

ANA FLÁVIA FAGUNDES MOURA

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UM DESTILADOR SOLAR
PASSIVO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2019

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

M929m
2019 Moura, Ana Flávia Fagundes, 1994-
 Modelagem e simulação numérica de um destilador solar
 passivo / Ana Flávia Fagundes Moura. – Viçosa, MG, 2019.
 vi, 61 f. : il. ; 29 cm.

Orientador: Antônio Marcos de Oliveira Siqueira.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 55-61.

1. Dessalinização de água. 2. Destilador solar. 3. Modelos matemáticos. 4. Estimativa de parâmetros. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Química. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. II. Título.

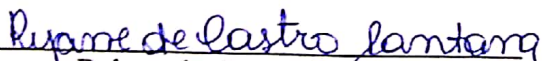
CDD 22. ed. 628.167

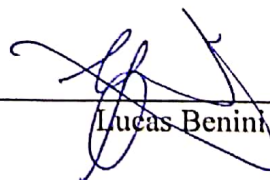
ANA FLÁVIA FAGUNDES MOURA


MODELAGEM E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UM DESTILADOR SOLAR
PASSIVO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 08 de fevereiro de 2019.


Rejane de Castro Santana


Lucas Benini


Antonio Marcos de Oliveira Siqueira
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me permitido saúde e sabedoria para vencer mais uma etapa.

Aos meus pais pelo incentivo, pelo amor incondicional e por sonharem junto comigo.

A Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de aperfeiçoar meus conhecimentos na área da Engenharia Química.

Ao professor Antonio Marcos de Oliveira Siqueira, pela orientação, apoio e confiança.

Aos amigos e familiares que caminharam junto comigo e tornaram essa jornada mais leve.

RESUMO

MOURA, Ana Flávia Fagundes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2019. **Modelagem e simulação numérica de um destilador solar passivo.** Orientador: Antonio Marcos de Oliveira Siqueira.

A escassez de água se tornou um problema de escala mundial em virtude da má gestão dos recursos hídricos de uma população cada vez maior e mais industrializada. As chuvas não estão sendo capazes de suprir a necessidade de água em diversos países, principalmente as regiões áridas e semiáridas. Diante desta realidade, viu-se a necessidade de estudar e avaliar outras fontes alternativas de água potável capazes de abastecer as cidades com menor índice pluviométrico e que conseqüentemente sofrem com a falta desse recurso natural essencial para a vida humana. Uma análise dos principais métodos de dessalinização é necessária e a tecnologia proposta ocorre através de um Destilador Solar, pois é o equipamento que mais se adequa economicamente a regiões áridas, com elevada quantidade de água salobra e elevada radiação solar. O objetivo principal deste trabalho é realizar uma análise paramétrica de um Destilador Solar Passivo, através de sua modelagem e simulação no *software* EES[®], que reforçou as condições propostas na revisão bibliográfica. As dimensões e o material do tanque e da cobertura serão os parâmetros analisados, além da estação do ano. O Destilador Solar que apresentou maior produção de água potável é aquele onde a bacia é construída de alvenaria e altura de 0,01 m. A cobertura deve possuir única inclinação de vidro e espessura de 4 mm.

ABSTRACT

MOURA, Ana Flávia Fagundes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2019. **Modeling and numerical simulation of a passive solar still.** Adviser: Antonio Marcos de Oliveira Siqueira.

