

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

Vinícius Immich

**AVALIAÇÃO DO USO DE DESTILADOR SOLAR PIRAMIDAL ATIVO
PARA PRODUÇÃO DE ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO EM SITUAÇÕES
EMERGENCIAIS**

Frederico Westphalen, RS
2021

Vinícius Immich

**AVALIAÇÃO DO USO DE DESTILADOR SOLAR PIRAMIDAL ATIVO
PARA PRODUÇÃO DE ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO EM 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

Vinícius Immich

**AVALIAÇÃO DO USO DE DESTILADOR SOLAR PIRAMIDAL ATIVO PARA
PRODUÇÃO DE ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO EM SITUAÇÕES
EMERGENCIAIS**

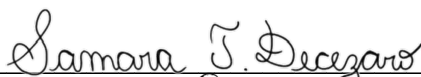
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Ambiental e Sanitária, da Universidade
Federal de Santa Maria (UFSM, RS),
como requisito parcial para obtenção do
título de **Engenheiro Ambiental e
Sanitarista**.

Aprovado em 10 de fevereiro de 2021



Marcus Bruno Domingues Soares, Dr. (UFSM)

(Presidente/Orientador)



Samara Terezinha Decezaro, Dra. (UFSM)



Gizelli Moiano de Paulo, Dra. (UFSM)

Frederico Westphalen, RS

2021

DEDICATÓRIA

“Dedico esse trabalho à minha família, que sempre contribuíram para minha bagagem de conhecimentos. Eles são os grandes responsáveis pelo sucesso deste estudo”.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, por me ensinarem a seguir meus próprios passos. Pela educação que me deram e por sempre estarem ao meu lado, tanto em bons momentos quanto os difíceis.

Aos meus irmãos Gabriel, Felipe e Arthur, serem como exemplo, me guiando a sempre ser uma pessoa melhor.

Aos professores pela dedicação, paciência e conhecimento que me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional.

Ao professor Marcus Bruno, pela assistência, suporte, confiança e envolvimento dedicado em todas as etapas desse trabalho.

A todos meus amigos, pelas discussões estimulantes, pelas noites sem dormir em que finalizávamos os trabalhos e por toda a diversão que tivemos nos últimos quatro anos, os quais me apoiaram e me incentivaram a buscar o meu objetivo.

A minha namorada, Stephany, por toda paciência, compreensão, carinho, amor e por todos momentos de tristezas e alegrias compartilhados.

Aos funcionários da Sulclean, pela ajuda nos ajustes necessários para operação do destilador.

A Universidade Federal de Santa Maria, pelas experiências inesquecíveis e ensino público gratuito e de qualidade ofertado.

*“A felicidade não está na estrada que leva a
algum lugar. A felicidade é a própria estrada”.*

(Bob Dylan)

RESUMO

AVALIAÇÃO DE UM DESTILADOR SOLAR PIRAMIDAL ATIVO PARA PRODUÇÃO DE ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO EM SITUAÇÕES EMERGENCIAIS

AUTOR: Vinícius Immich

ORIENTADOR: Marcus Bruno Domingues Soares

No planeta, há abundância de água em determinadas regiões e escassez em outras. Como consequência, se faz necessária a busca por alternativas para obtenção de uma água de qualidade, como promover a dessalinização da água do mar ou buscar a potabilidade de água doce contaminada. O presente trabalho buscou avaliar a produção e qualidade de água de um destilador piramidal ativo, capaz de destilar água, advinda de mananciais de água doce, com a ajuda de um painel fotovoltaico, afim de utiliza-lo em situações emergenciais. Construído com área de cobertura de vidro de 0,25 m², com base em recomendações já conhecidas para maximizar sua produtividade. Foram realizadas 19 coletas de produção, sendo 11 para o nível de água em 3,5 cm dentro da pirâmide, capaz de produzir uma média de 1,58 L/m³ em 32,74% de eficiência e 8 coletas em 1,0 cm, capaz de produzir um média de 4,30 L/m² em 57,80% de eficiência. Foram realizadas 12 análises da água destilada, todas com os parâmetros de acordo com norma brasileira vigente. 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. O destilador solar ativo, analisado no presente trabalho se mostrou de boa eficiência, simples entendimento, operação e manutenção.

Palavras-chave: Destilador Solar Piramidal Ativo. Tratamento de Água. Situações Emergenciais. Destilador Solar com Painel Fotovoltaico.

ABSTRACT

EVALUATION OF AN ACTIVE PYRAMID SOLAR STILL FOR PRODUCTION OF WATER FOR HUMAN CONSUMPTION IN EMERGENCY SITUATIONS

AUTHOR: Vinícius Immich

ADVISOR: Marcus Bruno Domingues Soares

On the planet, there is an abundance of water in certain regions and scarcity in others. As a consequence, it is necessary to search for alternatives to obtain quality water, such as promoting the desalination of sea water or seeking the potability of contaminated fresh water. The present work sought to evaluate the production and water quality of a pyramidal active solar still, capable of distilling water coming from freshwater sources, with the help of a photovoltaic panel, in order to use it in emergency situations. Built with a glass coverage area of 0.25 m², based on recommendations previously known to maximize your productivity. 19 samplings were carried out, 11 for the water level in 3.5 cm inside the model, capable of producing an average of 1.58 L / m² in 32.74% efficiency and 8 collections in 1.0 cm, capable of produce an average of 4.30 L / m² at 57.80% efficiency. 12 analysis of distilled water were carried out, all with the parameters according to the current national standard. The meteorological variables that influence the production of a solar still are solar radiation, ambient temperature, wind speed and relative humidity. These variables were monitored to assess the potential of production efficiency for local characteristics. The active solar still, analyzed in the present work, showed good efficiency, simple understanding, operation and maintenance.

Keywords: Pyramidal Ative Solar Still. Water treatment. Emergency Situations. Solar Still with photovoltaic panel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Balanço hídrico quantitativo por região hidrográfica no Brasil	18
Figura 2 – Nível de estresse hídrico	19
Figura 3 – Variabilidade do fotoperíodo ao longo do ano para diferentes latitudes	20
Figura 4 – Médias mensais do total diário da irradiação global horizontal	21
Figura 5 – Corte transversal de uma célula fotovoltaica	22
Figura 6 – Destilador solar – Las Salinas / Chile	24
Figura 7 – Destilador Ilha de Patmos – Grécia	24
Figura 8 – Classificação dos diferentes sistemas de Destilação Solar	26
Figura 9 – Esquema de operação de um destilador solar piramidal ativo	27
Figura 10 – Mapa de localização dos lugares utilizados durante o estudo	34
Figura 11 – Visão superior e corte lateral da cobertura de vidro	37
Figura 12 – Foto da cobertura de vidro	37
Figura 13 – Visão lateral superior e foto do módulo acoplado	37
Figura 14 – Visão superior, lateral e foto do tanque raso	38
Figura 15 – Fotos da espuma de isolamento térmico	38
Figura 16 – Foto da resistência elétrica usada no sistema de aquecimento com 3,5 cm de nível de água	39
Figura 17 – Foto da resistência elétrica usada no sistema de aquecimento com 1,0 cm de nível de água	39
Figura 18 – Foto do sistema completo do destilador piramidal	39
Figura 19 – Local da coleta de água bruta, no Lajeado Pardo, em Frederico Westphalen ..	41
Figura 20 – Termômetros Digitais utilizados para acompanhar a temperatura no experimento	42
Figura 21 – Estação Meteorológica INMET, localizada na UFSM-FW	42
Figura 22 – Produção x eficiência em 3,5 cm de profundidade de água	45
Figura 23 – Produção x eficiência em 1,0 cm de profundidade de água	47
Figura 24 – Produção x eficiência em 1,0 cm de profundidade de água sem auxílio do PV	50
Figura 25 – Gráfico de variação gradual da temperatura da água, ambiente, interna e radiação solar do dia 22/07/2020	52
Figura 26 – Gráfico de variação gradual da temperatura da água, ambiente, interna e radiação solar do dia 25/08/2020	54
Figura 27 – Gráfico de variação gradual da temperatura da água, ambiente, interna e radiação solar nos dias 22/07/2020 (A) e 25/08/2020 (B)	55
Figura 28 – Gráfico da média de remoção dos diferentes parâmetros da água destilada	59

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Patamares específicos de estresse hídrico.....	17
Quadro 2 – Valores encontrados para análises dos parâmetros de controle da água bruta e água destilada no dia 17/08/2020	58
Quadro 3 – Valores médios encontrados para análises dos parâmetros de controle da água bruta e água destilada no período do estudo	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites estabelecidos na Portaria de Consolidação nº 5 do Ministério da Saúde	31
Tabela 2 – Revisão Bibliográfica de diferentes destiladores ativos	32
Tabela 3 – Localização dos lugares utilizados durante o estudo	35
Tabela 4 – Componentes do destilador solar piramidal e suas configurações	36
Tabela 5 – Custo de cada material para desenvolvimento do sistema do destilador solar piramidal	40
Tabela 6 – Metodologias utilizadas para análises de qualidade de água.....	44
Tabela 7 – Resumo da produtividade em 3,5 cm de profundidade de água	46
Tabela 8 – Resumo da produtividade em 1,0 cm de profundidade de água	48
Tabela 9 – Resumo da produtividade em 1,0 cm de profundidade de água sem auxílio do PV	50
Tabela 10 – Progressão horária da temperatura da água no tanque raso, ambiente, interna e radiação solar no dia 22/07/2020	52
Tabela 11 – Média das variáveis climatológicas, das 8h as 18h do dia 22/07/2020	53
Tabela 12 – Progressão horária da temperatura da água no tanque raso, ambiente, interna e radiação solar no dia 25/08/2020	53
Tabela 13 – Média das variáveis climatológicas, das 8h às 18h do dia 25/08/2020	54
Tabela 14 – Tabela comparativa da variável climática vento na produção de água destilada	56
Tabela 15 – Tabela comparativa variáveis climáticas umidade relativa e temperatura do ar na produção de água destilada	56
Tabela 16 – Resultados dos parâmetros de odor e sabor da água bruta e água destilada	59

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVO	16
2.1. OBJETIVO GERAL.....	16
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3. REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1. ESTRESSE HÍDRICO	17
3.2. INCIDÊNCIA DE ENERGIA SOLAR GLOBAL.....	19
3.3. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	22
3.4. HISTÓRICO DO USO DE DESTILADORES SOLARES COMO ALTERNATIVA PARA PRODUÇÃO DE ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO	23
3.5. PRINCÍPIOS DE OPERAÇÃO E MECANISMOS DE UM DESTILADOR SOLAR PARA ÁGUA DE CONSUMO HUMANO.....	25
3.6. VARIÁVEIS INFLUENCIADORAS NO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ÁGUA DE CONSUMO HUMANO	27
3.7. PARÂMETROS INFLUENCIADORES NO PADRÃO DE QUALIDADE DA ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO.....	29
3.8. EFICIÊNCIA E PRODUÇÃO DE DIFERENTES DESTILADORES SOLARES.....	31
3.9. DESTILADORES SOLARES PARA USO EMERGENCIAL	33
4. MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1. LOCAL DO ESTUDO	34
4.2. CONSTRUÇÃO DO DESTILADOR	35
4.3. OPERAÇÃO DO DESTILADOR PIRAMIDAL	40
4.4. ANÁLISE QUANTITATIVA DE PRODUÇÃO DE ÁGUA E SUA EFICIÊNCIA ..	42
4.5. ANÁLISE QUALITATIVA DE PRODUÇÃO DE ÁGUA	43
4.6. ACOMPANHAMENTO DAS TEMPERATURAS	44
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
5.1. PRODUTIVIDADE DE ÁGUA E EFICIÊNCIA DO DESTILADOR PIRAMIDAL	45
5.1.1. Profundidade de água em 3,5cm com PV	45
5.1.2. Profundidade de água em 1 cm com PV	47
5.1.3. Profundidade em 1 cm, sem PV.....	49
5.1.4. Comparativo da eficiência e produtividade de água nos diferentes níveis e configurações.....	51
5.2. DESEMPENHO TÉRMICO DO SISTEMA COM AUXÍLIO DO PV.....	51
5.2.1. Profundidade de água em 3,5cm.....	51
5.2.2. Profundidade de água em 1,0 cm.....	53

5.2.3. Comparativo do desempenho térmico nas diferentes profundidades	54
5.3. INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS NA PRODUÇÃO DE ÁGUA DESTILADA.....	55
5.3.1. Vento.....	56
5.3.2. Umidade Relativa e Temperatura do ar	56
5.4. QUALIDADE DA ÁGUA PRODUZIDA PELO DESTILADOR PIRAMIDAL ATIVO	57
6. CONCLUSÃO.....	61
REFERÊNCIAS.....	63
ANEXO A- QUADRO DOS DADOS DE PRODUÇÃO DO DESTILADOR EM 3,5 CM DE NÍVEL DE ÁGUA COM PV.....	68
ANEXO B- QUADRO DOS DADOS DE PRODUÇÃO DO DESTILADOR EM 1,0 CM DE NÍVEL DE ÁGUA COM PV.....	69
ANEXO C- QUADRO DOS DADOS DE PRODUÇÃO DO DESTILADOR EM 1,0 CM DE NÍVEL DE ÁGUA SEM PV.....	69
ANEXO D- QUADRO DAS ANALÍSES DE ÁGUA BRUTA E DESTILADAS	70
ANEXO D- QUADRO DAS ANALÍSES DE ÁGUA BRUTA E DESTILADAS	71
ANEXO D- QUADRO DAS ANALÍSES DE ÁGUA BRUTA E DESTILADAS	72
ANEXO D- QUADRO DAS ANALÍSES DE ÁGUA BRUTA E DESTILADAS	73
ANEXO E- PLANTAS DO SISTEMA UTILIZADO NO EXPERIMENTO	74

1. INTRODUÇÃO

A água é um dos elementos mais importantes para a vida vegetal e animal. No organismo humano a água atua, entre outras funções, como veículo para a troca de substâncias e para a manutenção da temperatura, representando cerca de 65 a 70% da massa corporal. (COMPANHIA DE SANEAMENTO DE SERGIPE - DESO, 2018).

É fato que três quartos do planeta Terra está coberto por água, mas somente 0,5% destes adequam-se à classificação de água doce e encontram-se disponíveis para atender às necessidades humanas e dos ecossistemas (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2009). Segundo Araújo e Damasceno (2009), no planeta, há abundância em determinadas regiões e escassez em outras, visto que a distribuição das águas no planeta não ocorre de maneira uniforme. No Brasil o Semiárido nordestino é a região que mais sofre com a disponibilidade hídrica.

A carência extrema de água para consumo, em algumas regiões, faz com que a população consuma água de péssima qualidade, com níveis elevados de contaminantes químicos e biológicos. Segundo Corcoran *et al.* (2010), “mais da metade das camas de hospitais do mundo estão ocupadas com pessoas que sofrem de doenças relacionadas com a água contaminada e mais pessoas morrem como resultado de água poluída do que são mortas por todas as formas de violência, incluindo guerras”.

Em uma estação de tratamento de água (ETA), a operação de tratamento convencional, discorre das seguintes fases: Coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção e fluoretação (PIANTÁ, 2008). Estas etapas visam a remoção de microrganismos e impurezas que possam afetar a saúde humana. Uma alternativa ao tratamento convencional, capaz de produzir uma água potável de qualidade, é a destilação solar.

Em tempos de escassez de água, se faz necessária a busca por alternativas para obtenção de uma água de qualidade, como promover a dessalinização da água do mar (OLIVEIRA JÚNIOR; SCANFONE, 2010), ou buscar a potabilidade de água doce contaminada, como apresentado por Soares (2004) e também realizado no presente trabalho.

A destilação solar consiste no aquecimento da água pelos raios solares, evaporação, condensação do vapor d'água numa superfície fria e coleta do condensado como água-produto (SOARES, 2004). Com manutenção simples, sem custos operacionais, essa alternativa de purificação da água contaminada ou salgada, é transformado em água

adequada para consumo humano. Dessa forma, é um dos equipamentos mais simples e eficientes, utilizando o aproveitamento da energia solar (STEC – PB, 1984, citado por SOARES, 2004).

Atualmente, são conhecidos vários tipos de destiladores solares, se destacando os que utilizam o efeito estufa, pois esse é um dos procedimentos mais simples e baratos para a obtenção de água destilada (FONSECA FONSECA, SUSANA; MIRANDA PERDOMO; TORRES TEN, 2012).

Destiladores solares foram estudados em diversos trabalhos, como alternativa para obtenção de água potável através do processo de destilação solar, como os de Xiao *et al.* (2013), Rahim (2001) e Bhattacharyya (2013).

O presente trabalho buscou avaliar o desempenho de um destilador piramidal ativo, com painel fotovoltaico (PV) aplicado destilação de água doce, a fim de obter água potável, com atendimento aos parâmetros da Portaria da Consolidação nº5 de novembro de 2017. Avaliou-se a viabilidade de seus aspectos de produção e qualidade, tendo em vista que a grande demanda por alternativas unifamiliares viáveis, principalmente em áreas remotas e de difícil acessibilidade a tratamentos de água convencionais.

2. OBJETIVO

2.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar a produtividade e eficiência de tratamento de água potável em um Destilador Solar Ativo, perante as características do inverno no clima subtropical úmido, utilizando água bruta de captação superficial.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a temperatura interna do destilador, da água e ambiente, ao longo do dia;
- Avaliar a eficiência de produção de água do sistema com base na incidência de radiação solar;
- Avaliar a influência das variáveis climáticas na produção de água do sistema;
- Avaliar a viabilidade de produção para utilização do presente destilador no tratamento de água unifamiliar/pequenas comunidades;
- Análise da qualidade da água destilada em comparação com a Portaria da Consolidação nº5 de novembro de 2017;
- Análise da eficiência de produção de água destilada em diferentes níveis de água e configurações.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. ESTRESSE HÍDRICO

Segundo UNEP (2007), “Estresse hídrico ocorre quando a demanda de água excede a quantidade disponível durante um determinado período ou quando baixa qualidade limita seu uso”.

O Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos, publicado em 2018, pela Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura (UN-WATER, 2018) mostra que o ciclo mundial hídrico está se intensificando devido as mudanças climáticas com a tendência de regiões já úmidas ou secas apresentarem situações cada vez mais extremas. É estimado que 3,6 bilhões de pessoas vivam em áreas que apresentam escassez de água por pelo menos um mês do ano, com projeções entre 4,8 bilhões e 5,7 bilhões até 2050.

Ainda, conforme o Relatório, na década de 1990, a poluição hídrica piorou em quase todos os rios da América Latina, da África e da Ásia. Estima-se que a deterioração da qualidade da água irá se ampliar ainda mais durante as próximas décadas, o que aumentará as ameaças à saúde humana, ao meio ambiente e ao desenvolvimento sustentável (UN-WATER, 2018).

