléculas do líquido próxima a superfície sofrem colisões que aumentam sua energia para um valor acima daquele necessário para superar a energia de ligação da superfície. A energia necessária para sustentar a evaporação vem da energia interna do líquido, que sofre uma redução na sua temperatura. Matematicamente pode-se dizer que o fluxo de calor por evaporação é a soma dos fluxos de convecção e advecção (INCROPERA, 2014).

Conforme Fuentes e Roth (1997), a transferência de calor por evaporação é o principal mecanismo de transferência de calor em um dessalinizador do tipo bandeja, devendo ser maximizada. Essa transferência é baseada no efeito de pressões parciais do vapor na cobertura e no condensado na parte interna do dessalinizador.

O fluxo de calor evaporativo (q_{evap}) é expresso pelo somatório do fluxo de calor convectivo (q_{conv}) e do fluxo de calor advectivo (q_{ad}) conforme pode ser visualizado pela Equação (10).

$$q_{evap} = q_{conv} + q_{ad} \tag{10}$$

4.2 Análise Térmica dos Dessalinizadores Solar

Para realizar a modelagem de um sistema de dessalinização solar existe certas dificuldades por causa das características transientes e variáveis e também o fato da não homogeneidade da intensidade de radiação solar de região para região. O modelo que apresenta produtividade e eficiência em um determinado estado do país, poderá não ocorrer em outros estados do Brasil ou outros países. Os cálculos teóricos para determinação do desempenho do Dessalinizador Solar dependerão do uso de coeficientes empíricos de troca de calor e de massa. Os principais modelos, existentes na literatura, estão baseados nas relações apresentadas por Dunkle (1961).

Para execução da modelagem matemática foram admitidas como base as seguintes hipóteses:

- A temperatura de cada componente é uniforme;
- No início do processo, as temperaturas de todas as superfícies são iguais à temperatura ambiente;
- A condensação ocorre apenas na cobertura de vidro;
- O dessalinizador está livre de vazamentos;
- O dessalinizador opera em regime transiente;

Os resultados numéricos são obtidos resolvendo-se as equações de balanço de energia para cobertura de vidro, lâmina de água salobra, bandeja e isolamento do dessalinizador solar. Nas equações subsequentes, T_v , T_a , T_b e T_{ps} são: temperatura média da cobertura de vidro, temperatura da água salobra, temperatura da bandeja e temperatura do isolante, respectivamente, todas medidas em °C.

Para fins de comparação, foram projetados dois protótipos de dessalinizadores. Um operando de maneira indireta e outro de maneira indireta e direta. O primeiro dessalinizador

que operou de forma passiva é denominado D1 e o segundo que operou de maneira passiva e ativa, foi chamado D2.

4.2.1 Balanço de Energia Térmica no D1

Inicialmente foi feito o balanço térmico global no D1, conforme representado na Figura 14.



Figura 14 - Balanço geral de D1.

Fonte: Adaptado de Kalogirou (2009).

A variação de energia é calculada pela diferença entre a energia que está entrando no sistema (Irradiação) e a energia que está saindo sistema, a convecção entre o vidro e a água, a convecção entre o isolante e o ambiente e por fim a radiação, como expresso na Equação (11).

$$m_{a} \cdot C_{a} \cdot \frac{dI}{dt} = I(t) \cdot \alpha_{v} \cdot A_{v} - \{h_{v-amb} \cdot A_{v} \cdot (T_{v} - T_{amb}) + h_{ps-amb} \cdot A_{ps} \cdot (T_{PS} - T_{amb}) + h_{rad} \cdot A_{v} \cdot (T_{v} - T_{amb})\}$$
(11)

Onde, m_a (kg) é a massa de água, C_a (J.kg⁻¹.K⁻¹) é o calor específico da água, $\frac{dT}{dt}$ (W.s⁻¹) é a variação da temperatura em relação ao tempo, I(t) (W.m⁻²) a intensidade de radiação, α_v absorvidade do vidro, A_v (m²) a área do vidro, h_{v-amb} (W.m⁻².K⁻¹) coeficiente convectivo entre o vidro e o ambiente, h_{ps-amb} (W.m⁻².K⁻¹) coeficiente convectivo entre o isolante e o ambiente, A_{ps} (m²) a área do isolante, h_{rad} (W.m⁻².K⁻¹) coeficiente radiativo, T_v (K) temperatura do vidro, T_{amb} (K) temperatura ambiente e T_{PS} (K) temperatura do isolante.

Após representar o balanço global do D1, será realizado os balanços individuais em cada parte do dessalinizador.

Inicialmente será elaborado o balanço térmico no vidro de condensação. Nesta parte do equipamento é onde ocorre a condensação da água, que após ser evaporada vai para o vidro, que possui temperatura menor, ocorrendo assim a condensação do destilado. O balanço de energia térmica para a cobertura de vidro está representado pela Figura 15.



Figura 15 - Balanço de energia térmica para a cobertura de vidro de D1.

A variação de energia no vidro de condensação é calculada pela diferença entre a energia que está chegando na cobertura de vidro e a energia que está saindo. A irradiação, a evaporação, a radiação e a convecção da água para o vidro estão chegando na cobertura de vidro. A radiação e a convecção vidro ambiente estão saindo do vidro, como expresso na Equação (12).

$$m_{v}.C_{v}.\frac{dT_{v}}{dt} = \alpha_{v}.I(t).A_{v} + h_{ev\,a-v}.A_{v}.(T_{a} - T_{v}) + h_{a-v}.A_{v}.(T_{a} - T_{v}) + h_{rad\,a-v}.A_{v}.(T_{a} - T_{v}) - [h_{v-amb}.A_{v}.(T_{v} - T_{amb}) + h_{rad\,v-amb}.A_{v}.(T_{v} - T_{ambv})]$$
(12)

Em que, m_v (kg) corresponde a massa do vidro, C_v (J.kg⁻¹.K⁻¹) o calor específico do vidro, $\frac{dT_v}{dt}$ (W.s⁻¹) é a variação da temperatura em relação ao tempo, T_a (K) a temperatura da água. O $h_{rad a-v}$, coeficiente de troca de calor radiativo entre a água salobra e a cobertura de vidro, pode ser expresso na Equação (13):

$$h_{rad \ a-\nu} = \frac{\sigma(T_a^2 + T_\nu^2)(T_a + T_\nu)}{\frac{1}{\epsilon_a} + \frac{1}{\epsilon_\nu} - 1}$$
(13)

 ε_a e ε_v são respectivamente a emissividade da água salobra e a emissividade da cobertura de vidro. σ é a constante de Stefan-Boltzman.

De acordo com Aggarwal e Tiwari (1998), o coeficiente convectivo de troca de calor entre a água salobra e a cobertura de vidro h_{a-v} pode ser calculado como na Equação (14):

$$h_{a-\nu} = 0,884 [T_a - T_\nu + \frac{(T_a - T_\nu)(T_\nu + 273, 15)}{268,9x10^3 - P_a}]^{1/3}$$
(14)

Dunkle (1961) descreve que o coeficiente de troca de calor evaporativo entre a água salobra e a cobertura de vidro $h_{ev \, a-v}$, podendo ser definido na Equação (15):

$$h_{ev \, a-v} = 16,273x 10^{-3} x h_{a-v} x \frac{(P_a - P_v)}{(T_a - T_v)}$$
(15)

Onde P_a e P_v são respectivamente as pressões de vapor da água na água salobra e na cobertura de vidro, e são calculadas como sugerido por Tiwari (2002) e enunciado nas Equações (16) e (17):

$$P_a = \exp(25,317 - \frac{5144}{T_a + 273,15}) \tag{16}$$

$$P_{\nu} = \exp(25,317 - \frac{5144}{T_{\nu} + 273,15}) \tag{17}$$

O balanço seguinte será realizado na água salobra, ou seja, na água que passará pelo processo de dessalinização. O balanço de energia térmica está representado pela Figura 16.



Figura 16 - Balanço de energia térmica para a água salobra do D1.

Neste balanço térmico, a energia que está chegando a água salobra é a irradiação que atravessa a cobertura de vidro até chegar na água e a condução que ocorre entre a água e a bandeja. A energia que sai é a convecção, a radiação e a evaporação que ocorre entre a água e o vidro. A diferença entre a energia que chega e que saí da água salobra é a variação de energia que ocorre nesse sistema, como representado na Equação (18):

$$m_{a} \cdot C_{a} \cdot \frac{dT_{a}}{dt} = \tau_{v} \cdot \alpha_{a} \cdot I(t) \cdot A_{a} + \frac{K_{a}}{x_{a}} \cdot A_{a} \cdot (T_{b} - T_{a}) - [h_{ev \, a-v} \cdot A_{v} \cdot (T_{a} - T_{v}) + h_{a-v} \cdot A_{v} \cdot (T_{a} - T_{v}) + h_{a-v} \cdot A_{v} \cdot (T_{a} - T_{v}) + h_{a-v} \cdot A_{v} \cdot (T_{a} - T_{v})]$$

$$(18)$$

Na equação 18, τ_v representa a transmitância do vidro, α_a a absorvidade da água, $K_a e x_a$ denotam, respectivamente, a condutividade térmica (W.m⁻¹.K⁻¹) e a espessura (m) da lâmina de água e T_b (K) a temperatura da bandeja.

A bandeja é o local em que fica armazenada a água para acontecer todo o processo de dessalinização. O balanço de energia térmica para a bandeja é representado pela Figura 17.

Irradiação Condução \downarrow \uparrow Bandeja $m_b.C_b.\frac{dT_b}{dt}$ Condução

Figura 17 - Balanço de energia térmica para a bandeja de D1.

A variação de energia é calculada pela diferença entre a energia que está chegando e a energia que está saindo na bandeja. A irradiação, que atravessa o vidro e a água, e a condução que ocorre com a água estão chegando na bandeja. A condução entre a bandeja e o isolante está saindo do sistema, como expresso na Equação (19).

$$m_b.C_b.\frac{dT_b}{dt} = \tau_v.\tau_a.\alpha_{Al} I(t).A_b + \frac{K_b}{x_b}.A_b.(T_b - T_a)] - [\frac{K_{ps}}{x_{ps}}.A_{PS}.(T_b - T_{PS})]$$
(19)

Os coeficientes $K_{PS} e x_{PS}$ indicam, respectivamente, a condutividade térmica $(W.m^{-1}.K^{-1})$ e a espessura (m) do material de isolamento, τ_a a transmitância da água, α_{Al} a absorvância do alumínio, m_b (kg) a massa da bandeja, C_b (J.kg⁻¹.K⁻¹) a capacidade calorífica da bandeja e $\frac{dT_b}{dt}$ (W.s⁻¹) é a variação da temperatura em relação ao tempo.

