

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CAMPUS FREDERICO WESTPHALEN
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA
AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

Cassiano Gonçalves Simões do Carmo

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM DESTILADOR SOLAR
PIRAMIDAL PARA PRODUÇÃO DE ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO
ADVINDA DE CAPTAÇÃO SUPERFICIAL PARA SITUAÇÕES
EMERGENCIAIS**

Frederico Westphalen, RS
2021

Cassiano Gonçalves Simões do Carmo

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM DESTILADOR SOLAR
PIRAMIDAL PARA PRODUÇÃO DE ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO
ADVINDA DE CAPTAÇÃO SUPERFICIAL PARA SITUAÇÕES
EMERGENCIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Ambiental e Sanitarista**.

Orientador: Prof. Dr. Marcus Bruno Domingues Soares

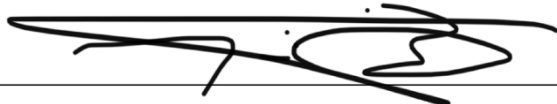
Frederico Westphalen, RS
2021

Cassiano Gonçalves Simões do Carmo

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM DESTILADOR SOLAR
PIRAMIDAL PARA PRODUÇÃO DE ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO
ADVINDA DE CAPTAÇÃO SUPERFICIAL PARA SITUAÇÕES
EMERGENCIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Ambiental e Sanitária, da Universidade
Federal de Santa Maria (UFSM, RS),
como requisito parcial para obtenção do
título de **Engenheiro Ambiental e
Sanitarista**.

Aprovado em 10 de fevereiro de 2021



Marcus Bruno Domingues Soares, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Raphael Correa Medeiros, Dr. (UFSM)



Edner Baumhardt, Dr. (UFSM)
Frederico Westphalen, RS

2021

DEDICATÓRIA

À minha família, por ter sido seu primeiro membro a ingressar em uma Universidade Federal e por todo seu apoio para concluir minha graduação. E à minha namorada, por despertar objetivos concretos e factíveis para nossas vidas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela possibilidade da vida e suas diversas formas de se manifestar em suas criações.

Aos meus pais que sempre proveram educação de qualidade, a mim e aos meus irmãos, e nos incentivam a sermos melhores e buscar nossa felicidade por meio do amor.

À minha irmã Julia e meu irmão Guilherme, por me amarem e me terem como exemplo, me guiando a sempre ser uma pessoa melhor.

Ao restante da minha grande família, que sempre me nutriu com muita informação, experiência, divertimentos e muito amor.

A todos os professores que eu tive a oportunidade de aprender algo novo e ampliar meus conhecimentos, que foram meu chão até este patamar.

Ao professor Marcus Bruno, pela confiança do meu trabalho e capacidade de administrar esta pesquisa e por todos os momentos em que se dispôs a sanar minhas dúvidas.

À todas as amigadas que eu construí ao longo da minha vida e principalmente na graduação, pela troca de informação e aprimoramento das minhas noções de valor e engenharia.

À minha namorada Natália, que sempre me deu suporte para meus estudos e com seus auxílios durante meu tempo de pesquisa, e pelo seu amor.

Aos funcionários da Sulclean, que me auxiliaram na construção do suporte do destilador e ajustes necessários para sua operação.

Aos terceiros que colaboraram na confecção das estruturas envolvidas na construção do destilador.

À Maria Luiza Giordano, que por muitos dias me ajudou coletando água destilada e analisando a qualidade da água no laboratório.

À Universidade Federal de Santa Maria, pela oportunidade de cursar uma graduação pública, gratuita e de qualidade.

“Lembra-se de cavar o poço bem antes de sentir sede.”

(Provérbio Chinês)

RESUMO

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM DESTILADOR SOLAR PIRAMIDAL PARA PRODUÇÃO DE ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO ADVINDA DE CAPTAÇÃO SUPERFICIAL PARA SITUAÇÕES EMERGENCIAIS

AUTOR: Cassiano Gonçalves Simões do Carmo
ORIENTADOR: Marcus Bruno Domingues Soares

Por diferentes circunstâncias e épocas do ano, o acesso à água por um sistema de captação subterrânea e superficial podem ser cessados, sujeitando a população local a recorrer a fontes não viáveis para sanar a escassez de água temporária. O presente estudo tem como objetivo avaliar a viabilidade do uso de um destilador solar piramidal para produção de água e sua qualidade para consumo humano em situações emergenciais. O destilador solar piramidal foi construído, com área de cobertura de vidro de 0,25 m², e operado com base em recomendações já conhecidas para maximizar sua produtividade, por meio da energia solar. As variáveis meteorológicas que influenciam na produção de um destilador solar são a radiação solar, temperatura ambiente, velocidade dos ventos e umidade relativa. Essas variáveis foram monitoradas para avaliar as potencialidades da eficiência de produção para características locais. Foram realizadas 69 coletas de produção e 7 bateladas de análise da qualidade da água bruta e produzida, para evidenciar que o presente destilador solar foi capaz de produzir, uma média de 3,18 L/m².dia com 35% de eficiência e água, dentro dos parâmetros analisados como própria para consumo humano. A avaliação sobre a viabilidade da tecnologia depende do uso de maiores destiladores solares para aplicação na região, tendo em vista que o potencial de volume produzido avaliado é dependente da área da cobertura do destilador solar para captação da energia solar.

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

ABSTRACT

DEVELOPMENT AND EVALUATION OF A PYRAMID SOLAR STILL FOR PRODUCTION OF WATER FOR HUMAN CONSUMPTION FROM SURFACE CAPTURE FOR EMERGENCY SITUATIONS

AUTHOR: Cassiano Gonçalves Simões do Carmo
ADVISOR: Marcus Bruno Domingues Soares

For different circumstances and times of the year, access to water through a system of underground and surface water catchment may be ceased, exposing the local population to recourse to non-viable sources to remedy the temporary water shortage. This study aimed at the evaluation of the viability of using a pyramid solar still to produce water and quality for human consumption in emergency situations. The pyramid solar still was built, with a 0.25 m² glass cover area, and operated based on known recommendations to maximize its productivity, through solar energy. The meteorological factors that influence the production of a solar still are solar radiation, ambient temperature, wind speed and relative humidity. These factors were monitored to evaluate the potential of production efficiency for local characteristics. Done 69 collections of production and 7 batches of quality analysis of raw and produced water, to evidence that the present solar still was able to produce, an average of 3.18 L/m².day with 35% efficiency and water, according to the parameters analyzed as proper for human consumption. The evaluation of the viability of the use of the technology depends on the use of larger scale solar stills for use in the region, considering that the potential volume produced is dependent on the cover area of the solar still to capture solar energy.

Keywords: Pyramid shaped solar still. Water treatment. Emergency situations.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
2.1. OBJETIVO GERAL	14
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3. REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1. ESCASSEZ DE ÁGUA POTÁVEL E ALTERNATIVAS PARA O ENFRENTAMENTO DESTES PROBLEMAS	15
3.2. PROBLEMÁTICA DO ACESSO A ÁGUA EM SITUAÇÕES EMERGENCIAIS	16
3.3. HISTÓRICO DO USO DE DESTILADORES SOLARES NA PRODUÇÃO DE ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO	16
3.4. PRINCÍPIOS DE OPERAÇÃO E MECANISMOS FÍSICOS DE UM DESTILADOR SOLAR PIRAMIDAL NA PRODUÇÃO DE ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO	23
3.5. VARIÁVEIS CONSTRUTIVAS DOS DESTILADORES QUE INFLUENCIAM NA PRODUÇÃO DE ÁGUA	25
3.6. PRINCIPAIS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS INFLUENCIADORAS NO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ÁGUA	26
3.6.1. Meios de analisar a produtividade dos destiladores com base no estudo das variáveis meteorológicas	28
3.7. PARÂMETROS INFLUENCIADORES NO PADRÃO DE QUALIDADE DA ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO DESTES ESTUDOS	29
3.8. MECANISMOS ENVOLVIDOS NA REMOÇÃO DE VARIÁVEIS DO PADRÃO DE QUALIDADE DA ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO	31
4. MATERIAL E MÉTODOS	34
4.1. LOCAL DE ESTUDO	34
4.2. CONSTRUÇÃO DO DESTILADOR SOLAR PIRAMIDAL	35
4.3. OPERAÇÃO DO DESTILADOR PIRAMIDAL	38
4.4. ANÁLISE DE EFICIÊNCIA E DESEMPENHO TÉRMICO DO SISTEMA E SUA INFLUÊNCIA SOBRE A PRODUÇÃO DE ÁGUA DESTILADA	41
4.5. ANÁLISE QUALITATIVA DE PRODUÇÃO DE ÁGUA	42
4.6. ANÁLISE DE VIABILIDADE PARA USO DE PRODUÇÃO DE ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO DO PRESENTE DESTILADOR	43
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	45

5.1. PRODUTIVIDADE DE ÁGUA DO DESTILADOR PIRAMIDAL E EFICIÊNCIA DE PRODUÇÃO	45
5.2. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE UM DIA AO LONGO DA PRODUÇÃO DE ÁGUA DESTILADA	47
5.3. COMPARAÇÃO DE PRODUTIVIDADE PARA MESMA EFICIÊNCIA... ..	50
5.4. COMPARAÇÃO DA PRODUTIVIDADE PARA MESMO BALANÇO DE RADIAÇÃO SOLAR	53
5.5. AVALIAÇÃO DA PRODUTIVIDADE PARA UM DIA COM EXTREMA EFICIÊNCIA	55
5.6. COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES DESTILADORES SOLARES PIRAMIDAI E COM O DO PRESENTE ESTUDO	58
5.7. ANÁLISE DE CUSTO E VIABILIDADE DO DESTILADOR PIRAMIDAL	61
5.8. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA PRODUZIDA PELO DESTILADOR PIRAMIDAL	62
5.8.1. Comparação da remoção de turbidez do presente destilador piramidal com outros destiladores	66
5.8.2. Comparação da diminuição de condutividade elétrica do presente destilador piramidal com outros destiladores	67
5.8.3. Comparação da remoção do parâmetro microbiológico do presente destilador piramidal com outros destiladores	68
6. CONCLUSÃO	69
REFERÊNCIAS	70
APÊNDICE A – VISTA SUPERIOR DO DESTILADOR SOLAR PIRAMIDAL	77
APÊNDICE B – VISTA INTERNA DE CORTE DO MÓDULO ACOPLADO....	77
APÊNDICE C – QUADRO GERAL DE PRODUÇÃO.....	78
APÊNDICE C – QUADRO GERAL DE PRODUÇÃO.....	79
APÊNDICE C – QUADRO GERAL DE PRODUÇÃO.....	80
APÊNDICE D – PARÂMETROS DE QUALIDADE MEDIDOS NO DIA 01/11/2019	80
APÊNDICE E – PARÂMETROS DE QUALIDADE MEDIDOS NO DIA 07/11/2019	81
APÊNDICE F – PARÂMETROS DE QUALIDADE MEDIDOS NO DIA 14/11/2019	81
APÊNDICE G – PARÂMETROS DE QUALIDADE MEDIDOS NO DIA 22/11/2019	82
APÊNDICE H – PARÂMETROS DE QUALIDADE MEDIDOS NO DIA 29/11/2019	82

APÊNDICE I – PARÂMETROS DE QUALIDADE MEDIDOS NO DIA 06/12/2019.....	83
APÊNDICE J – PARÂMETROS DE QUALIDADE MEDIDOS NO DIA 12/03/2020.....	83
ANEXO A – PARÂMETROS INFLUENCIADORES REGISTRADOS PELA ESTAÇÃO NO DIA 09/10/2019	84
ANEXO B – PARÂMETROS INFLUENCIADORES REGISTRADOS PELA ESTAÇÃO NO DIA 07/10/2019	85
ANEXO C – PARÂMETROS INFLUENCIADORES REGISTRADOS PELA ESTAÇÃO NO DIA 09/03/2020	86
ANEXO D – PARÂMETROS INFLUENCIADORES REGISTRADOS PELA ESTAÇÃO NO DIA 02/11/2019	87
ANEXO E – PARÂMETROS INFLUENCIADORES REGISTRADOS PELA ESTAÇÃO NO DIA 06/03/2020	88
ANEXO F – PARÂMETROS INFLUENCIADORES REGISTRADOS PELA ESTAÇÃO NO DIA 31/10/2019	89

1. INTRODUÇÃO

Inúmeros são os conflitos a respeito do uso e disponibilidade dos recursos hídricos em todo o globo, onde estes se relacionam quanto a sua demanda e qualidade. O Brasil, por ser um país extenso, com diversas características geográficas, sociais e culturais, acaba então, por não possuir uma distribuição igualitária para o acesso a água tanto em quantidade como em qualidade em suas diferentes regiões e localidades. Os esforços devem ser direcionados, portanto, em atenuar e sanar as dificuldades do acesso, de uma grande parcela da sociedade brasileira que ainda não possui acesso ao consumo digno de água potável.

De acordo com dados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD, 2015), a maior parte da população brasileira, 84,72 %, vive em áreas urbanas, que corresponde a aproximadamente 174 milhões de brasileiros. Ainda, de acordo com o Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento (SNIS, 2018), a população que possui atendimento de abastecimento de água é de 169,1 milhões de habitantes, o que corresponde a 83,6 %. Como apontam os resultados da pesquisa realizada pelo Programa Nacional de Saneamento Rural (PNSR) publicado em 2019, 26,0% da população residente em área rural não possui atendimento para abastecimento de água, e ainda 33,5% possuem atendimento precário, e estes correspondem à 10.335.932 e 13.295.012 habitantes, respectivamente.

No mundo, desastres naturais têm ocorrido ao longo de toda a história e moldam a forma que o homem interage com a natureza. Esses desastres, como fenômenos sísmicos, ciclones, erupções vulcânicas e enchentes, por exemplo, podem afetar ou impedir os sistemas de abastecimento de água e atribuir uma situação emergencial temporária para a população afetada. No Brasil, as situações emergenciais que se relacionam com as possibilidades de falta de abastecimento de água seriam principalmente de inundações. O clima, o relevo e as modificações provenientes das ocupações territoriais tornam as diferentes regiões do país como suscetíveis a este fenômeno. Além de as enchentes serem influenciadas pela sazonalidade, a escassez de precipitações também pode contribuir para situações emergenciais para populações que captam água subterrânea.

O estudo de Águas Subterrâneas (2016), desenvolvido pelo Instituto Trata Brasil, destaca a importância das águas subterrâneas para o abastecimento de pequenos

municípios, que possuem maiores concentrações de sua população como rural. Estas fontes subterrâneas podem ser coletivas ou individuais, em função de suas viabilidades. Um dos riscos associados a essa fonte é que, em muitos dos casos, o acesso relaciona-se com a qualidade e a profundidade das perfurações dos poços, que pode ocasionar a diminuição da produção ou perda do poço devido à superexploração do aquífero ou a interferências geradas no fluxo subterrâneo, pela operação de poços próximos e insuficiência da recarga por falta de chuvas, impossibilitando temporariamente o uso destes poços. Em função dos riscos e vulnerabilidades associadas à captação de água subterrânea, torna-se mais seguro a complementação de meios alternativos a este, que sejam capazes de suprir, também de forma viável, a obtenção de água potável em situações emergenciais.

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

O presente estudo buscou desenvolver uma estrutura de destilador piramidal capaz de destilar água, advinda de mananciais superficiais de água doce, e avaliar a viabilidade de seus aspectos de produção e qualidade da água produzida. Tendo em vista que as demandas, por alternativas unifamiliares e enfrentamento de situações emergências, para obtenção de água potável de forma viável é crescente, a busca por desenvolver inovações tecnológicas e sustentáveis de baixo custo evidenciam-se extremamente promissoras.

2. OBJETIVOS

2.1.OBJETIVO GERAL

Desenvolver um destilador solar piramidal e avaliar sua produtividade de água para consumo humano sob condições climáticas regionais e sua eficiência de tratamento utilizando água bruta de captação superficial.

2.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver um destilador solar piramidal;
- Avaliar a eficiência de produção de água do sistema, com base na influência das variáveis climáticas selecionadas;
- Avaliar a qualidade da água produzida e a eficiência de tratamento do destilador solar piramidal dentro dos parâmetros selecionados;
- Avaliar a viabilidade da utilização do presente destilador;
- Comparar o presente destilador piramidal com diferentes destiladores solares e da mesma categoria ao redor do mundo, quanto à produtividade e à tratabilidade.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. ESCASSEZ DE ÁGUA POTÁVEL E ALTERNATIVAS PARA O ENFRENTAMENTO DESTE PROBLEMA

Howell (2013) destaca que a escassez de água global e suas consequências são reconhecidas como um dos problemas mais importantes a serem solucionados, em função de sua abrangência e intensidade do seu impacto, tendo em vista o quão vital a água é para os seres vivos.

De acordo com Kahil *et al.* (2019), de forma global, a captação de água, para seus diferentes usos, aumentou muito desde o início do século XX acarretando significativamente no aumento da escassez de água. Ainda destaca que a degradação dos corpos hídricos se elevou, o que dificulta ainda mais o acesso à água potável.

Segundo a Agência Nacional das Águas (ANA, 2019) o Brasil possui boa quantidade de água em relação aos outros países ao redor do mundo. Essa quantidade é estimada em cerca de 12% da disponibilidade de água doce do planeta. No entanto, é má distribuída com relação a concentração de população e disponibilidade. A região Norte, por exemplo, concentra aproximadamente 80% da quantidade de água disponível, mas representa apenas 5% da população brasileira. Já as regiões próximas ao Oceano Atlântico possuem mais de 45% da população, porém, menos de 3% dos recursos hídricos do país.

Na tentativa de minimizar os impactos relacionados à escassez de água Kahil *et al.* (2019) sugerem que existem diferentes abordagens relacionadas à gestão, infraestrutura e tecnologias, como por exemplo, uso de instalações de armazenamento, transferência de água, reciclagem e reutilização da água e dessalinização.

De acordo com Das *et al.* (2020), tecnologias alternativas para tratamento e purificação de água para consumo humano tem se desenvolvido dia após dia ao redor do mundo, na busca de atenuar as dificuldades de seu acesso. Haddad, Chaker e Rahmani (2017) destacam que a destilação solar para produção de água para consumo humano é considerada como uma das soluções mais adequadas para resolver o problema da escassez de água e ser simultaneamente sustentável.

3.2.PROBLEMÁTICA DO ACESSO A ÁGUA EM SITUAÇÕES EMERGENCIAIS

De acordo com Santos (1999), as situações emergenciais podem ser originadas por ocorrências de desastres, que estes, por sua vez, podem ser por acontecimentos súbitos que modificam a ordem das coisas e podem colocar a população em situação perigosa. Os efeitos dos desastres podem variar entre as pessoas, instalações, serviços, economia e saúde. Segundo o mesmo autor, entre as diversas formas de calamidades que podem caracterizar uma situação emergencial as enchentes são a fonte mais comum no Brasil, cujo efeitos atuam diretamente sobre os serviços de saneamento e condições ambientais, atribuindo medidas emergenciais para contenção de seus efeitos.

Ainda segundo Santos (1999), em geral, os critérios para avaliar a gravidade dos efeitos relacionados às situações emergenciais estão relacionadas com: a área atingida; número de pessoas envolvidas; tipo e grau dos danos causados; interrupção parcial ou total de serviços de fornecimento de água e da coleta; transporte e disposição final dos resíduos sólidos, interrupção parcial ou total dos serviços de saúde; e ainda interrupção do fornecimento de energia elétrica.

Olímpio (2013) explica que tanto a falta, quanto o excesso de chuva podem atribuir uma situação emergencial a uma mesma localidade. O excesso de chuva, por exemplo, é capaz de inundar o sistema de captação de água, submergindo o bombeamento, que por consequência interrompe temporariamente o serviço de abastecimento de água. A escassez da chuva é capaz de inviabilizar a captação de água superficial, que por consequência interrompe temporariamente o serviço de abastecimento de água.

3.3.HISTÓRICO DO USO DE DESTILADORES SOLARES NA PRODUÇÃO DE ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO

Tiwari, Singh e Tripathi (2003) descrevem em sua pesquisa, que há tempos, a ideia e as aplicações do uso da destilação para produção de água potável já eram desenvolvidas em diferentes lugares do planeta. Os primeiros a registrarem ideias compatíveis à relação de água e energia foram os gregos. Aristóteles expressou a ideia de

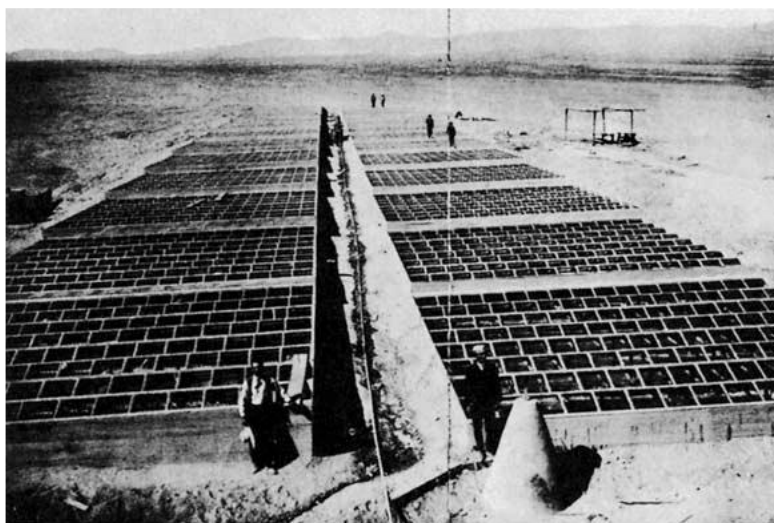
que o ciclo da água é dependente da ação do Sol, e que por sua vez, este ciclo da natureza poderia ser controlado pelo homem para obtenção de água pura.

De acordo com Beltran (1996), até a época medieval, nenhuma ideia ou importante aplicação sobre destilação solar voltada para o tratamento de água teria se desenvolvido, mas neste período, a energia solar era utilizada para aquecer alambiques que concentravam soluções alcoólicas diluídas ou extratos de ervas medicinais, além de produção de vinhos e essências de perfume.

Segundo Delyannis (2003), em 1870, a primeira patente de um destilador solar foi desenvolvida por dois norte-americanos. A patente detalhava os princípios básicos de operação do processo, inclusive os problemas relacionados à corrosão das estruturas do destilador ao longo do processo de destilação da água. Os norte-americanos descrevem a similaridade do efeito estufa no processo de evaporação e condensação, que ocorriam em menor escala, no sistema desenvolvido para destilar a água imprópria para consumo por radiação solar.

De acordo com Harding (1883 apud DELYANNIS, 2003), o primeiro destilador solar de grande escala (Figura 1) foi desenvolvido em 1872 pelo engenheiro sueco Carlos Wilson. O destilador foi construído em Las Salinas, no Chile, para prover água potável para as famílias e trabalhadores da mina de salitre da região. A estrutura do destilador era composta por diferentes tipos de madeira e eram cobertas por várias placas de vidro. Sua área era de 4450 m², capaz de produzir cerca de 22,70 m³ de água potável por dia e chegou a operar por quase 40 anos mesmo depois que as minas foram encerradas.