De modo geral, os recursos hídricos correm riscos evidentes de stress hídrico. Há regiões que mesmo consideradas abundantes de água, apresentam períodos de seca, o que está associado ao aumento da população na região e ao excessivo consumo dos recursos hídricos. Comprovando que não existe limite regionais para o estresse hídrico (CARVALHO, 2008 apud SILVA, 2014). É possível verificar se a situação de estresse hídrico, através do volume disponível per capita, como apresentado no Quadro 1.

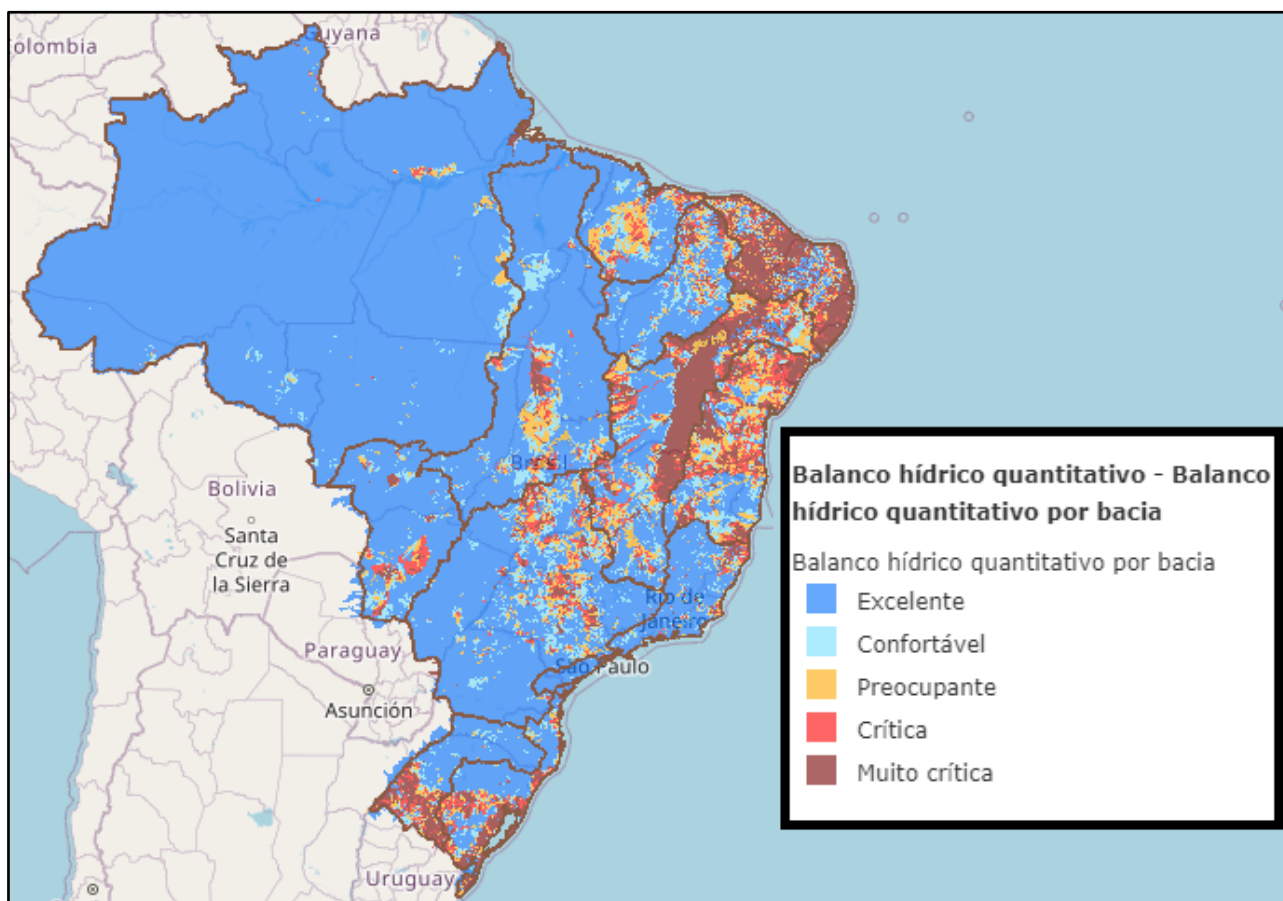
Quadro 1 - Patamares específicos de estresse hídrico

Volume disponível per capita m³/hab.ano	Situação
> 1.700	- Somente ocasionalmente tenderá a sofrer problemas de falta d'água.
1.000 - 1.700	- O estresse hídrico é periódico e regular.
500 - 1.000	A região está sob o regime de crônica escassez de água; - Nesses níveis, a limitação na disponibilidade começa a afetar o desenvolvimento econômico, o bem estar e a saúde.
< 500	- Considera-se que a situação corresponde a escassez absoluta.

Fonte: Beekman (1999).

Observa-se, a partir do Quadro 1, que o volume disponível per capita, deve ser de $> 1.700 \text{ m}^3/\text{hab.ano}$ para desenvolvimento das atividades humanas sem problemas de falta d'água. Subsequentemente na Figura 1, está o balanço hídrico quantitativo por região hidrográfica no Brasil.

Figura 1 - Balanço hídrico quantitativo por região hidrográfica no Brasil



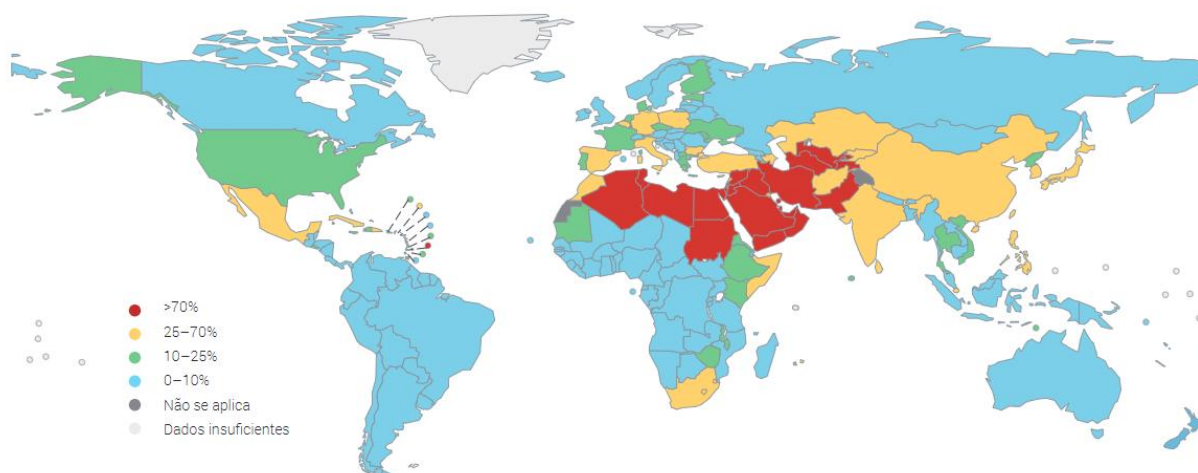
Fonte: Agência Nacional de Águas (2021).

Observando a Tabela e Figura 1, é possível perceber que a região do Brasil com maior frequência de escassez é a Região hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental. Seguida por algumas sub-bacias da região hidrográfica de São Francisco, Uruguai e Atlântico Sul. Com média inferior a $1.000 \text{ m}^3/\text{hab.ano}$. Em algumas unidades hidrográficas dessa região são registrados valores inferiores a $500 \text{ m}^3/\text{hab.ano}$. Quando analisamos a questão demográfica, percebemos que a maior parte da população brasileira não reside em pontos onde a disponibilidade hídrica é abundante, se concentrando grande parte nas regiões Sudeste e

Nordeste. Por sinal, são essas as regiões cujos estados possuem os maiores históricos de secas e escassez de água ao longo do tempo.

Apesar dos valores baixos em algumas regiões o Brasil é considerado rico, com disponibilidade de 33 mil m³/hab.ano (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2007), o que não se aplica em alguns países do mundo (Figura 2):

Figura 2 – Nível de estresse hídrico



Fonte: UN-Water (2019).

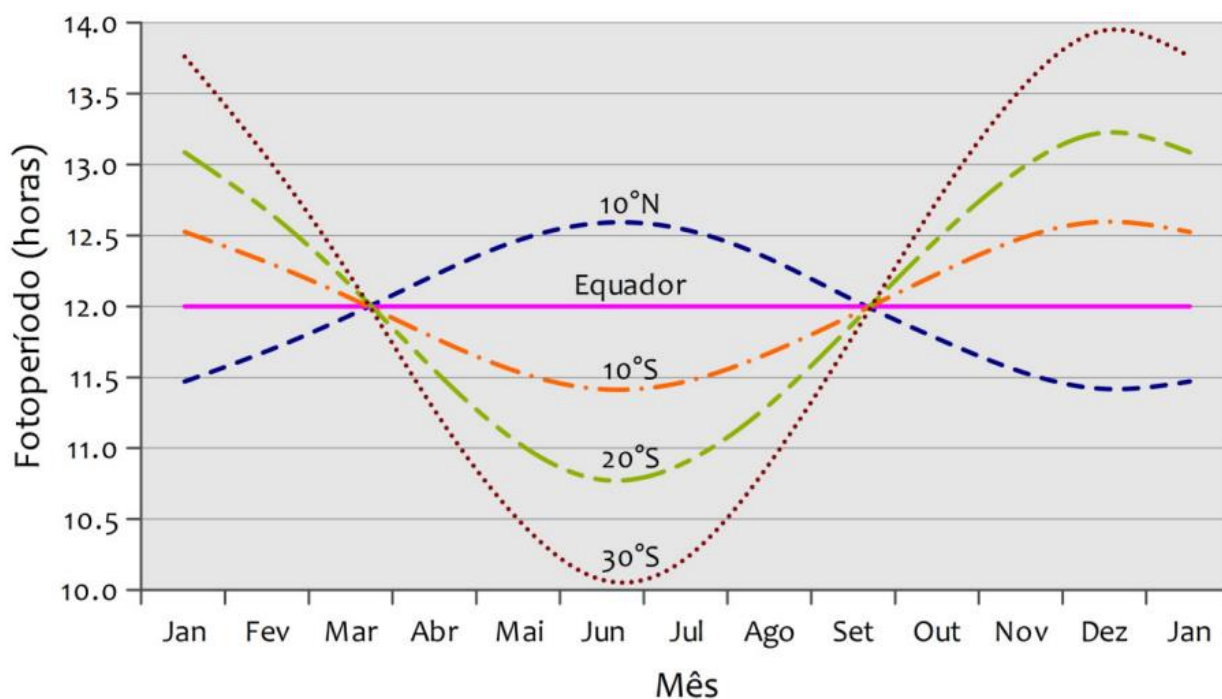
Os países árabes, são os que mais manifestam patamares de disponibilidade hídrica por habitante correspondentes a um quadro de escassez, principalmente por se enquadrarem em regiões áridas, onde não existem rios perenes. Segundo o Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos (UN-WATER, 2019) (Figura 2), os níveis de estresse hídrico mais altos estão nas regiões da América central, extremo norte e sul da África e Sul da Ásia.

3.2. INCIDÊNCIA DE ENERGIA SOLAR GLOBAL

A energia, está é definida, teoricamente, como uma energia não renovável, mas uma fonte inesgotável, levando em conta a escala de tempo de vida do Planeta Terra, alimentando todos os processos térmicos, dinâmicos e químicos, sejam naturais ou artificialmente desenvolvidos com aplicação do conhecimento científico (PEREIRA *et al.*, 2017).

A incidência de energia solar e duração do dia, apresenta uma variabilidade temporal, caracterizada pelos ciclos anual e diário. Na Figura 3 é apresentado como o período de incidência solar varia a latitude, relacionada com a estação do ano. Além do movimento de translação orbital, a variabilidade da incidência de energia está ligada ao ciclo diário, conforme o movimento de rotação da Terra em torno de seu eixo (PEREIRA *et al.*, 2017).

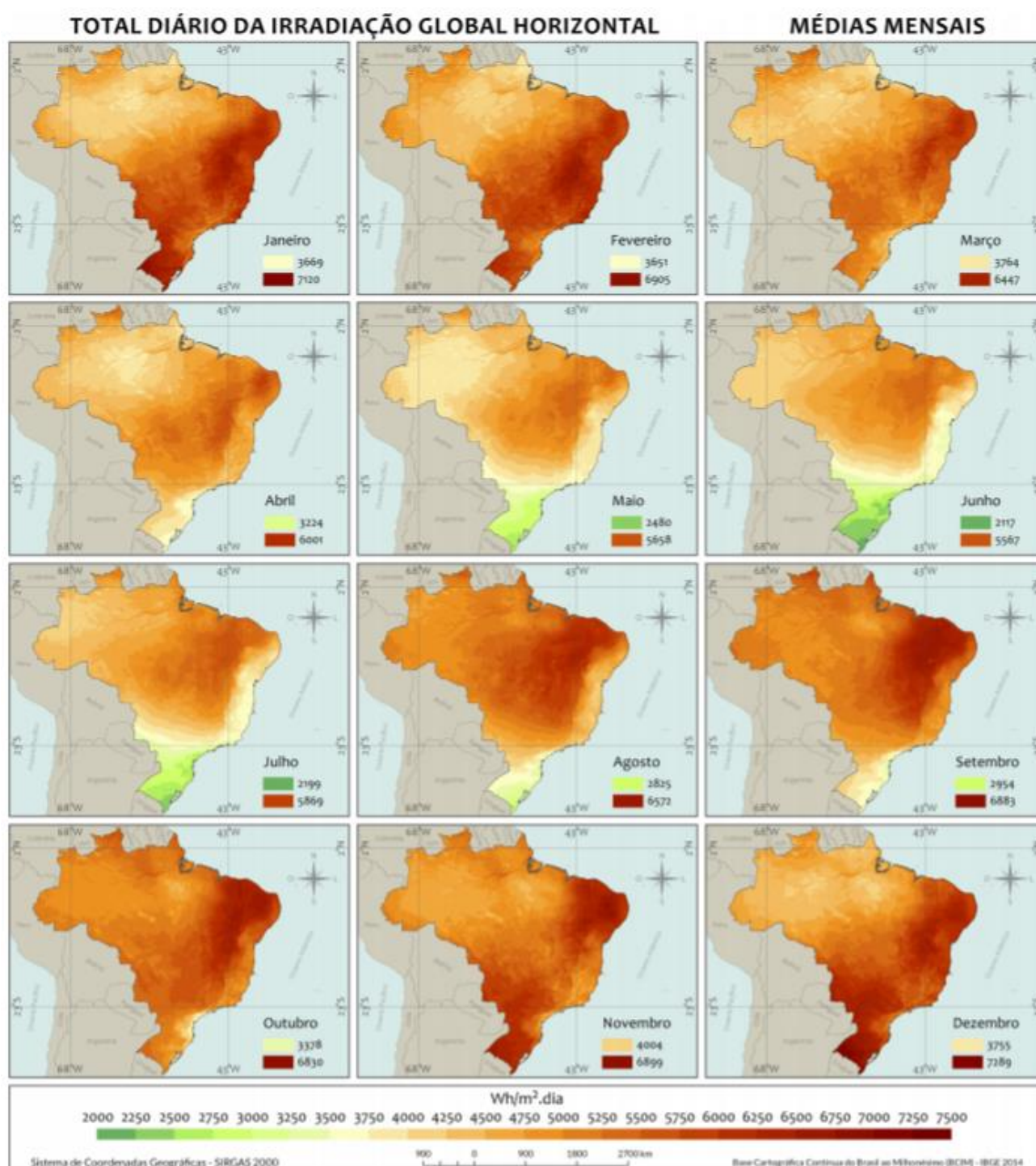
Figura 3- Variabilidade do fotoperíodo ao longo do ano para diferentes latitudes



Fonte: Pereira *et al.* (2017).

O Atlas Brasileiro de Energia Solar, apresenta um mapa com das variações de incidência de radiação solar em todos os meses do ano, presente na Figura 4, sendo possível verificar a baixa incidência nos meses de inverno, e o aumento nos meses próximos ao verão.

Figura 4- Médias mensais do total diário da irradiação global horizontal



Fonte: Pereira *et al.* (2017).

A confluência de energia solar com a superfície pode variar de acordo com a quantidade de nuvens. Estas são um dos principais moduladores da radiação incidente na

face terrestre, em razão de suas propriedades óticas. As gotículas de água provocam um espalhamento da radiação solar, que variam de acordo com a sua espessura ótica, tamanho das gotículas, conteúdo e estado físico (PALTRIDGE, 1976).

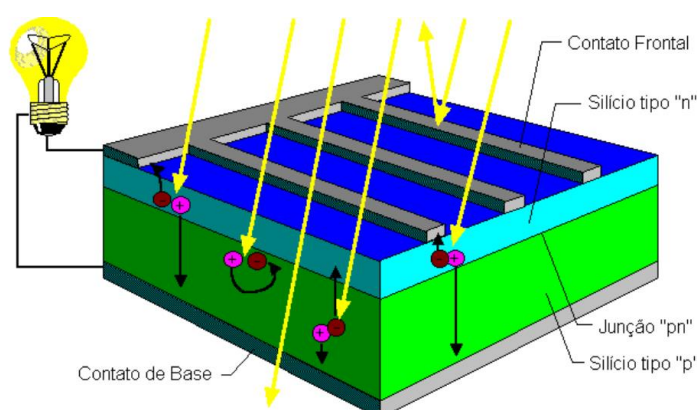
3.3. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Observado pela primeira vez em 1839, por Edmundo Becquerel, o efeito fotovoltaico foi produzido através de uma corrente elétrica ao expor à luz placas de prata mergulhadas num eletrólito. Posteriormente, em 1877, foi realizada a confecção da primeira célula solar, por Adams e R.E. Day, fundamentada nas propriedades fotocondutoras de dois elétrodos de selênio, que produziam uma corrente elétrica quando expostos à radiação. Porém a eficiência destes sistemas era muito reduzida, em torno de 0,5% (VALLÊRA; BRITO, 2004).

BRITO; SILVA, (2006), definem que:

Uma célula fotovoltaica simples consiste num díodo de grande área, e um substrato de material semiconductor, onde é criado um campo elétrico interno permanente (chamado junção pn). Quando a radiação atinge um átomo do semiconductor, este liberta um elétron que pode ser conduzido pelo campo elétrico interno para os contatos, contribuindo assim para a corrente produzida pela célula fotovoltaica (Figura 5).

Figura 5 – Corte transversal de uma célula fotovoltaica



Fonte: CRESESB/CEPEL (1999).

Somente em 1954, com a compreensão mais completa dos materiais semicondutores, D.M. Chapin e colaboradores, do Bell Laboratory, nos Estados Unidos da América,

registraram a patente de uma célula fotovoltaica com eficiência de 4,5%, após terem finalizado uma publicação de células solares de silício (BRITO; SILVA, 2006).

Em 2004, após 50 anos de pesquisas e desenvolvimentos de painéis solares de maior eficiência, uma pesquisa com módulos monocristalinos e multicristalinos, apresentou valores de eficiência que variaram de 9,1% a 16,1%, com um valor mediano próximo a 12,5% para módulos de tamanho razoavelmente **grande**, com garantia de 25 anos (GREEN, 2005).