Outro balanço realizado acontece no isolante, que é responsável para que não ocorra perdas de calor para o ambiente, aumentando a eficiência do dessalinizador. No isolante, o balanço de energia térmica é representado pela Figura 18.



Figura 18 - Balanço de energia térmica para o isolante de D1.

A variação de energia é calculada pela diferença entre a energia que está entrando no sistema, a condução que ocorre entre a bandeja e o isolante, e a energia que está saindo do sistema, a convecção entre o isolante e o ambiente, como expresso na Equação (20).

$$m_{PS}. C_{PS}. \frac{dT_{PS}}{dt} = \frac{K_{PS}}{x_{PS}}. A_{PS}. (T_b - T_{PS})] - [h_{PS-amb}. A_{PS}. (T_{PS} - T_{amb})]$$
(20)

Em que, m_{PS} (kg) representa a massa, C_{PS} (J. Kg⁻¹. K⁻¹) a capacidade calorífica e $\frac{dT_{PS}}{dt}$ (W.s⁻¹) é a variação da temperatura em relação ao tempo.

4.2.2 Balanço de Energia Térmica no D2

O balanço térmico ocorrido no Dessalinizador 2 está representado na Figura 19.

Figura 19 - Balanço geral do dessalinizador passivo modificado acoplado ao concentrador parabólico.



Fonte: Adaptado de Kologirou (2009).

A variação de energia, nesse balanço térmico, é calculada pela diferença entre a energia que está entrando no sistema a Irradiação que bate direto no vidro do dessalinizador, somado a irradiação refletida para a bandeja do dessalinizador pelo concentrador parabólico, e a energia que está saindo do sistema, a convecção e a radiação entre o vidro e o ambiente, somado a convecção da bandeja com o ambiente, como representado na Equação (21)

$$m_{a}.C_{a}.\frac{dT}{dt} = I(t).\alpha_{v}.A_{v} + C_{i}.I(t).\alpha_{Al}.A_{b} - \{h_{v-amb}.A_{v}.(T_{v} - T_{amb}) + h_{rad}.A_{v}.(T_{v} - T_{amb}) + h_{b-amb}.A_{b}.(T_{b} - T_{amb})\}$$
(21)

Onde C_i é o índice de concentração da irradiação refletida pelo concentrador parabólico.

Os balanços térmicos de cada componente do D2, difere apenas na bandeja, para o D1, pois há recebimento de radiação do concentrador parabólico e perda por convecção na parte inferior da bandeja por não está mais isolada, como representado na Figura 20.





Neste componente do D2, a variação de energia é calculada pela diferença entre a energia que está chegando e a energia que está saindo na bandeja. A irradiação pelo vidro, a irradiação pelo concentrador parabólico e a condução que ocorre entre a água e a bandeja estão chegando na bandeja. A condução entre a bandeja e o isolante e a convecção da bandeja para o ambiente, estão saindo do sistema, como expresso na Equação (22).

$$m_{b}.C_{b}.\frac{dT_{b}}{dt} = [\tau_{v}.\tau_{a}.\alpha_{Al}.I(t).A_{b} + C_{i}.I(t).\alpha_{Al}.A_{b} + \frac{K_{b}}{x_{b}}.A_{b} \times (T_{b} - T_{a})] - [\frac{K_{PS}}{x_{PS}}.A_{PS}.(T_{b} - T_{PS}) + h_{b-amb}.A_{b}.(T_{b} - T_{amb})]$$
(22)

 $K_a \ e \ x_a$ denotam, respectivamente, a condutividade térmica (W.m⁻¹.K⁻¹) e a espessura (m) da lâmina de água e os coeficientes $K_{PS} \ e \ x_{PS}$ indicam, respectivamente, a condutividade térmica (W.m⁻¹.K⁻¹) e a espessura (m) do material de isolamento.

4.2.3 Produção de Água Dessalinizada

A produtividade do destilado pode ser obtida pelas Equações (23) e (24) apresentadas por Tiwari et al. 2007:

$$m = h_{ev \, a-v} \left(\frac{A_c}{A_s}\right) x \left(\frac{T_a - T_v}{L}\right) x \, 3600 \tag{23}$$

$$L = 3161500 - 2409,9 x (T_a + 273)$$
⁽²⁴⁾

Onde, *m* é a produção de água (Kg.m⁻².dia⁻¹), L é o calor latente de vapor de água $(J.kg^{-1})$.

A produção diária é calculada pelo somatório da produção horária ao longo de um dia, como apresentado na Equação (25):

$$\dot{M} = \sum_{i=1}^{N} m \tag{25}$$

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Os projetos e as construções dos protótipos foram realizados na cidade de Campina Grande - Paraíba, a uma latitude 7°13'11" sul e longitude 35°52'31" oeste, com altitude média de 550 metros acima do nível do mar, 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).

A metodologia utilizada para a realização do presente trabalho consistiu no levantamento bibliográfico sobre dessalinização solar e coletores parabólicos compostos, identificação e pesquisa dos materiais a serem utilizados no projeto, análise físico-químico do destilado, tratamentos dos dados.

A partir desse estudo e da identificação dos materiais, foram construídos os protótipos de dois dessalinizadores visando atender as condições necessárias para a tecnologia proposta, de maneira a ter fácil operação, menor perda de calor, resistência à corrosão e boa durabilidade. Além disso, foram realizados testes de desempenho (preliminares) visando a adequação do sistema e a escolha dos materiais mais viáveis para a função, de maneira a obter boa eficiência e baixo custo. Para execução dos protótipos, optou-se por um dessalinizador do tipo dupla inclinação (D1) e outro dessalinizador solar do tipo parabólico modificado (D2).

5.1 Caracterização Físico-químicas das Águas

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 das águas provenientes da alimentação e do dessalinizado estão preconizadas no *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (BAIRD et al., 2017). No Quadro 1 estão apresentados os parâmetros e os métodos utilizados para as análises consideradas.

Parâmetro	Unidade	Métodos
pH	adimensional	Potenciométrico
Condutividade elétrica	μS.cm ⁻¹	Conduivímetro
Cloreto	mg Cl ⁻ .L ⁻¹	Mohr
Dureza	mg CaCO ₃ .L ⁻¹	Titulométrico - EDTA
Alcalinidade	mg CaCO ₃ .L ⁻¹	Titulométrico com indicador
Turbidez	NTU	Nefelométrica
Sódio	mg Na ⁺ .L ⁻¹	Fotometria de chama
Potássio	mg K ⁺ .L ⁻¹	Fotometria de chama
Temperatura	°C	Termopar

Quadro 01 - Metodologia das análises

5.2 Protótipo dos Dessalinizadores Solar

Foi projetado e construído dois modelos de dessalinizadores via energia solar os quais foram nomeados D1 e D2. O D1 é um dessalinizador passivo com cobertura tipo dupla inclinação totalmente isolado e o D2 é um dessalinizador composto da junção de dois tipos de equipamento conhecidos na área de dessalinização de água via energia solar, que consiste de uma calha parabólica modificada com a introdução de um dessalinizador do tipo dupla inclinação no foco da parábola. O dessalinizador passivo que foi introduzido no foco da parábola têm as mesmas características do D1. Os dois modelos de dessalinizadores (1 e 2) via energia solar foram projetados com o intuito de realizar uma análise comparativa entre eles e, desta forma, comprovar o aumento da eficiência do dessalinizador solar pela introdução da calha parabólica modificada.

5.2.1 Construção do Dessalinizador D1

O primeiro dessalinizador solar construído tem cobertura de vidro em forma de dupla inclinação, sendo considerado um dessalinizador passivo, como está apresentado na Figura 21.



Figura 21 - Dessalinizador passivo com cobertura tipo dupla inclinação totalmente isolado.

O material escolhido para a construção da bandeja do Dessalinizador foi o alumínio de 0,50 mm de espessura. O mesmo é de forma retangular de dimensão de 200 mm de largura por 1500 mm de comprimento e 100 mm de altura e pintado de preto fosco para que haja maior absorção de calor. É nesta bandeja em que fica armazenada a água salobra para que ocorra o processo de dessalinização, ou seja, de evaporação e condensação no vidro.

Soares (2004) realizou testes para os ângulos de 15°, 25°, 30° e 45°, concluindo que a angulação de 25° obteve melhores resultados, sendo assim sugerido como uma boa inclinação para a captação da energia solar em todo o território nacional. Para a cobertura foi utilizado o vidro de 3 mm. A cobertura de vidro foi vedada, objetivando evitar vazamento de vapor, provocando, dessa maneira, o efeito estufa.

A bandeja foi coberta com a estrutura de vidro, calhas nas laterais internas para o recolhimento da água condensada no vidro. O destilado recolhido pela calha, ao sair do dessalinizador, é contabilizado em uma proveta. As laterais externas e a base do dessalinizador foram isoladas utilizando o poliestireno expandido (EPS) conhecido como isopor, de 25 mm de espessura, para evitar perdas de calor por convecção com o ambiente.

5.2.2 Construção do Dessalinizador D2

O segundo dessalinizador construído neste trabalho é composto de um dessalinizador passivo do tipo bandeja modificado acoplado a um concentrador parabólico. A parte passiva deste dessalinizador foi fabricado igual ao D1, excetuando a parte do isolamento, pois neste há o isolamento apenas nas laterais para que no fundo da bandeja haja absorção de calor por irradiação oriundo da reflexão do concentrador parabólico. Para a fabricação do concentrador foi utilizado, como material, o aço inoxidável.

Um dessalinizador solar parabólico é descrito como um refletor em forma de depressão que possui uma seção transversal parabólica com uma inclinação afetada pelo ângulo da borda. A parábola concentra a radiação solar refletida ao longo de um dessalinizador passivo linear que percorre todo o comprimento. A fim de coletar este calor, o dessalinizador passivo linear, que é chamado de receptor, é posicionado ao longo do comprimento da calha em seu foco. Este dessalinizador é projetado para absorver a maior parte da energia focada nele, com o intuito de aquecer o dessalinizador com uma temperatura mais alta.