Figura 1 – Primeira estação de destilação solar em Las Salinas, Chile



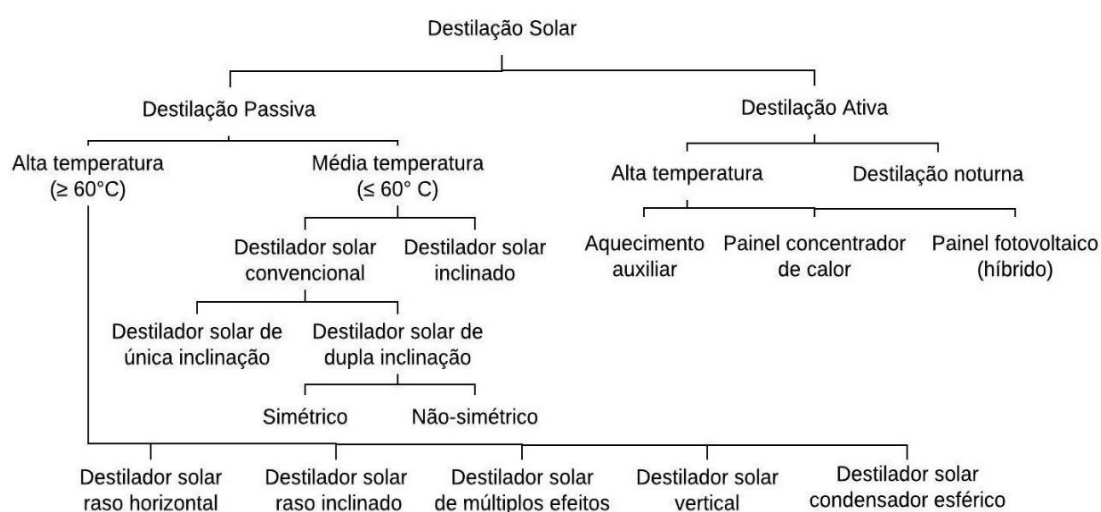
Fonte: Extraído de Delyannis (2003).

Delyannis (2003) analisa que no século XX, com a crescente populacional no globo e com novos conflitos para os diferentes usos da água, com o desenvolvimento das indústrias e da agropecuária e com estiagens severas, o mundo passou a fomentar a utilização de destiladores solares para obtenção de água potável em regiões onde há pouca água doce disponível, pouca infraestrutura e abundante água salina ou salobra. Nessa época, os destiladores, a cada nova década, eram reprojctados com a finalidade de maximizar seu desempenho. Melhorar a eficiência dos destiladores era fundamental, tendo em vista que, um dos seus pontos negativos, é que para produção de larga escala ocupam vastas áreas.

Durante a década de 1950, o interesse em destilação solar foi reavivado, e praticamente em todos os casos o objetivo era construir grandes destiladores centralizados. Entretanto, após cerca de dez anos, os pesquisadores concluíram que a destilação solar para grandes demandas era demasiadamente custosa se comparada com sistemas baseados em combustíveis fósseis ou eletricidade. Então a pesquisa se voltou para sistemas de destilação de pequeno porte (MALUF, 2005).

Atualmente, existem diversas linhas de pesquisa científica sobre as potencialidades da destilação solar de água salina para produção de água potável. Segundo Bhattacharyya (2013), o esquema (Figura 2) pode representar alguns dos diferentes tipos de destiladores solares com base em seus processos.

Figura 2 – Classificação dos diferentes sistemas de Destilação Solar



Fonte: Adaptado (BHATTACHARYYA, 2013).

Cappelletti (2001), Kabeel, Hammed e El-Agouz (2009) e Xu *et al.* (2019) relatam em suas pesquisas a importância da busca por alternativas e meios capazes de suprir a demanda e fornecimento de água durante situações emergências. Além disso, demonstram e destacam o uso da destilação solar como uma alternativa simples e sustentável para amenizar os efeitos da dificuldade do acesso a água potável durante situações emergenciais.

Para ilustrar os principais tipos de destiladores solares, as Figuras 3, 4, 5, 6 e 7 foram extraídas de diferentes trabalhos ao redor do mundo.

Figura 3 – Exemplo de um destilador convencional de única inclinação (Irã)



Fonte: Extraído de Feilizadeh *et al.* (2017).

Figura 4 – Exemplo de um destilador de dupla inclinação (Índia)



Fonte: Extraído de Jani e Modi (2018).

Figura 5 – Exemplo de uma série de destiladores solares do tipo piramidal, para teste de melhor isolante térmico (Índia)



Fonte: Extraído de Saravanan e Murugan (2020).

Figura 6 – Exemplo de um destilador com coletor de calor solar [esquerda] e destilador convencional de única inclinação [direita] (Omã)



Fonte: Extraído de Dev *et al.* (2011).

Figura 7 – Exemplo de um destilador híbrido com placa fotovoltaica (Índia)



Fonte: Extraído de Sathyamurthy *et al.* (2017).

Com base nas pesquisas de Delynnis e Belessiotis (1995), Mathioulakis, Belessiotis e Delyannis (2007) e Velmurugan *et al.* (2008) o uso mais comum está voltado para a utilização em escala familiar, e os que melhor atendem a esta demanda são os destiladores solares rasos, por serem, dentre os sistemas, os que mais se alinham à proposta da tecnologia, ou seja, ser um método eficiente de baixo custo para obtenção de água própria para consumo humano. O uso de destiladores solares para produção de água no Brasil é mais suscetível nas zonas áridas, semiáridas e zona costeira. De acordo com Tucci (2001), no Brasil, na região semiárida do Nordeste, a água doce é escassa e as águas subterrâneas possuem altas concentrações de sais e de sólidos dissolvidos, que tornam a água subterrânea em diversos locais imprópria para consumo humano e faz desta região a mais receptiva à tecnologia.

A Tabela 1 indica a produção usual de diferentes tipos de destiladores utilizados ao redor do mundo.

Tabela 1 – Produção de água de diferentes destiladores solares

Autoria	Tipo de destilador solar	Local	Produção usual
Tayeb (1991)	Única inclinação	Egito	1,3 l/m ² .d
El-bahi e Inan (1999)	Única inclinação (modificado) ¹	Turquia	7,0 l/m ² .d
Nafey <i>et al.</i> (2001)	Única inclinação	Egito	3,95 l/m ² .d
Fath <i>et al.</i> (2003)	Piramidal	Egito	2,9 l/m ² .d
Velmurugan <i>et al.</i> (2007)	Única inclinação	Índia	1,6 l/m ² .d
Tanaka (2009)	Única inclinação (modificado) ²	Japão	4,0 l/m ² .d
Dev <i>et al.</i> (2011)	Única inclinação invertido	Omã	4,0 l/m ² .d
Tanaka (2011)	Única inclinação (modificado) ²	Japão	6,8 l/m ² .d
Wassouf <i>et al.</i> (2011)	Piramidal	Austrália	2,5 l/m ² .d
Dev <i>et al.</i> (2011)	Prisma triangular	Omã	1,5 l/m ² .d
Ansari <i>et al.</i> (2013)	Única inclinação (modificado) ³	Marrocos	3,0 l/m ² .d
Sathyamurthy <i>et al.</i> (2015)	Única inclinação	Índia	1,4 l/m ² .d
El-Bialy <i>et al.</i> (2016)	Dupla inclinação	Egito	3,8 l/m ² .d
Omara, Kabeel e Abdullah (2017)	Única inclinação (modificado) ²	Egito	3,5 l/m ² .d
Kabeel <i>et al.</i> (2018)	Painel fotovoltaico (híbrido)	Índia	5,9 l/m ² .d
Kabeel <i>et al.</i> (2020)	Piramidal	Índia	2,8 l/m ² .d
Tayeb (1991)	Única inclinação	Egito	1,3 l/m ² .d

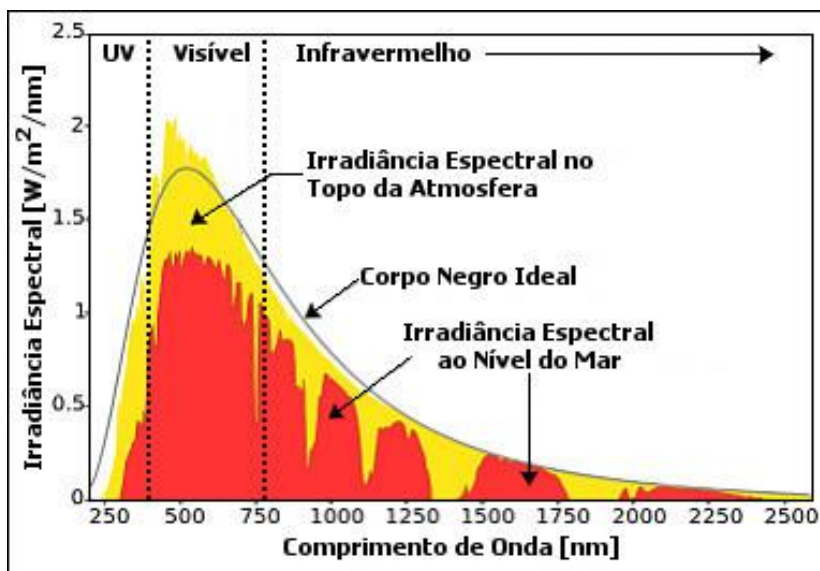
Legenda: 1 – Refletor e condensador; 2 – Refletores; 3 – Coletor e armazenador de calor
 Fonte: Autor.

3.4. PRINCÍPIOS DE OPERAÇÃO E MECANISMOS FÍSICOS DE UM DESTILADOR SOLAR PIRAMIDAL NA PRODUÇÃO DE ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO

Segundo Kalidasa *et al.* (2008), o sistema de destilação de água por meio de um destilador solar piramidal ocorre de forma passiva. Ele é categorizado como passivo porque os processos envolvidos para destilação dentro do sistema dependem apenas de variáveis meteorológicas, após sua construção. A captação e armazenamento da água destilada, o sistema de alimentação e a eficiência (minimização das perdas de energia) dependem do conjunto de materiais e dimensões que compõem a estrutura do sistema.

De acordo com Velmurugan *et al.* (2008), Jani e Modi (2018) e Hoff *et al.* (2019), o princípio de operação do sistema de destilação solar é de reproduzir os fenômenos do ciclo da água em uma estufa capaz de coletar a água que neste é evaporada. A energia solar é utilizada para aquecer a água bruta, segundo Gómez *et al.* (2018) as ondas que mais contribuem, a nível do mar, para o aquecimento dos diferentes corpos presentes no globo, e do próprio globo terrestre, são as ondas infravermelho, do intervalo de 900 a 1750 nm. O espectro solar pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 – Espectro da radiação solar



Fonte: GeoDesign (2016).

A radiação solar incide sob a água situada no tanque raso, que absorve a energia emanada por essas ondas incidentes, que propiciam maior agitação das partículas em

suspensão e dissolvidas presentes na água e da própria água. Após um determinado tempo, compatível à intensidade da exposição, o estado líquido da água é alterado para o gasoso (vapor), que por estar enclausurado, o vapor satura-se e adere ao contato de sua cobertura, na qual está a uma temperatura inferior à da água evaporada, que acaba por condensá-la, processo semelhante ao ponto de orvalho. A água condensada por sua vez é direcionada, por mecanismos de coleta a um reservatório, para que seja armazenada e assim utilizada.

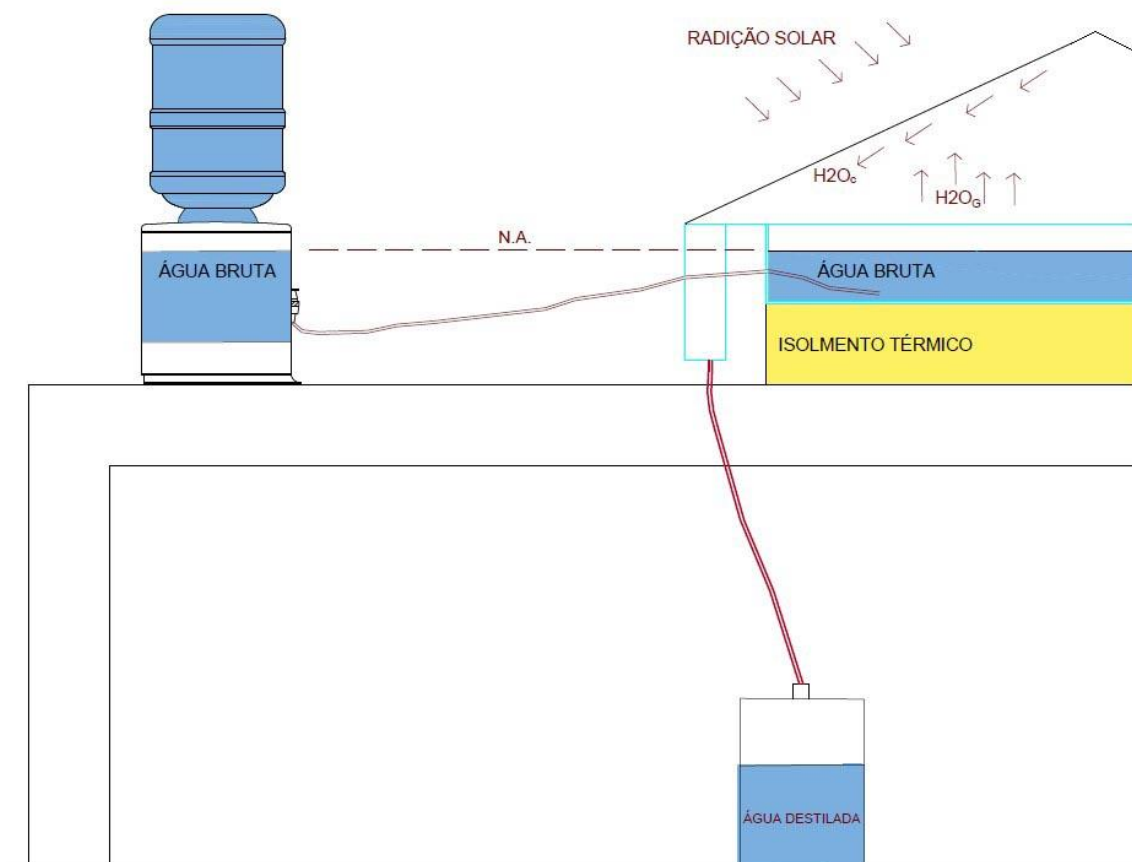
Os sistemas geralmente se iniciam com um sistema de alimentação de água bruta para o tanque raso, mantendo constante a altura da lâmina de água. Como explicado por Vertchenko, Dickman e Ferreira (2009), o processo físico envolvido para que o sistema de alimentação possa operar é baseado no princípio de Bernoulli, no que se refere a transferência de fluido entre dois reservatórios, onde ambos estão submetidos a mesma pressão, no caso a atmosférica. A diferença de carga hidráulica entre o reservatório de água bruta e a altura da lâmina de água do tanque é o que permite a transferência de água para dentro do sistema, que é interrompido quando as cargas hidráulicas se equilibram, conforme Figura 9.

Segundo Das *et al.* (2020), o processo de umidificação, que é o mecanismo de destilação do destilador solar piramidal, ocorre de forma similar ao processo de estufa. Este sistema de estufa é composto pelo tanque raso, que armazena a água a ser evaporada, e por uma cobertura, tendo vidro como material mais utilizado.

Como recomendam Muthu Manokar *et al.* (2020) e Modi e Nayi (2020), a cobertura deve ser projetada com a capacidade de transmitir o máximo de radiação diária e manter o calor gerado dentro do sistema. Em função das altas temperaturas no processo de destilação, o vidro se torna o principal material utilizado, por ser resistente, translúcido e pouco dilatável. A cobertura deve ser capaz de permitir a condensação do vapor, e preferencialmente, por formação de uma lâmina de água condensada que seja direcionada para o sistema de coleta. Segundo Maluf (2005), a formação de lâminas é preferível à formação de gotas, pois estas afetam o desempenho do sistema, já que seu acúmulo é capaz de divergir e absorver a radiação solar, e podem cair de volta para o tanque em vez de serem coletadas.

A Figura 9 representa o esquema de operação de um destilador solar piramidal.

Figura 9 – Esquema genérico de operação de um destilador solar piramidal



Fonte: Autor.

Como demonstra o esquema da Figura 9, com a incidência de radiação, a água bruta umidifica o ar interno do destilador (H_2O_g), e esta por sua vez é condensada na superfície do material de cobertura (H_2O_c), que é coletada e armazenada. A alimentação de água bruta do reservatório para o tanque raso de água bruta (bandeja) é determinada pelo nível de água (N.A.).

3.5. VARIÁVEIS CONSTRUTIVAS DOS DESTILADORES QUE INFLUENCIAM NA PRODUÇÃO DE ÁGUA

Existem recomendações acerca das dimensões do tanque raso e da inclinação da cobertura com relação à superfície da água a ser destilada (Figura 9). Segundo Maluf (2005), a distância entre a cobertura de vidro à superfície da água não deve ser maior que cinco ou sete centímetros, para que o destilador opere com maior eficiência. À medida

que a distância entre o vidro e a água aumenta, as perdas térmicas por convecção também aumentam e a eficiência do destilador diminui. De acordo com Panchal *et al.* (2020), o ângulo de inclinação da cobertura de vidro tem influência na quantidade de radiação solar que entra no destilador. Quanto mais ortogonal à superfície do vidro for esse ângulo de incidência, melhor será a eficiência de produção. Portanto, para que se obtenha maior eficiência de produção, os destiladores possuem área máxima útil, para que esta acompanhe as melhores inclinações com relação à latitude em que o destilador está sendo operado (Figura 9).

O tanque raso de água bruta contém a água de alimentação, que será destilada. Delynnais e Belessiotis (1995), Omara, Kabeel e Abdullah (2017) e Das *et al.* (2020) recomendam que este seja pintado de uma cor escura, preferencialmente preta, para que possa absorver melhor a radiação solar e transformá-la em calor. Segundo Castro *et al.* (2003) a cor preta para um corpo liso atribui maior absorvidade do espectro de luz visível solar do que qualquer outra cor. Para promover uma maior eficiência, os tanques devem ser de material com boa capacidade térmica, para que seja capaz de aquecer-se rapidamente, e por consequência, aquecer a água bruta para acelerar e manter o processo de destilação.

Sharshir *et al.* (2016), Chandrashekara e Yadav (2017) e Morad *et al.* (2017) destacam que o aspecto complementar para maximizar a eficiência da produção de um destilador é o seu isolamento. O isolamento pode ser efetuado em todos os contatos de diferentes materiais que compõem o sistema, que podem evitar maiores perdas de calor do destilador para o ambiente. Nos destiladores de tanque raso, geralmente utiliza-se algum material isolante por baixo do tanque (Figura 9).

3.6. PRINCIPAIS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS INFLUENCIADORAS NO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ÁGUA

O processo de destilação passiva da água por meio de sistemas de destilação solar depende basicamente das transferências de energia. As condições climáticas, que influenciam diretamente na eficiência de produção, podem ser no máximo aproveitadas pelo melhor *design* do destilador solar de onde será instalado. Segundo Kalidasa, Chockalingam e Srithar (2008), Sathyamurthy *et al.* (2017), a maximização da eficiência de um destilador solar depende de os seguintes parâmetros estarem aprimorados para as

condições locais e próprias do destilador: ângulo de inclinação da placa de cobertura; altura da água do tanque; temperatura da placa de cobertura; orientação do destilador solar, com relação ao Sol; transferência convectiva de calor da placa de cobertura e das paredes laterais; isolamento. De acordo com Jani e Modi (2018) a produtividade também é influenciada por menores espessuras do material de cobertura, também pelo tipo de material do tanque raso.

Segundo Shyamurthy *et al.* (2017), Das *et al.* (2020) e Panchal *et al.* (2020), todo o desempenho do destilador é dependente, de forma primordial, do fluxo de água evaporada do tanque e de sua condensação. Este desempenho pode ser avaliado com base nos seguintes parâmetros: taxa de transferência de calor entre a placa de cobertura e a água do tanque; diferença de temperatura entre o ar interno e a placa de cobertura; quantidade de água produzida; eficiência térmica.

De acordo com Xiao *et al.* (2013) e Hoff *et al.* (2019), os principais parâmetros meteorológicos que influenciam no processo de produção são: a radiação solar; temperatura ambiente; velocidade dos ventos; e umidade relativa do ar. A radiação acaba por influenciar a produção de forma condicional a eficiência de produção, pois sem radiação solar não há como transmitir energia capaz de aquecer a água bruta. Os raios incidentes da cobertura são transmitidos para o próprio material, que incide, converge, absorve e reflete os raios simultaneamente. Os incidentes e convergentes são direcionados para a água, que reproduz os mesmos efeitos do material de cobertura, para o tanque, e estes são capazes de armazenar a energia e trocar calor entre si constantemente, com o ar interno do destilador e com a cobertura, fazendo com que maiores disparidades de temperatura entre ar interno e superfície da cobertura propiciem maiores produtividades.

Kabeel, Omara e Younes (2015), Morad, El-Maghawry e Wasfy (2017) e Dhindsa e Mittal (2018) relacionam que a temperatura ambiente acaba por influenciar diretamente na temperatura do material de cobertura, que age como coletor e condensador do vapor de água. Quanto menor for a temperatura do ambiente, maior será a taxa de transferência de calor, para que assim se condense, em função da placa de cobertura perder calor para o ambiente. Com o mesmo efeito, a umidade relativa do ar e a velocidade do vento, implicam a contribuição da taxa de transferência de calor, por influenciarem na diminuição da temperatura do material de cobertura que se aquece, pela radiação, convecção e condução. Como recomendam Chandrashekara e Yadav (2017), a utilização e instalação de destiladores que produzem água com base no processo de umidificação é

mais produtiva quando estes estão situados próximos a áreas litorâneas, por serem locais que possuem alta umidade relativa e intenso fluxo de ventos.

3.6.1. Meios de analisar a produtividade dos destiladores com base no estudo das variáveis meteorológicas

Segundo Soares (2004), o rendimento dos destiladores solares pode ser expresso pelo volume de água produzida por unidade de área (L/m²). Este é um método simples para analisar a produtividade, tendo em vista que só se leva em consideração o quanto foi produzido e a área da cobertura. A influência de qualquer variável estaria ligada ao quanto se foi produzido. A autora ainda salienta de que uma vez construídos e instalados, os destiladores possuem configuração geométrica permanente e seu rendimento se dará exclusivamente em função das condições ambientais.