Water scarcity has become a global problem because of the poor management of the water resources of a growing and more industrialized population. The rains are not being able to supply the water demand in several countries, mainly arid and semiarid regions. Faced with this reality, there was a need to study and evaluate other alternative sources of drinking water capable of supplying cities with lower rainfall levels and consequently suffer from the lack of this natural resource essential for human life. An analysis of the main methods of desalination is necessary and the proposed technology occurs through a Solar Still, since it is the equipment that best suits economically arid regions, with high amount of brackish water and high solar radiation. The main objective of this work is to perform a parametric analysis of a Passive Solar Still, through its modeling and simulation in the EES[®] software, which reinforced the conditions proposed in the bibliographic review. The dimensions and material of the basin and the cover will be the analyzed parameters, besides the season of the year. The Solar Still that presented the highest production of drinking water is the one where the basin is built of masonry and height of 0.01 m. The cover must have a single glass slope and a thickness of 4 mm.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa	2
1.2 Objetivo Principal	3
1.3 Objetivos Específicos	3
2 ESTADO DA ARTE	4
2.1 Processos de Dessalinização Através de Membranas	4
<i>2.1.1 Osmose Reversa (Reverse Osmosis- RO)</i>	4
<i>2.1.2 Eletrodialise (Electrodialysis - ED)</i>	5
2.2 Processos Térmicos de Dessalinização	6
<i>2.2.1 Destilação Multi Efeito (Multi-Effect Distillation - MED)</i>	6
<i>2.2.2 Destilação por Compressão a Vapor (Vapour Compression Distillation – VCD)</i>	8
<i>2.2.2.1 Compressão Térmica de Vapor</i>	8
<i>2.2.2.2 Compressão Mecânica de Vapor</i>	8
<i>2.2.3 Destilação Flash de Múltiplo Estágio (Multi-Stage Flash - MSF)</i>	9
<i>2.2.4 Congelamento (Freezing)</i>	11
<i>2.2.5 Destilação Solar</i>	12
<i>2.2.5.1 Caracterização do Destilador Solar</i>	13
<i>2.2.5.2 Vantagens do Destilador Solar</i>	15
<i>2.2.5.3 Desvantagens do Destilador Solar</i>	16
<i>2.2.5.4 Análise Bibliográfica da Produção de Água Destilada Através do Destilador Solar Passivo</i>	16
2.3 Proposição de configurações para aumento da produtividade	20
<i>2.3.1 Destilador Solar Tubular (Destilador Passivo)</i>	20
<i>2.3.2 Destilador Solar convencional usando aspersores de água e ventilador de arrefecimento</i>	21
<i>2.3.3 Destilador Solar multi bacia com dupla inclinação</i>	22
<i>2.3.4 Destilador Solar tipo degrau com estabilizador vertical e esponjas</i>	23
<i>2.3.5 Destilador Solar Multi-Efeito com fonte de calor externa</i>	23
<i>2.3.6 Estudo Comparativo de técnicas de dessalinização</i>	24
3 MODELAGEM MATEMÁTICA	37
3.1 Método de Dessalinização Proposto	37

3.2 Equações da Modelagem Matemática	39
3.2.1 <i>Balço de Energia na Cobertura</i>	39
3.2.2 <i>Balço de Energia da Água</i>	42
3.2.3 <i>Massa Evaporada</i>	43
3.2.4 <i>Eficiência</i>	44
3.2.5 <i>Variáveis Acessórias</i>	44
3.2.6 <i>Propriedades</i>	44
3.3 Sistema Computacional Utilizado	45
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1 Altura da Coluna de Água no Tanque	46
4.2 Material e Espessura da Cobertura	47
4.3 Largura do Tanque	48
4.4 Estação do Ano	49
4.5 Material do Tanque	51
5. CONCLUSÃO	52
REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

O consumo de água está cada vez mais elevado e a disponibilização desse recurso natural para uso da população tem se tornado um problema em escala mundial. O Planeta Terra é composto por 70% de água. Porém 97,2% desta correspondem a água salgada e 2,38% a água congelada, presente nos glaciares. Sendo assim o uso de quase toda a água constituinte do planeta para consumo humano fica impossibilitado. Restam apenas 0,29% de água doce própria para consumo, presente nos rios, 0,39% presente no subsolo e 0,001% na atmosfera. Esta pequena quantidade de água doce disponível vem sendo utilizada de maneira exagerada no dia a dia da população (GUERREIRO, 2009; LEITE, 2017).

A má gestão dos recursos hídricos, atrelada à poluição e as alterações climáticas, vem agravando a escassez de água em diversos países, principalmente as regiões áridas e semiáridas. As chuvas não estão sendo capazes de suprir a necessidade de uma população cada vez maior e mais industrializada. A crise hídrica presente nos últimos anos causou inclusive a morte da população presente nessas regiões pelo uso de água de má qualidade.

Em algumas regiões do Brasil, as chuvas são mais abundantes proporcionando maior disponibilidade de água natural, em outras, as secas são mais frequentes e a escassez hídrica torna-se um problema a ser enfrentado. O desmatamento e a impermeabilização do solo fazem com que a água da chuva chegue mais rápido aos cursos d'água e ao mar, além de modificar o regime de precipitação. Esses fatores influenciam no clima, provocando períodos de estiagem, com escassez de água e crise de abastecimento, principalmente na região Nordeste.