Para a construção do concentrador parabólico, foi utilizado como base as informações contidas na modelagem matemática do dessalinizador. O concentrador solar construído é do tipo parabólico refletor, em que foi utilizada a Equação 1. Em que o foco da parábola fica situado a 200 mm de altura, convergindo toda a radiação incidente na parte inferior do dessalinizador fixado paralelamente ao foco da parábola. O ângulo de borda (ψ) corresponde a 50°, o comprimento do coletor (l) é de 1500 mm e a abertura do coletor (a) é de 1000 mm. O ângulo de inclinação foi ajustado em 15° a cada hora, permitindo que o concentrador acompanhe o movimento do sol, preservando sempre a posição perpendicular dos raios solares. O D2 está representado na Figura 22.





5.3 Operação do Sistema

Os dessalinizadores foram alimentados com água salgada coletada em dois poços no Sítio Poço de Pedra e Escurinha de Baixo, no município de Juazeirinho-PB. A operação dos equipamentos foi realizada em batelada. Os dessalinizadores D1 e D2 foram operados na mesma hora e nas mesmas condições ambientais. Para estudar os experimentos, foram definidos como fator de operação a espessura da lâmina de água salobra.

Foram feitas medições de temperatura na água, no vidro, na bandeja e também foi medido a temperatura ambiente nos dessalinizadores utilizando Termopares do tipo PT-100 de ligas metálicas. A quantidade de destilado foi medida com a utilização de uma proveta graduada. A medição da radiação foi realizada através do radiômetro SL 200 17957 da marca KIMO, este ficou fazendo leituras ininterruptas durante todo o período de funcionamento dos dessalinizadores.

Os experimentos foram operados, no período de agosto a dezembro de 2019, no horário das 07:00 às 17:00 horas, as medições das variáveis aconteceram a cada 30 minutos. Para tratamento dos dados e realização dos balanços, foram utilizados os resultados experimentais e equações da literatura e para a realização da modelagem foi utilizado EXCEL.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção foram apresentadas as informações contidas na base de dados organizadas em Tabelas do Excel e, posterior, análise dos perfis de temperatura, análise da influência de radiação, análise térmica dos coeficientes de transferência de calor, balanço energético, comparativo de produção teórica e experimental e caracterizações físico-químicas da água.

6.1 Perfis de Temperatura em Função da Espessura da Lâmina de Água

As variações de temperatura interna da cobertura de vidro, da temperatura da água e a temperatura ambiente em função da radiação incidente para o D1 e D2, para as lâminas estudadas foram apresentadas a seguir. Os perfis de temperatura e radiação com lâminas de 1,0 cm, estão apresentados para D1 (Figura 23) e D2 (Figura 24).



Figura 23 - Perfis de temperatura e radiação, com lâmina de 1 cm, para D1.

Na Figura 23, ao longo do experimento, a temperatura da água salobra sofre variações. Inicia as 07:00 horas com a temperatura de 26,2 °C e atinge maior temperatura às 13:30 horas, alcançando 76 °C, uma hora após o momento de maior incidência de radiação solar, 1172 W.m⁻². Na Figura 24 que representa D2, a água salobra varia de 26,2 °C às 07:00 horas a 90 °C às 13:30 horas, momento em que a radiação solar é mais incidente no dessalinizador. Essa temperatura foi muito elevada, devido a incidência de radiação vinda do Concentrador Cilíndrico Parabólico (CPC). As temperaturas da água e do vidro apresentam valores próximos, entre si, tanto para D1 quanto para D2, ocasionando perfis similares, devido a decorrência da radiação solar direta. Resultado próximo ao obtido, em D1, foi retratado por Morad et al. (2017) estudaram um dessalinizador solar híbrido, que utiliza um condensador integrado ao coletor solar de placa plana, em que a temperatura da água alcançou 75 °C.

Figura 24 - Perfis de temperatura e radiação, com lâmina de 1 cm, para D2.



Os perfis de temperatura e radiação com lâminas de 1,5 cm, podem ser visualizados para D1 (Figura 25) e D2 (Figura 26). Na Figura 25, que se refere a D1, a temperatura da água salobra inicia às 07:00 horas com 26 °C e atinge maior temperatura ao meio dia, chegando a 64 °C, uma hora depois que a radiação solar é a mais intensa durante o ensaio, chegando a 973 W.m⁻². O perfil da temperatura do vidro, ao longo do experimento, é bastante semelhante ao da água salobra e a temperatura ambiente sofre pouca variação, no início do experimento foi de 26 °C, que é o valor mínimo e o máximo de 35,1 °C às 11:30 horas. Na Figura 26, referente a D2, a temperatura da água atinge seu ápice às 09:30, alcançando 80°C, momento em que a radiação solar direta está incidindo sobre os dessalinizadores. Abderachid e Abdenacer (2013), estudaram um dessalinizador solar simétrico, e nos experimentos, a radiação solar atingiu 978,57 W.m⁻² e temperatura máxima de água de 60°C, valores estes, bem próximos aos obtidos quando da utilização do D1.



Figura 25 - Perfis de temperatura e radiação, com lâmina de 1,5 cm, para D1.

Figura 26 - Perfis de temperatura e radiação, com lâmina de 1,5 cm, para o D2.



A Figura 27 e 28 representam os perfis de temperatura da água, do vidro e do ambiente em relação a radiação solar para uma lâmina de 2,0 cm, para D1 e D2, respectivamente. Na Figura 27 o perfil da temperatura da água salobra inicia às 07:00 horas com 25,4 °C e atinge o valor máximo de 62°C às 12:30 horas, meia hora após a maior incidência de radiação solar. Na Figura 28, a temperatura da água salobra chega ao valor máximo no mesmo horário, atingindo 72°C. O perfil da temperatura ambiente varia de 25,9 °C a 39°C no decorrer do dia e o perfil de temperatura do vidro acompanha o perfil da temperatura da água salobra durante todo o experimento. Rabhi et. al (2017) fizeram um

estudo experimental de um dessalinizador solar do tipo dupla inclinação, e obtiveram temperatura da água de 70°C às 13:00h, valores estes, semelhantes ao encontrado nesse estudo.



Figura 27 - Perfis de temperatura e radiação, com lâmina de 2,0 cm, para D1.

Figura 28 - Perfis de temperatura e radiação, com lâmina de 2,0 cm, para D2.



6.2 Produção de água dessalinizada

A produção de água dessalinizada com lâminas de 1,0 cm para D1 e D2 estão nas Figuras 29 e 30, respectivamente.

Na Figura 29, no D1, ao longo do dia, mostra que o volume de destilado acompanha a variação de temperatura da água, sendo evidenciado às 12:30 horas em que a temperatura chegou a 76 °C, e quantidade de destilado na medição seguinte também alcançou a maior produção, atingindo 260 mL.m⁻². Observa-se também que a produção diária de destilado nesse dia foi de 2.333,3 mL.m⁻². dia⁻¹. Na Figura 30, referente ao D2, a maior produção instantânea de água foi ás 10:30 horas, obtendo 550 mL.m⁻², momento em que a radiação solar aumenta consideravelmente no dia, e uma produção acumulada diária de 4.133,3 mL.m⁻². dia⁻¹, resultado superior ao encontrado por Zeinab et. al (2007) teve uma produção de 2.750,0 mL.m⁻². dia⁻¹, utilizando o concentrador parabólico com um tubo para aquecer a água de um dessalinizador solar.







Figura 30 - Produção de água dessalinizada, com lâmina de 1cm, para D2.

Ns Figuras 31 e 32 estão apresentados os perfis de temperatura da água, do vidro e do ambiente, com a produção instantânea e a produção acumulada de água, para lâmina de 1,5 cm, para D1 e D2, respectivamente. Na Figura 31, a maior produção instantânea de água dessalinizada foi de 153,1 mL.m⁻² e a produção acumulada de água chegou a 1.486,6 mL.m⁻².dia⁻¹. Na Figura 32, que apresenta D2, a maior produção instantânea atingiu 266,7 mL.m⁻², na medição seguinte a maior temperatura de água registrada no dia que foi de 75 °C. A produção acumulada de água dessanilizada, para a lâmina de 1,5 cm, foi de 2.633,4 mL.m⁻². dia⁻¹, valor superior ao encontrado por Fonseca et. al (2005), que utilizaram um dessalinizador solar do tipo bacia plano retangular e alcançou a produtividade de 2.200 mL.m⁻².dia⁻¹.



Figura 31 - Produção de água dessalinizada, com lâmina de 1,5 cm, para D1.

Figura 32 - Produção de água dessalinizada, com lâmina de 1,5 cm, para D2.



As Figura 33 (D1) e 34 (D2) representam, para a lâmina de 2,0 cm, os perfis de temperatura e a produção de água. Na Figura 33, pode-se observar que a maior produção instantânea foi de 146,7 mL.m⁻² às 13:00 horas e a produção acumulada de água em D1, para a lâmina de 2,0 cm, chegou à 1413,4 mL.m⁻².dia⁻¹. A Figura 34 apresenta dados de D2, em que a maior produção de água instantânea foi de 216,7 mL.m⁻² acompanhando a incidência de radiação solar do dia, e a produção acumulada de água foi de 2366,7 mL.m⁻².dia⁻¹. Phadatare e Verma (2007), estudaram a influência da profundidade da lâmina de água do dessalinizador e

obtiveram a quantidade máxima de destilado em 2.100 mL.m⁻².dia⁻¹, valor próximo ao encontrado neste trabalho. Gnanaraj e Velmurugan (2019) em um estudo experimental para um dessalinizador bandeja com dupla inclinação convencional, obtiveram um destilado total de 1.880 mL.m⁻².dia⁻¹.



Figura 33 - Produção de água dessalinizada, com lâmina de 2,0 cm, para D1.

Figura 34 - Produção de água dessalinizada, com lâmina de 2,0 cm, para D2.



6.3 Produção de Água em Função da Radiação Solar

Nas Figuras 35, 36 e 37 estão apresentadas a produção de água em função da hora e da radiação solar incidente nos dessalinizadores D1 e D2, para as lâminas de 1,0; 1,5 e 2,0 cm, respectivamente.