Soares (2004) também destaca que a relação da capacidade de produção de água por sistemas de destilação solar está ligada, principalmente, à energia disponível que é emitida pelo Sol. A constante solar fora da atmosfera terrestre é de 1,4 KW/m². Ao entrar na atmosfera parte desta potência é absorvida pelas impurezas, poeiras, vapor d'água e outros materiais. Para que 1 Kg de água seja evaporado a temperatura de 30°C cerca de 2.4x10⁶ J são requeridos, assumindo uma insolação de 250 W/m² medida sob 24 horas e esta energia poderia evaporar um máximo de 9,0 L/m².dia. Na prática, com as perdas de calor do ambiente e do destilador, a média de água produzida pode ser de 4,0 a 5,0 L/m².dia apresentando uma eficiência de 45 a 55%.

Segundo Sharshir *et al.* (2016), a eficiência pode ser expressa em função da taxa de massa de água evaporada, do calor latente da água evaporada, da radiação solar sob a cobertura e da área do destilador. A equação (1) expressa o cálculo da eficiência.

$$\eta = \frac{\Sigma m_{dss} \times h_{fg}}{\Sigma I(t) \times A} \quad (1)$$

Onde:

η = Eficiência de produção (%);

m_{dss} = Taxa de evaporação da água (kg/s);

h_{fgss} = Calor latente da evaporação da água (W/kg);

$I(t)$ = Radiação incidente na área da superfície do destilador (W/m²);

A = Área da superfície do destilador (m²).

A equação do cálculo de eficácia leva em consideração apenas a radiação solar diária local, a influência dos parâmetros de vento, umidade relativa e temperatura ambiente, por exemplo, teriam contribuição na análise da eficiência na massa produzida de água. Não existe equação universal capaz de avaliar o grau de influência de cada parâmetro, em função de que cada localidade do globo possui diferentes características, das quais os parâmetros meteorológicos influenciadores se relacionam entre si.

3.7. PARÂMETROS INFLUENCIADORES NO PADRÃO DE QUALIDADE DA ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO DESTE ESTUDO

A água, quando em estado de pureza, não possui sabor e odor próprios. Por esta razão, a água destilada é desagradável ao paladar sendo desejável na água potável, devido a presença de algumas substâncias, em baixas concentrações, que promovem a sua palatabilidade. Entre substâncias mais frequentemente encontradas nas águas naturais, figuram: os carbonatos, sulfatos, cloretos e nitratos de cálcio, ferro, magnésio e sódio, além de alguns compostos de silício e, frequentemente, vários compostos orgânicos (BRANCO, 1996).

Os principais fatores que podem tornar a água imprópria para o consumo são: microorganismos parasitas, tais como bactérias, vírus, protozoários e vermes; elementos tóxicos; sabor e odor desagradáveis; cor e turbidez; elementos corrosivos, incrustantes, etc. (BRANCO, 1986).

O caráter potável da água está associado a padrões físicos, químicos e microbiológicos, que no Brasil são determinados pela Portaria de Consolidação nº 05 de 03/10/2017, do Ministério da Saúde. De acordo com seu Capítulo IV, que trata das exigências aplicáveis aos sistemas e soluções alternativas coletivas de abastecimento de água para consumo humano, prevê em seu art. 24. que toda água para consumo humano, fornecida coletivamente, deverá passar por processo de desinfecção ou cloração.

De acordo com a Comusa (2017), a desinfecção da água tem como objetivo inativar ou destruir organismos patogênicos, que usualmente pode ser desempenhada por meio de tratamentos físicos, como por exemplo filtração em membranas, fervura, radiação ultravioleta ou tratamentos químicos, por cloro ou ozônio. Essas tecnologias dependem de fontes de energia ou produtos químicos, com custos de operação e manutenção, que eventualmente não estão sempre à disposição. Segundo Daniel *et al.* (2001), uma fonte renovável, limpa e sem custo capaz de produzir efeito de desinfecção na água é a radiação solar, desde que operada com uma tecnologia que consiga efetivamente promover a desinfecção.

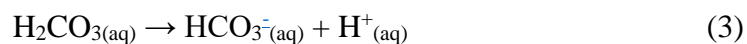
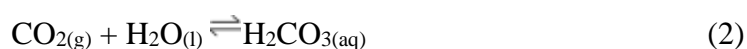
A utilização de destiladores solares para produção de água para consumo humano é mais empregada para dessalinizar a água, tendo em vista que processos ativos demandam muita energia e recursos, quando comparados à destilação solar. A proposta deste tipo de tecnologia, independente de qual água é introduzida ao sistema, é de que seu produto seja próprio para consumo. Quanto à água salina, o principal parâmetro que visa ser removido é o da condutividade elétrica, que é advinda principalmente de cloretos. A água salina possui valores extremamente altos de condutividade, como por exemplo 29100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, que ao ser destilada por um destilador solar piramidal de tanque raso passou a ser 15 $\mu\text{S}/\text{cm}$, de acordo com a pesquisa de Faria *et al.* (2015).

Outros dois parâmetros de destaque a serem avaliados para as águas destiladas são o parâmetro físico de pH e o microbiológico em geral, no que se refere à presença de microrganismos patológicos. O pH está relacionado à potabilidade da água, e geralmente os valores medidos das águas destiladas estudadas, por Soares (2004), Hanson *et al.* (2004) e Panchal *et al.* (2020), encontram-se dentro dos limites de potabilidade e geralmente próximo da neutralidade. No entanto, o aspecto a ser considerado sobre o pH é o da corrosão dos materiais das estruturas do sistema de destilação. De acordo com Mathioulakis, Belessiotis e Delyannis (2007), o caráter ácido da água acaba por reagir, por exemplo, com as tintas, metais e superfícies em geral, que podem liberar substâncias que são dissolvidas na água, capazes de atribuir odor, sabor e coloração a água destilada, além disso, dependendo de sua composição podem ser tóxicas.

Uma possível explicação para a presença do caráter ácido na água destilada pode ser em decorrência da solubilidade de CO_2 atmosférico. Segundo Weiss (1972), o CO_2 é o gás presente na atmosfera, em condições naturais, mais solúvel. A solubilidade do gás está relacionada ao aumento de temperatura e pressão do solvente. O aumento da

temperatura da água, durante o processo de destilação, propicia a um acréscimo de CO₂ dissolvido na água destilada, que produz ácido carbônico (H₂CO₃), que mesmo sendo fraco é capaz de acidificar a água logo após de ser destilada a ponto de poder ser corrosiva aos materiais do sistema, pela própria dissociação do ácido em meio aquoso. Após coletada e armazenada a água tende ao seu equilíbrio, por consequência, o pH fica próximo à neutralidade.

A produção e dissociação do ácido carbônico no meio ambiente pode ser representado pelas equações (2 e 3):



No que se refere à destilação solar de água doce, além de pH, condutividade elétrica e microrganismos patogênicos, também é visado a remoção de turbidez e cor. De acordo com Sperling (2005), os sólidos dissolvidos presentes na água podem atribuir cor à água e os sólidos em suspensão podem atribuir turbidez. Em água doce os sólidos, tanto suspensos quanto dissolvidos, podem ser advindos de fontes naturais ou não. Esses sólidos estão associados a partículas capazes ou não de serem nocivas à saúde, pois podem estar associados à presença de microrganismos ou substâncias tóxicas.

3.8.MECANISMOS ENVOLVIDOS NA REMOÇÃO DE VARIÁVEIS DO PADRÃO DE QUALIDADE DA ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO

O propósito do uso de destilação solar em águas doces contaminadas, ou águas salinas, é visado para remover parâmetros que atribuem as características destas águas como impróprias para consumo. De modo geral, os parâmetros que contribuem para esse atributo é a presença de sólidos dissolvidos ou suspensos e microrganismos patogênicos. De acordo com Soares (2004), dentro do sistema de destilação solar, essas variáveis são removidas ou inativadas por meio de processos físicos.

Como revisaram Jani e Modi (2018), a maior parte do uso da destilação solar é voltada para a dessalinização da água. Como destacam Kabeel, Omara e Younes (2015), Sharshir *et al.* (2016) e Chandrashekara e Yadav (2017), o êxito do sistema em produzir

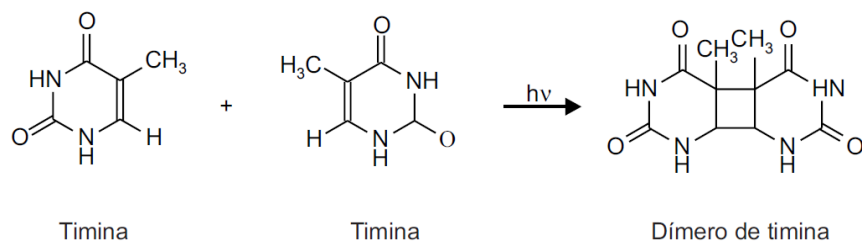
água potável e com baixíssimas concentrações de sais está relacionado com a temperatura necessária para que estes sólidos dissolvidos e suspensos possam ser volatilizados, fazendo com que uma grande quantidade fique retida no tanque raso. Das *et al.* (2020) salientam que, em geral, a temperatura medida da água e do ar dentro dos sistemas convencionais de destilação solar não chegam a 90° C, enquanto a temperatura necessária para volatilizar a maioria dos materiais presentes na água são superiores a 100° C. Portanto, parâmetros associados à presença de sólidos, como por exemplo turbidez, condutividade elétrica e cor, apresentam acentuada remoção.

Em seus estudos, Hoff *et al.* (2019) analisam a remoção de agroquímicos por meio do processo de fotólise das diferentes moléculas orgânicas presentes e seus eventuais subprodutos em água doce altamente contaminada. Seu estudo pode ser conclusivo de que as moléculas são removidas da água ou encontradas em complexos não-tóxicos a valores maiores de 90%. Ainda no estudo de Mota e Andrade (1986), foram confirmadas remoções próximas a 90% das concentrações de dureza total, alcalinidade total, cloretos totais, ferro e nitrito. A maioria desses parâmetros são advindos de moléculas inorgânicas com elevada temperatura de volatilização, portanto, também apresentam acentuada remoção.

De acordo com Martínez-García *et al.* (2020), Yan *et al.* (2020) e Parsa *et al.* (2020), em termos de desinfecção da água para consumo produzida pela destilação solar, os agentes físicos atuantes no processo são a radiação ultravioleta, elevação da temperatura da água e alteração do pH. A radiação ultravioleta atinge principalmente os ácidos nucléicos dos microrganismos, que promove reações fotoquímicas que os inativam. As temperaturas elevadas do processo de destilação solar e as alterações do pH acabam por desnaturar a estrutura celular dos diferentes microrganismos patogênicos.

De acordo Daniel *et al.* (2001), a radiação natural ultravioleta UV-A, de 320 a 400 nm, advinda do espectro solar é a maior responsável pela inativação dos microrganismos, em função de ser a mais abundante ao chegar no solo terrestre, age ao ser absorvida pelas bases nitrogenadas adjacentes resultando na formação de dímeros, como citosina-citosina, adenina-adenina e timina-timina. A timina, por ser a estrutura mais simples das bases nitrogenadas, é a que apresenta maior formação de dímeros, os quais mudam a estrutura do DNA, acabando por impedir a reprodução dos microrganismos. Esse mecanismo pode ser representado na Figura 10.

Figura 10 – Dimerização fotoquímica de duas bases timina



Fonte: Extraído de Daniel *et al.* (2001).

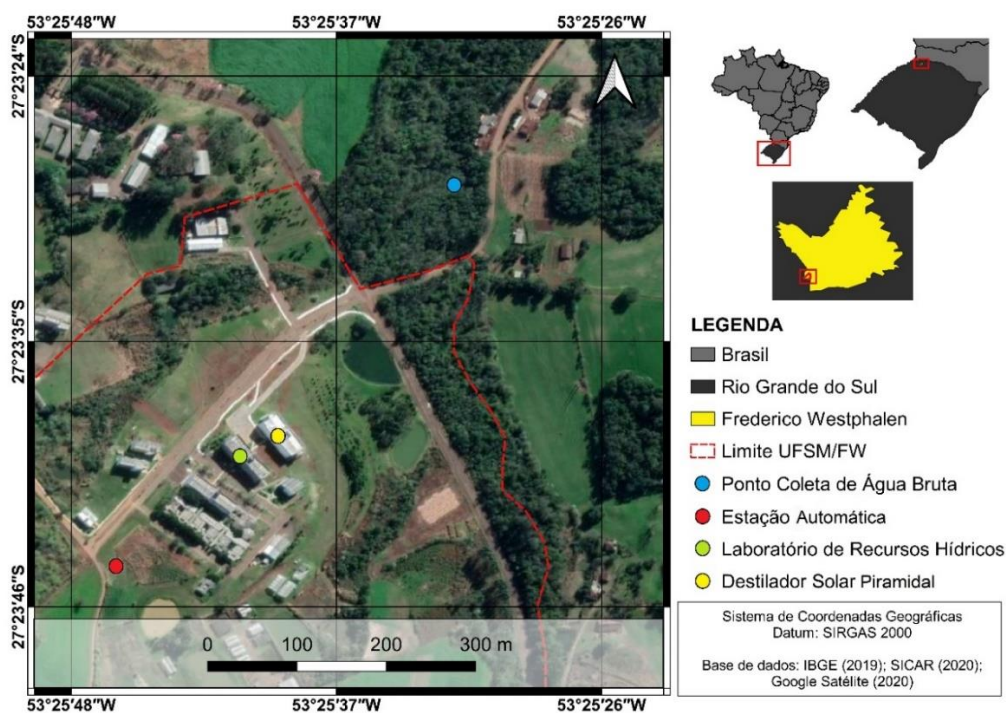
4. MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento do estudo se deu de forma dinâmica, com participação de terceiros para condições estruturais, que geraram critérios de escolha, para atender aos objetivos estabelecidos. A primeira etapa do estudo envolveu a construção do destilador solar piramidal e de suas componentes e a segunda envolveu a coleta de dados e suas análises. Nos subitens seguintes, são detalhadas as condições, os materiais, as dimensões, os critérios de escolha e os métodos associados as etapas citadas para o desenvolvimento deste estudo.

4.1. LOCAL DE ESTUDO

O presente estudo foi desenvolvido na Universidade Federal de Santa Maria, no *campus* de Frederico Westphalen. O mapa de localização (Figura 11) dispõe a localidade dos diferentes pontos envolvidos no estudo e a Tabela 2 apresenta as coordenadas e altitudes dos diferentes pontos.

Figura 11 – Mapa de localização do estudo



Fonte: Autor.

Tabela 2 – Coordenadas dos diferentes locais deste estudo

Local	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Coleta de água bruta	27°23'28" S	53°25'32" O	463
Destilador Solar Piramidal	27°23'38" S	53°25'39" O	489
Laboratório de Recursos	27°23'39" S	53°25'41" O	484
Estação Automática	27°23'44" S	53°25'45" O	489

Fonte: Autor.

4.2.CONSTRUÇÃO DO DESTILADOR SOLAR PIRAMIDAL

A construção do destilador solar piramidal foi realizada, por um conjunto de estruturas e com o auxílio de terceiros, na confecção das estruturas e da aquisição das peças e acessórios, para que pudesse ser operado. As decisões sobre os critérios de seleção das dimensões e composições dos materiais foram executadas a partir da disponibilidade, facilidade de montagem e do custo e, ainda, com base nas recomendações de autores como: El-Bahi e Inan (1999); Soares (2004); Maluf (2005); Kabeel (2007); Das *et al.* (2012); Bhattacharyya (2013); Jani e Modi (2018); Nayi e Modi (2018); Hoff *et al.* (2019). O arranjo do destilador solar piramidal foi dividido pelas componentes de cobertura, módulo acoplado, tanque raso, isolamento e sistema de alimentação e coleta.

A cobertura selecionada para compor o destilador solar foi do tipo piramidal, da qual se consiste em 4 placas de triângulos isósceles de vidro comum de 4 mm de espessura. A angulação da cobertura é de 25°, para maximizar a coleta dos raios solares e da água condensada. As placas foram unidas pelas arestas laterais com silicone, que também serve para isolamento (Figura 12).

O módulo acoplado é a estrutura na qual a cobertura é acoplada e possui a função de contenção do calor e direcionar, por meio das calhas, a água condensada até os reservatórios de água tratada. O material escolhido para esta estrutura foi o Polímero Reforçado com Fibra de Vidro (fibra de vidro), em função do seu custo e fácil manipulação. A estrutura foi pintada de azul com tinta Epóxi (Figura 13).

O material utilizado para confecção do tanque raso foi uma placa de aço galvanizado com espessura de 2 mm, que foi soldada para montar uma bandeja quadrada com aresta de 40 cm e altura de 5 cm em suas laterais. A superfície foi pintada de preto para maximizar a absorção da radiação solar (Figura 14).

O isolamento foi montado colando em uma placa de fibra de vidro, que abrange toda a área inferior do módulo acoplado, com duas camadas de 2 cm de Poliuretano macio (Figura 15).

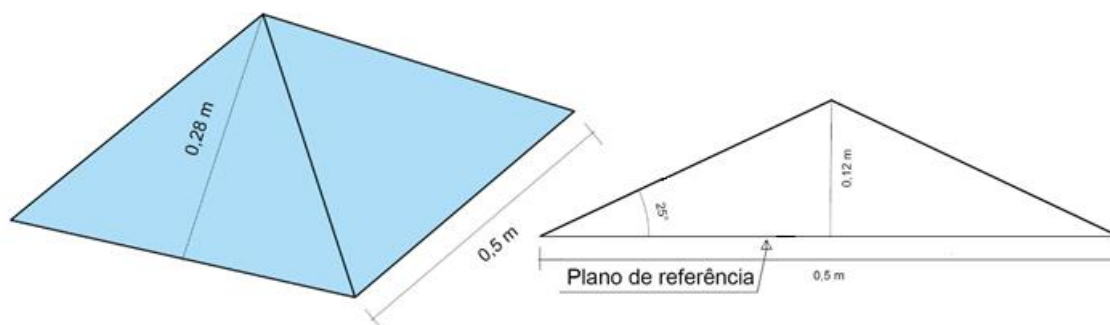
O sistema completo do destilador solar piramidal está representado na Figura 16 e as informações referentes a cada componente estão dispostas na Tabela 3. Os desenhos explicativos e mais detalhados do respectivo destilador solar também podem ser observados nos Apêndice - A e Apêndice - B.

Tabela 3 – Componentes do destilador solar piramidal e suas configurações

Componente	Material	Dimensões				
		Espessura	Aresta	Área	Altura	Inclinação
Cobertura	Vidro	4 mm	0,5 m	0,25 m ²	0,12 m	25°
Módulo acoplado	Fibra de vidro	4 mm	0,5 m	0,25 m ²	0,07 m	
Tanque raso	Aço galvanizado	2 mm	0,4 m	0,16 m ²	0,05 m	
Isolamento	Poliuretano macio	20 mm	0,5 m	0,25 m ²	0,04 m	

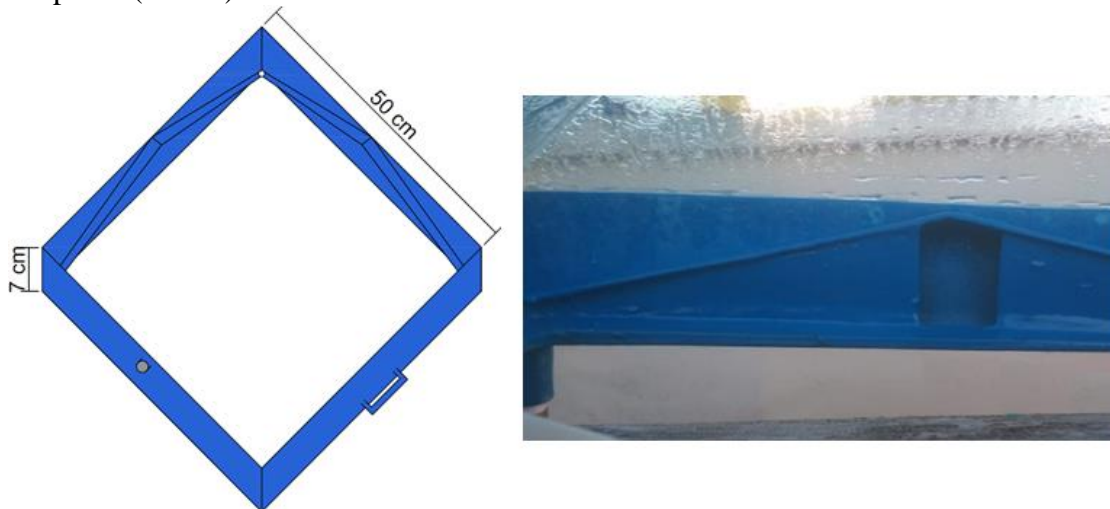
Fonte: Autor.

Figura 12 – Vista inclinada da cobertura de vidro (esquerda) e em corte da cobertura de vidro (direita)



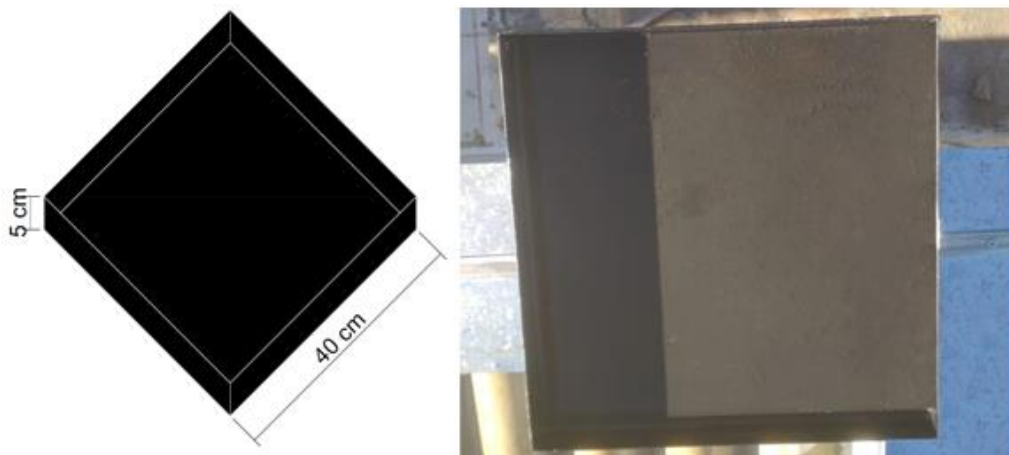
Fonte: Autor.

Figura 13 – Vista inclinada do módulo acoplado (esquerda) e foto interna do módulo acoplado (direita)



Fonte: Autor.

Figura 14 – Vista inclinada do tanque raso (esquerda) e foto do tanque raso (direita)



Fonte: Autor.

Figura 15 – Foto da espuma isolante



Fonte: Autor.

Figura 16 – Sistema completo do destilador solar piramidal



Fonte: Autor.

4.3. OPERAÇÃO DO DESTILADOR PIRAMIDAL

Como já citado pela literatura, a operação dos destiladores solares é extremamente simples, depende exclusivamente da introdução de água bruta, coleta da água destilada e eventuais manutenções, como limpeza e repintar o tanque raso.