Atualmente, de acordo com Januzzi, Varella e Gomes (2009), as células fotovoltaicas mais disponibilizadas no mercado são as que tem por base o silício monocristalino, policristalino e amorfo, com melhor rendimento comparado as de 2004, variando de 15% a 24,7%; 14% a 20,3%; 5% a 9,5%, respectivamente. Há também há materiais, como o disseleneto de cobre-indio (CIS) e telureto de cádmio (CdTe).

Segundo Manokar *et al.*, (2018), a eficiência do painel solar é expressa matematicamente por:

$$\eta_{pv} = \frac{V \times I}{I(t) \times A_{pv}} \times 100 \quad (1)$$

I – Corrente (A)

I(t) – Intensidade Solar (W.m⁻²)

V – Voltagem (V)

A_{pv} – Área do painel solar

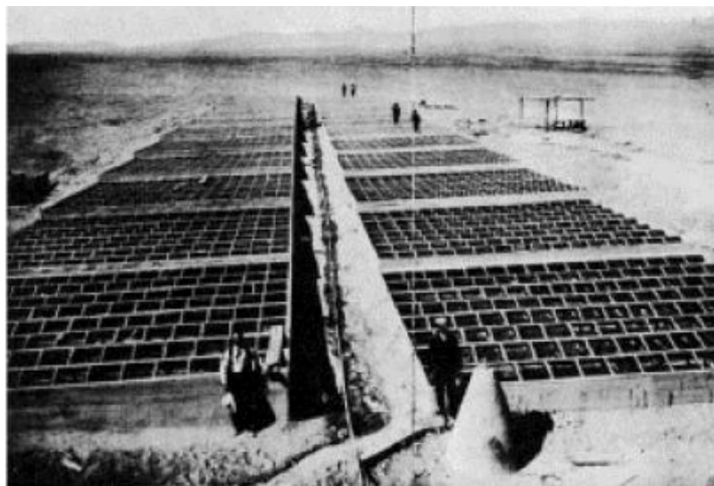
3.4. HISTÓRICO DO USO DE DESTILADORES SOLARES COMO ALTERNATIVA PARA PRODUÇÃO DE ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO

Considerada há muito tempo como alternativa para transformar a água imprópria em água para consumo, principalmente em lugares remotos, a destilação solar foi descrita no século IV a.C por Aristóteles. Foi utilizada, no século XVI, por alquimistas árabes e reproduzida, em 1593, pelo navegador “Sir” Richard Hawkins, que usava a destilação solar para obter água potável, a partir da água do mar, em suas viagens aos mares do sul (MALUF, 2005).

Duffie e Beckman (1991) afirmam que os dessalinizadores utilizados no deserto do Atacama no Chile, datam do ano de 1872 até 1907, utilizados pela Empresa Salitrera Lastenia Salinas. Seu propósito era prover água para mineiros e animais, com área

aproximada de 4.700 m², para uma produção de aproximadamente 6.000 galões, equivalente de 22 a 500 litros de água diários.

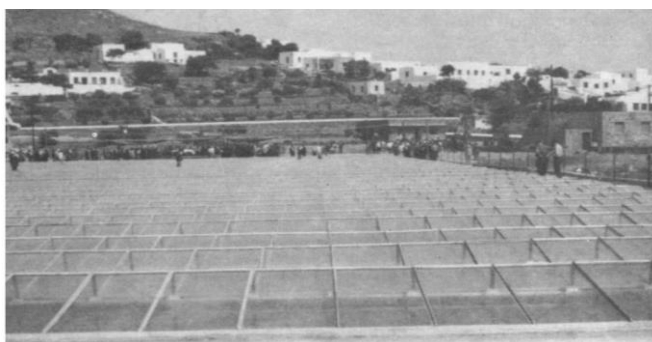
Figura 6 - Destilador solar – Las Salinas / Chile



Fonte: Ramirez (2003) apud Silva (2014).

A partir da década de 60 foram construídas plantas de destilação solar em países como, Grécia (8640 m²), Haiti (400 m²) e Índia (2000 m²). Também foram desenvolvidas e aplicadas em zonas de escassez de água potável, mas com acesso ao mar como: Israel, Ilhas Canárias na Espanha, e Ilhas no Mediterrâneo. Um dos maiores destiladores solares do mundo (Figura7), está localizado na Grécia, na Ilha de Patmos, com 800 m², e capacidade de produção em torno de 2.000 a 8.000 m³/dia (SILVA, 2014).

Figura 7 – Destilador localizado Ilha de Patmos – Grécia



Fonte: Nandwani, 2009 apud Silva (2014).

Segundo Silva (2014), os países que se destacam em pesquisas sobre destilação solar, principalmente ligadas a dessalinização, são: Inglaterra, EUA, França, Israel, Índia, Japão e Alemanha.

Destefani *et al.* (2007) relata que as experiências com a destilação solar, no Brasil, começaram em 1970, no Instituto Tecnológico da Aeronáutica – ITA. Em 1978 a PETROBRAS inicia seu programa de dessalinização de água do mar para atender suas plataformas marítimas com a utilização do processo da osmose reversa.

Ainda, de acordo com Destefani *et al.* (2007), atualmente existe 7.500 usinas em operação no Golfo Pérsico, Espanha, Malta, Austrália e Caribe, porém com o custo, ainda alto, em torno de US\$ 2,00 por metro cúbico de água produzida.

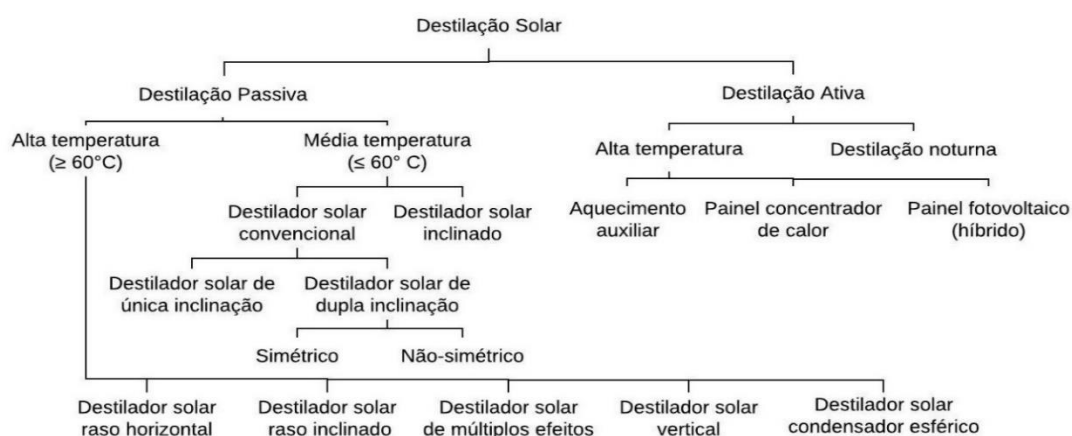
3.5. PRINCÍPIOS DE OPERAÇÃO E MECANISMOS DE UM DESTILADOR SOLAR PARA ÁGUA DE CONSUMO HUMANO

Destiladores solares são uma alternativa interessante e eficaz para potabilidade de água, tendo em vista que utiliza uma fonte de energia gratuita e abundante, apresenta fácil operação e não gera poluentes (FARIA *et al.*, 2015). Há várias configurações destes destiladores solares, entretanto, um estudo realizado por Ahmed; Alshutal e Ibrahim (2014) estudou o efeito de diferentes formatos, concluindo que destiladores piramidais, aprimoram a produtividade em cerca de 17,5% quando comparado a destiladores de uma única inclinação.

Maluf (2005), explica que “a destilação solar utiliza a energia solar diretamente, em um sistema extremamente simples: o processo natural de purificação de água, por meio de evaporação, condensação e precipitação, é reproduzido em pequena escala.” Mesmo sendo uma tecnologia com alto custo inicial para a produção de água potável, possui uma vida útil longa e funcionamento adequado, produzindo água potável a um custo razoável quando utilizada por longos períodos, deixando para trás os sais, outros minerais e a maioria das impurezas, incluindo micro organismos nocivos à saúde. O desempenho do destilador solar depende da radiação solar, da temperatura do ar ambiente e da velocidade do vento (JANI e MODI, 2018). Bezerra (2001), explica que: “A destilação solar é uma aplicação de energia solar bastante promissora, principalmente em regiões distantes dos centros urbanos e onde os custos das fontes convencionais são altos [...]”

Destiladores solares são divididos em dois tipos; ativo e passivo (Figura 8). Nos destiladores passivos, a radiação solar incidente é a única responsável pela evaporação da água, dependendo somente da radiação incidente disponível. Já os destiladores ativos são usados fornecedores de energia térmica, como painéis fotovoltaicos, para aumentar a taxa de evaporação (ELBAR; HASSAN, 2020).

Figura 8 – Classificação dos diferentes sistemas de Destilação Solar

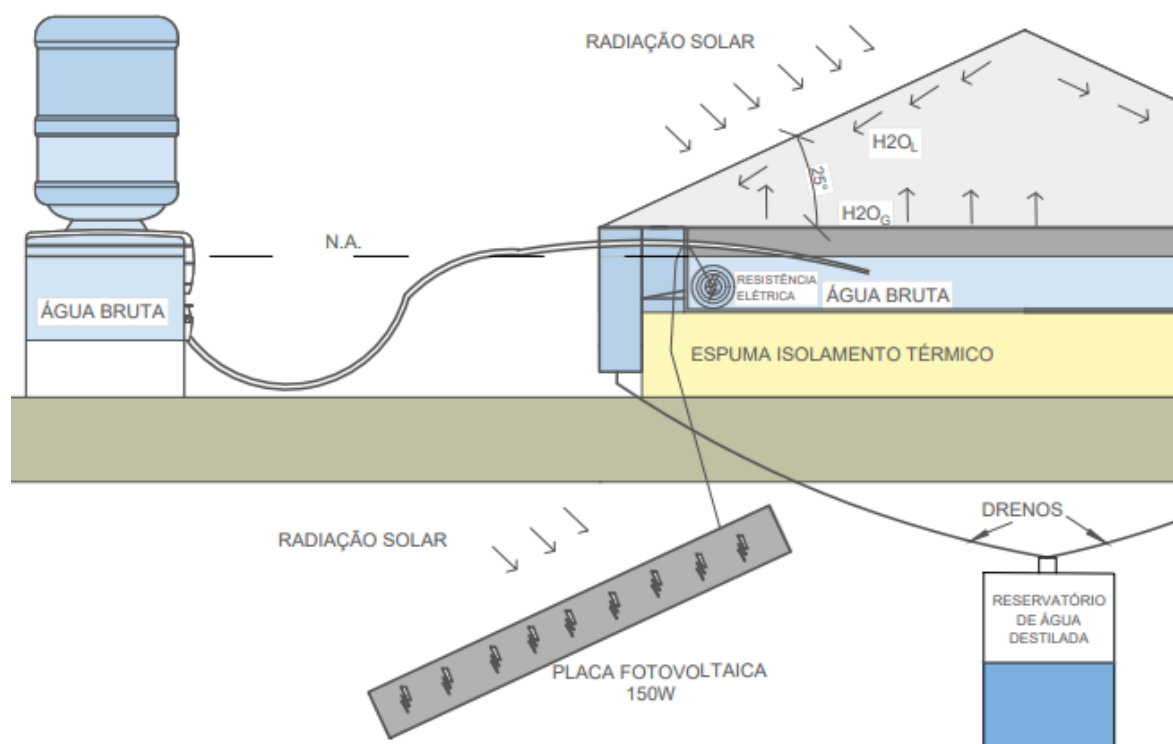


Fonte: Adaptado de Bhattacharyya (2013).

Vertchenko, Dickman e Ferreira (2009) explica que o processo físico envolvido na alimentação do sistema é baseado no princípio de Bernoulli, no que se refere a transferência de fluido entre dois reservatórios, onde ambos estão submetidos a pressão atmosférica. A diferença de carga hidráulica entre o reservatório de água bruta e o tanque raso, permite que haja inserção de água no sistema, e a mesma é interrompida quando as cargas hidráulicas se igualam.

Os destiladores solares tipo estufa, como o utilizado neste trabalho (Figura 9), consiste em uma bandeja escura, de pouca profundidade, onde a água é exposta à destilar por meio da radiação solar, que é absorvida pela bandeja. Esta aquece, evapora a água, que se condensa na tampa de vidro, desce e é coletada nos canais, e posteriormente transportada por dutos até um recipiente (FONSECA FONSECA *et al.*, 2005). Em lugares frios ou com pouco espaço, o processo pode ser realizado gerando-se calor. Para esse fim, recomenda-se a energia solar, que é mais barata, não consome recursos como petróleo e carvão e não agride o meio ambiente (SOARES, 2004).

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



Fonte: Autor.

3.6. VARIÁVEIS INFLUENCIADORAS NO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ÁGUA DE CONSUMO HUMANO

O processo de destilação da água em um sistema de destilação solar basicamente depende de transferência de energia. Por isso, fatores ambientais geram influência direta sobre a produção, que podem ser aproveitadas ao máximo pelo melhor *design* do destilador solar. Como explicado por Nandwani (2009) apud Silva (2014) e Xiao *et al.* (2013) que a quantidade de água destilada depende de fatores como: quantidade de água, radiação solar, temperatura e umidade do ambiente e velocidade do vento, dentre outros. No entanto o fator mais transformador é a radiação solar, pois é esta que fornece a energia capaz de aquecer a água bruta. A energia solar é absorvida pelo material de cobertura, tanque e água, armazena e troca calor entre si, havendo disparidades de temperatura entre ar interno e superfície da cobertura que propicia um ambiente de maiores produtividades.

Segundo Sathyamurthy *et al.* (2017), a eficiência da energia solar ainda depende dos seguintes parâmetros: Ângulo de inclinação da cobertura, temperatura da placa de cobertura, profundidade de água, orientação de energia solar, isolamento e transferência de calor por convecção da cobertura e paredes laterais. Também há influência, de acordo com Jani e Modi (2018), da espessura do material de cobertura, e do tipo de material do tanque raso.

O comportamento do destilador solar é caracterizado pelas diferentes transferências de massa e calor que ocorrem no seu interior. Os principais fenômenos que ocorrem são a transferência de calor entre a água e o vidro do destilador solar; e a transferência de massa entre a água e o vidro do destilador solar. [...] A transferência de massa se deve aos processos físicos de evaporação da água existentes nas coberturas do destilador. O vapor de água vai incorporando o ar do interior do destilador aumentando sua concentração. A condensação se produz quando o ar próximo à cobertura de vidro alcança a saturação e a temperatura do vidro (GAMEIRO, 2010).

Silva (2014), Dhindsa; Mittal (2018) apontam que a temperatura ambiente acaba por influenciar diretamente na temperatura do material de cobertura, contribui significativamente no fluxo de calor evaporativo, radioativo e convectivo. O vidro de cobertura está exposto ao ambiente externo, e perde calor para a atmosfera por convecção, age como coletor e condensador do vapor de água. Ou seja, quanto menor for a temperatura do ambiente, maior será a taxa de transferência de calor do material para o ambiente, para que assim se condense o vapor. A umidade relativa do ar e a velocidade do vento causa o mesmo efeito, como observado por Chandrashekara e Yadav (2017), que explica que destiladores que produzem água com base no processo de umidificação são mais produtivos quando situados próximos a áreas litorâneas. A umidade relativa do ar e a velocidade do vento, intensificam a taxa de transferência de calor, porque diminuem a temperatura do material de cobertura.

Rahim (2001) defende que badejas com menores profundidades tem maior eficiência, pois nestas a alteração da radiação solar afeta de imediato a temperatura da água, portanto, a taxa de evaporação é elevada, aumentando a produção de destilado. Isso não ocorre com as bacias profundas.

Costa (2008), El-Maghlany, El-Samadony e Kabeel (2016), Singh e Tiwari (2004) e Kabeel; Abdelgaied e Almulla (2016), explicam que o ângulo de inclinação da cobertura de vidro tem influência na quantidade de radiação solar que entra no destilador. A inclinação

ideal da cobertura de vidro deve ser igual ou próxima à latitude do local para receber mais radiação.

Como aconselhado por Muthu Manokar et al., (2020) e Modi e Nayi (2020) a cobertura deve ser projetada com um tipo de material capaz de transmitir o máximo de radiação solar, e manter o calor gerado dentro do sistema. Um estudo realizado por Tayeb (1992) com destiladores solares convencionais de quatro tipos diferentes de cobertura, concluiu que o vidro é o material mais eficiente durante as horas de sol.

De acordo com Maluf (2005), para uma maior eficiência do destilador, a distância entre a base da cobertura de vidro e a superfície da água não deve ser maior que cinco ou sete centímetros. A perda térmica por convecção aumenta conforme a distância entre o vidro e a água aumenta, diminuindo a eficiência do destilador.

Fica claro nas revisões das literaturas de Sharshir *et al.*, (2016), Chandrashekara e Yadav (2017) e Morad, El-Maghawry e Wasfy, (2017), que sistemas que utilizam o processo de aumento da temperatura da água para causar evaporação e condensação, requerem um bom isolamento para minimizar as perdas de calor por condensação para o ambiente externo. Em destiladores de tanque raso/bandeja, geralmente utiliza-se algum material isolante por baixo, como uma camada de espuma.

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

A água dessalinizada apresenta composição química variada em função do seu processo de desmineralização. O processo de destilação, por exemplo, apresenta de 2 a 10 mg/L de concentração final de sais (CUSTODIO; LLAMAS, 2001). A presença de algumas substâncias, em baixas concentrações, promovem a palatabilidade da água, portanto, quando em estado de pureza, não possui sabor e odor próprios. Por esta razão, a água destilada é desagradável ao paladar. 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, apud SOARES, 2004).

Durante a segunda guerra mundial os destiladores solares foram muito estudados e desenvolvidos para o uso em pequena escala. A sua utilização para produção de água para consumo humano é mais empregada para dessalinizar a água (SILVA, 2014). Em águas

salinas, o principal parâmetro a ser removido é o da condutividade elétrica, que é advinda principalmente de cloretos. Costa (2008) apresenta em seu estudo uma eficiência de remoção de 99,96%, com valor de condutividade inicial de 10520 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Outros parâmetros de destaque a serem avaliados para as águas destiladas são o parâmetro físico de pH, microbiológico em geral e compostos químicos. O pH relacionado a potabilidade, de acordo com a Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017, do Ministério da Saúde, é de 6,0 a 9,5. Mathioulakis, Belessiotis e Delyannis (2007) explicam que deve-se estar atento à corrosão dos materiais das estruturas do sistema de destilação. Com pH básico ou ácido, a água pode reagir com as tintas ou materiais gerais, liberando substâncias capazes de atribuir odor, sabor e coloração à água destilada.

Segundo Chandrashekara e Yadav (2017), destiladores solares de baixo custo são suficientes para a remoção de arsênico, mercúrio, cádmio, coliformes, vírus e bactérias. Jolis, Lam e Pitt (2001) concluíram em seu estudo que a eficiência do processo de desinfecção por UV depende em grande parte da quantidade de partículas em suspensão na água, capazes de proteger as bactérias coliformes da radiação, mas que uma dose de 800 J / m^2 parece ser o valor mínimo para inativar os microrganismos.