A Figura 35 representa a produção de água dessalinizada em relação a radiação incidente nos dessalinizadores D1 e D2, para lâmina de 1,0 cm. Ao observar a Figura, percebe-se que prevaleceu a radiação solar direta, deste modo, a produção de água em D2 foi melhor se comparado a D1. A melhor produtividade, em D2, deu pelo fato de a lâmina de água ser a menor e, assim, a água atingir temperaturas maiores em pequenos intervalos de tempo, devido a incidência da radiação solar.

Figura 35 - Produção e radiação, com lâmina de 1cm.



A Figura 36 apresenta a produção de água em função da hora e da radiação solar incidente em D1 e D2, para lâmina de 1,5 cm. Pode-se observar que como foi um dia em que teve o domínio da radiação direta. No intervalo de tempo das 12:30 e 15:30 horas houve prevalência de radiação difusa devido a existência de muitas nuvens, sendo assim, D1, embora sem o acoplamento parabólico, alcançou uma melhor produção nesse intervalo, quando comparado a D2. Também houve uma redução na produtividade dos dessalinizadores nesse intervalo de tempo. Em D2, às 13:30 horas houve uma redução na produção, em que atingiu 33,3 mL.m⁻², este fato ocorreu devido a produção de água ser influenciada diretamente

pela radiação solar e também devido a passagem de nuvens ocasionando uma radiação indireta, ou pela passagem forte de um vento que diminui consideravelmente a temperatura da bandeja e consequentemente a temperatura da água.



Figura 36 - Produção e radiação, com lâmina de 1,5 cm.

Para a lâmina de 2,0 cm, a produção de água dessalinizada versus a radiação solar, foi representada pela Figura 37. Nesse experimento houve prevalência de radiação direta até às 12:00 horas, logo após a radiação solar começou a decair. Por ser a maior lâmina do estudo, obteve menor produção, pois o aumento da temperatura da água é mais lento e como a produção de água está relacionada com esta temperatura, consequentemente tem a menor produtividade comparada as demais lâminas estudadas. Bouchekima (2002) com seu estudo de destilador na Argélia, com temperaturas médias, no verão, em torno de 40°C, atingiu na água a temperatura de 65 a 75°C. Observou que o aumento da produção de água destilada estava diretamente influenciado pela radiação solar e temperatura da água.



Figura 37 - Produção e radiação, com lâmina de 2,0 cm.

De maneira geral, analisando as Figuras 35, 36 e 37, percebe-se que a produção de água, de maneira geral, foi diretamente proporcional e dependente de fatores como a temperatura da água, temperatura ambiente e a radiação solar. Como foram dias com boa incidência de radiação direta, ficou explícito que a produção em D2 foi maior que a de D1, este fato se deu pela incidência da radiação no concentrador parabólico irradiando para o dessalinizador que se encontra no foco do concentrador.

6.4 Coeficientes de Transferência de Calor Convectivo, Evaporativo e Radiativo nos Dessalinizadores

A análise dos coeficientes de transferência de calor de convecção, radiação e evaporação em D1 e D2 foram abordados nesse tópico. As curvas de convecção estão relacionadas com o movimento do fluido, devido ao aumento da temperatura e o deslocamento do movimento do fluido horizontalmente ou verticalmente. As curvas de radiação estão relacionadas diretamente com a temperatura da água salobra, da cobertura de vidro e da emissividade do vidro e da água. As curvas de evaporação, tem valores maiores que os anteriores e geralmente é mais sensível a variação de temperatura. O coeficiente de radiação, convecção e evaporação foram calculados com base nas seguintes Equações 13, 14 e

Na Figura 38 são representadas as curvas dos coeficientes de convecção, evaporação e radiação para D1 e D2, com lâmina de 1,0 cm. Para D1 o coeficiente de evaporação atinge seu ápice às 12:30 horas no valor de 57,2 W.m⁻².°C⁻¹. As curvas dos coeficientes de convecção e radiação variam pouco, chegando a 2,4 e 8,2 W.m⁻².°C⁻¹, respectivamente. Para D2 as curvas dos coeficientes de convecção e radiação atingem a 3,0 e 9,4 W.m⁻².°C⁻¹, respectivamente. A curva do coeficiente de evaporação oscila bastante e atinge seu valor máximo, no mesmo horário, de 101,6 W.m⁻².°C⁻¹, evidenciando que os coeficientes de transferência de calor em D2 são maiores que em D1, devido a utilização do CPC que concentra a radiação solar na parte inferior da bandeja em D2. . Al-Sulttani et.al (2017) estudaram os coeficientes de transferência de calor para um dessalinizador com dupla inclinação híbrido e obtiveram um coeficiente de evaporação de 66,61 W.m⁻².°C⁻¹.

Figura 38 - Coeficientes de convecção, radiação e evaporação, com lâmina de 1,0 cm.



Na Figura 39, estão apresentados os valores dos coeficientes de convecção, radiação e evaporação de D1 e D2, para lâmina de 1,5 cm. Em D1, o coeficiente de convecção e radiação não sofrem muita variação, ficando na faixa de 0,9 a 2,1 W.m⁻².°C⁻¹ e 5,3 a 7,4 W.m⁻².°C⁻¹, respectivamente e o coeficiente de evaporação atinge 31,1 W.m⁻².°C⁻¹ às 12:30 horas, momento com maior variação de temperatura entre a água e a cobertura de vidro no dia do experimento. Em D2, por alcançar temperaturas mais elevadas, em relação a D1 com a mesma lâmina de água, o coeficiente de evaporação desse dessalinizador também apresenta valores

maiores, chegando a 50,9 W.m⁻².°C⁻¹. A curva de convecção chega a 2,2 W.m⁻².°C⁻¹ e a de evaporação a 8,3 W.m⁻².°C⁻¹.



Figura 39 - Coeficientes de convecção, radiação e evaporação, com lâmina de 1,5 cm.

Os coeficientes de transferência de calor para a lâmina de 2,0 cm são ilustrados na Figuras 40. Para D1, a curva de evaporação alcança 26,8 W.m⁻².°C⁻¹, o de convecção 2,04 W.m⁻².°C⁻¹, valor máximo às 13:00 horas e o coeficiente de radiação 7,4W.m⁻².°C⁻¹, às 12:30 horas. Em D2 os coeficiente de transferência de calor atingem valores máximos às 12:30 horas, chegando a 50,96 W.m⁻².°C⁻¹ o coeficiente de evaporação, 7,86 W.m⁻².°C⁻¹ o coeficiente de radiação e 2,91 W.m⁻².°C⁻¹ o coeficiente de convecção. Resultados próximos ao encontrado por Setoodeh et al. (2011), que analisaram os coeficientes de transferência de calor em um dessalinizador do tipo bandeja e encontraram o coeficiente evaporativo, utilizando o método de Dunkle, próximo a 30 W.m⁻².°C⁻¹.

A partir dos resultados obtidos, foi possível observar que as variações nos coeficientes de transferência de calor foi semelhante ao valor da variação de temperatura, porque tanto o coeficiente de convecção quanto o coeficiente de evaporação são dependes das temperaturas da água e do vidro. A temperatura da água sofre influência da lâmina de água, deste modo, quanto maior a espessura da lâmina, menor os coeficientes de transferência de calor.



Figura 40 - Coeficientes de convecção, radiação e evaporação, com lâmina de 2,0 cm.

6.5 Análise térmica dos dessalinizadores solar

Os perfis de equilíbrio energético no vidro, na bandeja e na água foram calculados com base nas Equações reportadas por Elango et al. (2015) e descritas pelas seguintes Equações 12, 18, 19 e 22, para os dessalinizadores (D1 e D2), que estão apresentados nas Figuras 41, 42 e 43. Ao realizar a análise térmica dos dessalinizadores, verificando a temperatura teórica e a temperatura experimental em cada componente, foi possível observar que independente da lâmina de água (L), seja 1,0, 1,5 ou 2,0 cm, para D1, os perfis das temperaturas, do vidro e da bandeja, teóricas comparado aos valores dos perfis de temperatura experimentais apresentam boa concordância, como pode ser observados nas Figuras 41 e 42. Nestas Figuras, também pode ser verificado que quanto menor a lâmina de água, mais próximo se encontra os perfis teóricos dos experimentais. Já os valores dos perfis de temperatura da água, nas horas iniciais de cada experimento, apresentaram valores equiparados, além disso ocorreu uma pequena diferença de valores, provavelmente devido a influência direta do coeficiente global de transferência de calor, conforme observado na Figura 43.



30

20

08:00

09:30

Figura 41 - Perfis de temperatura em D1 do vidro: (O) teórico e (Δ)experimental.

Figura 42 - Perfis de temperatura em D1 da bandeja: (O) teórico e (Δ) experimental.

11:00

12:30

Horário de operação (h)

14:00

15:30

17:00





Nas Figuras 44, 45 e 46 estão representadas as curvas de temperaturas teóricas e experimentais para cada componente de D2. Pode-se observar que por ter o auxílio do CPC as temperaturas da bandeja e, consequentemente, da água são maiores, decorrentes da incidência de radiação que se concentra ao longo da bandeja que está localizada no foco do concentrador. Nas Figuras 44 e 45 as curvas de temperaturas teóricas e experimentais estão bem próximas, devido a parcela da irradiação oriunda do concentrador. Na Figura 46, os perfis de temperatura da água encontram-se distantes devido, a presença do CPC que afetou diretamente na elevação da temperatura do modelo.

Figura 44 - Perfis de temperatura em D2 do vidro: (O) teórico e (Δ) experimental.





Figura 45 - Perfis de temperatura em D2 da bandeja: (O) teórico e (Δ) experimental.

Figura 46 - Perfis de temperatura em D2 da água: (O) teórico e (Δ) experimental.



6.6. Produção de Água Teórica

A produção de água teórica dos dessalinizadores (D1 e D2), foi calculada com base na Equação reportada por Elango et al. (2015) e apresentada na Equação 23. A Figura 47 representa as curvas de produção de água teórica e experimental para a lâmina de 1,0 cm em

D1 e D2. É notório, que as curvas teóricas e experimentais, dos dois dessalinizadores, apresentam perfis similares, devido a incidência de radiação solar. Pode-se observar que ao longo do experimento, as curvas de produção experimental, relacionadas com D1, apresentam valores superiores aos da curva de produção teórica, enquanto que em D2, ocorre o inverso, a curva de produção teórica é maior que a curva de produção experimental. Os maiores picos de produção de água ocorrem em D2, devido a incidência de radiação solar ser maior, pois chega ao equipamento diretamente e pelo auxílio do CPC.