- Coleta de água bruta:

A operação do destilador piramidal se inicia com a introdução de água bruta em seu sistema de alimentação. Semanalmente eram coletados aproximadamente 15 litros de água bruta para que fossem inseridos ao sistema de alimentação do destilador piramidal. A água era coletada em uma zona lântica (Figura 17) e com auxílio de um balde, que direcionava a água para um galão de 25 litros para transportar a água bruta coletada. Aproximadamente 1 litro de água bruta coletada era encaminhada para análise no laboratório, enquanto o restante era para o sistema. Toda água bruta residual que não foi destilada, era totalmente removida e substituída pelo novo volume coletado, tendo em vista que as análises da eficiência de remoção dos parâmetros visados dependem dos valores dos parâmetros encontrados na água bruta.

Figura 17 – Foto da zona de coleta de água bruta



Fonte: Autor.

- Coleta de água destilada:

Com base nos índices de radiação solar e o início da produção de água destilada, a água destilada era coletada diariamente, sempre que possível, nos primeiros horários da manhã, até no máximo 9 horas. O volume coletado dos reservatórios de água destilada era medido em uma proveta volumétrica, que indicava o quanto foi produzido ao todo do dia anterior. O volume mensurado era armazenado no acesso da cobertura do prédio da Universidade, em local escuro e coberto, para preservar ao máximo suas condições, sempre que coletado, para ser analisado nos mesmos dias em que a água bruta fosse analisada para comparar o desempenho do tratamento da água produzida.

- Limpeza do sistema:

A periodicidade da limpeza do sistema era mensal, exceto do sistema de alimentação de água bruta, que acumulava um pouco de lodo semanalmente. Diferentemente da destilação de água salina, a água doce gera pouquíssimas incrustações no tanque raso, portanto, o processo de limpeza envolvia a limpeza das superfícies, higienização com água sanitária dos reservatórios e mangueiras, retocar a pintura de tinta preta do tanque raso, que também era degradada pelo contato com a água bruta aquecida.

- Monitoramento de dados meteorológicos:

Os dados meteorológicos foram coletados a partir dos dados registrados pela Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática de Frederico

Westphalen (Figura 18). A estação é capaz de integrar os valores observados pelos seus sensores em uma unidade de memória que transfere seus dados para o sistema de informações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A estação é capaz de medir, a cada hora do dia, as seguintes variáveis: a temperatura ambiente instantânea, máxima e mínima em °C; a umidade relativa, em porcentagem; a temperatura do ponto de orvalho, em °C; a pressão atmosférica, em hPa; a velocidade do vento, em m/s, juntamente com sua direção em graus em relação ao norte; a radiação solar, em kJ/m²; a precipitação, em mm.

As variáveis influenciadoras analisadas neste estudo, no processo de produção de água destilada por um destilador solar são: a radiação solar; temperatura ambiente; umidade relativa do ar; vento. Em função da estação possuir altura muito próxima de onde o destilador se encontra e distância vertical próxima de 190 metros, os dados obtidos nas medições da estação podem ser considerados fidedignos, para este estudo.

Figura 18 – Foto da Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática de Frederico



Fonte: Autor.

4.4. ANÁLISE DE EFICIÊNCIA E DESEMPENHO TÉRMICO DO SISTEMA E SUA INFLUÊNCIA SOBRE A PRODUÇÃO DE ÁGUA DESTILADA

Durante o processo de coleta de dados, foram considerados 69 dias completos que produziram água destilada, para avaliar a eficiência de produção, confirmar a influência das variáveis climáticas no processo produtivo e comparar com outros destiladores piramidais.

A análise quantitativa da produção de água para consumo humano pelo destilador solar piramidal depende do controle do volume produzido e de como esta produção se relaciona com as variáveis climáticas. Estas análises foram desenvolvidas para atender aos critérios de avaliação da eficiência de produção do sistema de destilação. Por meio da análise destas variáveis, torna-se possível a comparação da eficiência do presente destilador solar, com outros destiladores sob suas devidas configurações, condições locais e critérios para maximizar a produção com a mesma tecnologia na região estudada.

Para avaliar a eficiência de produção a seguinte equação (4) foi utilizada:

$$\eta = \frac{P \times L}{H_s \times C} \quad (4)$$

Onde:

η = Eficiência de produção (%);

P = Produção de água destilada (kg/m²);

L = Calor latente de vaporização da água (2252 kJ/kg);

H_s = Balanço de radiação durante operação (kW/m²);

C = Constante de conversão do calor latente para Watts (3600).

No dia 09/10/2019, a temperatura da água e a temperatura interna do destilador, juntamente com o volume produzido, foram medidos de hora em hora para analisar o comportamento do destilador durante seu processo de produção no período de maior produtividade. As temperaturas foram medidas com o auxílio de um termômetro, com

representação da medição as 12:00 na Figura 19. As características do termômetro utilizado são: com intervalo de medição de [-50 a 110 °C]; precisão de ± 1 °C; variação do monitor de 0,1 °C. Os volumes foram medidos com auxílio de um béquer volumétrico de 100 mL.

Figura 19 – Temperaturas medidas da água bruta (esquerda) e do ar interno do destilador (direita)



Fonte: Autor.

4.5. ANÁLISE QUALITATIVA DE PRODUÇÃO DE ÁGUA

O êxito na produção de água destilada destinada para consumo humano também está associado à sua qualidade, de forma que seja enquadrada nos padrões de potabilidade. Para avaliar a eficiência de remoção, foram analisadas as seguintes variáveis: turbidez; condutividade elétrica; cor aparente; cor verdadeira; e presença de coliformes totais e *E. coli*. As metodologias de cada parâmetro e seus instrumentos de medição estão dispostas na Tabela 4, e foram realizadas em conformidade com métodos aprovados segundo o APHA *et al.* (2012) (*Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*).

Tabela 4 – Parâmetros de controle e instrumentos de medição

Parâmetros	Método de medição	Instrumento	Alcance	(continua)
				Precisão
Turbidez (NTU)	USEPA 180.1	DLT - 2500	0,01 - 1000	$\pm 2\%$
Temperatura (C°)	USEPA 4500-H+B	HQ40D	0 - 50	$\pm 0,3$
pH	USEPA 4500-H+B	HQ40D	2 - 14	

Tabela 4 – Parâmetros de controle e instrumentos de medição

(conclusão)				
Parâmetros	Método de medição	Instrumento	Alcance	Precisão
Condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	USEPA 2510-B	HQ40D	0,01 S/cm - 200 mS/cm	
Cor aparente (U.C.)	USEPA 110.2	SPECORD® 50 PLUS	190 - 1100 nm	$\pm 0,05 \%$
Cor verdadeira (U.C.)	USEPA 110.3	SPECORD® 50 PLUS	190 - 1100 nm	$\pm 0,05 \%$
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	USEPA 4500-O	HQ40D	0,1 - 20,0	$\pm 0,1$
Colif. term. (nmp/100mL)	Colilert ®			
<i>E. coli</i> (nmp/100mL)	Colilert ®			
Odor	Odor threshold test			
Sabor	Flavor threshold test			

Fonte: Autor.

4.6. ANÁLISE DE VIABILIDADE PARA USO DE PRODUÇÃO DE ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO DO PRESENTE DESTILADOR

Para análise de custo por produção de água é necessário quantificar o valor investido na confecção total do destilador solar para que este pudesse produzir água potável. O Quadro 1 indica os materiais e os custos envolvidos em cada componente do sistema.

Quadro 1 – Custo de cada material para desenvolvimento do sistema do destilador solar piramidal

(continua)

Componente	Material	Custo
Cobertura	Vidro	R\$ 200,00
Tanque raso	Aço galvanizado	R\$ 80,00
	Tinta spray preto	R\$ 9,11
Módulo acoplado	Fibra de vidro	R\$ 400,00
Isolamento e Sistema de alimentação e coleta	Poliuretano macio	R\$ 15,00
	Vasilhame de água	R\$ 5,36

Quadro 1 – Custo de cada material para desenvolvimento do sistema do destilador solar piramidal

(conclusão)		
Componente	Material	Custo
Isolamento e Sistema de alimentação e coleta	Bebedouro	R\$ 9,00
	Mangueira (3/16’’)	R\$ 5,52
	Mangueira (3/8’’)	R\$ 2,76
	Adaptador prensa	R\$ 2,70
	Espigão metálico (4 un.)	R\$ 77,52
	2 Galões de água (5 L)	R\$ 8,90
Destilador solar piramidal	Total	R\$ 815,87

Fonte: Autor.

A equação (5) que pode representar a razão entre o custo e a produção de água está disposta a seguir:

$$A = \frac{C}{P} \quad (5)$$

Onde:

A = Relação de custo/produção (R\$/L);

C = Custo de confecção total (R\$);

P = Volume produzido (L).

A introdução de diferentes volumes permite realizar análises para diferentes cenários e intervalos de tempos considerados, com diferentes critérios de análise de viabilidade.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. PRODUTIVIDADE DE ÁGUA DO DESTILADOR PIRAMIDAL E EFICIÊNCIA DE PRODUÇÃO

O Quadro 2 resume os resultados obtidos de toda a amostragem durante o período de coleta. Todos os dias e suas características também estão dispostos no Apêndice C.

Quadro 2 – Resumo da produtividade

Categoria de avaliação	Contagem ou data	L/m².dia	Radiação (kWh/m².dia)	Eficiência
Média geral de produção	69	3,18	6,87	35%
Produção usual (radiação > 5 kWh/m ² .dia)	55	3,55	7,67	31%
Produção máxima	06/12/2019	4,68	8,96	33%
Produção mínima	05/11/2019	0,28	0,96	18%

Fonte: Autor.

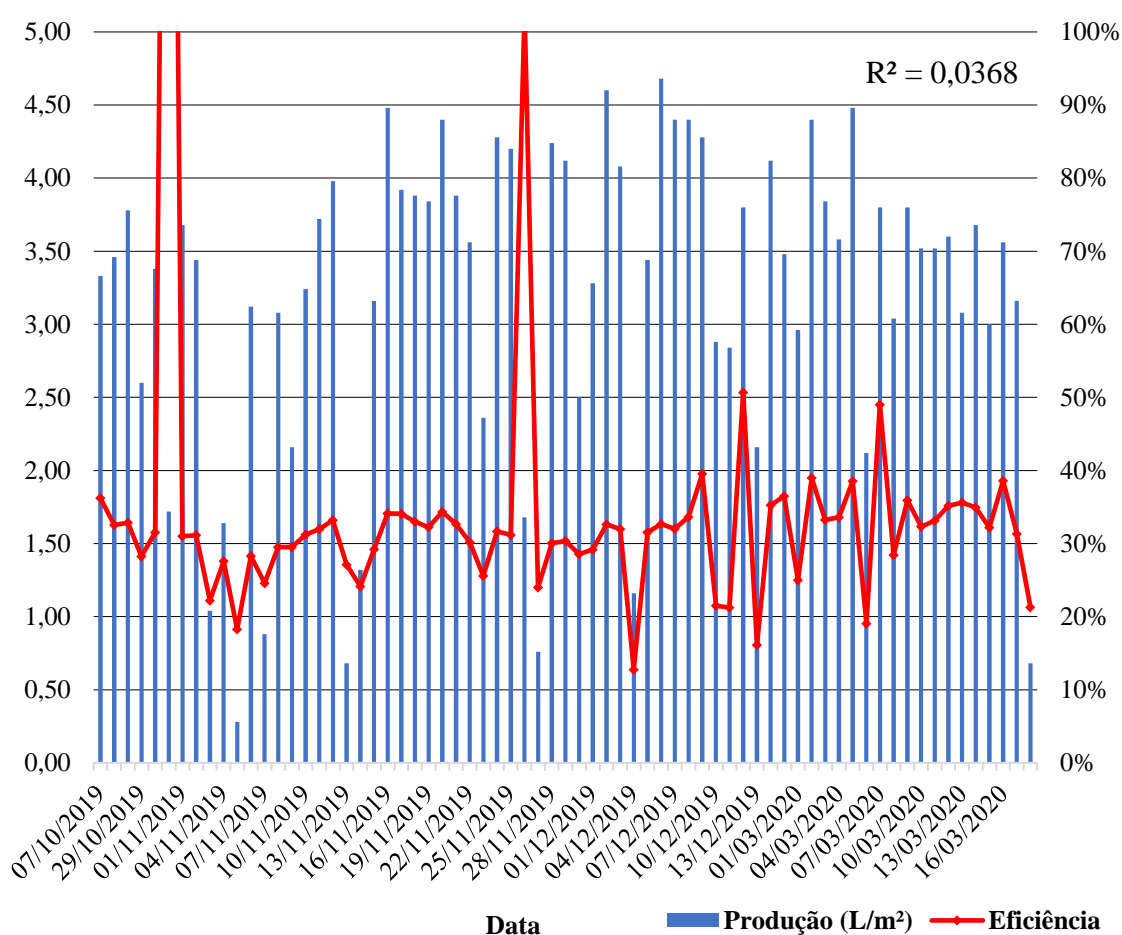
Dentro de toda a amostragem, 79,7% dos dias obtiveram balanço de radiação maior que 5 kWh/m².dia, que permitiu avaliar melhor a produção do destilador em dias que apresentaram no máximo pouca nebulosidade, portanto, favorecendo sua produtividade, e categorizando-os com dia usual de produção. As coletas variaram entre os meses de outubro a março, meses em que as estações locais são mais quentes, entre a Primavera e o Verão. Não houve nenhuma coleta de dados de produção de água para consumo nas estações mais frias, portanto, não há avaliações sobre a eficiência da tecnologia para essa época. De acordo com os mapas gerados pelo Atlas brasileiro de energia solar (2017), a região de estudo apresenta queda acentuada de irradiação solar nas estações não estudadas, o que sugere que a produção final de água possa ser bem inferior à produção das estações mais quentes, no entanto, as outras variáveis meteorológicas influenciadoras estudadas na produção de água para destilação solar seriam favoráveis. A temperatura ambiente seria mais baixa e a umidade relativa é mais alta, condições que favoreceriam a diminuição da temperatura da cobertura, e, portanto, contribuiriam para condensar a uma taxa maior, não seria o suficiente para equivaler a eficiência dos meses mais quentes.

O dia com maior produção (06/12/2019) registrou um balanço de radiação de 8,96 kWh/m².dia, valor bem acima da média, porém registrou eficiência próxima à média, indicando estabilidade na eficiência, independente da alta intensidade de radiação disponível no dia.

O dia com menor produção (05/11/2019) registrou um balanço de radiação de 0,96 kWh/m².dia e 36,6 mm de precipitação, configurando o dia como muito chuvoso. A produção de apenas 0,28 L/m², neste dia, demonstra a vulnerabilidade da tecnologia para produção de água em dias com condições desfavoráveis.

O gráfico, representado na Figura 20, indica a produção de água de todos os dias em que houve coleta e a eficiência de produção.

Figura 20 – Gráfico geral de produção e eficiência.



Fonte: Autor.

Ignorando os dias (31/10/2019 e 26/11/2019), que apresentaram eficiência, extremamente fora da tendência, de 239% e 103% respectivamente, ao analisar a tendência da linha da eficiência no restante dos 67 dias, a linha apresenta um $R^2 = 0,0368$, sugerindo que a produção é fortemente influenciada, não só pelo saldo de radiação solar, mas também como este se distribui no decorrer do dia. Além disso, os outros parâmetros influenciadores na produção contribuem para essa inconsistência no cálculo da eficiência, por estarem representadas no volume produzido, sugerindo que apenas a variável do saldo de radiação não seja o suficiente para estimar a eficiência de produção. A maioria dos dias (43) ficaram dentro do intervalo de eficiência de [30% - 40%], 17 dias dentro de [20% - 30%], e apenas 3 dias dentro de [40% - 51%].

5.2. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE UM DIA AO LONGO DA PRODUÇÃO DE ÁGUA DESTILADA

Na tabela 5 estão dispostos a média das variáveis climatológicas, dentro do intervalo onde as medições foram acompanhadas de hora em hora (10 horas às 18 horas) do dia 09/10/2019, com sua eventual produção ponderada e eficiência do dia. Os valores registrados pela estação automática estão dispostos no Anexo A.

Tabela 5 – Resumo das variáveis e produtividade do dia 09/10/2019

Temp. (°C)	Umidade rel. (%)	Vento (m/s)	Radiação acumulada (kW/m²)	Produção (L/m²)	Eficiência
24,40	48,69	1,36	7,20	3,78	33%

Fonte: Autor.

A tabela 6 representa o volume coletado, a temperatura da água e a temperatura interna do destilador, de hora em hora.

Tabela 6 – Progressão horária de produção e temperaturas analisadas do dia 09/10/2019

Hora	Volume Produzido (L)	Temp. água (°C)	Temp. interna (°C)
10	0,04	56	62
11	0,09	59	67
12	0,13	71	75

(continua)

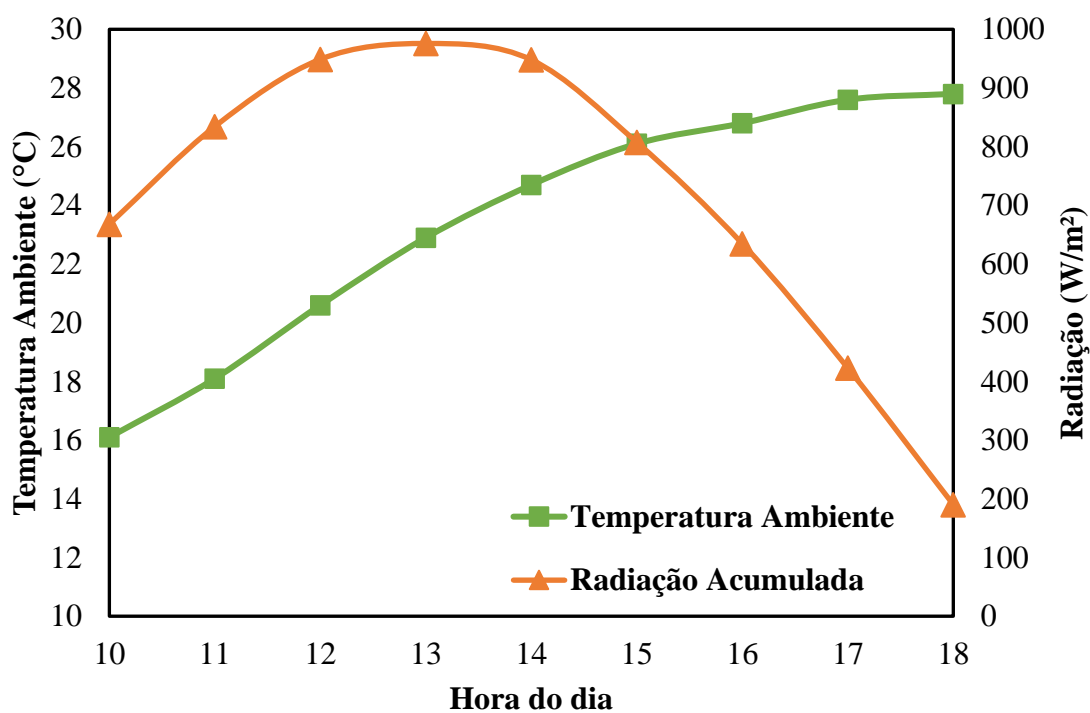
Tabela 6 – Progressão horária de produção e temperaturas analisadas do dia 09/10/2019
(conclusão)

Hora	Volume Produzido (L)	Temp. água (°C)	Temp. interna (°C)
13	0,16	76	81
14	0,14	72	79
15	0,12	69	72
16	0,09	63	67
17	0,05	56	63
18	0,04	51	59

Fonte: Autor.

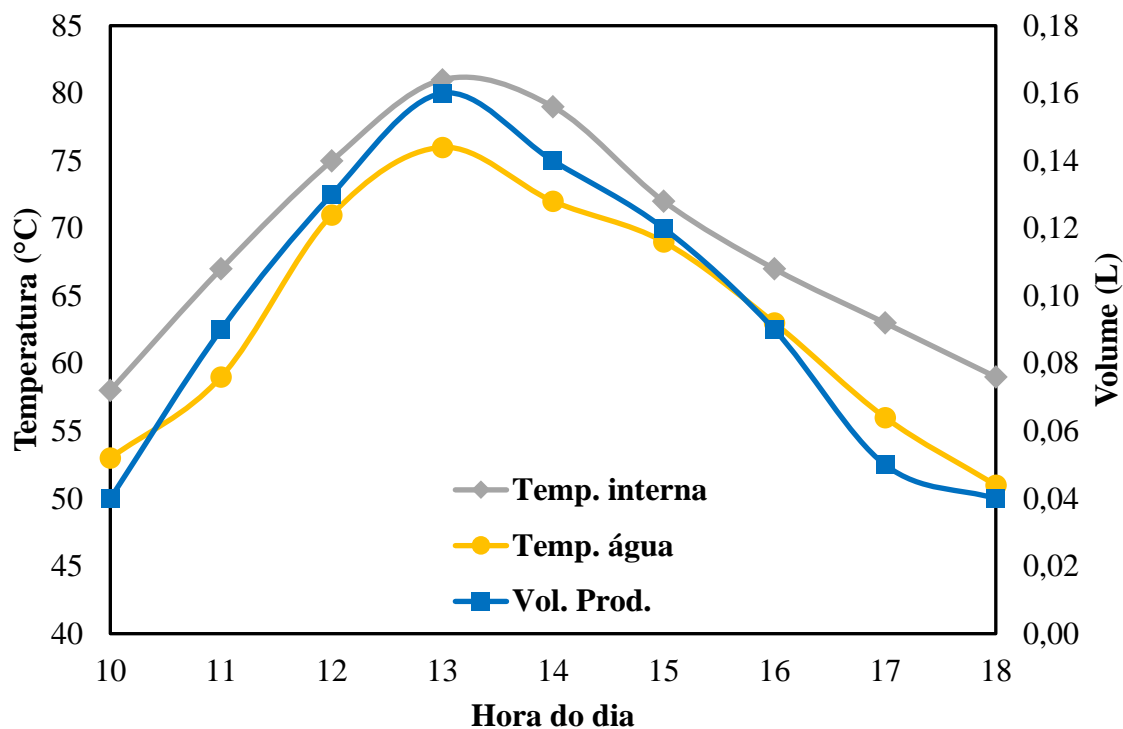
Entre as horas avaliadas a produção, em L/m², foi de 3,44, indicando que o restante de 0,34 L/m² que foram produzidos para completar o montante do dia (3,78 L/m²), foram produzidos após as 18:00 horas. A Figura 21 representa o gráfico da variação gradual da temperatura ambiente e da radiação solar. A Figura 22 representa o gráfico da variação gradual da temperatura da água e interna do destilador e volume produzido. A Figura 23 representa o gráfico da variação acumulada do volume produzido e da radiação.