Também é visado, em destiladores solares, a remoção de turbidez e cor. Segundo Richter e Azevedo Netto (1991), a turbidez é caracterizada pela presença de partículas suspensas na água, com tamanhos variando desde suspensões grosseiras a coloides, podendo ser causada por uma variedade de materiais, como: partículas de argila e lodo, descarga de esgoto doméstico ou industrial ou presença de grande número de microrganismos. Normalmente, a cor na água é devida a ácidos húmicos e tanino, originados da decomposição vegetal. A presença de substâncias dissolvidas ou em suspensão altera a cor da água, ela em sua forma pura, H_2O na forma líquida é ausente de coloração.

A água somente é dita potável quando não apresenta risco à saúde, o padrão organoléptico agradável aos sentidos e é adequada para consumo e preparação de alimentos. A Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017, do Ministério da Saúde dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade no Brasil. Alguns destes padrões são apresentados na Tabela 1 (BRASIL, 2017).

Tabela 1 – Limites estabelecidos na Portaria de Consolidação nº 5 do Ministério da Saúde

Parâmetro	Condição/Valor Máximo Permitido
<i>Escherichia Coli</i>	Ausência em 100 mL
Coliformes Totais	Ausência em 100 mL
Turbidez (pós filtração rápida)	0,5 uT em 95% das amostras
Turbidez final	5 uT
Cor	15 uH
pH	6,0 a 9,5

Fonte: Adaptado de Brasil (2017).

3.8. EFICIÊNCIA E PRODUÇÃO DE DIFERENTES DESTILADORES SOLARES

Tleimat (1979) apud Soares (2004) mostra que o rendimento dos destiladores solares se expressa normalmente pela quantidade de água produzida por unidade de área por dia, e exclusivamente os fatores ambientais exercem influência sobre este.

Kalogirou (2005) definiu a eficiência para destiladores passivos como a “relação da energia utilizada na evaporação da água e a energia solar incidente no vidro” sendo de 35% (máximo) e diariamente ainda a produção é de cerca de 3 a 4 L/m². Já Praveen Kumar *et al.*, (2018), diz que a produção de um destilador solar ativo é mais de 7 L/dia, número muito superior quando comparado ao destilador solar passivo.

As perdas típicas em um destilador solar do tipo tanque raso são causadas pela reflexão da radiação incidente no vidro (cerca de 10% da energia total), absorção no vidro (10%), perdas por radiação da cobertura de vidro para o céu (3,7%), perdas por convecção do vidro para o ambiente (12,2%), perdas por condução da base do reservatório para o solo (16% mas com o uso de um bom isolante térmico pode cair para 5%) e outras perdas menores devido aos vazamentos de calor (9,7%). Esses valores foram tirados de experimentos feitos na Índia. A velocidade do vento e as diferenças de temperatura contribuem para os vazamentos de calor. Assim, considerando esses números como referência, de 38% a 43% (a eficiência máxima atingida não passa de 60%) da energia solar recebida pelo destilador é utilizada no processo de transferência de massa da evaporação. Contando com um valor típico de energia solar incidente num plano horizontal como de 4 a 5 kWh/m².dia⁻¹, então o valor típico de produção para esses números serão de apenas de 2 a 2,7kg/m²/dia de água (MALUF, 2005).

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 sobre a cobertura e da área do destilador (Equação 2).

$$\eta = \frac{\Sigma m_{dss} \times h_{fgss}}{\Sigma I(t) \times A} \quad (2)$$

η = Eficiência de produção (%);

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

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

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

A = Área da superfície do destilador (m²).

Essa equação não leva em conta as perdas de energia e outros fatores climáticos que possam afetar o desempenho do destilador, como a temperatura, a umidade do ar e velocidade do vento.

A Tabela 2 indica a produção usual de diferentes tipos de destiladores utilizados ao redor do mundo.

Tabela 2 – Revisão bibliográfica de diferentes destiladores ativos

Autores	Local	Tipo	Experimento	Produção	Eficiência
Abdullah (2013)	Egito	Ativo	D. de Escada integrado com aquecedor de ar solar	6,3 L/m ² .dia	52%
Singh; Kumar; Tiwari (2011)	Índia	Ativo	D. Dupla inclinação integrado a coletores de placas planas	7.54 L/m ² .dia	32%
Elbar e Hassan (2019)	Egito	Ativo	D. com Placa fotovoltaica acoplada a resistência elétrica	2,62 L/m ² .dia	27%
Praveen Kumar <i>et al.</i> (2018)	Índia	Ativo	D. com Placa fotovoltaica acoplada a resistência elétrica de Ni-Cr	0.335 L/m ² /MJ.dia.	62%
Hidouri; Ben slama; Gabsi, (2010)	Tunisia	Ativo	D. acoplado a Bomba de compressão de calor	12 L/m ² /dia	80%

Fonte: Autor.

3.9. DESTILADORES SOLARES PARA USO EMERGENCIAL

Atualmente vivemos em ambientes intensamente urbanizados, onde dependemos do abastecimento de água potável de sistemas construídos por empresas de saneamento. Em casos de emergência, se o abastecimento público falhar, tem-se uma situação de vulnerabilidade, pela falta de outras alternativas para obtenção de água de qualidade aceitável (MORETTI; VARALLO; COMARU, 2013).

Garantir a quantidade e a qualidade da água potável durante uma emergência é desafiador devido à contaminação da água de mananciais, falta de infraestrutura e acesso a eletricidade, especialmente em áreas remotas e rurais (XU et al., 2019). Muitas pequenas comunidades fora de regiões desenvolvidas sofrem de escassez de água potável, encontrando alternativa para obter água potável em meios de transportes de outros locais, entretanto, o custo e a confiabilidade do transporte são fatores limitantes (NAFEY et al., 2001). Cappelletti (2002) explica que destiladores solares são uma ótima alternativa para purificar água em pequena escala, em situações de emergência e quando não existem outras fontes de energia disponíveis.

De acordo com Tiwari, Kupfermann e Aggarwal (1997), destiladores solares infláveis feitos de plásticos eram utilizados pela Marinha e força aérea dos Estados Unidos em botes salva vidas de emergência. Estes destiladores eram projetados para ter uma almofada de feltro porosa para manter uma película de água, para haver rápida evaporação.

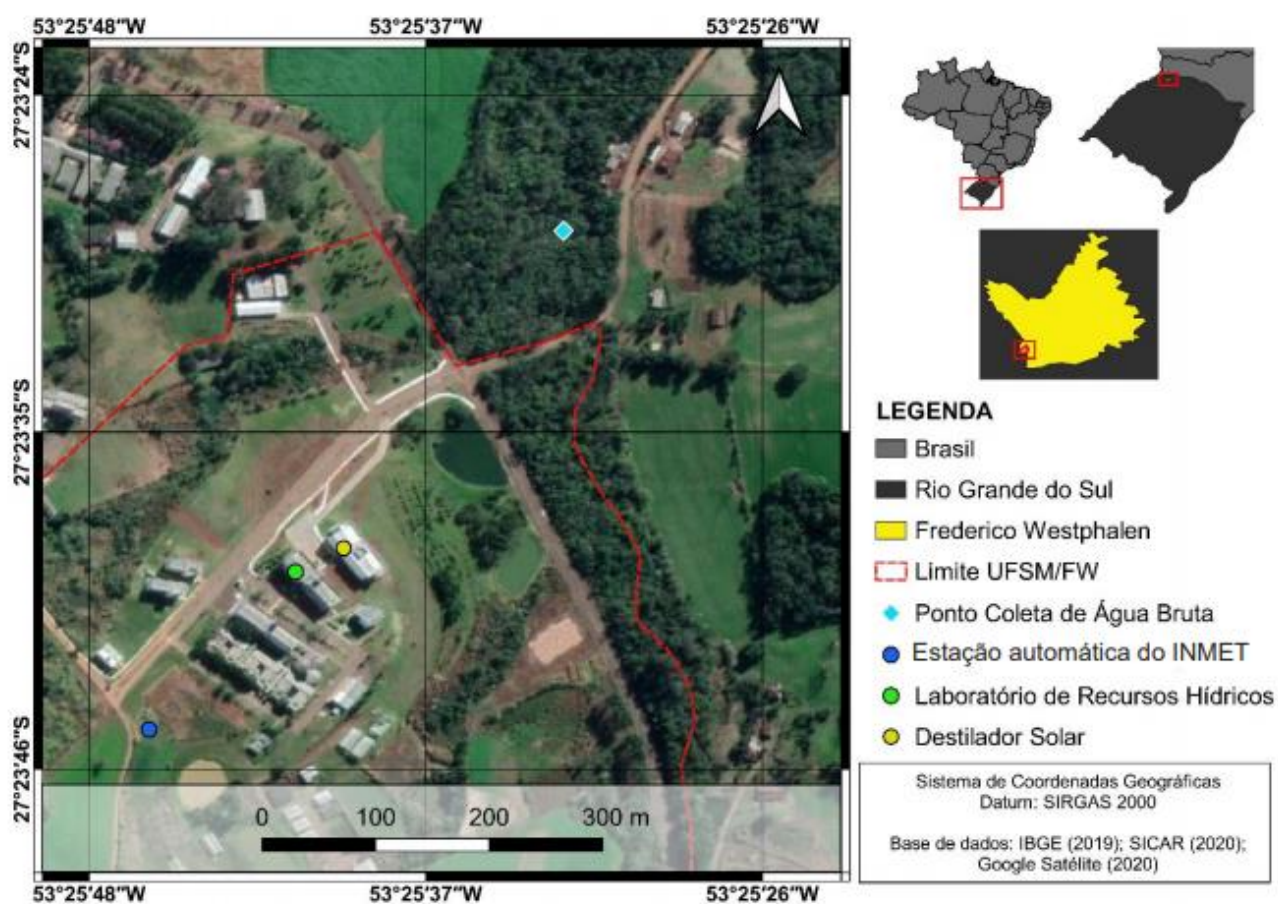
Alban Ulloa (2015), destaca que: os destiladores solares são dispositivos que permitem obter água doce onde esta é escassa, mas é encontrada em abundância misturada com outras substâncias que a tornam inutilizável na sua forma bruta. Além disto a contaminação das águas subterrâneas por atividades antrópicas, principalmente nas regiões semiáridas, tem resultado no abandono de muitos poços ou na perda de áreas importantes dos mananciais hídricos (OSTER, 2006). Com os destiladores solares é possível obter água doce da água do mar, de água barrenta e até mesmo a água contida em vegetais.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. LOCAL DO ESTUDO

O local do estudo foi realizado na Universidade Feral de Santa Maria *campus* Frederico Westphalen, água bruta superficial coletada em um córrego próximo (Figura 10 e Tabela 3).

Figura 10 – Mapa de localização dos lugares utilizados durante o estudo



Fonte: Autor.

Tabela 3 – Localização dos lugares utilizados durante o estudo

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

Fonte: Autor.

4.2. CONSTRUÇÃO DO DESTILADOR

A composição do destilador solar piramidal (Figura 18), foi dividido pelas componentes de cobertura, módulo acoplado, tanque raso, isolamento e sistema de alimentação e coleta, as quais estão dispostas na Tabela 4. As dimensões e composições dos materiais foram escolhidas em função de revisões bibliográficas de trabalhos realizados por outros autores, da disponibilidade, facilidade de montagem e do custo.

A cobertura escolhida para compor o destilador solar foi do tipo piramidal, a qual foi confeccionada com 4 placas de triângulos isósceles de vidro comum de 4 mm de espessura (Figuras 11 e 12), com angulação da cobertura de 25°. Segundo Sivakumar; Ganapathy Sundaram (2013) e Rahim (2001), o rendimento anual da energia solar é máximo quando a inclinação da cobertura de vidro é próxima à latitude do local. As placas foram unidas pelas arestas laterais com silicone, que também serve para isolamento.

O módulo acoplado (Figura 13) é a estrutura na qual a cobertura é acoplada e possui a função de conter o 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.

O material utilizado para confecção do tanque raso (Figura 14) 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 dos raios solares.

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

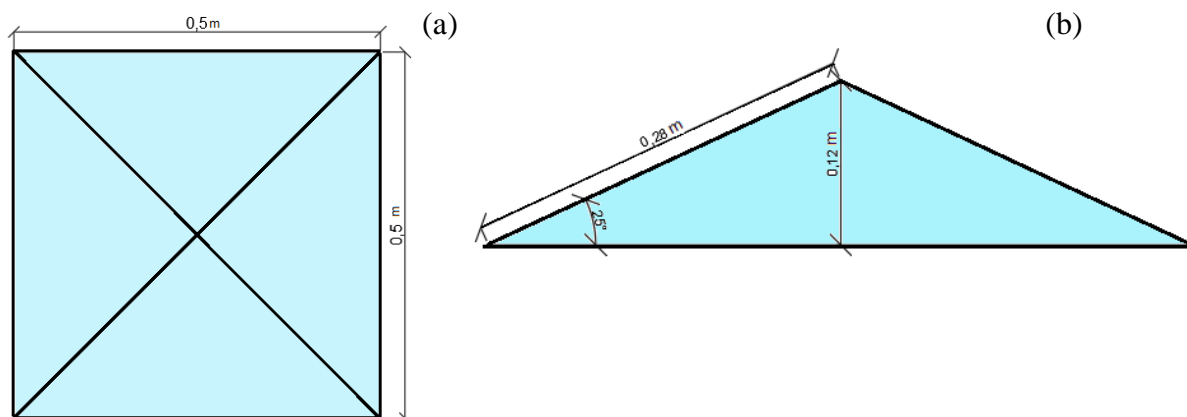
O destilador solar foi operado em diferentes níveis de água, a fim de realizar comparação entre as eficiências geradas, portando foi utilizado duas resistências elétricas (Figuras 16 e 17), feitas a partir de fio de Ni-Cr, para aquecimento da água no tanque. As resistências foram conectadas a um painel fotovoltaico (PV), marca Resun, com potência máxima de 150W e eficiência em torno de 15%, capaz de gerar 506 Wh/dia.

Tabela 4 – Componentes do destilador solar piramidal e suas configurações

DESTILADOR SOLAR						
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	
SISTEMA DE AQUECIMENTO						
Componente	Material	Potência				
Painel Fotovoltaico	Sílicio Policristalino	150W				
Resistencia	Fio Ni-Cr					

Fonte: Autor.

Figura 11 – Visão superior (a) e corte lateral da cobertura de vidro (b)



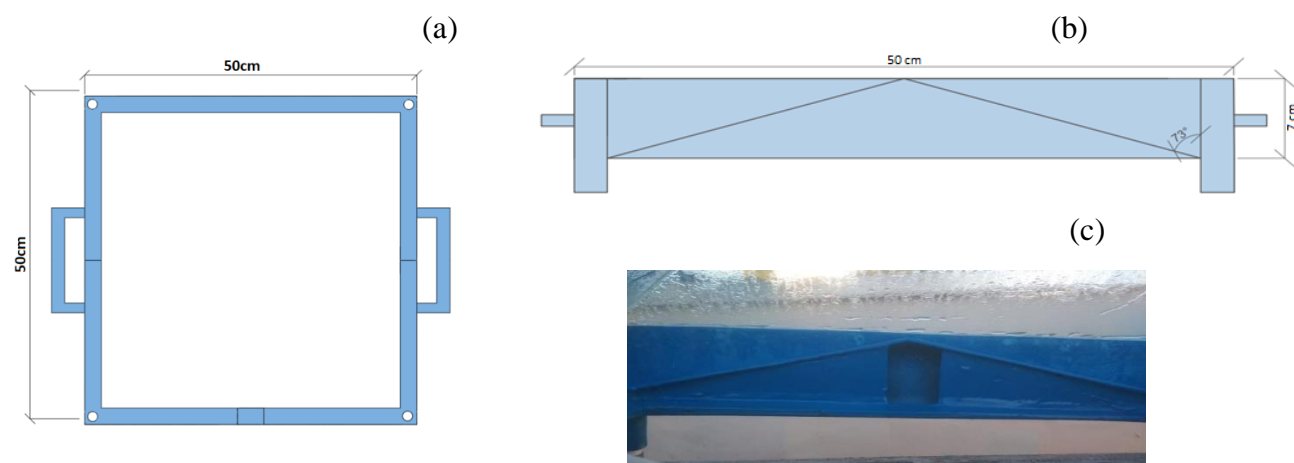
Fonte: Autor.

Figura 12 - Foto da cobertura de vidro



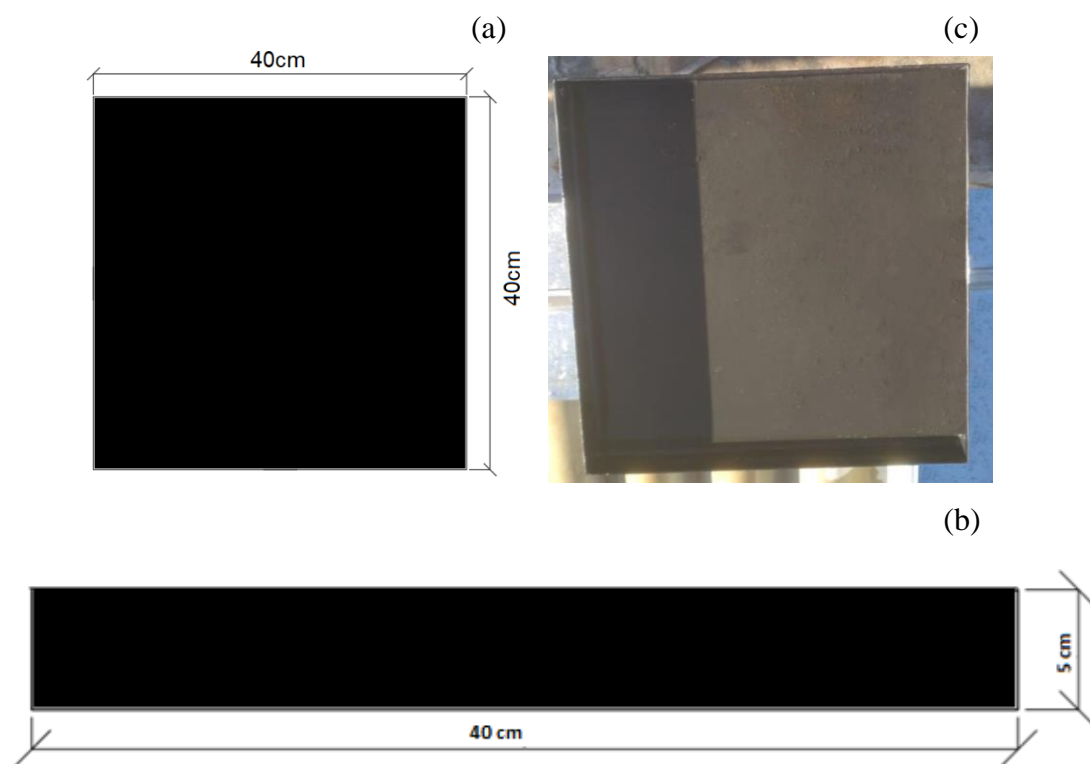
Fonte: Autor.