Figura 47 - Produção de água teórica versus experimental para lâmina de 1,0 cm.



A produção de água teórica e experimental para lâmina de 1,5 cm, estão representadas na Figura 48. É possível verificar que, para D1, as curvas de produção teórica e experimental possuem configurações semelhantes, além disso, é perceptível que os valores experimentais estão acima dos valores teóricos. Em D2, as curvas de produção teórica e experimental são superiores a D1, este fato é devido o auxílio do CPC, pois as temperaturas da água são maiores nesse dessalinizador e, consequentemente, foi maior a produção.



Figura 48 - Produção de água teórica versus experimental para lâmina de 1,5 cm.

Na Figura 49 são representadas as curvas da produção de água teórica e experimental, dos dois dessalinizadores, para lâmina de 2,0 cm. Pode-se observar que no decorrer do experimento, a curva da produção experimental é superior a curva de produção de água teórica nos dois dessalinizadores e a produção de água é menor, quando comparada as demais lâminas de água, isso ocorre pois quando a radiação solar é mais intensa o aumento da temperatura da água ocorre mais rapidamente e quanto menor a lâmina, mais rápido o aquecimento da água e consequentemente, maior a produção, ou seja, para uma lâmina maior, o aquecimento será mais lento, logo, menor também será a produção de água, isso quando é levado em consideração um mesmo intervalo de tempo das demais lâminas.




6.7 Monitoramento da qualidade da água obtida

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 do Sítio Poço de Pedra e Sítio Escurinha de Baixo no município de Juazeirinho-PB. 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. Na Tabela 1 estão expostos a média dos parâmetros físico-químicos da água bruta e dessalinizada e em Anexo encontram-se os resultados dos vários experimentos que foram realizados.

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

PARÂMETRO	A.B.1*	A.D.1*	A.D 2.*	A.B.2*	A.D.1	A.D 2.	V.M.P.**
pH	7,7	6,2	6,36	7,8	6,15	6,6	6,0 - 9,5
Condutividade elétrica (µS.cm ⁻¹)	11.160,0	10,87	22,37	11.030,0	29,88	48,53	-
Cloreto (mg Cl L ⁻¹)	5.538,0	35,5	35,5	4.260,0	35,5	28,4	250,0
Dureza (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	375,0	20,0	20,0	570,0	45,0	35,0	500,0
Alcalinidade (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	531,0	21,0	37,0	480,0	24,0	43,0	100,0
Turbidez (uT)	2,0	2,0	2,0	3,0	3,0	3,0	5,0
Sódio (mg Na ⁺ .L ⁻¹)	1200,0	1,0	0,0	1200,0	0,0	0,0	200,0
Cor (uH)	6,7	5,8	5,1	8,1	7,6	6,7	15,0

*A.B.1 = Água Bruta do Sítio Poço de Pedra; A.B.2 = Água Bruta do Sítio Escurinha de Baixo; A.D.1= Água Dessalinizada D1, A.D.2= Água Dessalinizada D2;

**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 através 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), potencial hidrogeniônico o pH, evidencia a concentração de íons de hidrgênio, relacionando-o com a alcalinidade, neutralidade ou acidez da água. Os valores encontrados para a água bruta de 7,7 e 7,8 para as águas brutas, 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. O valor encontrado foi de 11.160,0 e 11.030,0 μ S.cm⁻¹ para a água bruta, e que foram superiores ao encontrado por Filho et. al (2019) de 1.321,3 μ S.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 99,9% no D1 e 99,79% no D2, para a água bruta do Sítio Poço de Pedra e 99,73% no D1 e 99,56% no D2, para a água bruta do Sítio Escurinha de Baixo.

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 subterrâneas 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 Sítio Poço de Pedra a água bruta obteve 5.538 mg Cl⁻.L⁻¹ e a água dessalinizada 35,5 mg Cl⁻.L⁻¹, para D1 e D2, uma redução de 99,36% do teor de cloretos na água. Já o Sitio Escurinha de Baixo a redução foi de 99,16% para D1 e 99,33% para D2, o teor de cloretos na água bruta foi 4260 mg Cl⁻.L⁻¹ e na água dessalinizada 35,5 e 28,4 mg Cl⁻.L⁻¹ para D1 e D2, respectivamente.

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 mg CaCO₃.L⁻¹, com isso a única água bruta que estava fora do padrão foi a do Sítio Escurinha de Baixo, no valor de 570 mg CaCO₃.L⁻¹ e apresentou uma redução de 92,1% e 93,86% para D1 e D2. A água bruta do Sítio Poço de Pedra apresentou valor 375 mg CaCO₃.L⁻¹, havendo uma redução de 94,67% da dureza na água de D1 e D2. 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 encontrou um valor médio de 415 mg CaCO₃.L⁻¹.

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 mg CaCO₃.L⁻1. Para a água bruta do Sítio Poço de Pedra, houve uma redução de 95,48% para D1 e 91,90% para D2. Para a água bruta do Sítio Escurinha de Baixo, houve uma redução de 95,62% para D1 e 92,29% para D2. 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 do presente estudo, excetuando a água bruta do Poço P1, todas as outras encontram-se dentro dos padrões estabelecidos pela Portaria. Silva et al. (2017), analisaram os parâmetros físico-químicos de águas utilizadas para consumo em poços artesianos na cidade de Remígio- PB, e constataram que as amostras atenderam ao padrão vigente, com exceção de uma que apresentou um valor de 500 uH para cor.

Além disso, o parâmetro mais significativo foi o de sódio, pois foi trabalhado com uma água com alto ter de salinidade, no valor de 1200 mg Na⁺. L⁻¹ para as águas brutas, havendo uma redução de 99,91% de D1, e de 100% para D2. 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.

Assim, diante dos resultados obtidos, tem-se que a proposta de utilização dos dessalinizadores projetados apresenta potencial e viabilidade para aplicação no semiárido paraibano, sendo então importantes vias de potabilização das águas salobras típicas dessa região nordestina. Dessa forma, contribuindo para as pesquisas na área e para os formuladores de políticas públicas, no sentido de direcionar medidas para alavancar o desenvolvimento sustentável e ambientalmente correto, como é o aproveitamento da energia solar.

7. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, foi possível chegar as seguintes conclusões:

Uma visão geral do procedimento de modelagem foi apresentada para o dessalinizador solar tipo parabólico modificado e também foi reportado os parâmetros operacionais significativos do sistema que afetam o desempenho como: a espessura da lâmina de água, o uso do concentrador solar parabólico e a incidência de radiação solar;

A espessura da lâmina de água e a utilização do Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico foram fundamentais para melhorar a produtividade do dessalinizador solar com dupla inclinação. Deste modo, foi verificado que D2 com lâmina de 1,0 cm apresentou melhor produtividade diante das demais lâminas e de todas as lâminas de D1, atingindo 4.133,3 mL.m⁻².dia⁻¹. De maneira geral, por meio da modelagem realizada nos dessalinizadores, foi constatado uma maior eficiência para o protótipo de D2;

Foi possível verificar que as curvas de produção de água experimentais foram maiores que as curvas de produção teóricas, como também, os valores de produção em D2 foram maiores que D1. Este fato ocorreu devido a utilização do CPC, que concentra a radiação, aumentando desta forma, a temperatura da água, e consequentemente, a produção de água dessalinizada;

Os dados evidenciaram que os protótipos desenvolvidos são viáveis para utilização no semiárido paraibano, com destaque para o dessalinizador solar tipo parabólico modificado, visto que foi possível com os mesmos dessalinizar a água salobra de forma eficiente, deixando-a dentro dos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria vigente do Ministério da Saúde. Além disso, por se tratar de um dessalinizador que utiliza a energia solar para operação, o mesmo pode ser aplicado em comunidades remotas que não possuem energia elétrica.

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.

ALMEIDA, G.S.M. **Pesquisa e Desenvolvimento de um Sistema Termoelétrico do tipo Linear Fresnel Reflector**. 2013. Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis – Conversão Elétrica e Utilização Sustentável) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

AGGARWAL, S.; TIWARI, G.N. Convective Mass Transfer in a Double-Condensing Chamber and a Conventional Solar Still. **Desalination**, v. 115, p. 181-188, 1998.

ALVES, G. A. Uso da eletrólise para geração de energia elétrica e/ou dessalinização. 2017. 113p. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

AL-SULTTANI, A.O., AHSAN, A., RAHMAN, A., NIK DAUD, 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.

AKASH, B.A., MOSEN, M.S., OSTA, O., ELAYAN. Y. Experimental evaluation of a singlebasin solar still using different absorbing materials. **Renewable Energy**, Jordan, v. 14, p. 307-310, 1998.

ANA. Agência Nacional das Águas (Brasil). A questão da água no Nordeste. Brasília, 2012.

ARAÚJO, A.C.S.P.A. **Contribuição para o Estudo da Viabilidade/Sustentabilidade da Dessalinização enquanto Técnica de Tratamento de Água.** 2013. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia do Ambiente, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Universidade Nova de Lisboa.

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.

BARBOSA, A. Avaliação de um sistema de colunas de leito fixo utilizando xisto retortado e pó da casca de coco para remoção de óleos e graxas e arsênio de efluente industrial. 2011. 96f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

BEZERRA, M.A.S. Estudo de viabilidade de destilador Solar para polimento de águas produzidas de petróleo. 2010. 133p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade de Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

BIRD, R.B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E.N. Fenômenos de Transporte. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

BOUKAR, M.; HARMIM, A. Effect of climatic conditions on the performance of a simple basin solar still: a comparative study. **Desalination**, Adrar, Algérie, v. 137, p.15-22, 2001.

BOUCHEKIMA, B.A. A solar desanination plant for domestic water needs in arid areas of South Algeria. **Desalination**, v.153, p.65-69, Ouargla, Algeria, 2002.

BRASIL. Portaria de consolidação de nº 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.

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

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

CONAMA, Resolução n° 357, de 17 de março de 2005 que 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. Publicada Publicada no DOU em 18 de março, 2005.