Figura 21 – Gráfico de variação gradual da temperatura ambiente e radiação solar do dia 09/10/2019



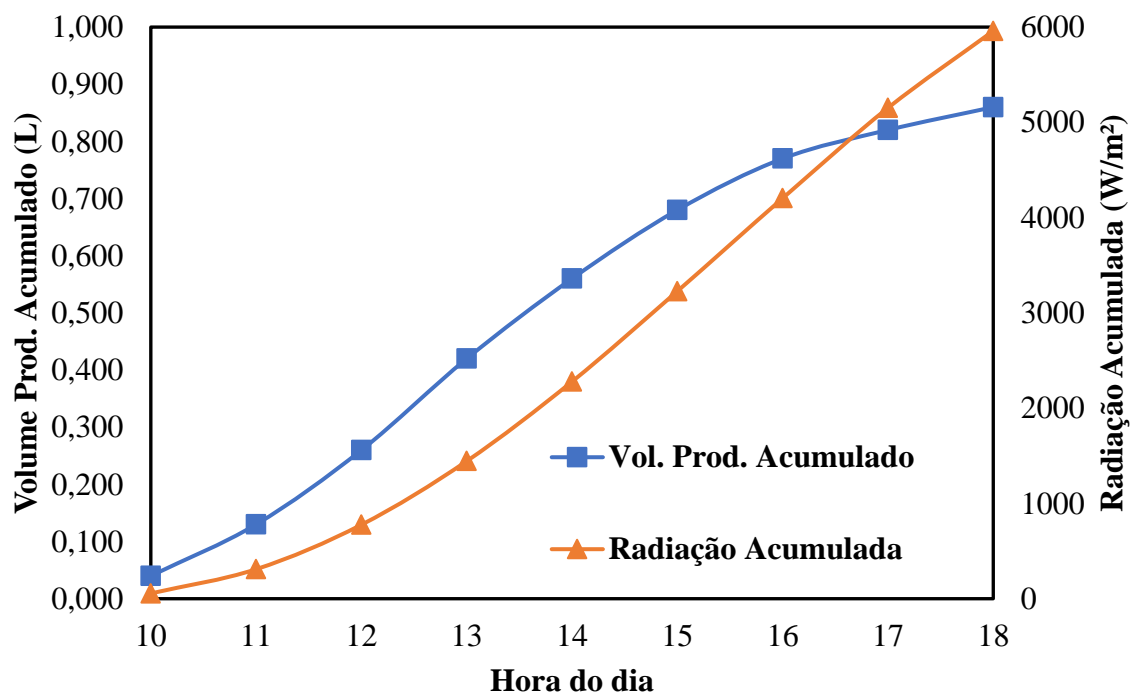
Fonte: Autor.

Figura 22 – Gráfico de variação gradual do volume produzido e temperaturas analisadas do dia 09/10/2019



Fonte: Autor.

Figura 23 – Gráfico de variação acumulada do volume produzido e radiação solar do dia 09/10/2019



Fonte: Autor.

Com base nos dados (Figura 22) o aumento da produção acompanha o aumento da temperatura da água e da temperatura interna, assim como sua redução. A análise dos gráficos permite confirmar, assim como também ocorre nos estudos de Soares (2004), Velmurugun *et al.* (2008), Haddad, Chaker e Rahmani (2017), Sharshir *et al.* (2019), Kabeel *et al.* (2020), a temperatura interna do destilador é sempre superior à temperatura da água bruta no tanque raso.

5.3.COMPARAÇÃO DE PRODUTIVIDADE PARA MESMA EFICIÊNCIA

Para avaliar a influência dos parâmetros meteorológicos, os dias de produção de 7/10/2019 e 09/03/2020 apresentaram mesma eficiência de produção, porém produziram volumes diferente e apresentaram saldo de radiação diferente ao longo do dia. Na tabela 7 estão dispostos a média das variáveis climatológicas, dentro do intervalo onde as radiações eram positivas (7 horas às 19 horas), com sua eventual produção ponderada, eficiência do dia e referência de visualização dos gráficos. Os valores registrados pela estação automática estão dispostos no Anexo B e Anexo C, respectivamente para os dias A e B.

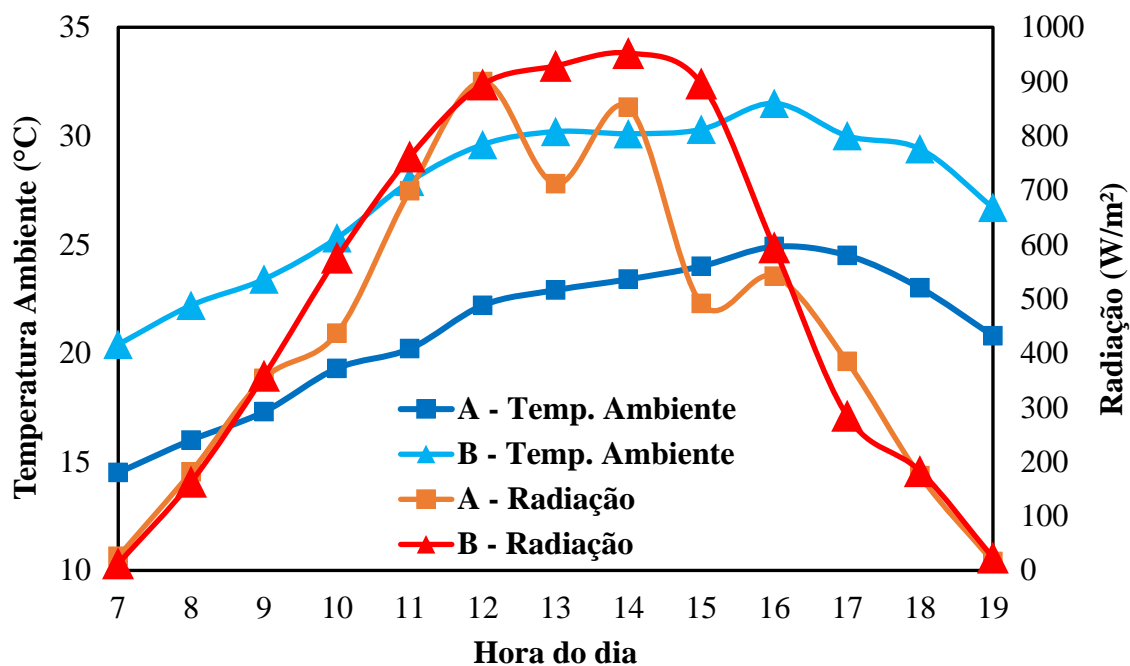
Tabela 7 – Resumo das variáveis e produtividade dos dias 07/10/2019 e 09/03/2020

Data	Temp. (°C)	Umidade rel. (%)	Vento (m/s)	Radiação acumulada (kW/m²)	Produção (L/m²)	Eficiência	Dia
07/10/2019	21,00	68,00	1,14	5,75	3,33	36%	A
09/03/2020	26,94	47,43	1,27	6,62	3,80	36%	B

Fonte: Autor.

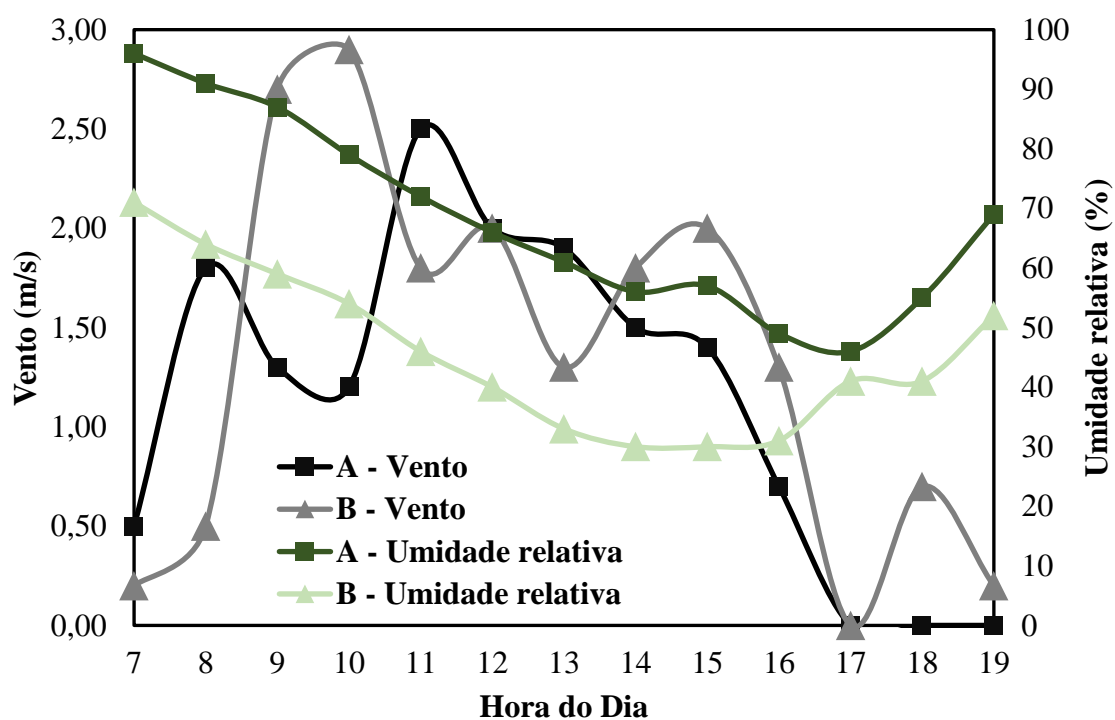
Mesmo com eficiência igual o dia B foi capaz de produzir 0,47 L/m² a mais que o dia A. A média da temperatura ambiente e umidade relativa foram mais favoráveis para produção do dia A, já o vento e o balanço de radiação foram mais favoráveis para o dia B.

Figura 24 – Gráfico de variação gradual da temperatura ambiente e radiação solar dos dias A e B.



Fonte: Autor.

Figura 25 – Gráfico de variação gradual da umidade relativa e vento dos dias A e B



Fonte: Autor.

O gráfico da Figura 24 indica que no intervalo das [12 – 14 horas] e [15 – 19 horas] a radiação foi consideravelmente superior para o dia B. A temperatura ambiente de ambos seguiu um padrão de aumento e redução. O gráfico da Figura 25 indica ventos superiores no intervalo de [12 – 13 horas], intervalo de pico no aquecimento da temperatura da água e interna do destilador, no dia B. A umidade relativa de ambos seguiu padrão de aumento e redução.

A interpretação dos dados indica que mesmo com as variáveis de temperatura ambiente e umidade relativa favoráveis para o dia A, o dia B foi capaz de produzir maior volume de água com saldo superior de $0,87 \text{ kW/m}^2$. No entanto, o dia A apresentou mesma eficiência de 36% que o dia B. A possível justificativa para estes dias apresentarem mesma eficiência com saldos de radiação diferentes é de que para o dia A, as variáveis de temperatura ambiente, vento e umidade relativa contribuíram na taxa de condensação do vapor interno do destilador para produção da água destilada final.

O cálculo de eficiência leva em consideração as variáveis, que se distinguem entre diferentes dias, de produção em L/m^2 e balanço de radiação (W/m^2). Para contribuir a evidenciar a influência dos parâmetros favoráveis do dia A a se igualar sua eficiência com o dia B, no dia de 29/10/2019 (Apêndice C) o balanço de radiação foi de $5,76 \text{ kW/m}^2$, praticamente igual ao dia A, porém produziu $2,6 \text{ L/m}^2$ e apresentou eficiência de 28%. O cálculo de eficiência leva em consideração a produção e o balanço de radiação, portanto, as variáveis de temperatura ambiente, vento e umidade relativa se apresentam com capacidade considerável de favorecer a produtividade e suas contribuições indiretas se representam na variável do volume produzido da equação de eficiência.

Faria *et al.* (2015) por exemplo, em seus dados, apresentaram dias com 37,1 e 37,2 % de eficiência com produção de $2,57 \text{ L/m}^2$ e $2,62 \text{ L/m}^2$, respectivamente. Os mesmos autores também apresentaram dias com 31,5 e 32,7 % de eficiência com produção de $2,27 \text{ L/m}^2$ e $1,68 \text{ L/m}^2$. Essa relação entre os dois pares de dias dos autores, indica que as variáveis meteorológicas influenciadoras, estudadas deste estudo, são capazes ou não de influenciar diferentes volumes para mesmas eficiências, isso dependerá de como todas as variáveis são capazes de interagir com o destilador solar ao longo de sua produção diária.

5.4.COMPARAÇÃO DA PRODUTIVIDADE PARA MESMO BALANÇO DE RADIAÇÃO SOLAR

Também, para avaliar a influência dos parâmetros meteorológicos, os dias de produção de 02/11/2019 e 06/03/2020 apresentaram balanço de radiação muito próximo, entretanto eficiência de produção diferente. Na tabela 8, estão dispostas a média das variáveis meteorológicas, dentro do intervalo onde as radiações eram positivas (7 horas às 19 horas), com sua eventual produção ponderada, eficiência do dia e referência de visualização dos gráficos. Os valores registrados pela estação automática estão dispostos no Anexo D e Anexo E, respectivamente para os dias C e D.

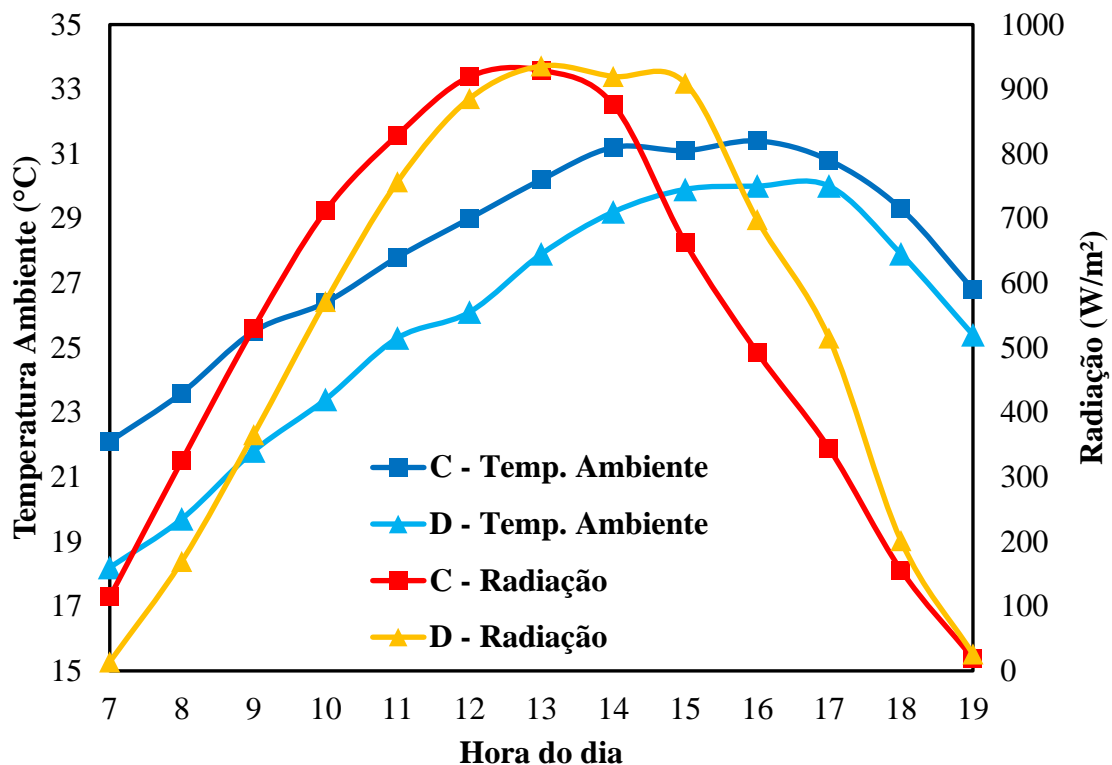
Tabela 8 – Resumo das variáveis e produtividade dos dias 02/11/2019 e 06/03/2020

Data	Temp. (°C)	Umidade rel. (%)	Vento (m/s)	Radiação acumulada (kW/m²)	Produção (L/m²)	Eficiência	Dia
02/11/2019	27,61	62,71	2,35	6,91	3,44	31%	C
06/03/2020	25,18	55,21	1,56	6,96	2,12	19%	D

Fonte: Autor.

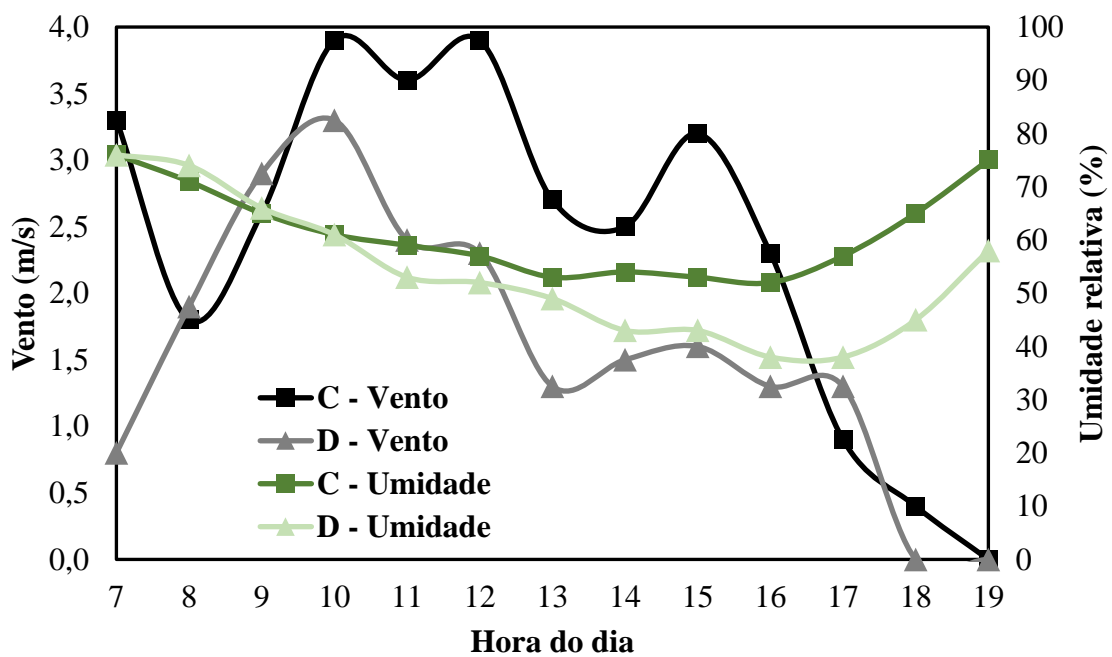
Mesmo com balanço de radiação semelhantes, o dia C foi capaz de produzir 1,32 L/m² a mais que o dia D e ainda 12% de eficiência a mais. O dia C apresentou umidade relativa e vento mais favoráveis que o dia D, dia no qual apresentou apenas a temperatura ambiente pouco favorável.

Figura 26 – Gráfico de variação gradual da temperatura ambiente e radiação solar dos dias C e D.



Fonte: Autor.

Figura 27 – Gráfico de variação gradual da umidade relativa e do vento dos dias C e D.



Fonte: Autor.

O gráfico da Figura 26 indica que radiação do dia C iniciou as 10 horas mais alta e só passou a ser inferior ao dia D a partir das 16 horas. A temperatura ambiente de ambos seguiu padrão de aumento e redução. O gráfico da Figura 27 indica ventos superiores em quase todos os intervalos para o dia C, especialmente nos intervalos onde a temperatura da água é normalmente mais alta [12 – 15 horas]. A umidade relativa no início do dia foi semelhante para ambos os dias, somente a partir das 16 horas que o dia C apresenta acréscimo mais acentuado de umidade relativa que o dia D.

A interpretação dos dados indica que, principalmente, uma intensidade maior de radiação nas primeiras horas da manhã e fortes intensidades de vento, juntamente com a influência dos outros parâmetros, sejam capazes de atribuir acréscimo de até 12% na eficiência de produção do dia C comparando com o dia D. Como a temperatura ambiente e a umidade relativa foram próximas, a influência na produção pode ser destacada pela intensidade da radiação no começo do dia e da intensidade do vento nos horários mais favoráveis, entre 12 e 15 horas, para diminuição da temperatura da cobertura.

Faria *et al.* (2015) por exemplo, em seus dados, apresentaram dias com balanço de radiação de 4,71, 4,71, 4,74, 4,75 e 4,77 kW/m² com produção de 2,62, 1,88, 2,12, 2,47 e 1,78 L/m², respectivamente. A relação dos resultados obtidos pelos autores, com os dados obtidos deste estudo, permite evidenciar que radiações similares são capazes de produzir diferentes volumes, e a explicação para isso seria o grau de influência e relação entre as variáveis de vento, umidade relativa e temperatura ambiente ao longo dia com o destilador solar.

5.5.AVALIAÇÃO DA PRODUTIVIDADE PARA UM DIA COM EXTREMA EFICIÊNCIA

Ainda, para avaliar a influência dos parâmetros meteorológicos, o dia de produção de 31/10/2019 apresentou altíssima eficiência e condições meteorológicas favoráveis para produção, com exceção da radiação solar. Na tabela 9 estão dispostos a média das variáveis climatológicas, dentro do intervalo onde as radiações foram positivas (7 horas às 19 horas), com sua eventual produção ponderada e eficiência do dia. Os valores registrados pela estação automática estão dispostos no Anexo F.

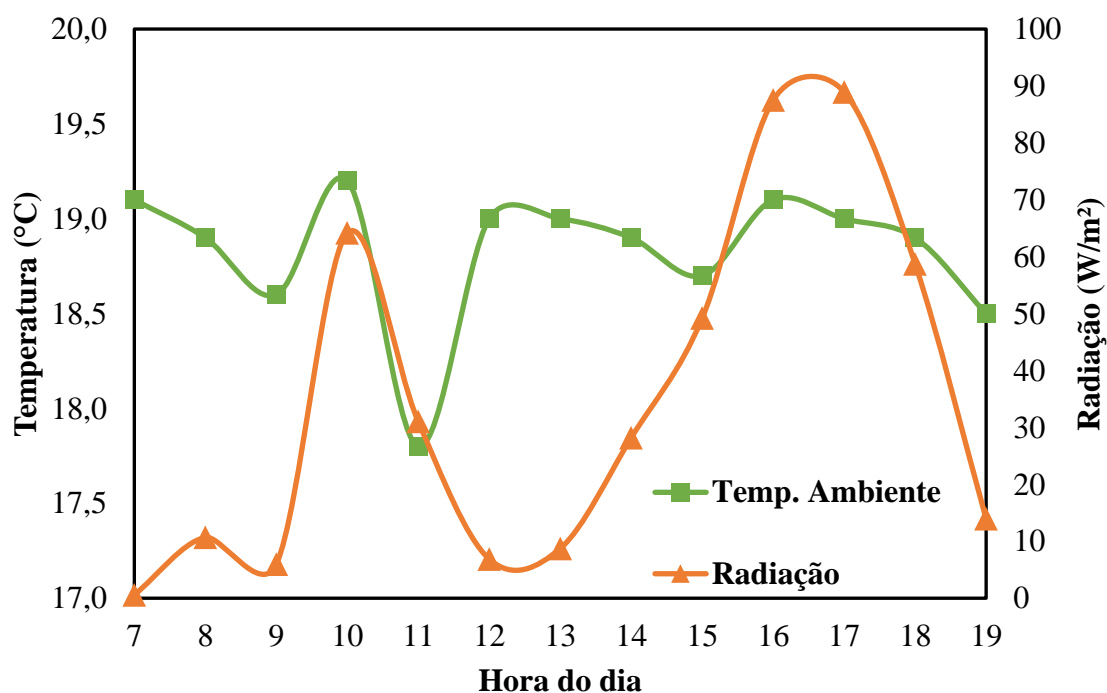
Tabela 9 – Resumo das variáveis e produtividade do dia 31/10/2019.