Figura 13 – Vista superior (a), lateral (b) e foto do módulo acoplado (c)



Fonte: Autor.

Figura 14 – Vista superior (a), lateral (b) foto do tanque raso (c)



Fonte: Autor.

Figura 15 – Fotos da espuma de isolamento térmico



Fonte: Autor.

Figura 16 – Foto da resistência elétrica usada no sistema de aquecimento com 3,5 cm de nível de água



Fonte: Autor.

Figura 17 – Foto da resistência elétrica usada no sistema de aquecimento com 1,0 cm de nível de água



Fonte: Autor.

Figura 18 – Foto do sistema completo do destilador solar piramidal



Fonte: Autor.

Para análise de custo por produção de água, o montante investido na construção do destilador foi calculado e está disposto na Tabela 5.

Tabela 5 – Custo de cada material para desenvolvimento do sistema do destilador solar piramidal

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
	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
Sistema de aquecimento da água	Módulo Fotovoltaico	R\$ 699,00
	Resistência	R\$ 20,00
Destilador solar piramidal ativo	Total	R\$ 1.534,87

Fonte: Autor.

4.3. OPERAÇÃO DO DESTILADOR PIRAMIDAL

Bastante simples, a operação dos destiladores solares depende da introdução de água bruta, coleta da água destilada e eventuais manutenções, como limpeza e repintar o tanque raso.

Semanalmente eram coletados aproximadamente 20 litros de água bruta, para inserir em seu sistema de alimentação e iniciar a operação do destilador piramidal ativo. A água era coletada com galão de 20 litros, em uma barragem, caracterizada por uma zona de fluxo lântico, como mostra a Figura 19. Aproximadamente 600 ml de água coletada era encaminhada para análise no Laboratório de Recursos Hídricos da Universidade Federal de

Santa Maria, *Campus* Frederico Westphalen, e o restante para o sistema de alimentação. Na semana seguinte, a água bruta residual que não era destilada, era removida totalmente e substituída pelo novo volume coletado.

Figura 19 – Local da coleta de água bruta, no Lajeado Pardo, em Frederico Westphalen



Fonte: Autor.

A água destilada era coletada diariamente, sempre que possível, nos primeiros horários da manhã, até no máximo 8 horas, tendo como base os índices de radiação e incidência no destilador, pois até este horário não há registro positivo de radiação. O volume coletado dos reservatórios de água destilada era medido em uma proveta volumétrica, indicando o quanto havia sido produzido no dia anterior, e duas vezes na semana a água destilada era analisada no laboratório.

O sistema era limpo mensalmente, exceto o sistema de alimentação, que acumulava lodo semanalmente. A água doce gera poucas incrustações no tanque raso, portanto o processo de limpeza envolvia basicamente limpeza das superfícies com uma esponja, higienização dos reservatórios, mangueiras e resistência elétrica com água sanitária. A pintura preta do tanque raso era retocada quando muito degradada pelo contato com a água bruta aquecida e efeito da radiação solar. O painel solar era limpo uma vez por semana, assim como a cobertura externa da pirâmide, para retirada de poeira ou excrementos de pássaros.

O acompanhamento da temperatura da água, interna e do ambiente era feito a partir de três termômetros digitais TPM-10 LCD (Figura 20), capazes de medir temperaturas de -30 a 110°C.

Figura 20 – Termômetros digitais utilizados para acompanhar a temperatura no experimento



Fonte: Autor.

4.4. ANÁLISE QUANTITATIVA DE PRODUÇÃO DE ÁGUA E SUA EFICIÊNCIA

A partir do volume de produção e análise das variáveis climáticas é possível obter a eficiência de produção do sistema de destilação, o que possibilita a comparação com outros destiladores de diferentes configurações e condições locais.

Os dados meteorológicos foram coletados a partir dos dados registrados pela Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática de Frederico Westphalen, localizada a aproximadamente 244 metros do local do experimento, representada na Figura 21.

Figura 21 – Estação Meteorológica INMET, localizada na UFSM-FW



Fonte: Autor.

Segundo INMET (2011) “ a estação é composta por uma unidade de memória central ("data logger"), ligada a vários sensores dos parâmetros meteorológicos (pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar, precipitação, radiação solar, direção e velocidade do vento, etc.), que integra os valores observados minuto a minuto e os disponibiliza automaticamente a cada hora”.

Para avaliar a eficiência de produção a seguinte equação foi utilizada:

$$\eta = \frac{P \times L}{H_s \times C} \quad (3)$$

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 (kWh/m²);

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

A fim de avaliar o nível de água com maior eficiência, a altura da lâmina de água no tanque raso foi modificada durante o experimento, variando-se em dois níveis diferentes. Primeiramente utilizou-se 3,5 cm, durante o período do dia 15/06/2020 até 23/07/2020. Após, foi mantido o nível em 1 cm, do dia 23/07/2020 até 29/08/2020.

4.5. ANÁLISE QUALITATIVA DE PRODUÇÃO DE ÁGUA

No Brasil somente pode-se dizer que uma água é potável se seus parâmetros se estão de acordo com a Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017, do Ministério da Saúde. Os parâmetros analisados para avaliar a eficiência do destilador solar piramidal ativo, foram: turbidez, condutividade elétrica, cor aparente, cor verdadeira e microbiológicos. Análises da água bruta e água destilada foram realizadas ao longo de todo o período de coleta de produção.

As metodologias de cada parâmetro e seus instrumentos de medição estão dispostas na tabela 8, as quais foram realizadas em conformidade com métodos aprovados segundo a American Public Health Association - APHA (2012) na publicação *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*

Tabela 6 – Metodologias utilizadas para análises de qualidade de água

Parâmetros	Método de medição	Instrumento	Alcance	Precisão
Turbidez (NTU)	USEPA 180.1	DLT - 2500	0,01 - 1000	± 2%
Temperatura (C°)	USEPA 4500-H+B	HQ40D	0 - 50	± 0,3
pH	USEPA 4500-H+B	HQ40D	2 - 14	
Condutividade elétrica (µS/cm)	USEPA 2510-B	HQ40D SPECORD®	0,01 S/cm - 200 mS/cm	
Cor aparente (U.C.)	USEPA 110.2	50 PLUS SPECORD®	190 - 1100 nm	± 0,05 %
Cor verdadeira (U.C.)	USEPA 110.3	50 PLUS	191 - 1100 nm	± 0,05 %
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	USEPA 4500-O	HQ40D	0,1 - 20,0	± 0,1
Colif. Totais (NMP/100mL)	Colilert ®			
<i>E. coli</i> (NMP/100mL)	Colilert ®			
Odor	Odor threshold test			
Sabor	Flavor threshold test			

Fonte: Autor.

4.6. ACOMPANHAMENTO DAS TEMPERATURAS

No dia 22/07/2020, com o nível de água em 3,5 cm, foi acompanhada a temperatura da água dentro do destilador (tanque raso), temperatura interna do destilador e a temperatura ambiente no local, a fim de analisar o comportamento do destilador. No dia 25/08/2020 o mesmo processo foi realizado, porém com o nível de água em 1,0 cm.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

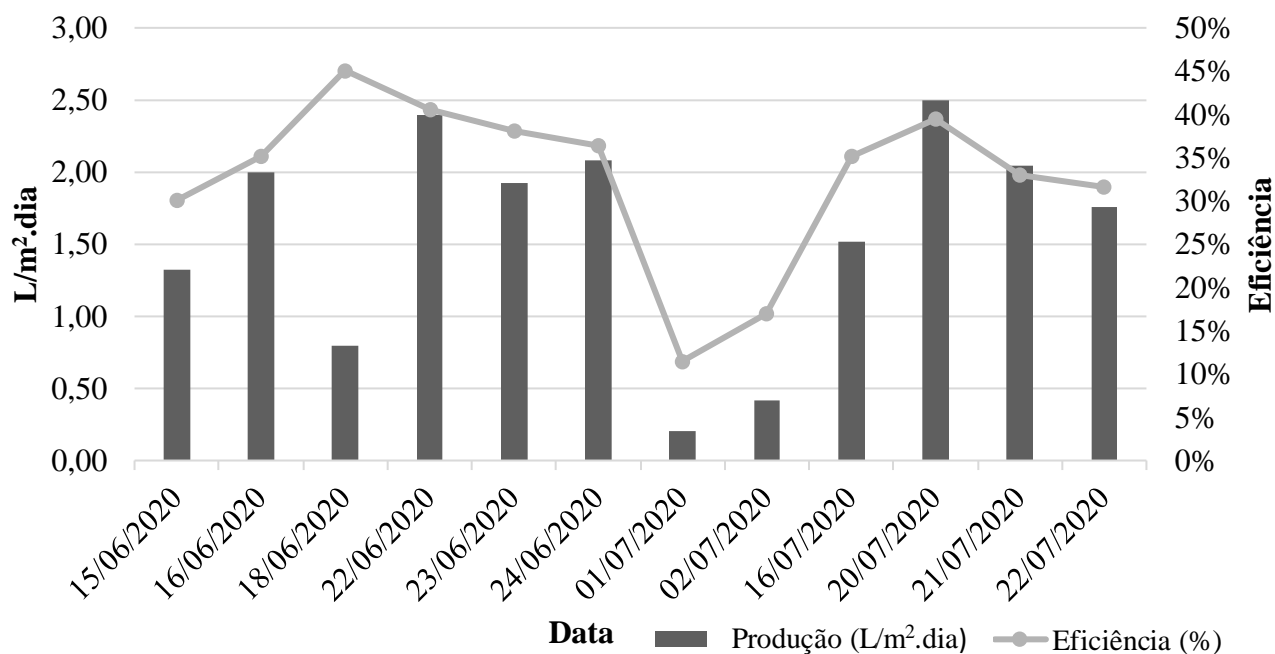
5.1. PRODUTIVIDADE DE ÁGUA E EFICIÊNCIA DO DESTILADOR PIRAMIDAL

São apresentados, a seguir, os resultados obtidos utilizando dois níveis de profundidade água, 3,5 cm e 1 cm, no tanque raso. Bem como o comparativo de eficiência de operação com e sem painel fotovoltaico (PV).

5.1.1. Profundidade de água em 3,5cm com PV

O Gráfico da Figura 22 e Anexo A apresenta a produção de água destilada e a eficiência obtida com 3,5 cm de profundidade de água no tanque raso, entre os dias 15/06/2020 e 13/07/2020:

Figura 22 – Produção x eficiência em 3,5 cm de profundidade de água



Fonte: Autor.

Analisando o gráfico gerado pela produção x eficiência, nota-se que, a maioria dos dias (8), ficaram no intervalo de 30-40% de eficiência, seguido por 2 dias em 40-50% e 2 dias em 10-20%. Assim o destilador piramidal + painel fotovoltaico em 3,5cm de profundidade de água, apresentou uma eficiência média de 32,75%, valor próximo ao

encontrado por Singh, Kumar e Tiwari (2011) em um trabalho realizado na Índia, que foi de 35%, utilizando um destilador híbrido fotovoltaico/termal de inclinação dupla, com 5 cm de profundidade de água, em um mês de inverno. Ainda, é possível verificar que o valor é superior aos obtidos em alguns estudos, como o de Elbar e Hassan (2020), que também utilizou um destilador solar de inclinação dupla acoplado a painel fotovoltaico, o qual obteve 26,83% de eficiência, mesmo em um mês mais favorável, de maior radiação e vento.

A Tabela 7, apresenta o resumo da produtividade obtida em 3,5 cm de profundidade de água no tanque raso.

Tabela 7 – Resumo da produtividade em 3,5 cm de profundidade de água

	Dias	L/m ² .dia	Radiação (kwh/m ² .dia)	Eficiência	Condições climáticas
Média geral de produção	15/06/2020-23/07/2020	1,58	2,88	32,74%	X
Produção máxima	20/07/2020	2,50	3,97	39%	Ensolarado
Produção mínima	01/07/2020	0,20	1,09	11%	Precipitação pluviométrica e nebulosidade
Produção usual (radiação > 2,1 kwh/m².dia)	9 dias	1,95	3,42	35,49%	X

Fonte: Autor.

A região de estudo apresenta queda acentuada de radiação solar nos meses de junho e julho. Dentro de toda a amostragem, 69 % dos dias tiveram balanço de radiação maior ou igual que o valor médio diário esperado para o bimestre, que é de 2,1 kWh/m².dia, segundo apresentado por Pereira *et al.* (2017), no Atlas Brasileiro de Energia Solar. A produção de água para consumo foi prejudicada, pelos baixos índices de radiação no período, e também devido as características do inverno de 2020 na região Sul, marcado por períodos intensos de chuvas e queda na temperatura (INMET, 2020). Na segunda metade de julho foi possível avaliar melhor a produção do destilador, quando as temperaturas se elevaram, e dias de sol e céu limpo predominaram.

Apesar do baixo índice de radiação, as outras variáveis meteorológicas estudadas na produção de água para destilação solar foram favoráveis. A temperatura ambiente baixa, a umidade relativa mais alta e ventos fortes, favoreceram a diminuição da temperatura da cobertura, e, portanto, contribuíram para condensar a uma taxa maior. Com isso, foi possível obter uma eficiência média de 32,74% e produção de 1,58 L/m². dia.

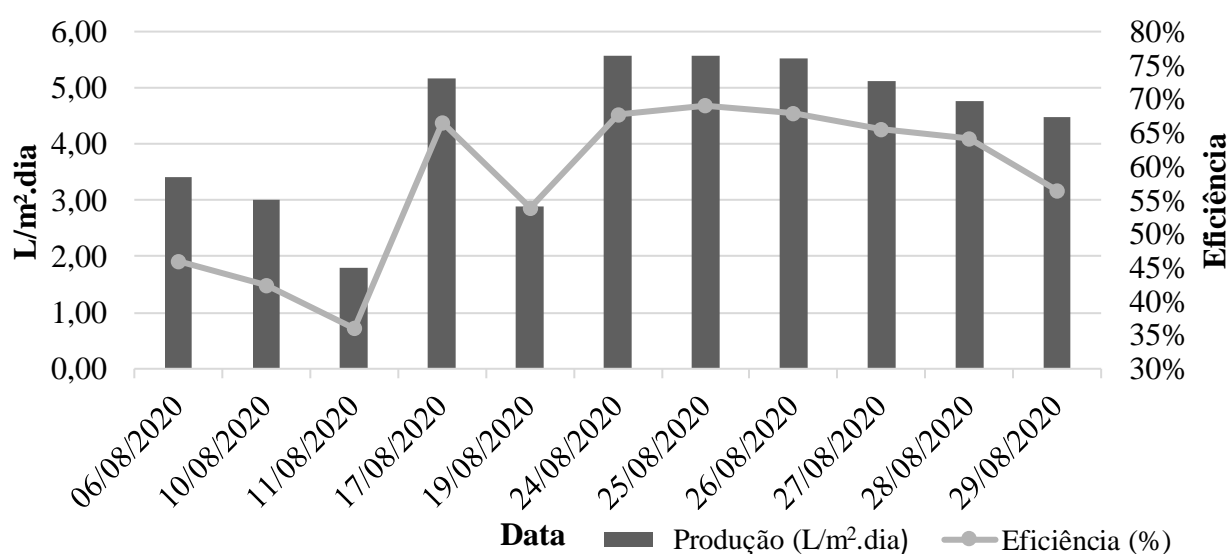
No dia com maior produção (20/07/2020) foi registrado um balanço de radiação de 3,97 kWh/m².dia, valor acima da média verificada nos outros dias. No entanto com eficiência foi somente 6,26% acima da média, devido à baixa umidade relativa do ar ser baixa, e menor velocidade do ventos, 1,89 m/s, fatores que não contribuiu para resfriamento da cobertura.

No dia com menor produção (01/07/2020) foi registrado um balanço de radiação de 1,09 kWh/m².dia, tempo chuvoso e nublado. Com uma produção de apenas 0,20 L/m², esse acontecimento demonstra a vulnerabilidade da tecnologia para produção de água em dias com condições desfavoráveis.

5.1.2. Profundidade de água em 1 cm com PV

O Gráfico da Figura 23 e Anexo B apresenta a produção de água destilada e a eficiência obtida com 1,0 cm de profundidade de água no tanque raso, entre os dias 06/08/2020 e 29/08/2020.

Figura 23 – Produção x eficiência em 1,0 cm de profundidade de água



Fonte: Autor.

Analisando o gráfico gerado, pela produção x eficiência, nota-se que a maioria dos dias (5) ficaram no intervalo de 60-70% de eficiência, seguido por 2 dias em 50-60%, 2 dias em 40-50% e 1 dia 30-40%. Assim o destilador piramidal + painel fotovoltaico em 1 cm de profundidade de água, apresentou uma eficiência média de 57,80%, valor próximo aos 62,5% encontrados por Praveen Kumar *et al.* (2018), em seu experimento na Índia, nos meses de verão com condições mais favoráveis, que também utilizou um fio de Ni-Cr ligado a um PV para aquecimento da água contida no destilador, com 5 cm de profundidade de água. O valor médio também ficou próximo aos valores encontrados por um sistema de dessalinização movido a energia solar, elaborado por Morad, El-Maghawry e Wasfy (2017), nos meses de verão, que obteve eficiências entre 50 e 62%. Pounraj et al. (2018), obteve uma eficiência geral de 63,1%, também conduzindo seu experimento em dias de verão.

A Tabela 8, apresenta o resumo da produtividade obtida em 1,0 cm de profundidade de água no tanque raso.

Tabela 8 – Resumo da produtividade em 1,0 cm de profundidade de água

	Data	L/M ² .Dia	Radiação (Kwh/M ² .Dia)	Eficiência	Condições Climáticas
Média geral de produção	06/08/2020- 29/08/2020	4,30	4,56	57,80%	X
Produção máxima	25/08/2020	5,56	5,04	69%	Ensolarado
Produção mínima	11/08/2020	1,80	3,13	36%	Nublado
Produção usual (radiação > 2,8 kwh/m².dia)	11 dias	4,30	4,56	57,80%	X

Fonte: Autor.

A região de estudo apresentou uma elevação de radiação solar no mês de agosto, quando comparada a junho e julho. Dentro de toda a amostragem, 100% dos dias obtiveram balanço de radiação maior que o valor médio diário esperado para o mês, que é de 2,8 kWh/m².dia, segundo apresentado por Pereira *et al.* (2017), no Atlas Brasileiro de Energia

Solar. Devido ao aumento da radiação e predominância de dias ensolarados, principalmente na segunda quinzena do mês, a produção de água para consumo foi otimizada.