CHAIBI, M.T. An overview of solar desalination for domestic and agricultura water needs in remote arid areas. **Desalination**, v.127, p. 119-133, Tunisia, 2000.

DUFFIE. A. J., BECKMAN. A. W., Solar Engineering of Thermal Processes, Fourth Edition, John Wiley and Sons, Inc, 2013.

DUNKLE, R. V. Solar Water Distillation: The Roof Type Still and a Multiple Effect Diffusion Still. International Developments in Heat Transfer, ASME, Proc. International Heat Transfer, Part V, University of Colorado, Melbourne: CSIRO, p. 895-902, 1961.

ELANGO, C., GUNASEKARAN, N., SAMPATHKUMAR, K. Thermal models of solar still-A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 47, p. 856 - 911, 2015.

ELKADER, M.A. An investigation of the parameters involved in simple solar still with inclined yute. **Renewable Energy**, Port Said , Egypt, v. 14, n. 1-4, p.333-338, 1998

EL-SEBAII, A.A.; EL-BIALY, E. Advanced designs of solar desalination systems: a review, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 49, p. 1198–1212, 2015.

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 sitio alegre no município de Lagoa Seca-PB. Águas Subterrâneas – Seção Estudos de Caso e Notas Técnicas, 2019.

FRANCHITO, S.H.; FERNANDEZ, J.P.R.; PAREJA, D. Surrogate climate change scenario and projections with a regional climate model: impact on the aridity in South America. **American Journal of Climate Change**. p. 474 - 489, 2014.

FONSECA, S.; RODRIGUES, J.E.L.; VILLAFANE, P.; HECHAVANA, J.L.S. "Protótipo de um destilador Solar Fibra de Vidro", **Tecnologia Química**. v. XXV n. 3, 2005.

FORMOSO, Silvia Curpetino. Sistema de tratamento de água salobra: alternativa de combate a escassez hídrica no semiárido Sergipano. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão – SE, 2010.

FUENTES, R., ROTH, P. Teoria de La Destilación Solar en Vacio. Revista Facultad de Ingenieria, U. T. A., Chile, vol. 4, 1997.

GAMEIRO, B.M.L. Análise do Rendimento de um Destilador Solar Integrado numa Estufa. 2010. 86p. (Mestrado em Engenharia de Ambiente) – Departamento de Ambiente e Ordenamento. Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2010.

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.

GUNTHER, M.; JOEMANN, M.; CSAMBOR, S. Parabolic Trough Technology. In: ENERMENA (Jordânia).**Advanced CSP Teaching Materials.** Amman: Enermena, 2011. p. 245-317. Disponível em: http://www.4shared.com/office/ZU40pNM-/chapter_05_parabolic_trough_te.html. Acesso em: fevereiro de 2019.

HAFEZ, A. Z., ATTIA, A. M., ELTWAB, H. S., ELKOUSY, A. O., AFIFI, A. A., ABDELHAMID, A. G., FATEENB, S.K., EL-METWALLYA, K.A., SOLIMAN, A.; ISMAIL, I. M. Design analysis of solar parabolic trough thermal collectors. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 82, 1215–1260, 2018.

HOWE, E.D., TLEIMAT, B.W. Fundamentals of water desalination. Sayigh, A.A.M. (Ed), Solar Energy **Engineering. Academic Press**, p.431-464, 1977.

IQBAL M. An introduction to solar radiation. Academic Press Canada, 390p, 1983.

INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P.; BERGMAN, T.L.; LAVINE, A.S. Fundamentos de transferência de calor e de massa. LTC, 7. ed., Rio de International Heat Transfer, part V,University of Colorado, 2014.

KALOGIROU, S.A., 2009. Solar energy engineering: processes and systems. 1^a edição, Academic Press, Elsevier, EUA.

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

KHALIFA, A.J.N.; HAMOOD, A.M. On the verification of the effect of water depth on the performance of basin type solar still, **Solar Energy**. v. 83, p. 1312–1321, 2009.

KOPSCH, O.: "Solar water desalination: decentralized desalination systems". Disponível em: http://sinovoltaics.com/technology/solar-water-desalination-decentralized-desalination-systems-powered-solar-energy/ Acesso: fevereiro de 2019.

KUMAR, S. & TIWARI, G.N. Estimation of Convective Mass Transfer in Solar Systems. **Solar Energy**, v. 57, p. 459-464.

LIMA, A.C.; DELPUPO, A.M.; PONTES DA SILVA, B.F.; SACRAMENTO, B.F.; MADUREIRA, C.C.; ALVARENGA, H.M.; RAMOS, H.E.A.; SILVA, J. G. F.; SCARPATTI, M.P.; ALMEIDA, P.V.D. **A energia solar no Espírito Santo: tecnologias, aplicações e oportunidades**. 1. ed. Vitória: Agência de Serviços Públicos de energia do Estado do Espírito Santo, 2013.

MACÊDO, J. A. B. Águas & Águas. 1027 p., 3. ed. rev. atual. Belo Horizonte-MG: CRQ-MG, 2007.

MALIK, M., TIWARI, M.S.G.N., KUMAR, A., SODHA, M.S. Solar Distillation: a practical study of a wide range of stills and their optimum design, construction and performance. **Pergamon Press**, Oxford, 1982.

MANOKAR, A.M.; MURUGAVEL, K.K.; ESAKKIMUTHU, G. Different parameters affecting the rate of evaporation and condensation on passive solar still — a review, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 38, p. 309 - 322, 2014.

MARENGO, J.A.; BERNASCONI, M. Regional differences in aridity/ drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections. **Clim Chang** v. 129, p. 103 - 115, 2015.

MORAD, M.M., EL-MAGHAWRY, H.A.M., WASFY, K.I. A developed solar-powered desalination system for enhancing fresh water productivity. **Solar Energy**, v. 146, p. 20 - 29, 2017.

NAFEY, A.S.; ABDELKADER, M.; ABDELMOTALIP, A.; MABROUK, A.A. Solar still productivity enhancement, Energy Convers. **Manag**. v. 42, p. 1401 - 1408, 2001.

NRC. National Research Council. 2008. **Desalination: A National Perspective**. 312 p. Washington, DC: The National Academies Press, 2008.

PEREIRA. E.B., MARTINS. F.R., GONÇALVES, A. R., COSTA, R. S., LIMA, F.J.L., RÜTHER. R., ABREU. S.L., TIEPOLO, G.M., PEREIRA, S.V., SOUZA, J.G. Atlas brasileiro de energia solar – 2.ed - São José dos Campos : INPE, 2017. 88p.

PHADATARE, M.K., VERMA, S.K., Influence of water depth on internal heat and mass transfer in a plastic solar still. **Dessalination**, v. 217, p. 267-275, 2007.

PINHO, J.T.; GALDINO, M.A. (Org.). Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro: Cepel - Cresesb, 2014.

POUYFAUCON, A.B.; GARCÍA-RODRÍGUEZ, L. Solar thermal-powered desalination: a viable solution for a potential market, **Desalination**. v. 435, p. 60 - 69, 2018.

PRAKASH, P.; VELMURUGAN, V. Parameters influencing the productivity of solar stills - a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews.** v. 49, p. 585 - 609, 2015.

PUGSLEY, A.; ZACHARAPOULOS, A.; MONDOL, J.D.; SMYTH, M. Global applicability of solar desalination, **Renewable Energy**, v. 88 p. 200–219, 2016

RABHI, K., NCIRI, R., NASRI, F., ALI, C., BEN BACHA, H. 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.

SHARON, H.; REDDY, K.S. A review of solar energy driven desalination technologies, **Renewable and Sustainable Energy Reviews.** v. 41, p. 1080 - 1118, 2015.

SHARSHIR, S.W.; YANG, N.; GUILONG P.; KABEEL, A.E. Factors affecting solar stills productivity and improvement techniques: A detailed review. **Applied Thermal Engineering**. v. 100, p. 267 - 284, 2016.

SEN, Z. Solar energy in progress and future research trends. In: Progress in energy and combustion science 30. p. 367-415, 2004.

SETOODEH, N.; RAHIMI, R.; AMERI, A. Modeling and determination of heat transfer coefficient in a basin solar still using CFD. **Desalination**, v. 268, p. 103–110, 2011.

SHATAT, M., WORALL M., RIFFAT, S. Opportunities for solar water desalination worldwide: Review. **Sustainable cities and society**, v. 9, p. 67-80, 2013.

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.

SILVA Í.N. Agropecuária Científica no Semiárido, UFCG – Patos – PB. ACSA - Agropecuária Científica no Semiárido, v. 07, n. 03, p. 01 - 15, jul./set. 2011.

SINGH, H.N.; TIWARI, G.N. Monthly performance of passive and active solar stills for different Indian climatic condition, **Desalination**. v. 168, p. 145–150, 2004.

SOARES C. Tratamento de água unifamiliar através da destilação solar natural utilizando água salgada, salobra e doce contaminada. 2004. 110p. Dissertacao de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pos-graduacao em Engenharia Sanitaria e Ambiental. Florianopolis, SC.

SOUSA, F.L.; **Dessalinização como fonte alternativa de água potável**. Norte Científico, v. 1, n. 1. 2006.

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: XX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas ,2018, Campinas - SP. Anais. Campinas: 2018.

TIWARI, G. N. Solar Energy: Fundamentals, Design, Modelling and Applications. 525 p., Editora: Alpha Science Intl Ltd; Edição: Revised, New York, 2015. STINE, W.B., GEYER, M., 2001, Power from the Sun, Retrieved from: http://www.powerfromthesun.net/book.html (chapter 8).

TECHNAVIO, Global Desalination Market, 2018–2022. 2018.

TIWARI, A.K.; TIWARI, G.N. Thermal Modeling Based on Solar Fraction and Experimental Study of the Annual and Seasonal Performance of a Single Slope Passive Solar Still: The Effect of Water Depths. **Desalination**, v. 207, p. 184-204, 2007.

TLEIMAT, B.W. **Tecnologia para aprovechar la energia solar**. Organizacion de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. Naciones Unidas, NY.169p, 1979.

TRINDADE, C.M.; GIACOBBO,A.; FERREIRA,V.; RODRIGUES, M.A.S.; BERNARDES, A.M. Membrane Separation Processes Applied to the Treatment of Effluents from Nanoceramic Coating Operations. **Desalination and Water Treatment**, v. 55, p. 28-38, 2015.