Temp. (°C)	Umidade rel. (%)	Vento (m/s)	Radiação acumulada (kW/m ²)	Produção (L/m ²)	Eficiência
18,83	93,23	3,44	0,45	1,72	239%

Fonte: Autor.

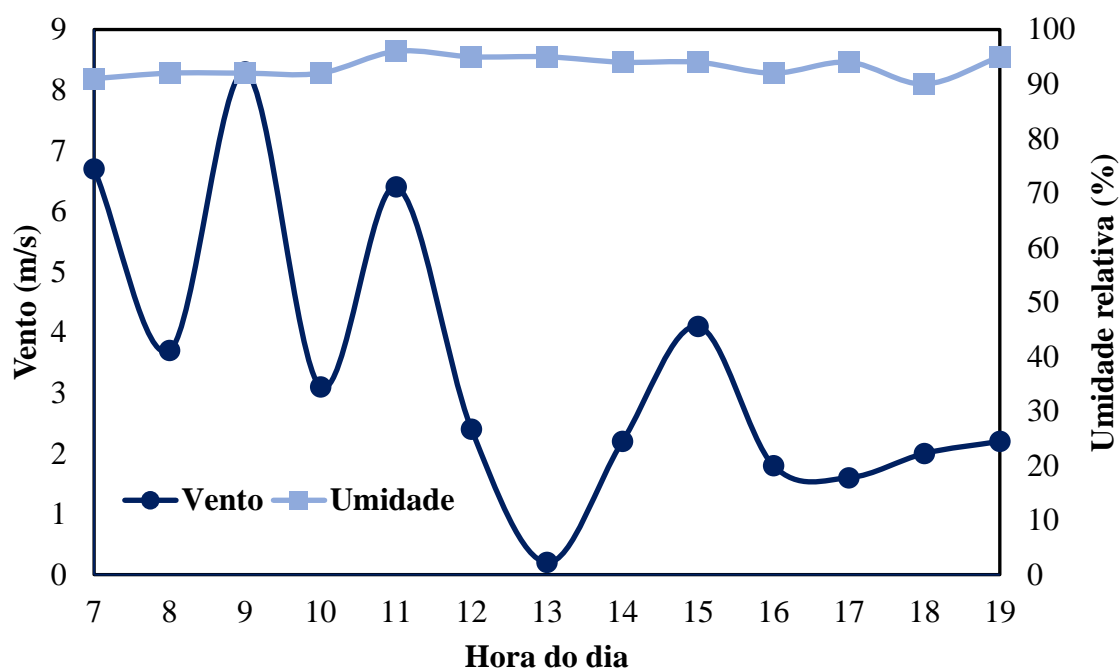
O dia 31/10/2019 apresentou eficiência superior de 204% a média geral. A possível explicação para essa imensa disparidade poderia ser explicada pelas condições extremamente favoráveis dos parâmetros influenciadores na produção, com exceção do saldo de radiação, que foi 6,42 kW/m² inferior à média geral, próximo de 93,5% menor. A produção do dia foi relativamente pequena com relação à média geral, 1,38 L/m², no entanto, foi capaz de produzir 1,72 L/m² com saldo de apenas 0,45 kW/m².

Figura 28 – Gráfico de variação gradual da temperatura ambiente e radiação solar do dia 31/10/2019



Fonte: Autor.

Figura 29 – Gráfico de variação gradual da umidade relativa e vento do dia 31/10/2019



Fonte: Autor.

Como pode ser observado no gráfico da Figura 28, e pela informação (Apêndice C) de que o dia apresentou alta precipitação de 55,6 mm, destes, 38,6 mm foram distribuídos no intervalo de [14 – 18 horas], o que justifica o decréscimo de radiação deste intervalo. O pico de radiação registrado foi de 88,94 W/m² as 20 horas o intervalo da temperatura ambiente onde a radiação era positiva foi de [17,8 – 19,2 °C]. A umidade relativa do dia foi alta ao longo de todo o dia, com intervalo de [91% – 96%] dentre as [10 – 22 horas]. Este dia também apresentou velocidades de vento altíssimas ao longo de todo o dia, com rajadas registradas de até 17,3 m/s (Figura 29).

Dentro da amostragem de produção, não houve nenhum outro dia que possuiu balanço próximo de 0,45 kW/m². O mais próximo foi de 0,96 kW/m² do dia 05/11/2019 que produziu 0,28 L/m² e apresentou eficiência de 18%, a menor registrada. No entanto o dia 05/11/2019 também apresentou condições de temperatura ambiente e umidade relativa similares ao dia 31/10/2019, porém com média de vento aproximadamente 53,5% inferior.

Apesar de plausível, é inconclusivo condicionar, em função de não haver datas com condições similares e capazes de produzir comparação entre o dia 31/10/2019, de

que a influência, de forma exclusiva, de fortíssimos ventos ao longo de quase todo o dia seria capaz de influenciar a produção do destilador a atingir uma eficiência de 239%. O dia com segunda maior eficiência, de 103%, foi o dia 26/11/2019 (Apêndice C), que apresentou saldo de radiação de 1,02 kW/m² e produziu 1,68 L/m², porém diferente do dia de maior eficiência, a média da velocidade do vento foi de 1,91 m/s e sua temperatura ambiente e umidade relativa também foram próximas do dia de maior eficiência.

Os dados obtidos deste dia, em comparação com outros dias, e das avaliações entre mesmos balanços e mesma eficiência contribuem para evidenciar a vulnerabilidade da equação de cálculo de eficiência de produção de água destilada. A amostragem total (Apêndice C) demonstra também que as variáveis de vento, umidade relativa e temperatura ambiente possuem alto grau de influência, ao longo de suas interações na taxa de resfriamento do vapor de água interno do destilador.

5.6.COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES DESTILADORES SOLARES PIRAMIDAIS E COM O DO PRESENTE ESTUDO

A tabela 10 apresenta a produção média e eficiência de diferentes tipos de destiladores piramidais estudados ao redor do mundo.

Tabela 10 – Produção média e eficiência de outros tipos destiladores solares piramidais.

(continua)

Autor	Local	Tipo de destilador piramidal	Produção média (L/m².dia)	Eficiência
Fath <i>et al.</i> (2003)	Egito	Comum	2,60	30,00%
Kabeel (2007)	Egito	Com diversos andares	2,50	NI
Kabeel (2009)	Egito	Com tanque côncavo	3,50	35,00%
Wassouf <i>et al.</i> (2011)	Austrália	Comum	1,80	NI
Kianifar <i>et al.</i> (2012)	Irã	Comum	2,20	NI
Taamneh e Taamneh (2012)	Jordão	Comum	2,49	40,20%

Tabela 10 – Produção média e eficiência de outros tipos destiladores solares piramidais.

(conclusão)				
Autor	Local	Tipo de destilador piramidal	Produção média (L/m².dia)	Eficiência
Algaim <i>et al.</i> (2013)	Irã	Comum	5,26	43,00%
Sathyamurthy <i>et al.</i> (2014)	Índia	Triangular	3,2	NI
Kabeel <i>et al.</i> (2017)	Egito	Sem material térmico de estocagem de calor	3,48	36,20%
		Com material térmico de estocagem de calor	6,52	67,86%
Shashir <i>et al.</i> (2019)	Egito	Comum	3,6	54,50%
		Cobertura de acrílico, sem isolamento	3,02	26,20%
Kabeel <i>et al.</i> (2020)	Índia	Cobertura de acrílico, com isolamento	3,52	28,50%
		Comum	4,02	32,20%
Kabeel <i>et al.</i> (2020)	Índia	Tanque raso com vários pequenos orifícios	5,75	45,90%
		Tanque raso com vários pequenos orifícios e transmissor de calor em sua base	8,1	64,30%
Modi e Nayi (2020)	Índia	Sem material térmico de estocagem de calor	1,36	17,36%
		Com material térmico de estocagem de calor	1,76	21,95%
Saravanan e Murugan (2020)	Índia	Comum	4,3	23,00%
Sharshir, Elaziz e Elkadeem (2020)	Egito	Com adição de nano fluido	4,73	NI

Legenda: NI: Não informado.

Fonte: Autor.

Para auxiliar a avaliação foram comparadas a capacidade de produção média e eficiência do destilador piramidal deste estudo com outros que possuem incrementação. A comparação permite avaliar o incremento de eficiência das modificações propostas pelos autores e as potencialidades da tecnologia para região deste estudo, com as outras regiões onde a destilação solar é mais estudada.

A tabela 11 indica a comparação de produção entre os diferentes destiladores piramidais do tipo comum, que são semelhantes ao deste estudo.

Tabela 11 – Comparação de produção e eficiência de diferentes destiladores piramidais do tipo comum.

Autor	Local	Produção		Eficiência	Produção máxima (L/m ² .dia)
		média (L/m ² .dia)			
Algaim <i>et al.</i> (2013)	Irã	5,26		43,00%	7,36
Saravanan e Murugan (2020)	Índia	4,30		23,00%	4,30
Kabeel <i>et al.</i> (2020)	Índia	4,02		32,20%	4,02
Shashir <i>et al.</i> (2019)	Egito	3,60		54,50%	3,80
Presente estudo (2020)	Brasil	3,18		35,00%	4,68
Fath <i>et al.</i> (2003)	Egito	2,60		30,00%	4,25
Kumar <i>et al.</i> (2020)	Índia	2,60		NI	2,60
Taamneh e Taamneh (2012)	Jordão	2,49		40,20%	2,49
Kianifar <i>et al.</i> (2012)	Irã	2,20		NI	3,14
Wassouf <i>et al.</i> (2011)	Austrália	1,80		NI	7,00

Legenda: NI: Não informado.

Fonte: Autor.

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

produção, que pode favorecer positivamente seus resultados para comparar com a produção média.

A produção usual deste destilador foi 1,71 L/m² inferior à do destilador de Algaim *et al.* (2013) e 12% menos eficiente. Comparado com Shashir *et al.* (2019) a eficiência da produção usual foi 23,5% inferior a encontra em seu estudo. A disparidade da eficiência entre estes diferentes destiladores piramidais pode indicar que o presente destilador apresenta maiores perdas de calor em função da sua configuração geométrica, espessura e qualidade do material utilizado no isolamento ou/e ainda influência das variáveis climatológicas de cada região.

5.7. ANÁLISE DE CUSTO E VIABILIDADE DO DESTILADOR PIRAMIDAL

Para a construção e operação do presente destilador, foi necessário o investimento de R\$815,87. O preço pelo montante do volume produzido durante o período de análise [219 L/m²] seria de R\$ 3,72/L.m², razão bem acima do ofertado pelo mercado de água mineral, variando de [0,5 – 0,8 R\$/L]. No entanto, esta avaliação valida o volume produzido em 69 dias e em somente nas estações mais quentes. Assumindo uma estimativa de média de produção semanal, dentro do ano todo, como 17,5 L/m², o montante anual seria de 912,5 L/m², para o custo deste destilador piramidal seria o equivalente R\$ 0,89/L.m². O valor por litro de produção em um ano seria próximo ao encontrado no mercado de água mineral, propondo, portanto, que em pelo menos 2 anos de produção diária de água, a tecnologia seria capaz de ser muito rentável para um possível uso complementar na obtenção de água para consumo.

No que se refere à utilização desta tecnologia para produção de água em situações exclusivamente emergenciais para obtenção de água potável, a viabilidade do presente destilador piramidal estudado não apresenta grandes potencialidades, pois demoraria muito tempo até que o investimento pudesse gerar retorno, em comparação com outros meios para suprir as demandas de obtenção de água potável durante períodos emergenciais. Inclusive por conta da sua área de 0,25 m² e preço alto. Para produção diária de [3-5 L] o destilador precisaria ter pelo menos 1 m², o que elevaria mais o custo de fabricação de um destilador piramidal ampliado e tornando sua viabilidade ainda mais questionável.

Para que a tecnologia seja viável em termos de uso emergencial, seria necessário desenvolver e articular formas de fabricar a cobertura e o módulo acoplado, pois apenas as duas componentes custaram R\$600,00 de modo muito mais barato, possivelmente por meio da aquisição do vidro em atacado e reconfigurar o *design* do módulo acoplado para facilitar a fabricação e utilizar menos fibra de vidro e horas de confecção. Além destas opções, os materiais utilizados também poderiam ser substituídos por materiais mais baratos, no entanto, com durabilidade e qualidade sanitária menores, podendo também atribuir diferentes características da capacidade de produção.

5.8.AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA PRODUZIDA PELO DESTILADOR PIRAMIDAL

Os resultados obtidos para os parâmetros de controle são advindos de 7 bateladas de análises. Visava-se avaliar a eficiência de remoção dos parâmetros de turbidez, condutividade elétrica, cor aparente, cor verdadeira, coliformes totais e *Escherichia coli*, além disso, o enquadramento dos outros parâmetros sob a conformidade com os padrões de potabilidade da água. Além destes, os parâmetros de odor e sabor foram avaliados. Com os resultados obtidos, buscou-se avaliar se a tecnologia é eficaz no que se refere ao tratamento da água bruta para uma água que atenda as condições de consumo humano.

O Quadro 3 apresenta a média geral dos parâmetros medidos para água bruta e água destilada, juntamente com a remoção desta média, que foram realizados nas 7 bateladas de análises, com exceção dos parâmetros microbiológicos, que foram realizadas 4 análises. Os valores de todas as análises dos parâmetros visados podem ser observados nos apêndices de: Apêndice D a Apêndice J.

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

(continua)

Parâmetros	Valor		Remoção
	Água bruta	Água destilada	
Turbidez	6,78 NTU	0,40 NTU	93,06%
Temperatura	23,5 C°	24,4 C°	NV
pH	6,68	6,62	NV
Condutividade elétrica	80,30 µS/cm	17,54 µS/cm	78,87%

Quadro 4 - Resumo geral das médias dos parâmetros de controle analisados para água bruta e água destilada.

(conclusão)

Parâmetros	Valor		Remoção
	Água bruta	Água destilada	
Cor aparente	38,66 U.C.	10,19 U.C.	78,27%
Cor verdadeira	13,48 U.C.	AD	SI
Oxigênio Dissolvido	8,39 mg/L	7,61 mg/L	NV
Coliformes totais	808,2 NMP/100mL	0 NMP/100mL	100%
<i>Escherichia coli</i>	256,7 NMP/100mL	0 NMP/100mL	100%

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

Fonte: Autor.

A cor verdadeira sempre se apresentou abaixo do limite detectável proposto pela metodologia, valor de 5 U.C..

A tabela 12 compara a média dos parâmetros analisados com os valores máximos permitidos para o enquadramento dos padrões de potabilidades estabelecidos pelo Anexo XX da Portaria de Consolidação n° 5 de 28 de setembro de 2017. O enquadramento dos parâmetros analisados nesta pesquisa foi realizado com os valores preconizados pela norma.

Tabela 12 – Comparação entre valores médios dos parâmetros de controle da água destilada com os padrões de potabilidade.

Parâmetros	Água destilada	Padrão de potabilidade
Turbidez	0,64 NTU	5 NTU
pH	6,46	6 - 9,5
Cor aparente	7,07 U.C.	15 U.C.
Coliformes totais	0 NMP/100mL	Ausência em 100 mL
<i>Escherichia coli</i>	0 NMP/100mL	Ausência em 100 mL

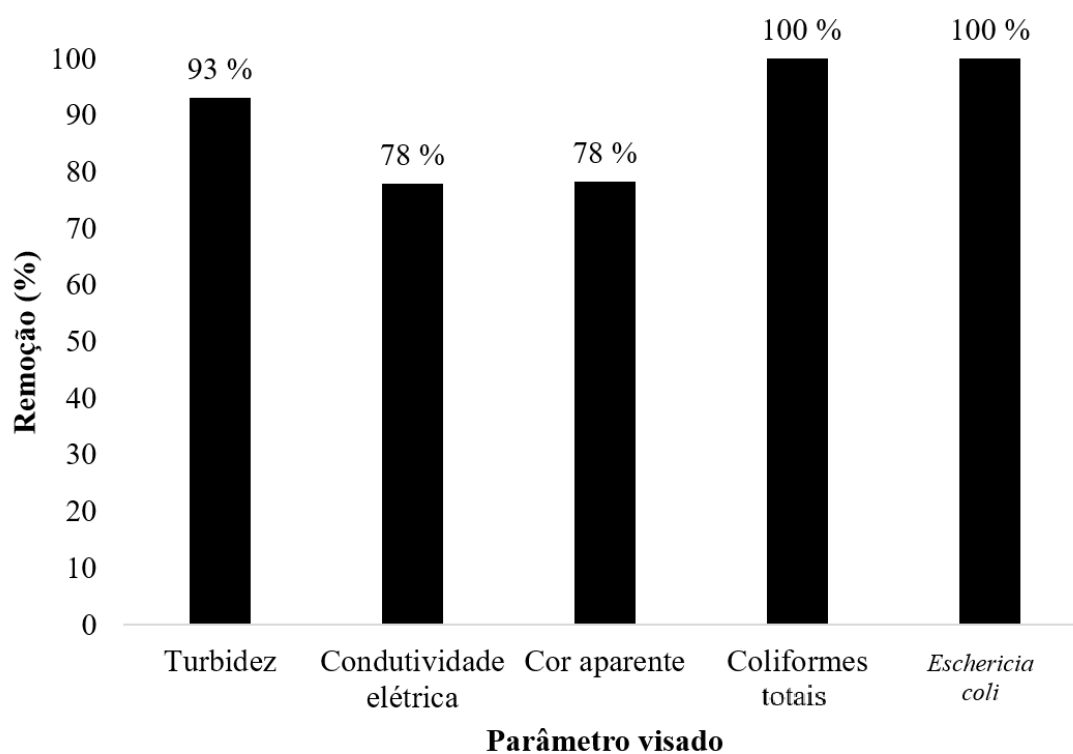
Legenda: NMP: Número mais provável.

Fonte: Autor.

Dentro dos parâmetros dispostos pela portaria, a água destilada pelo destilador solar piramidal apresenta-se de acordo com os padrões estabelecidos pela norma vigente, demonstrando a eficácia da tecnologia para o tratamento de água.

No processo de tratamento da água, uma medida que é capaz de avaliar a eficiência é a remoção. O gráfico da Figura 30 apresenta a média das remoções que foram calculadas em cada batelada de análise. A remoção do parâmetro de cor verdadeira não pode ser avaliada em função de que os valores obtidos na água destilada se encontravam sempre abaixo do limite detectável da metodologia de medição.

Figura 30 – Gráfico de remoção dos parâmetros visados da água destilada



Fonte: Autor.

A respeito dos padrões organolépticos de odor e sabor da água, os resultados foram padrões em todas as 7 vezes que as águas foram analisadas e o resultados estão dispostos na tabela 13.

Tabela 13 – Resultados dos parâmetros de odor e sabor da água bruta e água destilada

Parâmetro	Água bruta	Água destilada
Odor	LT	LR
Sabor	NR	LR

Legenda: LT: Levemente de terra; NR: Não realizado; LR: Levemente de resina.
Fonte: Autor.

O sabor e o odor avaliados na água destilada podem ser resultado da corrosão da tinta do módulo acoplado. A Figura 31 demonstra as mangueiras de alimentação dos reservatórios de água destilada tingidas levemente de azul.

Figura 31 – Mangueiras de coleta tingidas de azul.



Fonte: Autor.

De acordo com as especificações da Resicolor Tintas (2016) a tinta epóxi base de água possui composição química com emulsão acrílica modificada, pigmentos orgânicos e inorgânicos, surfactantes, silicões especiais, água, espessantes e microbicidas. Segundo a Analytics Brasil (2019) as tintas epóxi possuem alto teor de epiclorigrina e Bisfenol-A, que são extremamente tóxicos. Segundo Abreu (2016), a presença dos polímeros da epiclorigrina e Bisfenol-A nas resinas Epóxi atribuem a qualidade de

anticorrosão, e ainda podem ter suas propriedades melhoradas em função da copolimerização com outras resinas.

Mesmo que a tintura seja capaz de atribuir certo odor e sabor de resina a água, os valores encontrados de cor verdadeira da água destilada estavam sempre abaixo do limite detectável, de 5 U.C.. No entanto, nenhum teste específico foi realizado para avaliar a presença de elementos tóxicos derivados da possível corrosão da tinta do módulo acoplado.

5.8.1. Comparação da remoção de turbidez do presente destilador piramidal com outros destiladores

Velmurugan *et al.* (2008) avaliou o uso da destilação solar para remoção de turbidez de efluentes industriais, outros autores como por exemplo Hedayati-Mehdiabadi *et al.* (2020) e Wassouf *et al.* (2011) avaliaram a turbidez de água salina. Na tabela 14 estão dispostos os valores de remoção de diferentes estudo sobre a remoção de turbidez de diferentes tipos de água.

Tabela 14 – Remoção de turbidez de diferentes estudos sobre destilação solar.

Estudo	Tipo de água	Remoção
Velmurugan <i>et al.</i> (2008)	Residuária	95,35%
Soares (2004)	Salina	94,83%
Soares (2004)	Doce	91,59%
Mota e Andrade (1986)	Doce	41,12%
Hedayati-Mehdiabadi <i>et al.</i> (2020)	Salina	96,48%
Wassouf <i>et al.</i> (2011)	Salina	99,60%
Maroneze <i>et al.</i> (2014)	Residuária	99,16%

Fonte: Autor.

A remoção média, do presente destilador solar piramidal estudado, para o parâmetro de turbidez foi de 93,06%, valor próximo disposto aos dos autores presentes na tabela 14. No mesmo tipo de água do presente estudo (doce), a remoção encontrada no

estudo de Soares (2004) foi de 91,59% e de 41,12% para Mota e Andrade (1986), não sendo possível determinar a razão da baixa remoção da pesquisa de Mota e Andrade. Com base nas remoções encontradas de turbidez para diferentes tipos de água, é possível considerar que a tecnologia, se bem desenvolvida, é capaz de remover valores maiores de 90% da turbidez presente na água bruta.

5.8.2. Comparação da diminuição de condutividade elétrica do presente destilador piramidal com outros destiladores

Em outros estudos, como por exemplo, de Saravanan e Murugan (2020) e Soares (2004) analisaram a remoção da condutividade elétrica de água salina e apresentaram remoção maior que 99%. Isso se dá em função da grande quantidade de sais presentes na água bruta, que são removidos no processo de destilação pelos destiladores solares. A tabela 15 indica as remoções obtidas em outros estudos. Soares (2004), por exemplo, mediu valores de 54200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 57400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ em sua água bruta e 120 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente, em sua água destilada.