Apesar do rebaixamento do nível de água para 1 cm e os ventos fortes no período terem contribuído para o aumento da eficiência, algumas variáveis meteorológicas estudadas na produção de água para destilação solar foram desfavoráveis e poderiam ter contribuído para uma ainda melhor eficiência. A umidade relativa do ar baixou na segunda quinzena de agosto, e a temperatura aumentou, condições que desfavoreceram a diminuição da temperatura da cobertura, e, portanto, dificultaram a condensação a uma taxa maior. Mesmo com alguns fatores desfavoráveis foi possível obter uma eficiência média de 57,80% e produção de 4,30 L/m². dia.

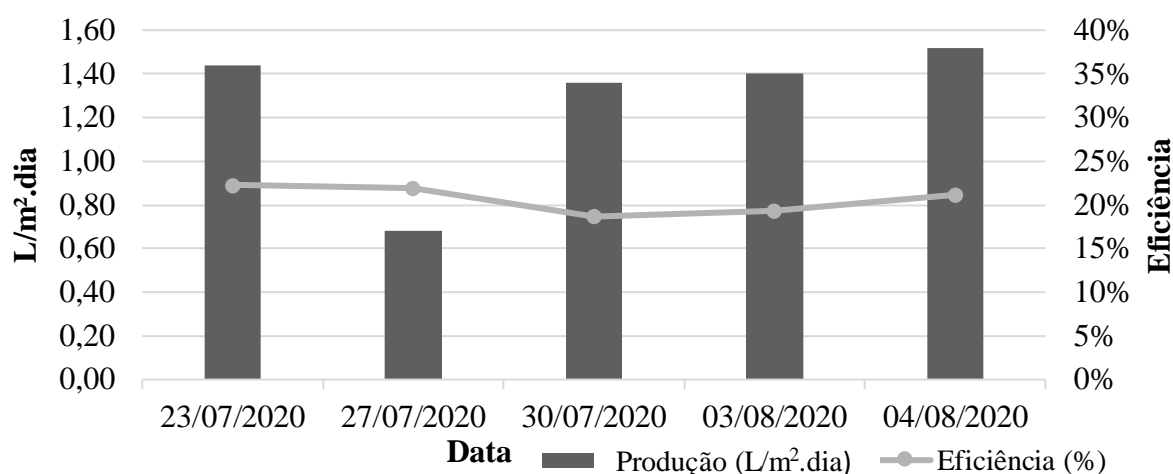
No dia com maior produção (25/08/2020) foi registrado um balanço de radiação de 5,04 kWh/m².dia, valor acima da média verificada nos outros dias. O tempo limpo, ensolarado e com ventos médios de 2,64 m/s contribuíram para uma eficiência de 69% e produção de 5,56 L/m².

No dia com menor produção (11/08/2020) foi registrado um balanço de radiação de 3,13 kWh/m².dia (tempo nublado). Com uma produção de apenas 1,80 L/m², esse acontecimento demonstra, novamente, a vulnerabilidade da tecnologia para produção de água em dias com condições desfavoráveis, mesmo com o rebaixamento do nível de água.

5.1.3. Profundidade em 1 cm, sem PV.

O Gráfico da Figura 24 e Anexo C apresenta a produção de água destilada e a eficiência obtida com 1,0 cm de profundidade de água no tanque raso, sem o auxílio do painel fotovoltaico, entre os dias 23/07/2020 e 04/08/2020.

Figura 24 – Produção x eficiência em 1,0 cm de profundidade de água sem auxílio do PV



Fonte: Autor.

Devido ao tempo para execução deste trabalho, foram analisados somente 5 dias, para que seja possível verificar a influência do sistema de aquecimento no destilador solar.

Analisando o gráfico gerado, pela produção x eficiência, nota-se que todos os dias ficaram no intervalo de 19-22% de eficiência, em dias ensolarados e condições climáticas semelhantes aos dias com PV e profundidade em 1cm. Assim o destilador piramidal sem o auxílio do Painel fotovoltaico, em 1 cm de profundidade de água, apresentou uma eficiência média de 20,68%. Eficiência essa, próxima aos 23% obtidos com 2 cm de profundidade de água, no estudo elaborado por Saravanan e Murugan (2020), em meses de verão na Índia.

A Tabela 9, apresenta o resumo da produtividade obtida em 1,0 cm de profundidade de água no tanque raso sem auxílio do PV.

Tabela 9 – Resumo da produtividade em 1,0 cm de profundidade de água sem auxílio do PV

	Data	L/m².dia	Radiação (kwh/m²·dia)	Eficiência	Condições climáticas
Média geral de produção	23/07/2020- 04/08/2020	1,28	3,91	20,68%	X
Produção máxima	04/08/2020	1,52	4,50	21%	Ensolarado
Produção mínima	27/07/2020	0,68	1,94	22%	Nublado
Produção usual (radiação > 2,45 kwh/m²·dia)	4 dias	1,43	4,41	20,36%	X

Fonte: Autor.

Devido ao aumento da radiação no mês de agosto, em comparação aos meses anteriores dentro de toda a amostragem, apenas um dia, que estava nublado, não obteve o balanço de radiação maior que o valor médio diário esperado para a média dos meses de julho e agosto, que é de 2,45 kWh/m².dia, segundo apresentado por Pereira *et al.* (2017), no Atlas Brasileiro de Energia Solar. Devido à predominância de dias ensolarados, a produção de água para consumo foi otimizada.

5.1.4. Comparativo da eficiência e produtividade de água nos diferentes níveis e configurações.

É compreensível que as variáveis climáticas como o vento e radiação foram maiores no período de rebaixamento do nível de água na pirâmide, o que contribuiu para uma diferença de produção de água destilada em 2,72 L/m². Porém, analisando a eficiência, que leva em conta a produção pelos níveis de radiação, e que estão presentes nas Tabelas 7 e 8, verifica-se que a eficiência média se elevou de 32,74% para 57,80%, representando um aumento de 76,54% com a diminuição para 1 cm de profundidade de água no tanque raso, em relação aos 3,5 cm. Praveen Kumar et al. (2018), obtiveram eficiências geral em um destilador ativo de 62,5%, 48,7% e 46,6%, com 5 cm, 10 cm e 15 cm, respectivamente. Isso comprova que o aumento do nível de água, diminui a eficiência do destilador.

Entretanto, quando o destilador é operado sem o auxílio do PV para o aquecimento da água contida no tanque raso e com a profundidade de água em 1cm, a eficiência média, observada nos Tabelas 8 e 9, cai em 37,12%. Al-Qadami et al. (2020), em um experimento com destilador solar ativo, operado com 2 cm de água durante o verão, conseguir alcançar um acréscimo de 55% de eficiência em relação a um destilador solar passivo. Posto isso, é evidente a otimização do destilador solar operando o auxílio de PV.

5.2. DESEMPENHO TÉRMICO DO SISTEMA COM AUXÍLIO DO PV

5.2.1. Profundidade de água em 3,5cm

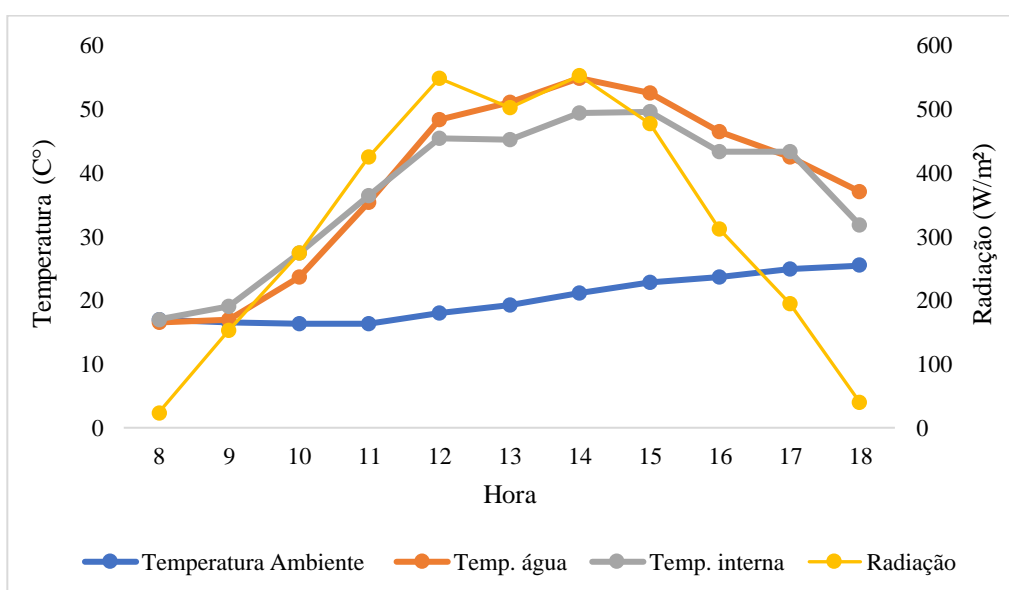
Os dados do acompanhamento da temperatura da água durante o período de luz solar no dia 22/07/2020, estão expostos na Tabela 10 na Figura 25.

Tabela 10 – Progressão horária da temperatura da água no tanque raso, ambiente, interna e radiação solar no dia 22/07/2020

Hora	Temp. água (C°)	Temp. interna (C°)	Temp. ambiente (C°)	Radiação (W/m ²)
8:00	16,5	17,0	17,0	23,9
9:00	17,0	19,0	16,5	152,5
10:00	23,6	27,4	16,3	273,9
11:00	35,4	36,3	16,4	423,6
12:00	48,3	45,4	17,9	548,1
13:00	51,1	45,1	19,2	501,8
14:00	54,8	49,4	21,2	551,8
15:00	52,5	49,5	22,8	475,6
16:00	46,3	43,3	23,7	310,5
17:00	42,4	43,2	24,8	193,6
18:00	37,0	31,8	25,4	39,0

Fonte: Autor.

Figura 25 - Gráfico de variação gradual da temperatura da água, ambiente, interna e radiação solar do dia 22/07/2020



Fonte: Autor.

Analisando a Tabela 9 e Figura 25 é possível perceber que a temperatura da água começa a ser superior à temperatura interna após as 11:00, quando a radiação começa a ser significativamente maior que o início da manhã. Dhindsa e Mittal (2018), Ahmed, Alshutal e Ibrahim (2014) apresentam em seus estudos que a temperatura interna de destiladores solares convencionais é maior que a temperatura da água ao longo do dia. O contrário

acontece em destiladores solares ativos, devido ao auxílio do painel fotovoltaico na geração de energia para o aquecimento da água.

Na Tabela 11 são apresentadas a média das variáveis climatológicas, dentro do intervalo das 8 horas até as 18 horas, onde as medições foram acompanhadas de hora em hora no dia 22/07/2020, com produção e eficiência do dia.

Tabela 11 – Média das variáveis climatológicas, das 8h as 18h do dia 22/07/2020

Temp. (°C)	Umidade rel. (%)	Vento (m/s)	Radiação acumulada (kW/m²)	Produção (L/m²)
20,11	63,91	1,01	3,48	2,17

Fonte: Autor.

5.2.2. Profundidade de água em 1,0 cm

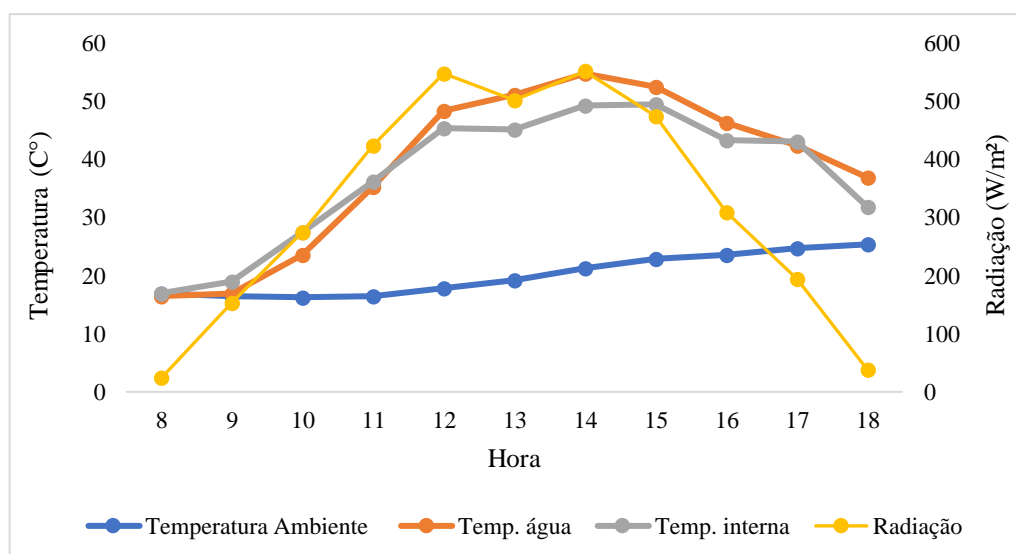
Os dados do acompanhamento da temperatura da água durante o período de luz solar no dia 25/08/2020, estão dispostas na Tabela 12 e Figura 26.

Tabela 12 – Progressão horária da temperatura da água no tanque raso, ambiente, interna e radiação solar no dia 25/08/2020

Hora	Temp. água (C°)	Temp. interna (C°)	Temp. ambiente (C°)	Radiação (W/m²)
8:00	17,0	16,8	16,3	62,00
9:00	23,0	22,0	15,9	253,98
10:00	42,0	39,1	15,3	450,92
11:00	62,6	56,2	15,8	611,01
12:00	70,4	63,2	17,1	713,29
13:00	72,8	65,8	18,5	751,48
14:00	73,8	67,8	20,4	721,73
15:00	67,9	62,0	22,1	621,95
16:00	63,9	57,3	23,6	473,79
17:00	54,2	48,9	24,7	285,63
18:00	42,3	38,9	25,9	89,33

Fonte: Autor.

Figura 26 - Gráfico de variação gradual da temperatura da água, ambiente, interna e radiação solar do dia 25/08/2020



Fonte: Autor.

Analisando a Tabela 12 e gráfico 26 é possível perceber que a temperatura da água começa a ser superior já na primeira hora de observação (08:00), período em que a radiação ainda é pouco significativa. Novamente, nota-se o efeito de aquecimento por meio da energia gerada pelo painel fotovoltaico em Destiladores Solares ativos, devido a temperatura da água sempre estar maior que a temperatura interna.

Na Tabela 13 estão apresentadas as médias das variáveis climatológicas, dentro do intervalo das 8 horas até as 18 horas, onde as medições foram acompanhadas de hora em hora no dia 25/08/2020, com sua eventual produção e eficiência do dia.

Tabela 13 – Média das variáveis climatológicas, das 8h às 18h do dia 25/08/2020

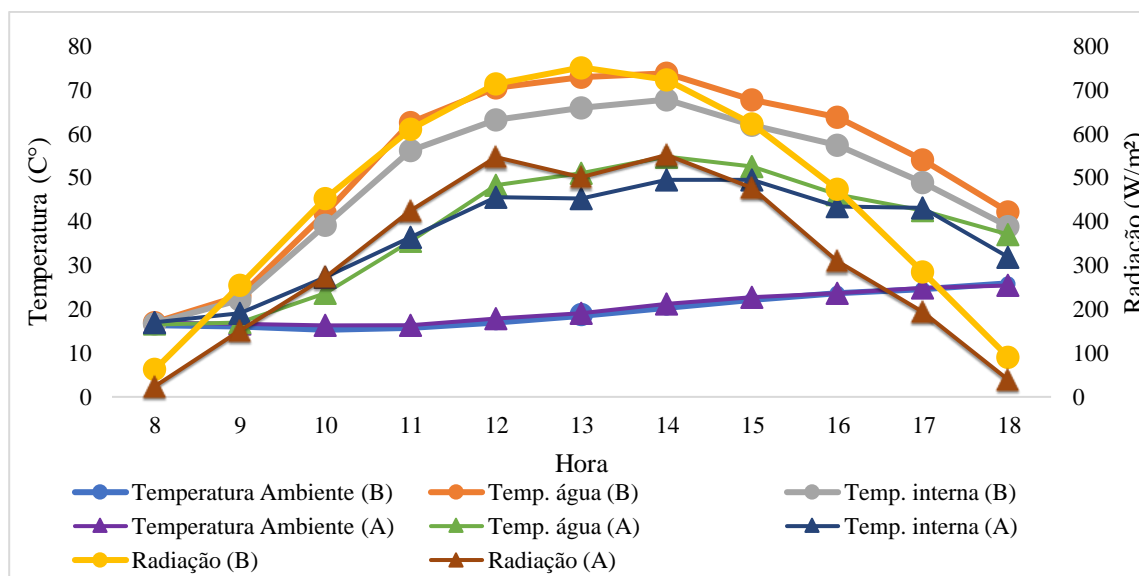
Temp. (°C)	Umidade rel. (%)	Vento (m/s)	Radiação acumulada (kW/m²)	Produção (L/m²)
19,60	54,82	3,17	5,04	4,95

Fonte: Autor.

5.2.3. Comparativo do desempenho térmico nas diferentes profundidades

Os dados do comparativo do período de luz solar dos dias 22/07/2020 (A) e 25/08/2020 (B), estão dispostos na Figura 27

Figura 27 - Gráfico comparativo de variação gradual da temperatura da água, ambiente, interna e radiação solar dos dias 22/07/2020 (A) e 25/08/2020 (B)



Fonte: Autor.

Realizando um comparativo entre o dia A (22/07/2020), com profundidade de água em 3,5 cm e o dia B (25/08/2020), com profundidade de água em 1,0 cm, percebe-se que quanto menor a profundidade, mais rapidamente a água aquece no tanque raso, como defendido por Rahim (2001).

Com a profundidade de água em 1,0 cm, a temperatura da água já é superior à interna do destilador na primeira hora, diferentemente da profundidade em 3,5 cm, que leva uma demora para o aquecimento inicial da água, devido ao maior volume de água contido no tanque raso. No dia A, a temperatura máxima ambiente a temperatura máxima da água, foram de 25,4 °C e 54,8 °C, respectivamente. Boukar e Harmim (2001) observaram uma temperatura máxima de 69,18 °C na água contida no tanque raso, em um destilador solar de bacia única acoplado a um coletor solar, com mesma profundidade de água, em um dia semelhante ao dia 22/07/2020. Já Al-Qadami et al. (2020), obteve temperaturas no destilador próximas às encontradas neste trabalho, porém em um dia com temperaturas mais elevadas.

5.3. INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS NA PRODUÇÃO DE ÁGUA DESTILADA

Nos itens a seguir está demonstrado como as variáveis climáticas, tais como umidade relativa do ar e a velocidade do vento, podem intensificar a taxa de transferência de calor.

Estas variáveis diminuem a temperatura do material de cobertura, ocasionando em uma maior produção de destilado.

5.3.1. Vento

Na tabela 14, é possível verificar um indicativo de influência da variável climática vento na produção de água destilada.

Tabela 14 - Tabela comparativa da variável climática vento na produção de água destilada

Data	Temp. (°C)	Umidade rel. (%)	Vento (m/s)	Radiação acumulada (kW/m²)	Produção (L/m²)	Eficiência (%)
15/06/2020	18,60	75,09	1,06	2,75	1,32	30
16/07/2020	18,08	69,00	2,32	2,71	1,52	35

Fonte: Autor

Analisando a Tabela 14 é possível perceber que os dias 15/06/2020 e 16/07/2020 obtiveram níveis de temperatura, umidade relativa e radiação acumulada próximas, mas velocidade de ventos muito diferentes, o que pode ser indicativo que esse fator interferiu no resfriamento da cobertura da pirâmide, aumentando a produção de destilado, em 0,2 L/m², e eficiência em 5%.