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.

VIEIRA R.M.S.P.; TOMASELLA J.; ALVALA R.C.S.; SESTINI, M.F.; AFFONSO, A.G., RODRIGUEZ ,D.A.; BARBOSA, A.A.; CUNHA, A.P.M.A.; VALLES, G.F.; CREPANI, E.; OLIVEIRA, S.B.P.; SOUZA, M.S.B.; CALIL, P.M.; CARVALHO, M.A.; VALERIANO, D.M.; CAMPELLO, F.C.B.; SANTANA, M.O. Identifying areas susceptible to desertification in the Brazilian northeast. **Solid Earth**, v. 6, p. 47-360, 2015.

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.

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.

VILLALVA, M.G.; GAZOLI, J.R. *Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações*. 1. ed. São Paulo: Érica, 2012.

WWAP, The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-based Solutions, UNESCO, Paris, 2018.

XIAO, G.; WANG, X.; NI, M.; WANG, F.; ZHU, W.; LUO, Z. A review on solar stills for brine desalination. **Applied Energy**, v. 103, p. 642–652, 2013.

YADAV, C.M.A. Water desalination system using solar heat: a review, **Renewable and Sustainable Energy Reviews.** v. 67, p. 1308–1330, 2017.

ZEINAB S, ABDEL R, ASHRAF L. Experimental and theoretical study of a solar desalination systemlocated in Cairo-Egypt. **Desalination**, v. 217, p. 52-64, 2007.

ZURIGAT, Y.H.; ABU-ARABI, M.K. Modelling and performance analysis of a regenerative solar desalination unit, **Applied Thermal Engineering**. v. 24, p. 1061-1072, 2004.

ANEXO I

Parâmetros físico-químicos da água nos meses de agosto a dezembro de 2019.

Tabela A1 – Parâmetros físico-químicos para o mês de agosto de 2019 (experimento 1).

PARÂMETRO	A.B.1*	A.D.1*	A.D 2.*	V.M.P.**
pH	7,7	6,1	6,4	6,0 - 9,5
Condutividade elétrica (µS.cm ⁻¹)	11160,0	9,9	22,1	-
Cloreto (mg $Cl^{-}L^{-1}$)	5538,0	35,5	35,5	250
Dureza (mg CaCO ₃ . L^{-1})	375,0	40,0	30,0	500
Alcalinidade (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	531,0	26,0	39,0	100
Turbidez (uT)	2,0	2,0	2,0	5
Sódio (mg Na ⁺ .L ⁻¹)	1200,0	1,0	0,0	200
Cor (uH)	6,7	5,0	6,0	15

*A.B.1 = Água Bruta do Sítio Poço de Pedra; A.D.1= Água Dessalinizada D1, A.D.2= Água Dessalinizada D2;

**V.M.P. = Valor Máximo Permitido segundo a RDC n° 5, de 28 de setembro de 2017, Anexo XX.

Tabela A2 – Parâmetros físico-químicos para o mês de agosto de 2019 (experimento 2).

PARÂMETRO	A.B.1*	A.D.1*	A.D 2.*	V.M.P.**
pH	7,7	6,3	6,0	6,0 - 9,5
Condutividade elétrica (µS.cm ⁻¹)	11160,0	10,3	24,3	-
Cloreto (mg $Cl^{-}L^{-1}$)	5538,0	35,5	42,6	250
Dureza (mg CaCO ₃ L^{-1})	375,0	10,0	10,0	500
Alcalinidade (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	531,0	18,0	39,0	100
Turbidez (uT)	2,0	2,0	2,0	5
Sódio (mg Na ⁺ .L ⁻¹)	1200,0	0,0	0,0	200
Cor (uH)	6,7	5,8	5,0	15

*A.B.1 = Água Bruta do Sítio Poço de Pedra; A.D.1= Água Dessalinizada D1, A.D.2= Água Dessalinizada D2;

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

PARÂMETRO	A.B.2*	A.D.1*	A.D 2.*	V.M.P.**
pH	7,8	6,3	6,7	6,0 - 9,5
Condutividade elétrica (µS.cm ⁻¹)	11030,0	25,6	52,1	-
Cloreto (mg Cl L ⁻¹)	4260,0	35,5	28,4	250
Dureza (mg CaCO ₃ . L^{-1})	570,0	40,0	40,0	500
Alcalinidade (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	480,0	29,0	46,0	100
Turbidez (uT)	3,0	3,0	3,0	5
Sódio (mg Na ⁺ .L ⁻¹)	1200,0	0,0	0,0	200
Cor (uH)	8,1	7,6	6,5	15

Tabela A3 – Parâmetros físico-químicos para o mês de agosto de 2019 (experimento 3).

A.B.2 = Água Bruta do Sítio Escurinha de Baixo; A.D.1= Água Dessalinizada D1, A.D.2= Água Dessalinizada D2;

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

PARÂMETRO	A.B.2*	A.D.1*	A.D 2.*	V.M.P.**
pH	7,8	6,0	6,9	6,0 - 9,5
Condutividade elétrica (µS.cm ⁻¹)	11030,0	34,3	47,3	-
Cloreto (mg $Cl^{-}L^{-1}$)	4260,0	42,6	35,5	250
Dureza (mg CaCO ₃ L^{-1})	570,0	50,0	40,0	500
Alcalinidade (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	480,0	21,0	42,0	100
Turbidez (uT)	3,0	3,0	3,0	5
Sódio (mg Na ⁺ .L ⁻¹)	1200,0	1,0	0,0	200
Cor (uH)	8,1	7,0	6,5	15

Tabela A4 – Parâmetros físico-químicos para o mês de agosto de 2019 (experimento 4).

A.B.2 = Água Bruta do Sítio Escurinha de Baixo; A.D.1= Água Dessalinizada D1, A.D.2= Água Dessalinizada D2;

**V.M.P. = Valor Máximo Permitido segundo a RDC n° 5, de 28 de setembro de 2017, Anexo XX.

Tabela A5 – Parâmetros físico-químicos para o mês de setembro de 2019 (experimento 5).

PARÂMETRO	A.B.1*	A.D.1*	A.D 2.*	V.M.P.**
рН	7,7	6,2	6,5	6,0 - 9,5
Condutividade elétrica (µS.cm ⁻¹)	11160,0	10,2	10,9	-
Cloreto (mg $Cl^{-}L^{-1}$)	5538,0	35,5	28,4	250
Dureza (mg CaCO ₃ L^{-1})	375,0	10,0	20,0	500
Alcalinidade (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	531,0	26,0	35,0	100
Turbidez (uT)	2,0	2,0	2,0	5
Sódio (mg Na ⁺ .L ⁻¹)	1200,0	0,0	0,0	200
Cor (uH)	6,7	6,0	5,1	15

*A.B.1 = Água Bruta do Sítio Poço de Pedra; A.D.1= Água Dessalinizada D1, A.D.2= Água Dessalinizada D2;

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

PARÂMETRO	A.B.1*	A.D.1*	A.D 2.*	V.M.P.**
pH	7,7	6,0	6,8	6,0 - 9,5
Condutividade elétrica (µS.cm ⁻¹)	11160,0	13,2	18,2	-
Cloreto (mg Cl L ⁻¹)	5538,0	35,5	28,4	250
Dureza (mg CaCO ₃ . L^{-1})	375,0	10,0	20,0	500
Alcalinidade (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	531,0	15,0	35,0	100
Turbidez (uT)	2,0	2,0	2,0	5
Sódio (mg Na ⁺ .L ⁻¹)	1200,0	0,0	0,0	200
Cor (uH)	6,7	6,2	5,1	15

Tabela A6 – Parâmetros físico-químicos para o mês de setembro de 2019 (experimento 6).

*A.B.1 = Água Bruta do Sítio Poço de Pedra; A.D.1= Água Dessalinizada D1, A.D.2= Água Dessalinizada D2;

**V.M.P. = Valor Máximo Permitido segundo a RDC n° 5, de 28 de setembro de 2017, Anexo XX.

PARÂMETRO	A.B.2*	A.D.1*	A.D 2.*	V.M.P.**
рН	7,8	6,1	6,4	6,0 - 9,5
Condutividade elétrica (µS.cm ⁻¹)	11030,0	28,6	46,9	-
Cloreto (mg $Cl^{-}L^{-1}$)	4260,0	28,4	35,5	250
Dureza (mg CaCO ₃ L^{-1})	570,0	60,0	50,0	500
Alcalinidade (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	480,0	28,0	43,0	100
Turbidez (uT)	3,0	3,0	3,0	5
Sódio (mg Na ⁺ .L ⁻¹)	1200,0	0,0	0,0	200
Cor (uH)	8,1	7,8	6,8	15

Tabela A7 – Parâmetros físico-químicos para o mês de setembro de 2019 (experimento 7).

A.B.2 = Água Bruta do Sítio Escurinha de Baixo; A.D.1= Água Dessalinizada D1, A.D.2= Água Dessalinizada D2;

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

Tabela A8 – Parâmetros físico-químicos para o mês de setembro de 2019 (experimento 8).

PARÂMETRO	A.B.2*	A.D.1*	A.D 2.*	V.M.P.**
pH	7,8	6,0	6,5	6,0 - 9,5
Condutividade elétrica (µS.cm ⁻¹)	11030,0	31,9	49,2	-
Cloreto (mg Cl L ⁻¹)	4260,0	49,7	28,4	250
Dureza (mg CaCO ₃ . L^{-1})	570,0	30,0	30,0	500
Alcalinidade (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	480,0	19,0	40,0	100
Turbidez (uT)	3,0	3,0	3,0	5
Sódio (mg Na ⁺ .L ⁻¹)	1200,0	1,0	0,0	200
Cor (uH)	8,1	7,6	6,9	15

A.B.2 = Água Bruta do Sítio Escurinha de Baixo; A.D.1= Água Dessalinizada D1, A.D.2= Água Dessalinizada D2;

**V.M.P. = Valor Máximo Permitido segundo a RDC n° 5, de 28 de setembro de 2017, Anexo XX.

PARÂMETRO	A.B.1*	A.D.1*	A.D 2.*	V.M.P.**
pH	7,7	6,1	6,3	6,0 - 9,5
Condutividade elétrica (µS.cm ⁻¹)	11160,0	9,8	22,4	-
Cloreto (mg Cl L ⁻¹)	5538,0	28,4	35,5	250
Dureza (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	375,0	20,0	10,0	500
Alcalinidade (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	531,0	15,0	39,0	100
Turbidez (uT)	2,0	2,0	2,0	5
Sódio (mg Na ⁺ .L ⁻¹)	1200,0	0,0	0,0	200
Cor (uH)	6,7	5,5	5,1	15

Tabela A9 – Parâmetros físico-químicos para o mês de outubro de 2019 (experimento 9).