Tabela 15 – Remoção de condutividade elétrica de diferentes estudos sobre destilação solar.

Estudo	Tipo de água	Diminuição
Saravanan e Murugan (2020)	Salina	99,98%
Soares (2004)	Salina	99,97%
Soares (2004)	Doce	77,27%
Mota e Andrade (1986)	Doce	96,09%
Maroneze <i>et al.</i> (2014)	Residuária	98,33%

Fonte: Autor.

A remoção média, do presente destilador solar piramidal estudado, para o parâmetro de condutividade elétrica foi de 78,87 %, valor variante ao disposto pelos autores da tabela 15. A variação da remoção dos diferentes tipos de água pode ser explicada em função da altíssima concentração de sais das águas salinas e residuárias, quando comparada com as águas do tipo doce. No mesmo tipo de água do presente estudo

(doce), a remoção encontrada no estudo de Soares (2004) foi de 77,27 % e de 96,09 % para Mota e Andrade (1986), não sendo possível determinar a razão da elevada remoção da pesquisa de Mota e Andrade.

5.8.3. Comparação da remoção do parâmetro microbiológico do presente destilador piramidal com outros destiladores

No que se refere à remoção de coliformes totais, todos os outros estudos, Maroneze *et al.* (2014), Wassouf *et al.* (2011), Soares (2004), e Mota e Andrade (1986) encontraram remoção de 100% na contaminação de coliformes totais e *Escherichia coli*. Este resultado comum, entre o presente estudo e com o de diferentes autores, pode ser justificado pela facilidade e segurança de remoção dos microrganismos no processo de destilação solar da água, com princípios previamente explanados no referencial teórico. É possível considerar, portanto, que os destiladores solares, se bem projetados, são capazes de desinfetar águas contaminadas.

6. CONCLUSÃO

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

- O destilador solar apresenta potencialidades razoáveis na produção de água para consumo humano capaz de suprir necessidades diárias de pequenas famílias, no entanto deve ser construído com área de cobertura de, pelo menos, 1 m².
- Dentro do período de produção estudado, a região recebeu boa intensidade de radiação e foi capaz de produzir uma média 3,18 L/m².dia com média de balanço diário de 6,87 kW/m² e média geral de produção de 35%. No entanto as potencialidades da tecnologia não foram avaliadas durante o período de outono e inverno, estações que apresentam forte queda na radiação, quando comparadas com o resto do país, de acordo com o Atlas brasileiro de energia solar.
- No que se refere à eficiência de remoção e tratamento da água para potabilidade da água dos parâmetros estudados, o destilador se demonstrou extremamente eficiente.
- Em comparação com outros destiladores solares piramidais, o presente destilador demonstrou eficiência razoável. Isso sugere que as configurações dos componentes poderiam ser ajustadas visando minimizar as perdas de calor, aumentando sua capacidade térmica interna, principalmente do módulo acoplado.
- A viabilidade do uso do destilador está diretamente relacionada com seu custo de fabricação. A tecnologia pode ser mais viável para produção de água em situações emergências e altamente viável para produção complementar diária na obtenção de água para consumo humano com custos de fabricação reduzidos.

REFERÊNCIAS

- ABREU, Fernando Tomaz de. **Estudo das propriedades da tinta epóxi Nb2O5 aplicada na indústria química**. 2016. 165 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de São João Del-Rei, São João Del Rei, 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS (Brasil). Panorama da qualidade das águas subterrâneas do Brasil. Brasília, 74 pp. Brasil, 15 de setembro de 2005, <http://www.ana.gov.br/pnrh>.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2019: informe anual / Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA, 2019.
- ALGAIM, H. R. M.; ALASDI, J. M.; MOHAMMED, A. J. Study of efficiency for the pyramidal solar still (PSS) in Basra city, Iraq. **Scholars Research Library Archives of Applied Science Research**, v. 5, n. 5, p. 62–67, 2013.
- AMARAL, L. A. *et al.* Uso Da Radiação Solar Na Desinfecção Da Água De Poços Rasos. **Medicina**, p. 45–50, 2006.
- ANALYTICS BRASIL. **Veja os 3 agentes químicos mais tóxicos presentes nas tintas**. 19 jun. 2019. Disponível em: <https://www.analyticsbrasil.com.br/blog/veja-os-3-agentes-quimicos-mais-toxicos-presentes-nas-tintas/>. Acesso em: 30 jun. 2020.
- ANDRADE NETO, C. O. DE. Tratamento de esgotos domésticos. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 11, n. 1, p. 6–6, 2006.
- ANSARI, O. *et al.* Desalination of the brackish water using a passive solar still with a heat energy storage system. **Desalination**, v. 324, p. 10–20, 2013.
- APHA - American Public Health Association. **Standard Method for the Examination of Water and Wasterwater**. 22 ed. Washington: APHA - AWWA - WEF, 2012.
- ARUN KUMAR, S. *et al.* A study of life cycle conversion efficiency and CO2 role in the pyramid shape solar stills – Comparative analysis. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 11, 2020.
- BELTRAN, M. H. R. Destilação: a arte de “extrair virtudes”. **Química Nova na Escola**, v. 4, p. 24–27, 1996.
- BERTHOLINI, Thargus Martins; BELLO, Adriana Xavier da Silva. Desinfecção de água para consumo humano através do método Sódís: estudo de caso em localidade rural do município de Cuiabá - MT. **Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**, ed. 2, 2011.
- BHATTACHARYYA, A. Solar Stills for Desalination of Water in Rural Households. **International Journal of Environment and Sustainability**, v. 2, n. 1, p. 21–30, 2013.
- BOUCHEKIMA, B. A solar desalination plant for domestic water needs in arid areas of South Algeria. **Desalination**, v. 153, n. 1–3, p. 65–69, 2003.
- BRANCO, S. M. **Hidrobiologia Aplicada à Engenharia Sanitária**. 3 ed. CETESB/ASCETESB, São Paulo, SP, 1986.

BRASIL. Ministério da Saúde (2017). **Anexo XX da Portaria de Consolidação nº 05, de 03 de outubro de 2017**. Controle e Vigilância da Qualidade da água Para Consumo Humano e Seu Padrão de Potabilidade.

BRASIL. Ministério da Saúde (2019). **Programa Nacional de Saneamento Rural (PNSR)** – Brasília: Funasa, 2019. 260 p.

BRENNER, H. *et al.* The impact of sedimentary alkalinity release on the water column CO₂ system in the North Sea. **Biogeosciences**, v. 13, n. 3, p. 841–863, 2016.

CAPPELLETTI, G.M. An experiment with a plastic solar still. **Desalination**, v.142, p.221- 227, Foggia, Italy, 2001.

CARVALHO, Eyre K. F. de. **Potabilização de água eutrofizada utilizando destilações solar**. 2015. 84 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2015.

CASTRO, A. P. A. S..*et al.* **Medidas de refletância de cores de tintas através de análise espectral**. Ambiente Construído. v. 3, n. 2.p.69-76, Porto Alegre, abr/jun., 2003.

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

CONSUMA. **Tratamento de água**. 2017. Disponível em: <http://www.comusa.rs.gov.br/index.php/saneamento/tratamentoagua>. Acesso em: 30 jun. 2020.

DANIEL, L. A. **Processos de desinfecção e desinfetantes alternativos na produção de água potável**. Rio de Janeiro: ABES, 2001. 155 p.

DAS, D. *et al.* Solar still distillate enhancement techniques and recent developments. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 10, 2020.

DEAN, A. J. *et al.* How social capital influences community support for alternative water sources. **Sustainable Cities and Society**, v. 27, p. 457–466, 2016.

DELYANNIS, E. E.; BELESSIOTIS, V. Solar application in desalination: the Greek Islands experiment. **Desalination**, v. 100, n. 1–3, p. 27–34, 1995.

DELYANNIS, E. Historic background of desalination and renewable energies. **Solar Energy**, v. 75, n. 5, p. 357–366, 2003.

DEV, R.; ABDUL-WAHAB, S. A.; TIWARI, G. N. Performance study of the inverted absorber solar still with water depth and total dissolved solid. **Applied Energy**, v. 88, n. 1, p. 252–264, 2011.

DHINDSA, G. S.; MITTAL, M. K. Experimental study of basin type vertical multiple effect diffusion solar still integrated with mini solar pond to generate nocturnal distillate. **Energy Conversion and Management**, v. 165, p. 669–680, 2018.

EAWAG. **Desinfección Solar del Agua - Guia de Aplicación**, Cochabamba, Bolívia. P.80. 2005.

EL-BAHI, A.; INAN, D. A solar still with minimum inclination, coupled to an outside condenser. **Desalination**, v. 123, n. 1, p. 79–83, 1999.

EL-BIALY, E. *et al.* Cost analysis for several solar desalination systems. **Desalination**, v. 384, p. 12–30, 2016.

FARIA, E. V. DE *et al.* Desenvolvimento E Construção De Um Destilador Solar Para Dessalinização De Água Salgada Em Diferentes Concentrações De Sais. **Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados**, ed. 37, 2015.

FATH, H. E. S. *et al.* Thermal-economic analysis and comparison between pyramid-shaped and single-slope solar still configurations. **Desalination**, v. 159, n. 1, p. 69–79, 2003.

FEILIZADEH, M. *et al.* Optimization of geometrical dimensions of single-slope basin-type solar stills. **Desalination**, v. 424, p. 159–168, 2017.

FUSATI FILTROS. **Como Tratar Água de Poço**. 2017. Disponível em: <https://www.fusati.com.br/como-tratar-agua-de-poco/>. Acesso em: 2 jun. 2020.

GEODESIGN. **Conhecimento básico sobre o recurso solar**, 2016. Disponível em: http://recursosolar.geodesign.com.br/Pages/Sol_Rad_Basic_RS.html. Acesso em: 25 jun. 2020.

GÓMEZ, J. M. R., Carlesso, F., Vieira, L. E., & Da Silva, L. A irradiância solar: conceitos básicos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, 2018.

HADDAD, Z.; CHAKER, A.; RAHMANI, A. Improving the basin type solar still performances using a vertical rotating wick. **Desalination**, v. 418, p. 71–78, 2017.

HANSON, A. *et al.* Distillate water quality of a single-basin solar still: Laboratory and field studies. **Solar Energy**, v. 76, n. 5, p. 635–645, 2004.

HEDAYATI-MEHDIABADI, E.; SARHADDI, F.; SOBHNAMAYAN, F. Exergy performance evaluation of a basin-type double-slope solar still equipped with phase-change material and PV/T collector. **Renewable Energy**, v. 145, p. 2409–2425, 2020.

HOFF, R. *et al.* Efficiency of a low-cost pyramid-shaped solar still for pesticide removal from highly contaminated water. **Chemosphere**, v. 234, p. 427–437, 2019.

HOWELL, L. 2013. **Global Risks 2013**. 8 ed. World Economic Forum.

IBGE. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD)**, 2016. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 2020.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Água**. 2019. Disponível em: <http://www.tratabrasil.org.br/saneamento/principais-estatisticas/no-brasil/agua>. Acesso em: 6 jul. 2020.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Estudo de Águas Subterrâneas**, 2016. Disponível em: http://www.tratabrasil.org.br/images/estudos/itb/aguas-subterraneas-e-saneamento-basico/Estudo_aguas_subterraneas_FINAL.pdf. Acesso em: 17 jun. 2020.

JANI, H. K.; MODI, K. V. A review on numerous means of enhancing heat transfer rate in solar-thermal based desalination devices. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 93, p. 302–317, 2018.

KABEL, A.E., A.M. Hamed, S.A. El-Agouz, Cost analysis of different solar still configurations, **Energy**, v. 35, 2010.

- KABEEL, A. E. *et al.* Modified pyramid solar still with v-corrugated absorber plate and PCM as a thermal storage medium. **Journal of Cleaner Production**, v. 161, p. 881–887, 2017.
- KABEEL, A. E. *et al.* Performance enhancement of pyramid-shaped solar stills using hollow circular fins and phase change materials. **Journal of Energy Storage**, v. 31, p. 1307-1319, 2020.
- KABEEL, A. E. Performance of solar still with a concave wick evaporation surface. **Energy**, v. 34, n. 10, p. 1504–1509, 2009.
- KABEEL, A. E. Water production from air using multi-shelves solar glass pyramid system. **Renewable Energy**, v. 32, n. 1, p. 157–172, 2007.
- KABEEL, A. E.; ABDELGAIED, M. Enhancement of pyramid-shaped solar stills performance using a high thermal conductivity absorber plate and cooling the glass cover. **Renewable Energy**, v. 146, p. 769–775, 2020.
- KABEEL, A. E.; ABDELGAIED, M.; EISA, A. Enhancing the performance of single basin solar still using high thermal conductivity sensible storage materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 183, p. 20–25, 2018.
- KABEEL, A. E.; OMARA, Z. M.; YOUNES, M. M. Techniques used to improve the performance of the stepped solar still-A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 46, p. 178–188, 2015.
- KAHIL, T. *et al.* A nexus modeling framework for assessing water scarcity solutions. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 40, p. 72–80, 2019.
- KALIDASA MURUGAVEL, K.; CHOCKALINGAM, K. K. S. K.; SRITHAR, K. Progresses in improving the effectiveness of the single basin passive solar still. **Desalination**, v. 220, n. 1–3, p. 677–686, 2008.
- KIANIFAR, A.; ZEINALI HERIS, S.; MAHIAN, O. Exergy and economic analysis of a pyramid-shaped solar water purification system: Active and passive cases. **Energy**, v. 38, n. 1, p. 31–36, 2012.
- LABREN. **Atlas brasileiro de energia solar**, 2017. Disponível em: <<http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP3W34P/3PERDJE>>
- MALUF, Alexandre Prata. **Destiladores solares no Brasil**. 2005. Monografia (Especialista em Fontes Alternativas de Energia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005. p. 39.
- MARTÍNEZ-GARCÍA, A. *et al.* Assessment of a pilot solar V-trough reactor for solar water disinfection. **Chemical Engineering Journal**, v. 399, 2020.
- MATHIOULAKIS, E.; BELESSIOTIS, V.; DELYANNIS, E. Desalination by using alternative energy: Review and state-of-the-art. **Desalination**, v. 203, n. 1–3, p. 346–365, 2007.
- MODI, K. V.; NAYI, K. H. Efficacy of forced condensation and forced evaporation with thermal energy storage material on square pyramid solar still. **Renewable Energy**, v. 153, p. 1307–1319, 2020.

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.

MOTA, S.; ANDRADE, M. A. N. Uso da destilação solar no tratamento de águas contaminadas por microorganismos. Aplicações à pequenas comunidades. **Revista Tecnologia**, n.º.7, p. 24-26, 1986.

MUTHU MANOKAR, A. *et al.* Effect of water depth and insulation on the productivity of an acrylic pyramid solar still – An experimental study. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 10, 2020.

NAFEY, A. S. *et al.* Solar still productivity enhancement. **Energy Conversion and Management**, v. 42, n. 11, p. 1401–1408, 2001.

NAYI, K. H.; MODI, K. V. Pyramid solar still: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 136–148, 2018.

OLÍMPIO, J. L. S. **Desastres naturais associados à dinâmica climática no estado do Ceará: subsídios à gestão dos riscos de secas e de inundações**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Fortaleza, 2013.

OLIVEIRA, J. DE S. C. *et al.* Soluções individuais de abastecimento de água para consumo humano: questões para a vigilância em saúde ambiental. **Cadernos Saúde Coletiva**, v. 25, n. 2, p. 217–224, 2017.

OMARA, Z. M.; KABEEL, A. E.; ABDULLAH, A. S. A review of solar still performance with reflectors. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, p. 638–649, 2017.

PANCHAL, H. *et al.* Experimental and water quality analysis of solar stills with vertical and inclined fins. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 11, 2020.

PARSA, S. M. *et al.* A renewable energy-driven thermoelectric-utilized solar still with external condenser loaded by silver/nanofluid for simultaneously water disinfection and desalination. **Desalination**, v. 480, 2020.

PEREIRA, Enio Bueno *et al.* **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. Atlas.

QUELUZ, J. G. T.; ALVES, T. R.; SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M. Desinfecção Solar: Uma Solução De Baixo Custo Para O Tratamento De Águas Residuárias. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering** v, v. 8, n. 3, p. 199–208, 2014.

RESICOLOR TINTAS. **Epoxi base água**. 2016. Disponível em: <http://www.resicolor.com.br/pt-br/produto/epoxi-base-agua-102>. Acesso em: 30 jun. 2020.

SÁ, L. F., Jucá, J. F., & Motta Sobrinho, M. A. Tratamento do lixiviado de aterro sanitário usando destilador solar. **Ambiente e Água**. v. 7, n.1, 2012.

SANTOS, M. P., 1999. **O Saneamento frente às Situações Emergenciais motivadas pelas Enchentes: Casodo Município do Rio de Janeiro**. Dissertação (Mestrado). Rio de Janeiro, Fundação Oswaldo Cruz.

SARAVANAN, A.; MURUGAN, M. Performance evaluation of square pyramid solar still with various vertical wick materials – An experimental approach. **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 19, 2020.

SATHYAMURTHY, R. *et al.* A Review of integrating solar collectors to solar still. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 77, p. 1069–1097, 2017.

SATHYAMURTHY, R. *et al.* Factors affecting the performance of triangular pyramid solar still. **Desalination**, v. 344, p. 383–390, 2014.

SHARSHIR, S. W. *et al.* A hybrid desalination system using humidification-dehumidification and solar stills integrated with evacuated solar water heater. **Energy Conversion and Management**, v. 124, p. 287–296, 2016.

SHARSHIR, S. W. *et al.* Augmentation of a pyramid solar still performance using evacuated tubes and nanofluid: Experimental approach. **Applied Thermal Engineering**, v. 160, 2019.

SHARSHIR, S. W. *et al.* Thermal performance and exergy analysis of solar stills – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 73, p. 521–544, 2017.

SHARSHIR, S. W.; ABD ELAZIZ, M.; ELKADEEM, M. R. Enhancing thermal performance and modeling prediction of developed pyramid solar still utilizing a modified random vector functional link. **Solar Energy**, v. 198, p. 399–409, 2020.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Abastecimento de Água - 2018**. 2018. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/painel-informacoes-saneamento-brasil/web/painel-abastecimento-agua>. Acesso em: 20 jun. 2020.

SIVAKUMAR, V.; GANAPATHY SUNDARAM, E. Improvement techniques of solar still efficiency: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 28, p. 246–264, 2013.

SOARES, Clarissa. **Tratamento de água unifamiliar através da destilação solar natural utilizando água salgada, salobra e doce contaminada**. 2004. 110 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

SPERLING, M. V. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos**. 3ª edição. Belo Horizonte: Editora DESA, 2005. 452p.

TAAMNEH, Y.; TAAMNEH, M. M. Performance of pyramid-shaped solar still: Experimental study. **Desalination**, v. 291, p. 65–68, 2012.

TANAKA, H. Experimental study of a basin type solar still with internal and external reflectors in winter. **Desalination**, v. 249, n. 1, p. 130–134, 2009.

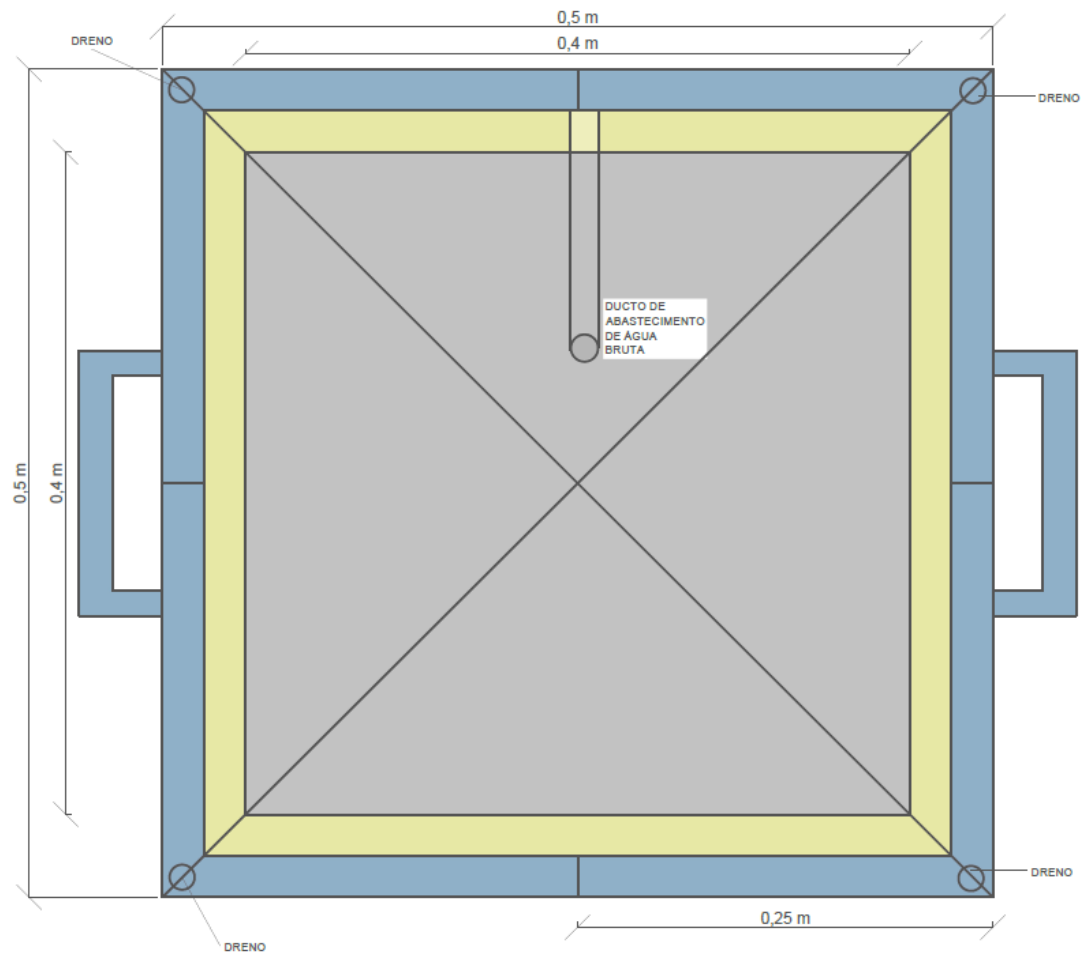
TANAKA, H. Tilted wick solar still with flat plate bottom reflector. **Desalination**, v. 273, n. 2–3, p. 405–413, 2011.

TAYEB, A. M. Performance study of some designs of solar stills. **Energy Conversion and Management**, v. 33, n. 9, p. 889–898, 1992.

TIWARI, G. N.; SINGH, H. N.; TRIPATHI, R. Present status of solar distillation. **Solar Energy**, v. 75, n. 5, p. 367–373, 2003.