5.3.2. Umidade Relativa e Temperatura do ar

Na tabela 15, é possível verificar um indicativo de influência das variáveis climáticas umidade relativa e temperatura na produção de água destilada.

Tabela 15 - Tabela comparativa variáveis climáticas umidade relativa e temperatura do ar na produção de água destilada

Data	Temp. (°C)	Umidade rel. (%)	Vento (m/s)	Radiação acumulada (kW/m²)	Produção (L/m²)	Eficiência (%)
17/08/2020	18,58	72,00	1,85	4,85	5,16	67
29/08/2020	27,58	39,67	3,11	4,96	4,48	57

Fonte: Autor.

Durante o período avaliado, nenhum dia obteve níveis de radiação, vento, temperatura, ou umidade iguais, de modo que se pudesse analisar a influência, separadamente, das variáveis umidade relativa e temperatura. Porém, analisando a Tabela 15 é possível perceber que os dias 17/08/2020 e 29/08/2020 obtiveram níveis de vento e radiação acumulada mais ou menos próximos, mas umidade relativa e temperatura muito diferentes. Portanto, o dia mais frio e com umidade superior, obteve uma superioridade em 0,68 L/m² e eficiência em 10%, o que pode indicar que esses fatores interferiram no resfriamento da cobertura da pirâmide.

Também é possível verificar, que apesar do dia 29/08/2020 ter apontado maior velocidade do vento, a temperatura elevada e a umidade baixa não foram capazes de auxiliar no resfriamento.

5.4. QUALIDADE DA ÁGUA PRODUZIDA PELO DESTILADOR PIRAMIDAL ATIVO

Ao total para este trabalho, foram realizadas 19 análises, sendo 4 análises de água bruta e 7 de água destilada pela pirâmide em 3,5 cm de profundidade de água, e 3 análises de água bruta e 5 de água destilada pela pirâmide em 1,0 cm de profundidade de água (Anexo D).

As eficiências de remoção dos parâmetros de qualidade de água permaneceram semelhantes em ambos níveis de água (3,5 e 1,0 cm). Portanto, a qualidade da água produzida pelo destilador não teve influência da profundidade.

Com as análises visou-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 destes parâmetros quanto à 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 obtenção de água que atenda as condições de consumo humano.

O Quadro 2 apresenta um exemplo dos parâmetros medidos para água bruta e água destilada no dia 17/08/2020.

Quadro 2 - Valores encontrados para análises dos parâmetros de controle da água bruta e água destilada no dia 17/08/2020

Parâmetros	Água bruta	Água destilada	Remoção
	Valor	Valor	
Turbidez	8,71 NTU	0,22 NTU	97,47%
Temperatura	17,6 °C	19 °C	X
pH	7,19	7,16	X
Condutividade elétrica	80 µS/cm	15,54 µS/cm	80,58%
Cor aparente	69,30 U.C.	0	100%
Cor verdadeira	10,37 U.C.	0	100%
Oxigênio Dissolvido	9,38 mg/L	8,97 mg/L	X
Coliformes term.	7556 NMP/100mL	0 nmp/100mL	100%
<i>Escherichia coli</i>	488 NMP/100mL	0 nmp/100mL	100%

Fonte: Autor.

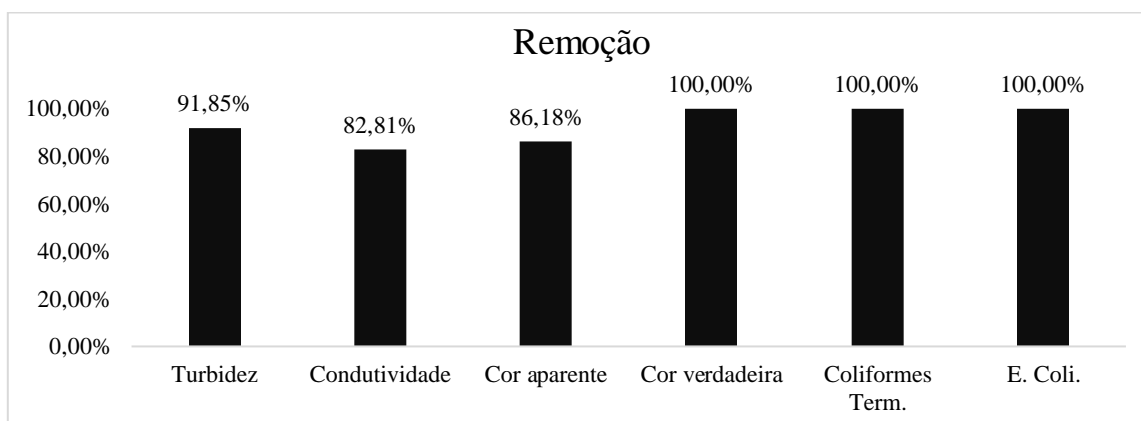
No processo de tratamento da água, um modo de avaliar a eficiência é através da remoção de parâmetros de qualidade. O Quadro 3 apresenta a média geral dos parâmetros medidos para água bruta e água destilada, juntamente com a remoção média, também apresentadas na Figura 28 sendo esta média realizada nas 19 análises, com exceção dos parâmetros microbiológicos, que foram realizadas 3 análises.

Quadro 3 - Valores médios encontrados para análises dos parâmetros de controle da água bruta e água destilada no período do estudo

Parâmetros	Água bruta	Água destilada	Remoção
	Valor	Valor	
Turbidez	5,65 NTU	0,46 NTU	91,85%
Temperatura	18,8 °C	19,08 °C	X
pH	7,05	7,17	X
Condutividade elétrica	73,39 µS/cm	12,62 µS/cm	82,81%
Cor aparente	50,91 U.C.	7,04	86,18%
Cor verdadeira	6,28 U.C.	0	100%
Oxigênio Dissolvido	9,41 mg/L	9,19 mg/L	X
Coliformes term.	15096 nmp/100mL	0 nmp/100mL	100%
<i>Escherichia coli</i>	651 nmp/100mL	0 nmp/100mL	100%

Fonte: Autor.

Figura 28- Gráfico da média de remoção dos diferentes parâmetros da água destilada



Fonte: Autor.

A água destilada pelo destilador solar piramidal apresenta-se de acordo com os padrões estabelecidos (Tabela 1) pela norma vigente, Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017, do Ministério da Saúde demonstrando a eficácia da tecnologia para o tratamento de água.

Também é possível verificar que os valores de remoção foram próximos ao encontrados no estudo de Soares (2004), envolvendo água doce contaminada, que foram de 86,9%, 100%, 91,3% e 77% para os parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez, condutividade, respectivamente. A remoção de turbidez também está próxima ao valor de 96,48% e 95,74% obtido por Hedayati-Mehdiabadi, Sarhaddi e Sobhnamayan (2020) e Al-Qadami et al. (2020), respectivamente.

Os parâmetros bacteriológicos de coliformes totais e fecais, apresentaram remoção de 100% na água tratada, que também foram atingidos por Mota e Andrade (1986) em seu destilador solar localizado em Fortaleza-CE, que obtiveram valores de 100% para coliformes termotolerantes e *Escherichia coli*.

Com relação aos aspectos organolépticos e odor e sabor da água, os resultados estão dispostos na Tabela 16.

Tabela 16 – Resultados dos parâmetros de odor e sabor da água bruta e água destilada

Parâmetro	Água Bruta	Água Destilada
Odor	Levemente de terra e folhas	Levemente de resina
Sabor	Não Realizado	Levemente de resina

Fonte: Autor.

O sabor e o odor apresentados na água destilada podem ser advindos da corrosão da resina utilizada no módulo acoplado. A mistura de um reforço (fibra de vidro) a uma matriz polimérica (resina poliéster ou outro tipo de resina) e a uma substância catalisadora de polimerização, forma um composto denominado Plástico Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV), utilizado na fabricação do módulo acoplado, assim, essa técnica permite a produção de peças com grande variedade de formatos e tamanhos (PIOVESAN et al., 2013). A resina plástica comumente empregada é a de poliéster, que é constituída por uma base poliéster insaturada, dissolvida em um monômero, geralmente o de estireno. O monômero de estireno é o produto mais ativo envolvido neste processo de fabricação, e possui um odor característico (MINC, 2003). Porém, segundo AEROJET (2015), este monômero é prejudicial à saúde humana, por inalação, ingestão, contato com a pele e olhos.

Nenhum teste específico foi realizado para avaliar a presença de elementos tóxicos derivados da possível corrosão da resina do módulo acoplado, somente análises físicas de turbidez e cor verdadeira que poderiam ter apontado pequenos sólidos provenientes de corrosão no sistema, as quais também não se mostraram diferentes do esperado.

6. CONCLUSÃO

O presente estudo possibilitou avaliar a produtividade, tratabilidade e influência das variáveis climáticas em um destilador piramidal ativo, aplicado no tratamento de água para consumo humano a partir de água doce. Grande parte dos trabalhos já publicados usando esta tecnologia para tratamento de água para consumo humano, envolve a utilização de água salinas e bombeamento para sistemas de aquecimento. Com base neste trabalho e comparando com outros estudos já realizados, é possível concluir:

- O destilador apresenta um bom potencial de produção de água para consumo, suprimindo a necessidade de famílias pequenas. Porém, sua produção é afetada em épocas de baixa incidência de radiação solar, como observado nos meses de junho e julho, com média de 2,88 kWh/m².dia produzindo 1,58 L/m². A produção de água também cai drasticamente em dias nublados ou chuvosos, portanto recomenda-se a construção de um destilador solar de maiores dimensões.
- O destilador ligado a um painel fotovoltaico apresenta um acréscimo na eficiência de 37,12%.
- A utilização do nível de água em 1 cm no tanque raso aumentou a eficiência e produção de água no destilador. Também colaborou para um aumento rápido da temperatura logo nas primeiras horas de incidência de radiação solar.
- A produção de água é suscetível a variáveis climáticas. As condições ideais para a produção de destilado, são elevadas incidências de radiação solar, alta umidade relativa do ar, baixa temperatura e ventos fortes.
- Referente à eficiência de remoção e tratamento da água a fim de enquadrar-se na Portaria da Consolidação nº5 de novembro de 2017, o destilador se demonstrou altamente eficiente.
- Comparando com outros destiladores ativos, o presente trabalho se mostrou de boa eficiência, e principalmente de simples entendimento, operação e manutenção. Porém, algumas alterações nas configurações poderiam minimizar as perdas de calor, otimizando o sistema.
- O custo de fabricação do destilador ativo usado no estudo foi bastante elevado, mas se mostrou uma tecnologia eficiente no tratamento de água em uso emergencial. No entanto, recomenda-se pesquisar e selecionar outros materiais construtivos, a fim de reduzir o custo de implantação do sistema.

- Recomenda-se verificar periodicamente o material isolante do destilador, o presente trabalho utilizou poliuretano macio (espuma), este exposto ao clima externo se decompõe mais facilmente, perdendo sua eficácia.

REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, A. S. Improving the performance of stepped solar still. **Desalination**, v. 319, p. 60–65, 2013.
- AEROJET. Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico - Monomero de estireno. p. 1–13, 2015.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Disponibilidade e demandas de recursos hídricos no Brasil. p. 123, 2007.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Fatos e Tendências- Água no Rumo da Mudança**, 2009. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2006/AguaFatosETendencias.pdf>>
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Balço Hídrico Quantitativo**. Disponível em: <<https://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/webappviewer/index.html?id=ac0a9666e1f340b387e8032f64b2b85a&extent=-13579890.7724%2C-5108130.4023%2C508982.2811%2C2611397.9583%2C102100>>. Acesso em: 12 fev. 2021.
- AHMED, H. M.; ALSHUTAL, F. S.; IBRAHIM, G. Impact of Different Configurations on Solar Still Productivity. **Advance Science and Engineering Research**, v. 4, n. 2, p. 118–126, 2014.
- AL-QADAMI, E. H. H. et al. Productivity enhancement of a double slope solar still coupled with a solar system. **Journal of Ecological Engineering**, v. 21, n. 4, p. 255–263, 2020.
- ALBAN ULLOA, J. A. **Destilador solar para potabilizar el agua para una familia de 3 a 4 personas en el sitio bajo alto, cantón el guabo, provincia de el Oro**. [s.l.] Universidad Técnica de Machala, 2015.
- APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Method for the Examination of Water and Wasterwater**. 22. ed. Washington: APHA - AWWA - WEF, 2012.
- BEEKMAN, G. B. **Gerenciamento integrado dos recursos hídricos**. Brasília: [s.n.].
- BEZERRA, A. M. **Aplicações Térmicas da Energia Solar**. 4. ed. João Pessoa: Editora Universitária UFPB, 2001.
- 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.
- BOUKAR, M.; HARMIM, A. Effect of climatic conditions on the performance of a simple basin solar still.: A comparative study. **Desalination**, v. 137, n. 1–3, p. 15–22, 2001.
- BRASIL. Portaria de Consolidação nº 5 de 28 de setembro de 2017. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. . 2017, p. 926.
- BRITO, M. C.; SILVA, J. A. Energia fotovoltaica: conversão de energia solar em electricidade. **O Instalador**, 2006.

- CAPPELLETTI, G. M. An experiment with a plastic solar still. **Desalination**, v. 142, n. 3, p. 221–227, 2002.
- CHANDRASHEKARA, M.; YADAV, A. Water desalination system using solar heat: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 67, p. 1308–1330, 2017.
- COMPANHIA DE SANEAMENTO DE SERGIPE - DESO. Distribuição de Água. p. 1, 2018.
- CORCORAN, E. et al. Sick Water? The central role of wastewater management in sustainable development. **Mine Water and the Environment**, p. 88, 2010.
- COSTA, C. **Destilação Solar : aplicação no tratamento de efluentes líquidos de laboratórios**. [s.l.] Universidade de Brasília – UnB, ago. 2008.
- CRESESB/CEPEL. **Energia Solar Princípio e Aplicações**. Rio de Janeiro: [s.n.].
- CUSTODIO, E.; LLAMAS, M. R. **Hidrología subterránea / organizado por Emilio Custodio e Manuel Ramón Llamas..** [s.l: s.n.].
- DAMASCENO, L. B.; ARAÚJO, G. M. Avaliação de um destilador solar simplificado de baixo custo visando o consumo humano. n. 1, p. 1–8, 2009.
- DESTEFANI, A. et al. Destilador Solar. 2007.
- 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, n. March, p. 669–680, 2018.
- DUFFIE, J. .; BECKMAN, W. **Solar Engineering of Thermal Processes**. New York: John Wiley and Sons Inc, 1991.
- EL-MAGHLANY, W. M.; EL-SAMADONY, Y. A. F.; KABEEL, A. E. Glass cover inclination angle effect on the radiation shape factor within conventional solar still. **Desalination and Water Treatment**, v. 57, n. 38, p. 17722–17730, 2016.
- ELBAR, A. R. A.; HASSAN, H. Experimental investigation on the impact of thermal energy storage on the solar still performance coupled with PV module via new integration. **Solar Energy**, v. 184, n. March, p. 584–593, 2019.
- ELBAR, A. R. A.; HASSAN, H. An experimental work on the performance of new integration of photovoltaic panel with solar still in semi-arid climate conditions. **Renewable Energy**, v. 146, p. 1429–1443, 2020.
- FARIA, E. V. DE et al. Desenvolvimento E Construção De Um Destilador Solar Para Dessalinização De Água Salgada Em Diferentes Concentrações De Sais. p. 1969–1978, 2015.
- FONSECA FONSECA, SUSANA; MIRANDA PERDOMO, E.; TORRES TEN, A. Modelo matemático y solución analítica del funcionamiento de un destilador solar de bandeja. **Tecnología Química**, v. 32, n. 2, p. 154–161, 2012.
- FONSECA FONSECA, S. et al. Prototipo de destilador solar de fibra de vidro. **Tecnología Química**, v. 25, p. 57–64, 2005.
- GREEN, M. A. Silicon photovoltaic modules: A brief history of the first 50 years.

- Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 13, n. 5, p. 447–455, 2005.
- 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.
- HIDOURI, K.; BEN SLAMA, R.; GABSI, S. Hybrid solar still by heat pump compression. **Desalination**, v. 250, n. 1, p. 444–449, 2010.
- INMET, I. N. DE M. Rede de Estações Meteorológicas Automáticas do INMET. . 2011, p. 1–11.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Boletim Agroclimatológico Mensal - Junho**. Brasília: [s.n.].
- 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, n. May, p. 302–317, 2018.
- JANNUZZI, G. DE M.; VARELLA, F. K. DE O. M.; GOMES, R. D. M. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica no Brasil: Panorama da Atual Legislação. **Relatório da IEI PROCOBRE-UNICAMP**, p. 53, 2009.
- JOLIS, D.; LAM, C.; PITT, P. Particle Effects on Ultraviolet Disinfection of Coliform Bacteria in Recycled Water. **Water Environment Research**, v. 73, n. 2, p. 233–236, 2001.
- KABEEL, A. E.; ABDELGAIED, M.; ALMULLA, N. Performances of pyramid-shaped solar still with different glass cover angles: Experimental study. 2016.
- MALUF, A. P. **Destiladores Solares no Brasil**. [s.l.] Universidade Federal de Lavras, 2005.
- MANOKAR, A. M. et al. Sustainable fresh water and power production by integrating PV panel in inclined solar still. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 2711–2719, 2018.
- 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.
- MINC, C. Projeto de lei Nº 997/2003. . 2003.
- 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.
- MORETTI, R. S. ; VARALLO, L. S. ; COMARU, F. O direito à água potável e os riscos de desabastecimento: um estudo do abc paulista. **Rev. UFMG**, v. 20, p. 290–305, 2013.
- MOTA, S.; ANDRADE, M. A. N. Uso da Destilação Solar no Tratamento de Águas Contaminadas por Microrganismos. Aplicações à pequenas comunidades. **Revista Tecnologia**, v. 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, p. 100319, 2020.

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

OLIVEIRA JÚNIOR, D. C. DE; SCANFONE, L. Fornecimento de água potável no semiárido brasileiro: alternativas possíveis. v. 3, p. 1–16, 2010.

OSTER, H. Tracing of contaminated shallow groundwater in a deep aquifer system, Germany. In: **Use of Chlorofluorocarbons in hydrology: A guidebook**. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2006. p. 277.

PALTRIDGE, G. W. **Radiative processes in meteorology and climatology**. 6. ed. Amsterdam: Elsevier, 1976.

PEREIRA, E. B. et al. Atlas Brasileiro de Energia Solar. p. 88, 2017.

PIOVESAN, M. et al. Fibras De Vidro: Caracterização, Disposição Final E Impactos Ambientais Gerados. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 10, n. 10, p. 2112–2121, 2013.