*A.B.1 = Água Bruta do Sítio Poço de Pedra; A.D.1= Água Dessalinizada D1, A.D.2= Água Dessalinizada D2;

**V.M.P. = Valor Máximo Permitido segundo a RDC n° 5, de 28 de setembro de 2017, Anexo XX.

PARÂMETRO	A.B.1*	A.D.1*	A.D 2.*	V.M.P.**
рН	7,7	6,3	6,2	6,0 - 9,5
Condutividade elétrica (µS.cm ⁻¹)	11160,0	10,2	21,4	-
Cloreto (mg $Cl^{-}L^{-1}$)	5538,0	28,4	42,6	250
Dureza (mg CaCO ₃ L^{-1})	375,0	20,0	20,0	500
Alcalinidade (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	531,0	23,0	39,0	100
Turbidez (uT)	2,0	2,0	2,0	5
Sódio (mg Na ⁺ .L ⁻¹)	1200,0	0,0	0,0	200
Cor (uH)	6,7	6,0	5,1	15

Tabela A10 – Parâmetros físico-químicos para o mês de outubro de 2019 (experimento 10).

*A.B.1 = Água Bruta do Sítio Poço de Pedra; A.D.1= Água Dessalinizada D1, A.D.2= Água Dessalinizada D2;

**V.M.P. = Valor Máximo Permitido segundo a RDC n° 5, de 28 de setembro de 2017, Anexo XX.

Tabela A	11 -	– Parâmetros	físico-0	químicos	para o	mês c	le outub	ro d	e 20)19	(exp	perimento	11)).
----------	------	--------------	----------	----------	--------	-------	----------	------	------	-----	------	-----------	-----	----

PARÂMETRO	A.B.2*	A.D.1*	A.D 2.*	V.M.P.**
рН	7,8	6,0	6,6	6,0 - 9,5
Condutividade elétrica (µS.cm ⁻¹)	11030,0	29,1	47,6	-
Cloreto (mg $Cl^{-}L^{-1}$)	4260,0	28,4	21,3	250
Dureza (mg CaCO ₃ . L^{-1})	570,0	20,0	20,0	500
Alcalinidade (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	480,0	19,0	40,0	100
Turbidez (uT)	3,0	3,0	3,0	5
Sódio (mg Na ⁺ .L ⁻¹)	1200,0	1,0	0,0	200
Cor (uH)	8,1	7,3	6,3	15

A.B.2 = Água Bruta do Sítio Escurinha de Baixo; A.D.1= Água Dessalinizada D1, A.D.2= Água Dessalinizada D2;

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

PARÂMETRO	A.B.2*	A.D.1*	A.D 2.*	V.M.P.**
pH	7,8	6,2	6,3	6,0 - 9,5
Condutividade elétrica (µS.cm ⁻¹)	11030,0	26,7	49,9	-
Cloreto (mg Cl L ⁻¹)	4260,0	42,6	35,5	250
Dureza (mg CaCO _{3.} L^{-1})	570,0	60,0	40,0	500
Alcalinidade (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	480,0	27,0	45,0	100
Turbidez (uT)	3,0	3,0	3,0	5
Sódio (mg Na ⁺ .L ⁻¹)	1200,0	0,0	0,0	200
Cor (uH)	8,1	7,6	6,8	15

Tabela A12 – Parâmetros físico-químicos para o mês de outubro de 2019 (experimento 12).

A.B.2 = Água Bruta do Sítio Escurinha de Baixo; A.D.1= Água Dessalinizada D1, A.D.2= Água Dessalinizada D2;

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

PARÂMETRO	A.B.1*	A.D.1*	A.D 2.*	V.M.P.**
рН	7,7	6,0	6,3	6,0 - 9,5
Condutividade elétrica (µS.cm ⁻¹)	11160,0	10,5	21,8	-
Cloreto (mg $Cl^{-}L^{-1}$)	5538,0	49,7	42,6	250
Dureza (mg CaCO ₃ L^{-1})	375,0	30,0	10,0	500
Alcalinidade (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	531,0	18,0	32,0	100
Turbidez (uT)	2,0	2,0	2,0	5
Sódio (mg Na ⁺ .L ⁻¹)	1200,0	0,0	0,0	200
Cor (uH)	6,7	6,2	5,2	15

Tabela A13 – Parâmetros físico-químicos para o mês de novembro de 2019 (experimento 13).

*A.B.1 = Água Bruta do Sítio Poço de Pedra; A.D.1= Água Dessalinizada D1, A.D.2= Água Dessalinizada D2;

**V.M.P. = Valor Máximo Permitido segundo a RDC n° 5, de 28 de setembro de 2017, Anexo XX.

Tabela A14 – Parâmetros físico-	químicos para	o mês de novembro	de 2019 (experimento 1	14)
---------------------------------	---------------	-------------------	-----------	---------------	-----

PARÂMETRO	A.B.1*	A.D.1*	A.D 2.*	V.M.P.**
pH	7,7	6,5	6,4	6,0 - 9,5
Condutividade elétrica (µS.cm ⁻¹)	11160,0	10,8	30,4	-
Cloreto (mg Cl L ⁻¹)	5538,0	28,4	35,5	250
Dureza (mg CaCO ₃ . L^{-1})	375,0	20,0	40,0	500
Alcalinidade (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	531,0	22,0	38,0	100
Turbidez (uT)	2,0	2,0	2,0	5
Sódio (mg Na ⁺ .L ⁻¹)	1200,0	1,0	0,0	200
Cor (uH)	6,7	5,5	5,1	15

*A.B.1 = Água Bruta do Sítio Poço de Pedra; A.D.1= Água Dessalinizada D1, A.D.2= Água Dessalinizada D2; **V.M.P. = Valor Máximo Permitido segundo a RDC n° 5, de 28 de setembro de 2017, Anexo XX.

PARÂMETRO	A.B.2*	A.D.1*	A.D 2.*	V.M.P.**
рН	7,8	6,3	6,6	6,0 - 9,5
Condutividade elétrica (µS.cm ⁻¹)	11030,0	27,0	48,4	-
Cloreto (mg $Cl^{-}L^{-1}$)	4260,0	28,4	28,4	250
Dureza (mg CaCO ₃ . L^{-1})	570,0	50,0	40,0	500
Alcalinidade (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	480,0	21,0	42,0	100
Turbidez (uT)	3,0	3,0	3,0	5
Sódio (mg Na ⁺ .L ⁻¹)	1200,0	1,0	0,0	200
Cor (uH)	8,1	7,8	7,0	15

nento 15).

A.B.2 = Água Bruta do Sítio Escurinha de Baixo; A.D.1= Água Dessalinizada D1, A.D.2= Água Dessalinizada D2;

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

PARÂMETRO	A.B.2*	A.D.1*	A.D 2.*	V.M.P.**
pH	7,8	6,2	6,5	6,0 - 9,5
Condutividade elétrica (µS.cm ⁻¹)	11030,0	29,5	49,6	-
Cloreto (mg Cl L ⁻¹)	4260,0	35,5	28,4	250
Dureza (mg CaCO ₃ L^{-1})	570,0	60,0	40,0	500
Alcalinidade (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	480,0	25,0	44,0	100
Turbidez (uT)	3,0	3,0	3,0	5
Sódio (mg Na ⁺ .L ⁻¹)	1200,0	0,0	0,0	200
Cor (uH)	8,1	7,9	6,8	15

Tabela A16 – Parâmetros físico-químicos para o mês de novembro de 2019 (experimento 16).

A.B.2 = Água Bruta do Sítio Escurinha de Baixo; A.D.1= Água Dessalinizada D1, A.D.2= Água Dessalinizada D2;

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

Tabela A17 – Parâmetros físico-químicos para o mês de dezembro de 2019 (experimento 17).

PARÂMETRO	A.B.1*	A.D.1*	A.D 2.*	V.M.P.**
pH	7,7	6,2	6,7	6,0 - 9,5
Condutividade elétrica (µS.cm ⁻¹)	11160,0	13,5	32,9	-
Cloreto (mg Cl L ⁻¹)	5538,0	42,6	35,5	250
Dureza (mg CaCO ₃ . L^{-1})	375,0	20,0	20,0	500
Alcalinidade (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	531,0	23,0	33,0	100
Turbidez (uT)	2,0	2,0	2,0	5
Sódio (mg Na ⁺ .L ⁻¹)	1200,0	0,0	0,0	200
Cor (uH)	6,7	5,8	5,2	15

*A.B.1 = Água Bruta do Sítio Poço de Pedra; A.D.1= Água Dessalinizada D1, A.D.2= Água Dessalinizada D2;

**V.M.P. = Valor Máximo Permitido segundo a RDC n° 5, de 28 de setembro de 2017, Anexo XX.

PARÂMETRO	A.B.1*	A.D.1*	A.D 2.*	V.M.P.**
pH	7,7	6,2	6,0	6,0 - 9,5
Condutividade elétrica (µS.cm ⁻¹)	11160,0	10,2	29,5	-
Cloreto (mg Cl L ⁻¹)	5538,0	35,5	28,4	250
Dureza (mg CaCO ₃ . L^{-1})	375,0	20,0	20,0	500
Alcalinidade (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	531,0	24,0	41,0	100
Turbidez (uT)	2,0	2,0	2,0	5
Sódio (mg Na ⁺ .L ⁻¹)	1200,0	0,0	0,0	200
Cor (uH)	6,7	5,4	5,2	15

Tabela A18 – Parâmetros físico-químicos para o mês de dezembro de 2019 (experimento 18).

*A.B.1 = Água Bruta do Sítio Poço de Pedra; A.D.1= Água Dessalinizada D1, A.D.2= Água Dessalinizada D2;

**V.M.P. = Valor Máximo Permitido segundo a RDC n° 5, de 28 de setembro de 2017, Anexo XX.