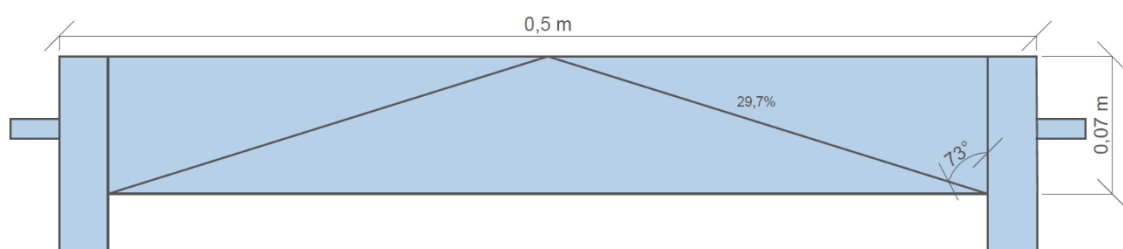
- TUCCI, Carlos E. M. **Gestão da água no Brasil**. Brasília: UNESCO, 2001. 156p.
- VELDKAMP, T. I. E. *et al.* Changing mechanism of global water scarcity events: Impacts of socioeconomic changes and inter-annual hydro-climatic variability. **Global Environmental Change**, v. 32, p. 18–29, 2015.
- VELMURUGAN, V. *et al.* Desalination of effluent using fin type solar still. **Energy**, v. 33, n. 11, p. 1719–1727, 2008.
- VERTCHENKO, L.; DICKMAN, A. G.; FERREIRA, J. R. F. Transferência de fluido por meio de um sifão vs. aplicação da equação de Bernoulli. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 31, n. 3, 2009.
- WASSOUF, P. *et al.* Novel and low cost designs of portable solar stills. **Desalination**, v. 276, n. 1–3, p. 294–302, 2011.
- WEISS, R.F. Carbon dioxide in water and seawater: the solubility of a non-ideal gas. **Chem**, 1974.
- XIAO, G. *et al.* A review on solar stills for brine desalination. **Applied Energy**, v. 103, p. 642–652, 2013.
- Xu, Y., Ma, J., Liu, D., Xu, H., Cui, F., & Wang, W. Origami system for efficient solar driven distillation in emergency water supply. **Chemical Engineering Journal**. v. 356, 2019.
- YAN, H. *et al.* Binary composite MoS₂/TiO₂ nanotube arrays as a recyclable and efficient photocatalyst for solar water disinfection. v. 401, 2020.
- YOUSEF, M. S. *et al.* Energy and exergy analysis of single slope passive solar still under Egyptian climate conditions. **Energy Procedia**, v. 141, p. 18–23, 2017.

APÊNDICE A – VISTA SUPERIOR DO DESTILADOR SOLAR PIRAMIDAL



Fonte: Autor.

APÊNDICE B – VISTA INTERNA DE CORTE DO MÓDULO ACOPLADO



Fonte: Autor.

APÊNDICE C – QUADRO GERAL DE PRODUÇÃO

(continua)

Data	Temp. (°C)	Umidade rel. (%)	Vento (m/s)	Radiação acumulada de produção (kW/m²)	Produção (L/m²)	Eficiência
07/10/2019	21,00	68,00	1,14	5,75	3,33	36%
08/10/2019	23,68	54,46	1,37	6,65	3,46	33%
09/10/2019	24,40	48,69	1,36	7,20	3,78	33%
29/10/2019	26,10	61,29	3,58	5,76	2,6	28%
30/10/2019	29,36	57,21	2,87	6,71	3,38	32%
31/10/2019	18,83	93,23	3,44	0,45	1,72	239%
01/11/2019	25,72	65,14	1,94	7,42	3,68	31%
02/11/2019	27,61	62,71	2,35	6,91	3,44	31%
03/11/2019	23,26	78,93	2,76	2,93	1,04	22%
04/11/2019	25,85	72,93	2,26	3,72	1,64	28%
05/11/2019	20,44	93,20	1,67	0,96	0,28	18%
06/11/2019	23,66	70,43	1,61	6,90	3,12	28%
07/11/2019	21,74	83,50	1,90	2,24	0,88	25%
08/11/2019	23,67	75,14	1,33	6,53	3,08	30%
09/11/2019	25,24	73,85	2,46	4,58	2,16	30%
10/11/2019	25,24	64,64	2,42	6,49	3,24	31%
11/11/2019	25,51	60,14	1,77	7,28	3,72	32%
12/11/2019	25,74	58,00	2,36	7,50	3,98	33%
13/11/2019	20,19	80,71	2,12	1,57	0,68	27%
14/11/2019	22,25	81,21	2,14	3,42	1,32	24%
15/11/2019	23,94	56,71	1,33	6,77	3,16	29%
16/11/2019	23,02	48,07	1,51	8,21	4,48	34%
17/11/2019	24,61	52,64	1,83	7,20	3,92	34%
18/11/2019	26,84	49,86	1,47	7,36	3,88	33%
19/11/2019	27,61	47,07	1,80	7,45	3,84	32%
20/11/2019	28,14	48,50	1,86	8,02	4,40	34%
21/11/2019	27,87	51,36	2,08	7,43	3,88	33%
22/11/2019	27,93	55,71	3,23	7,38	3,56	30%
23/11/2019	23,95	64,07	4,55	5,77	2,36	26%
24/11/2019	23,35	55,07	2,87	8,46	4,28	32%

APÊNDICE C – QUADRO GERAL DE PRODUÇÃO

(continuação)

Data	Temp. (°C)	Umidade rel. (%)	Vento (m/s)	Radiação acumulada de produção (kW/m²)	Produção (L/m²)	Eficiência
25/11/2019	25,43	55,43	2,79	8,43	4,20	31%
26/11/2019	21,07	82,42	1,91	1,02	1,68	103%
27/11/2019	22,13	85,21	1,87	1,98	0,76	24%
28/11/2019	22,43	50,35	3,10	8,83	4,24	30%
29/11/2019	25,46	57,79	2,46	8,49	4,12	30%
30/11/2019	25,57	65,64	1,76	5,48	2,50	29%
01/12/2019	26,19	50,14	2,75	7,04	3,28	29%
02/12/2019	23,07	44,78	3,51	8,82	4,60	33%
03/12/2019	25,04	53,50	2,67	7,98	4,08	32%
04/12/2019	22,70	82,64	2,42	5,70	1,16	13%
05/12/2019	22,25	66,64	2,54	6,82	3,44	32%
06/12/2019	22,50	47,86	1,36	8,96	4,68	33%
07/12/2019	24,93	38,35	1,64	8,60	4,40	32%
08/12/2019	26,27	46,86	2,72	8,18	4,40	34%
09/12/2019	24,73	62,57	1,84	6,77	4,28	40%
10/12/2019	26,92	52,64	1,71	8,38	2,88	21%
11/12/2019	28,58	47,71	1,70	8,37	2,84	21%
12/12/2019	23,28	77,00	2,59	4,69	3,80	51%
13/12/2019	25,91	60,50	2,30	8,38	2,16	16%
28/02/2020	23,33	53,36	1,63	7,31	4,12	35%
29/02/2020	24,16	56,79	1,49	5,97	3,48	36%
01/03/2020	24,25	52,43	2,54	7,41	2,96	25%
02/03/2020	23,61	56,14	2,24	7,06	4,40	39%
03/03/2020	23,66	58,79	1,74	7,23	3,84	33%
04/03/2020	25,13	54,21	1,61	6,67	3,58	34%
05/03/2020	24,01	55,07	1,36	7,27	4,48	39%
06/03/2020	25,18	55,21	1,56	6,96	2,12	19%
07/03/2020	24,60	58,07	2,21	4,85	3,80	49%
08/03/2020	24,81	52,00	1,31	6,69	3,04	28%
09/03/2020	26,94	47,43	1,27	6,62	3,80	36%

APÊNDICE C – QUADRO GERAL DE PRODUÇÃO

(conclusão)

Data	Temp. (°C)	Umidade rel. (%)	Vento (m/s)	Radiação acumulada de produção (kW/m ²)	Produção (L/m ²)	Eficiência
10/03/2020	27,65	40,35	1,31	6,81	3,52	32%
11/03/2020	27,62	39,79	1,84	6,65	3,52	33%
12/03/2020	28,52	46,35	1,63	6,40	3,60	35%
13/03/2020	29,71	44,21	0,96	5,41	3,08	36%
14/03/2020	29,88	33,14	1,49	6,59	3,68	35%
15/03/2020	28,76	45,07	2,23	5,83	3,00	32%
16/03/2020	27,64	54,29	1,69	5,77	3,56	39%
17/03/2020	28,43	51,64	2,01	6,31	3,16	31%
18/03/2020	22,94	88,58	2,23	2,00	0,68	21%

Fonte: Autor.

APÊNDICE D – PARÂMETROS DE QUALIDADE MEDIDOS NO DIA 01/11/2019

Parâmetros	Valor		Remoção
	Água bruta	Água destilada	
Turbidez	15,4 NTU	0,66 NTU	95,71%
Temperatura	21,0 C°	25,0 C°	NV
pH	7,0	6,6	NV
Condutividade elétrica	89,51 µS/cm	21,17 µS/cm	76,35%
Cor aparente	42,69 U.C.	14,43 U.C.	66,20%
Cor verdadeira	NR	AD	SI
Oxigênio Dissolvido	8,40 mg/L	7,92 mg/L	NV
Coliformes totais	NR	NR	NR
<i>Escherichia coli</i>	NR	NR	NR

Legenda: NV: Não visado; NR: Não realizado; AD: Abaixo do detectável; SI: Sem informação
 Fonte: Autor.

**APÊNDICE E – PARÂMETROS DE QUALIDADE MEDIDOS NO DIA
07/11/2019**

Parâmetros	Valor		Remoção
	Água bruta	Água destilada	
Turbidez	8,73 NTU	0,42 NTU	95,19%
Temperatura	24,0 C°	23,4 C°	NV
pH	6,48	6,57	NV
Condutividade elétrica	81,72 µS/cm	18,99 µS/cm	76,76%
Cor aparente	60,61 U.C.	12,58 U.C.	79,24%
Cor verdadeira	AD	AD	SI
Oxigênio Dissolvido	8,64 mg/L	7,92 mg/L	NV
Coliformes totais	2419,6 NMP/100mL	0 NMP /100mL	100%
<i>Escherichia coli</i>	920,8 NMP /100mL	0 NMP /100mL	100%

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

**APÊNDICE F – PARÂMETROS DE QUALIDADE MEDIDOS NO DIA
14/11/2019**

Parâmetros	Valor		Remoção
	Água bruta	Água destilada	
Turbidez	7,32 NTU	0,42 NTU	94,26%
Temperatura	23,1 C°	22,1 C°	NV
pH	6,48	6,26	NV
Condutividade elétrica	81,67 µS/cm	18,78 µS/cm	77,01%
Cor aparente	57,13 U.C.	7,89 U.C.	86,19%
Cor verdadeira	18,56 U.C.	AD	SI
Oxigênio Dissolvido	8,45 mg/L	6,76 mg/L	NV
Coliformes totais	NR	NR	NR
<i>Escherichia coli</i>	NR	NR	NR

Legenda: NV: Não visado; AD: Abaixo do detectável; SI: Sem informação; NR: Não realizado.
Fonte: Autor.

**APÊNDICE G – PARÂMETROS DE QUALIDADE MEDIDOS NO DIA
22/11/2019**

Parâmetros	Valor		Remoção
	Água bruta	Água destilada	
Turbidez	4,71 NTU	0,15 NTU	96,82%
Temperatura	23,2 C°	24,3 C°	NV
pH	6,48	6,58	NV
Condutividade elétrica	90,20 µS/cm	14,39 µS/cm	84,05%
Cor aparente	31,66 U.C.	5,87 U.C.	81,46%
Cor verdadeira	15,47 U.C.	AD	SI
Oxigênio Dissolvido	8,25 mg/L	8,07 mg/L	NV
Coliformes totais	504 NMP /100mL	0 NMP /100mL	100%
<i>Escherichia coli</i>	53 NMP /100mL	0 NMP /100mL	100%

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

**APÊNDICE H – PARÂMETROS DE QUALIDADE MEDIDOS NO DIA
29/11/2019**

Parâmetros	Valor		Remoção
	Água bruta	Água destilada	
Turbidez	4,57 NTU	0,46 NTU	89,93%
Temperatura	24,2 C°	24,2 C°	NV
pH	6,48	6,63	NV
Condutividade elétrica	81,86 µS/cm	13,41 µS/cm	83,62%
Cor aparente	32,54 U.C.	AD	SI
Cor verdadeira	10,69 U.C.	AD	SI
Oxigênio Dissolvido	8,37 mg/L	7,68 mg/L	NV
Coliformes totais	256 NMP /100mL	0 NMP /100mL	100%
<i>Escherichia coli</i>	38 NMP /100mL	0 NMP /100mL	100%

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

**APÊNDICE I – PARÂMETROS DE QUALIDADE MEDIDOS NO DIA
06/12/2019**

Parâmetros	Valor		Remoção
	Água bruta	Água destilada	
Turbidez	3,51 NTU	0,55 NTU	84,33%
Temperatura	23,9 C°	26,5 C°	NV
pH	6,30	6,62	NV
Condutividade elétrica	79,82 µs/cm	20,73 µS/cm	74,03%
Cor aparente	30,80 U.C.	AD	SI
Cor verdadeira	9,23 U.C.	AD	SI
Oxigênio Dissolvido	8,59 mg/L	7,30 mg/L	NV
Coliformes totais	53,1 NMP /100mL	0 NMP /100mL	100%
<i>Escherichia coli</i>	15 NMP /100mL	0 NMP /100mL	100%

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

**APÊNDICE J – PARÂMETROS DE QUALIDADE MEDIDOS NO DIA
12/03/2020**

Parâmetros	Valor		Remoção
	Água bruta	Água destilada	
Turbidez	3,30 NTU	0,16 NTU	95,15%
Temperatura	25,2 C°	25,2 C°	NV
pH	7,53	7,11	NV
Condutividade elétrica	57,30 µS/cm	15,30 µS/cm	73,30%
Cor aparente	15,22 U.C.	AD	SI
Cor verdadeira	AD	AD	SI
Oxigênio Dissolvido	8,06 mg/L	7,66 mg/L	NV
Coliformes totais	NR	NR	NR
<i>Escherichia coli</i>	NR	NR	NR

Legenda: NV: Não visado; AD: Abaixo do detectável; SI: Sem informação; NR: Não realizado.
Fonte: Autor.

ANEXO A – PARÂMETROS INFLUENCIADORES REGISTRADOS PELA ESTAÇÃO NO DIA 09/10/2019

Hora	Temperatura (°C)	Umidade (%)	Vento (m/s)	Radiação (kJ/m²)
0	18,50	75,00	0,60	-3,50
1	17,00	70,00	0,20	-3,50
2	16,10	70,00	0,00	-3,50
3	15,60	78,00	0,10	-3,50
4	15,00	83,00	0,70	-3,50
5	15,50	73,00	0,90	-3,50
6	15,20	72,00	0,00	-3,50
7	14,20	80,00	1,60	200,60
8	13,70	82,00	0,00	915,10
9	13,80	77,00	1,40	1680,00
10	16,10	68,00	0,90	2405,00
11	18,10	67,00	1,40	3004,00
12	20,60	62,00	1,80	3416,00
13	22,90	59,00	1,50	3513,00
14	24,70	49,00	1,70	3413,00
15	26,10	45,00	1,50	2907,00
16	26,80	41,00	2,80	2285,00
17	27,60	35,00	1,50	1522,00
18	27,80	35,00	1,70	684,70
19	28,20	37,00	1,20	31,70
20	27,90	35,00	0,70	-3,50
21	26,60	46,00	1,00	-3,50
22	23,90	54,00	0,00	-3,50
23	19,90	69,00	0,00	-3,50

Fonte: INMET (2019)

ANEXO B – PARÂMETROS INFLUENCIADORES REGISTRADOS PELA ESTAÇÃO NO DIA 07/10/2019

Hora	Temperatura (°C)	Umidade (%)	Vento (m/s)	Radiação (kJ/m²)
0	16,40	87,00	1,50	-3,50
1	16,30	88,00	0,90	-3,50
2	15,80	91,00	1,40	-3,50
3	15,40	93,00	0,60	-3,50
4	15,10	94,00	0,20	-3,50
5	14,90	94,00	2,20	-3,30
6	14,70	95,00	0,00	-3,50
7	14,50	95,00	0,80	92,30
8	14,20	95,00	0,20	652,80
9	14,20	96,00	0,20	1272,00
10	14,50	96,00	0,50	1572,00
11	16,00	91,00	1,80	2516,00
12	17,30	87,00	1,30	3240,00
13	19,30	79,00	1,20	2562,00
14	20,20	72,00	2,50	3069,00
15	22,20	66,00	2,00	1768,00
16	22,90	61,00	1,90	1950,00
17	23,40	56,00	1,50	1384,00
18	24,00	57,00	1,40	626,50
19	24,90	49,00	0,70	58,60
20	24,50	46,00	0,00	-3,50
21	23,00	55,00	0,00	-3,50
22	20,80	69,00	0,00	-3,50
23	18,30	86,00	0,00	-3,50

Fonte: INMET (2019)

ANEXO C – PARÂMETROS INFLUENCIADORES REGISTRADOS PELA ESTAÇÃO NO DIA 09/03/2020

Hora	Temperatura (°C)	Umidade (%)	Vento (m/s)	Radiação (kJ/m²)
0	20,60	78,00	0,00	-3,50
1	19,80	79,00	0,00	-3,50
2	18,90	85,00	0,00	-3,50
3	18,20	85,00	0,00	-3,50
4	17,80	80,00	0,00	-3,50
5	17,70	83,00	0,00	-3,50
6	19,10	70,00	0,20	-3,50
7	20,80	67,00	0,00	45,50
8	20,20	74,00	0,40	586,70
9	20,10	72,00	0,40	1290,00
10	20,40	71,00	0,20	2072,00
11	22,20	64,00	0,50	2742,00
12	23,40	59,00	2,70	3221,00
13	25,30	54,00	2,90	3344,00
14	27,90	46,00	1,80	3429,00
15	29,60	40,00	2,00	3227,00
16	30,20	33,00	1,30	2140,00
17	30,10	30,00	1,80	1024,00
18	30,30	30,00	2,00	657,90
19	31,50	31,00	1,30	84,60
20	30,00	41,00	0,00	-3,50
21	29,40	41,00	0,70	-3,50
22	26,70	52,00	0,20	-3,50
23	23,30	63,00	0,00	-3,50

Fonte: INMET (2020)

ANEXO D – PARÂMETROS INFLUENCIADORES REGISTRADOS PELA ESTAÇÃO NO DIA 02/11/2019

Hora	Temperatura (°C)	Umidade (%)	Vento (m/s)	Radiação (kJ/m²)
0	23,10	83,00	0,00	-3,50
1	22,30	88,00	0,00	-3,50
2	23,90	72,00	0,00	-3,50
3	24,20	73,00	0,20	-3,50
4	24,10	74,00	2,00	-3,50
5	23,60	75,00	2,40	-3,50
6	22,50	78,00	2,00	-3,50
7	22,10	78,00	2,50	-3,50
8	21,60	80,00	2,00	7555,00
9	21,40	80,00	1,90	411,30
10	22,10	76,00	3,30	1170,00
11	23,60	71,00	1,80	1910,00
12	25,50	65,00	2,60	2563,00
13	26,40	61,00	3,90	2985,00
14	27,80	59,00	3,60	3309,00
15	29,00	57,00	3,90	3345,00
16	30,20	53,00	2,70	3154,00
17	31,20	54,00	2,50	2385,00
18	31,10	53,00	3,20	1774,00
19	31,40	52,00	2,30	1239,00
20	30,80	57,00	0,90	561,10
21	29,30	65,00	0,40	71,10
22	26,80	75,00	0,00	-3,50
23	25,40	75,00	0,00	-3,50

Fonte: INMET (2019)

ANEXO E – PARÂMETROS INFLUENCIADORES REGISTRADOS PELA ESTAÇÃO NO DIA 06/03/2020

Hora	Temperatura (°C)	Umidade (%)	Vento (m/s)	Radiação (kJ/m²)
0	20,00	73,00	0,20	-3,50
1	21,50	61,00	2,20	-3,50
2	20,80	66,00	2,00	-3,50
3	20,10	68,00	1,30	-3,50
4	19,40	71,00	1,80	-3,50
5	19,00	74,00	1,60	-3,50
6	18,80	74,00	0,70	-3,50
7	18,10	77,00	0,20	50,20
8	18,00	76,00	0,70	609,40
9	17,80	77,00	1,30	1316,00
10	18,20	76,00	0,80	2058,00
11	19,70	74,00	1,90	2724,00
12	21,80	66,00	2,90	3187,00
13	23,40	61,00	3,30	3369,00
14	25,30	53,00	2,40	3311,00
15	26,10	52,00	2,30	3274,00
16	27,90	49,00	1,30	2513,00
17	29,20	43,00	1,50	1853,00
18	29,90	43,00	1,60	724,60
19	30,00	38,00	1,30	93,50
20	30,00	38,00	1,30	-3,50
21	27,90	45,00	0,00	-3,50
22	25,40	58,00	0,00	-3,50
23	23,20	73,00	0,00	-3,40

Fonte: INMET (2020)

ANEXO F – PARÂMETROS INFLUENCIADORES REGISTRADOS PELA ESTAÇÃO NO DIA 31/10/2019

Hora	Temperatura (°C)	Umidade (%)	Vento (m/s)	Radiação (kJ/m²)	Chuva (mm)
0	25,30	71,00	2,40	-3,50	0,00
1	25,10	72,00	1,70	-3,50	0,00
2	25,10	72,00	2,00	-3,50	0,00
3	25,00	74,00	0,00	-3,30	0,00
4	23,60	86,00	0,00	-3,50	0,00
5	24,70	74,00	0,10	-3,20	0,00
6	23,40	80,00	2,80	-3,40	0,00
7	23,10	81,00	3,30	-3,50	0,00
8	22,60	79,00	4,30	2,10	0,00
9	20,40	80,00	9,40	38,50	0,00
10	19,10	91,00	6,70	21,50	9,20
11	18,90	92,00	3,70	231,00	0,40
12	18,60	92,00	8,30	111,70	6,60
13	19,20	92,00	3,10	24,80	0,80
14	17,80	96,00	6,40	31,50	20,80
15	19,00	95,00	2,40	101,50	3,60
16	19,00	95,00	0,20	177,10	5,60
17	18,90	94,00	2,20	315,00	6,40
18	18,70	94,00	4,10	320,20	2,20
19	19,10	92,00	1,80	211,40	0,00
20	19,00	94,00	1,60	50,20	0,00
21	18,90	90,00	2,00	-3,40	0,00
22	18,50	95,00	2,20	-3,50	0,00
23	18,40	95,00	3,40	-2,70	0,00

Fonte: INMET (2019)