POUNRAJ, P. et al. Experimental investigation on Peltier based hybrid PV/T active solar still for enhancing the overall performance. **Energy Conversion and Management**, v. 168, n. December 2017, p. 371–381, 2018.

PRAVEEN KUMAR, B. et al. Experimental investigation on hybrid PV/T active solar still with effective heating and cover cooling method. **Desalination**, v. 435, n. August, p. 140–151, 2018.

RAHIM, N. H. A. Utilisation of new technique to improve the efficiency of horizontal solar desalination still. **Desalination**, v. 138, n. 1–3, p. 121–128, 2001.

RICHTER, C. A.; AZEVEDO NETTO, J. M. DE. **Tratamento de água: Tecnologia atualizada**. 1. ed. São Paulo: [s.n.].

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, n. March, p. 100581, 2020.

SATHYAMURTHY, R. et al. A Review of integrating solar collectors to solar still. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 77, n. October 2016, p. 1069–1097, 2017.

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.

SILVA, M. C. C. DA. **Estudos sobre sistemas de destilação solar direta para potabilização de água**. [s.l.: s.n.].

SINGH, G.; KUMAR, S.; TIWARI, G. N. Design, fabrication and performance evaluation of a hybrid photovoltaic thermal (PVT) double slope active solar still. **Desalination**, v. 277, n. 1–3, p. 399–406, 2011.

SINGH, H. N.; TIWARI, G. N. Monthly performance of passive and active solar stills for different Indian climatic conditions. **Desalination**, v. 168, n. 1–3, p. 145–150, 2004.

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, C. **Tratamento de água unifamiliar através da destilação solar natural utilizando água salgada, salobra e doce contaminada**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

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.; KUPFERMANN, A.; AGGARWAL, S. A new design for a double-condensing chamber solar still. **Desalination**, v. 114, n. 2, p. 153–164, 1997.

UN-WATER. Relatório mundial das Nações Unidas sobre desenvolvimento dos recursos hídricos 2018: soluções baseadas na natureza para a gestão da água. p. 12, 2018.

UN-WATER. Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2019. 2019.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. Freshwater in Europe. 2007.

VALLÊRA, A. M.; BRITO, M. C. Meio Século De História Fotovoltaica. **Gazeta de Física**, p. 10–15, 2004.

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.

XIAO, G. et al. A review on solar stills for brine desalination. **Applied Energy**, v. 103, p. 642–652, 2013.

XU, Y. et al. Origami system for efficient solar driven distillation in emergency water supply. **Chemical Engineering Journal**, v. 356, n. August 2018, p. 869–876, 2019.

ANEXO A- QUADRO DOS DADOS DE PRODUÇÃO DO DESTILADOR EM 3,5 CM DE NÍVEL DE ÁGUA COM PV

Data	Temp. (°C)	Umidade rel. (%)	Vento (m/s)	Radiação acumulada de produção (kW/m²)	Produção (L/m²)	Eficiência (%)	Tempo
15/06/2020	18,60	75,09	1,06	2,75	1,32	30%	Nublado
16/06/2020	20,09	68,73	1,51	3,56	2,00	35%	Ensolarado
18/06/2020	22,31	66,09	2,99	1,11	0,80	45%	Nublado
22/06/2020	23,02	60,36	1,13	3,70	2,40	41%	Ensolarado
23/06/2020	23,14	54,64	1,88	3,15	1,92	38%	Ensolarado
24/06/2020	23,33	48,09	2,77	3,57	2,08	36%	Sol com nuvens
01/07/2020	9,15	90,00	1,49	1,09	0,20	11%	Precipitação pluviométrica e nebulosidade
02/07/2020	8,87	81,27	0,89	1,55	0,42	17%	Precipitação pluviométrica e nebulosidade
16/07/2020	18,08	69,00	2,32	2,71	1,52	35%	Sol com nuvens
20/07/2020	22,70	55,91	1,89	3,97	2,50	39%	Ensolarado
21/07/2020	22,35	56,45	1,94	3,86	2,04	33%	Ensolarado
22/07/2020	22,25	59,64	1,10	3,49	1,76	32%	Ensolarado

ANEXO B- QUADRO DOS DADOS DE PRODUÇÃO DO DESTILADOR EM 1,0 CM DE NÍVEL DE ÁGUA COM PV

Data	Temp. (°C)	Umidade rel. (%)	Vento (m/s)	Radiação acumulada de produção (kW/m²)	Produção (L/m²)	Eficiência (%)	Tempo
06/08/2020	21,65	54,45	1,45	4,65	3,42	46%	Ensolarado
10/08/2020	23,54	44,55	2,68	4,42	3,00	42%	Ensolarado com nuvens
11/08/2020	17,92	75,09	3,56	3,13	1,80	36%	Nublado
17/08/2020	18,58	72,00	1,85	4,85	5,16	67%	Ensolarado
19/08/2020	17,72	76,17	3,28	3,34	2,88	54%	Ensolarado com nuvens
24/08/2020	19,15	52,92	3,00	5,14	5,56	68%	Ensolarado e nebuloso
25/08/2020	22,45	47,92	2,64	5,04	5,56	69%	Ensolarado
26/08/2020	23,81	41,46	2,28	5,08	5,52	68%	Ensolarado
27/08/2020	25,98	38,00	1,82	4,89	5,12	65%	Ensolarado
28/08/2020	26,02	46,46	1,39	4,64	4,76	64%	Ensolarado
29/08/2020	27,58	39,67	3,11	4,96	4,48	57%	Ensolarado

ANEXO C- QUADRO DOS DADOS DE PRODUÇÃO DO DESTILADOR EM 1,0 CM DE NÍVEL DE ÁGUA SEM PV

Data	Temp. (°C)	Umidade rel. (%)	Vento (m/s)	Radiação acumulada de produção (kW/m²)	Produção (L/m²)	Eficiência (%)	Tempo
23/07/2020	22,75	52,00	2,14	4,04	1,44	22%	Ensolarado
27/07/2020	19,95	72,27	1,24	1,94	0,68	22%	Nublado
30/07/2020	12,84	62,45	1,80	4,56	1,36	19%	Ensolarado
03/08/2020	20,55	52,64	1,63	4,52	1,40	19%	Ensolarado
04/08/2020	20,86	52,00	1,77	4,50	1,52	21%	Ensolarado

ANEXO D- QUADRO DAS ANALÍSES DE ÁGUA BRUTA E DESTILADAS

(continua)

ÁGUA BRUTA (15/06/2020)		ÁGUA DESTILADA (15/06/2020)	REMOÇÃO	ÁGUA DESTILADA (17/06/2020)	REMOÇÃO
Parâmetros	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor
Turbidez	10,02 NTU	1,81 NTU	81,94%	0,38 NTU	96,21%
Temperatura	13,3 C°	18,3 C°	X	21,5 C°	X
pH	7,02	7,17	X	7,06	X
Condutividade	75,5 µS	11,62 µS	84,61%	13,03 µS	82,74%
Cor aparente	72,31 U.C.	29,40 U.C.	59,34%	10,58U.C.	85,37%
Cor verdadeira	0 U.C.	0 U.C.	X	0 U.C.	X
OD	9,55 mg/L	9,49 mg/L	X	8,71 mg/L	X
ÁGUA BRUTA (22/06/2020)		ÁGUA DESTILADA (22/06/2020)	REMOÇÃO	ÁGUA DESTILADA (17/06/2020)	REMOÇÃO
Parâmetros	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor
Turbidez	4,27 NTU	0,30 NTU	92,97%	0,41 NTU	90,40%
Temperatura	17,8 C°	21,3 C°	X	20,4 C°	X
pH	6,97	7,13	X	7,34	X
Condutividade	72,9 µS	9,24 µS	87,33%	7,33 µS	89,95%
Cor aparente	30,27 U.C.	13,08 U.C.	56,79%	0 U.C.	100,00%
Cor verdadeira	0 U.C.	0 U.C.	X	0 U.C.	X
OD	9,32 mg/L	8,88 mg/L	X	8,94 mg/L	X

ANEXO D- QUADRO DAS ANALÍSES DE ÁGUA BRUTA E DESTILADAS

(continuação)

ÁGUA BRUTA (16/07/2020)		ÁGUA DESTILADA (16/07/2020)	REMOÇÃO	ÁGUA DESTILADA	REMOÇÃO
Parâmetros	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor
Turbidez	5,45 NTU	0,82 NTU	84,95%	X	X
Temperatura	20,3 C°	18,6 C°	X	X	X
pH	7,17	7,64	X	X	X
Condutividade	69,4 µS	7,85 µS	88,69%	X	X
Cor Aparente	122,47 U.C.	12,06 U.C.	90%	X	X
Cor verdadeira	37,12 U.C.	0 U.C.	100%	X	X
OD	9,71 mg/L	7,68 mg/L	X	X	X
ÁGUA BRUTA (21/07/2020)		ÁGUA DESTILADA (21/07/2020)	REMOÇÃO	ÁGUA DESTILADA (22/07/2020)	REMOÇÃO
Parâmetros	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor
Turbidez	4,57 NTU	0,48 NTU	89,50%	0,76 NTU	83,37%
Temperatura	21,2 C°	21,3 C°	X	20,1 C°	X
pH	7,16	7,28	X	7,19	X
Condutividade	69,3 µS	13,85 µS	80,01%	10,30 µS	85,14%
Cor Aparente	47,08 U.C.	7,65 U.C.	84%	4,62 U.C.	90%
Cor verdadeira	0 U.C.	0 U.C.	X	0 U.C.	X
OD	8,92 mg/L	9,1 mg/L	X	9,13 mg/L	X

ANEXO D- QUADRO DAS ANALÍSES DE ÁGUA BRUTA E DESTILADAS

(continuação)

ÁGUA BRUTA (10/08/2020)		ÁGUA DESTILADA (10/08/2020)	REMOÇÃO	ÁGUA DESTILADA	REMOÇÃO
Parâmetros	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor
Turbidez	2,53 NTU	0,10 NTU	96,05%	X	X
Temperatura	21 C°	21,3 C°	X	X	X
pH	7,04	6,01	X	X	X
Condutividade	70,2 µS	29,3 µS	58,26%	X	X
Cor Aparente	23,68 U.C.	0 U.C.	100%	X	X
Cor verdadeira	2,73 U.C.	0 U.C.	100%	X	X
OD	9,36 mg/L	8,83 mg/L	X	X	X
Coliformes Term.	2489 NMP/100mL	0 NMP /100mL	100%	X	X
E. Coli	132 NMP/100mL	0 NMP /100mL	100%	X	X
ÁGUA BRUTA (17/08/2020)		ÁGUA DESTILADA (17/08/2020)	REMOÇÃO	ÁGUA DESTILADA (20/08/2020)	REMOÇÃO
Parâmetros	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor
Turbidez	8,71 NTU	0,22 NTU	97,47%	0,09 NTU	98,97%
Temperatura	17,6 C°	19 C°	X	10,1 C°	X
pH	7,19	7,16	X	7,33	X
Condutividade	80 µS	15,54 µS	80,58%	10,63 µS	86,71%
Cor Aparente	69,30 U.C.	0 U.C.	100%	0 U.C.	100%
Cor verdadeira	10,37 U.C.	0 U.C.	100%	0 U.C.	X
OD	9,38 mg/L	8,97 mg/L	X	10,63 µS	X
Coliformes Term.	7556 NMP/100mL	0 NMP/100mL	100%	X	X
E. Coli	488 NMP/100mL	0 NMP/100mL	100%	X	X

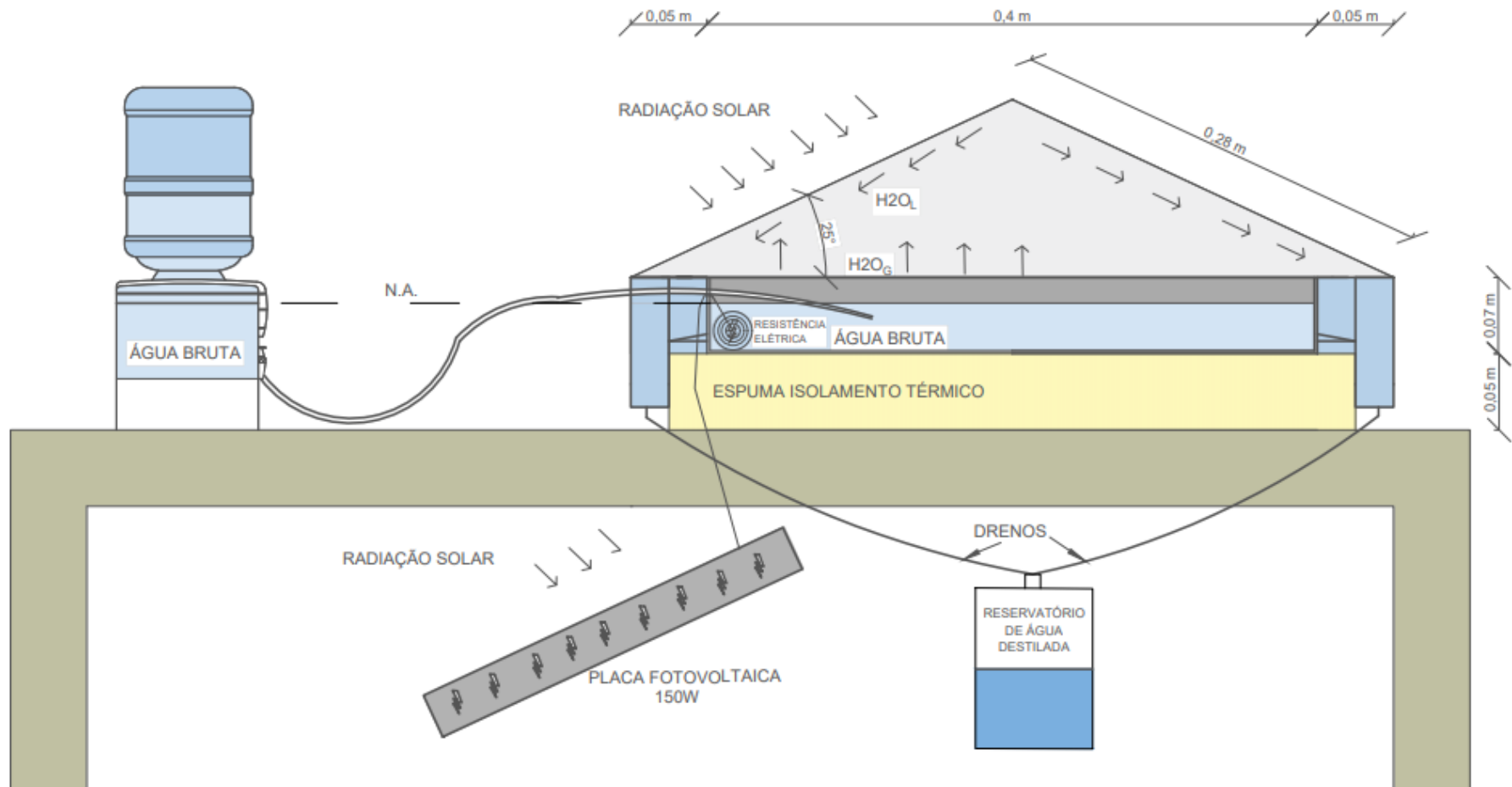
ANEXO D- QUADRO DAS ANALÍSES DE ÁGUA BRUTA E DESTILADAS

(conclusão)

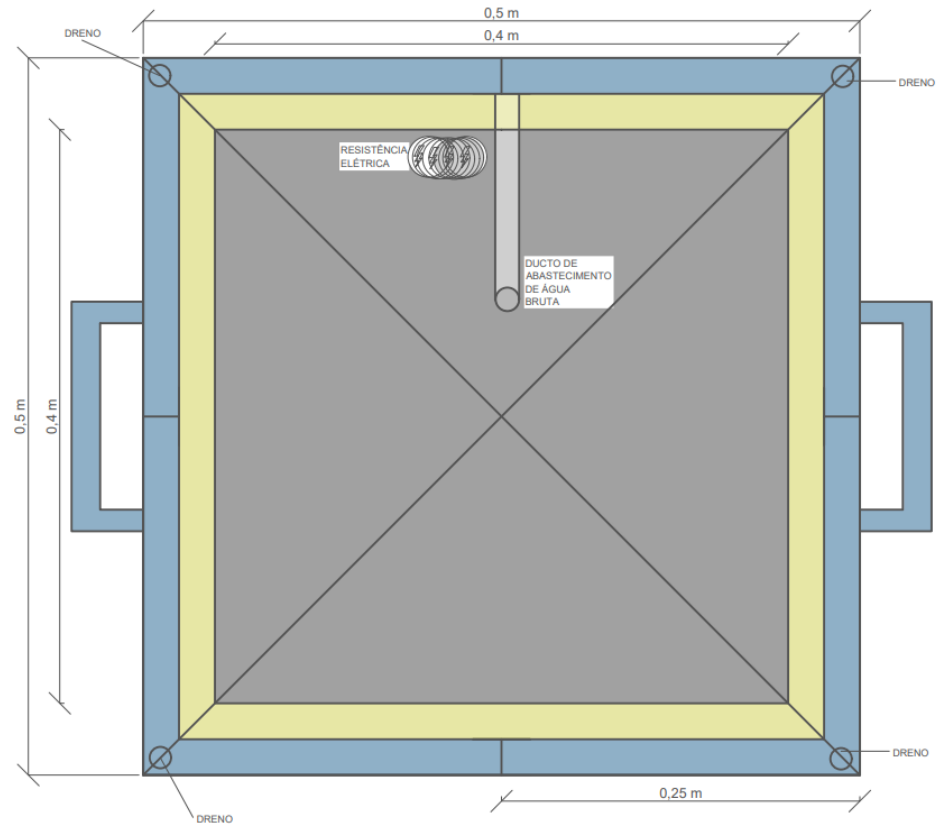
ÁGUA BRUTA (24/08/2020)		ÁGUA DESTILADA (24/08/2020)	REMOÇÃO	ÁGUA DESTILADA (25/08/2020)	REMOÇÃO
Parâmetros	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor
Turbidez	3,97 NTU	0,07 NTU	98,15%	0,079NTU	97,63%
Temperatura	17,6 C°	17 C°	X	20 C°	X
pH	6,78	7,37	X	7,33	X
Condutividade	76,4 µS	10,88 µS	85,76%	11,82 µS	84,53%
Cor Aparente	37,52 U.C.	0 U.C.	100%	0 U.C.	100%
Cor verdadeira	0 U.C.	0 U.C.	100%	0 U.C.	X
OD	9,66 mg/L	9,24 mg/L	X	8,98 mg/L	X
Coliformes Term.	35244 NMP/100mL	0 NMP/100mL	100%	X	X
E. Coli	1333 NMP/100mL	0 NMP/100mL	100%	X	X

ANEXO E- PLANTAS DO SISTEMA UTILIZADO NO EXPERIMENTO

CORTE LATERAL DO SISTEMA



VISTA SUPERIOR DO DESTILADOR SOLAR ATIVO



CORTE LATERAL DO MODOLO ACOPLADO