No estado do Ceará, o semiárido ocupa 93,5% da sua área total, se tornando bastante vulnerável aos efeitos da seca, sendo conhecida popularmente como sertão nordestino. Essas regiões são ecossistemas complexos, que possuem um quadro natural limitado de disponibilidade hídrica para a população. O clima semiárido apresenta como características principais: deficiência hídrica, precipitações irregulares e agropecuária limitada, implicando na dificuldade de disponibilizar água a partir de simples armazenamento, visto que a população é numerosa e a evaporação é significativa (NASCIMENTO, 2006; LIMA, 2011). Segundo a Casa Civil do Ceará (2017) em 2012, 206 comunidades de 44 municípios já foram beneficiadas com sistemas de dessalinização. E outros 42 equipamentos estão em processo de implementação. Para tanto, terão sido investidos R\$ 44.249.978,55 de recursos do Governo Federal e Estadual.

Cerca de 200.000 famílias residem próximo destes poços e dependem parcial ou totalmente deles. Em 2001, o governo do Ceará financiou mais 160 unidades de dessalinização em comunidades rurais, favorecendo 21.500 famílias, porém, grande parte desses dessalinizadores encontra-se fora de funcionamento, pelo alto custo de operação e manutenção. Recentemente no sertão do Ceará cerca de 200 sistemas foram implementados em 34 municípios pelo programa Água Doce. O preço da água por m³ é em torno de R\$ 1,00, contudo chega aos moradores por um valor menor, uma vez que a iniciativa é subsidiada pelo governo para a população de baixa renda (CAGECE, 2017).

A otimização do processo de dessalinização da água do mar se tornou uma alternativa para o problema da escassez de água no Nordeste, visto que as águas do oceano estão dispostas de forma abundante nessa região, porém com elevada salinidade. Este método consiste na retirada dos sais da água salobra através de processos térmicos ou processos que utilizem membranas.

Os processos térmicos consistem na vaporização da água salgada, a fim de destilá-la e remover a maior quantidade de sais possíveis, adotando múltiplas ebulições em sucessivos estágios, reduzindo assim a quantidade de energia necessária. Os principais processos térmicos são destilação de múltiplo efeito, destilação por compressão a vapor, destilação flash de múltiplo estágio, congelamento e destilação solar (AL-SHAYJI, 1998; SOUZA, 2011; EL-GHONEMY, 2012; SILVA, 2015).

As membranas por sua vez são capazes de diferenciar e separar de forma eficiente a água dos sais através dos processos de eletrodialise e osmose reversa. Esses métodos não alteram a fase da água, utilizando a membrana como uma barreira entre a água salobra e a água potável (AL-SHAYJI, 1998; SILVA, 2015).

1.1 Justificativa

A necessidade de se obter um método eficiente e viável economicamente de dessalinização da água do mar, fez com que iniciassem vários estudos e projetos a fim de avaliar qual o método de dessalinização seria mais oportuno para a região metropolitana de Fortaleza. O objetivo é eleger um método que seja capaz de suprir as necessidades da população de uma metrópole semiárida, com baixo índice pluviométrico e alta concentração de litorais. Para essa análise é considerada a área da região, o clima, a intensidade do vento e a radiação solar que incidem nas cidades da metrópole. Para que então uma forma alternativa de obtenção de água doce

seja implantada e utilizada como apoio, minimizando ou até mesmo eliminando o problema da escassez de água. Como inspiração para esta proposta, um projeto lançado pela Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE) em agosto de 2017 visa a formulação de estudos de uma usina de dessalinização. Esse projeto tem como objetivo encontrar uma planta de dessalinização para a Região Metropolitana de Fortaleza, capaz de auxiliar o fornecimento de água doce e suprir a crise hídrica presente nessa localidade.

1.2 Objetivo Principal

O objetivo principal deste trabalho é realizar uma análise paramétrica e dimensional de um Destilador Solar Passivo através de sua modelagem e simulação no *software* EES, possibilitando a obtenção de um método que seja capaz de suprir as necessidades da região metropolitana de Fortaleza.

1.3 Objetivos Específicos

- Avaliar as vantagens e desvantagens da construção de um Destilador Solar;
- Construir um Modelo Matemático para o destilador solar;
- Aplicar o modelo matemático no programa computacional EES[®];
- Realizar uma análise paramétrica, usando o *software* EES[®].

2 ESTADO DA ARTE

Neste capítulo serão apresentadas as principais tecnologias de dessalinização, subdivididas em processos térmicos e processos através de membranas, esclarecendo seus mecanismos e métodos utilizados para a obtenção de água potável. Com foco principal no Destilador Solar proposto no trabalho, este capítulo apresenta mais detalhadamente as características desse equipamento, expondo as vantagens e desvantagens da utilização desse método. Além disso, é realizada uma análise comparativa dos resultados de alguns autores envolvendo esse tipo de dessalinização.

2.1 Processos de Dessalinização Através de Membranas

Com a grande eficiência das membranas em diferenciar e separar a água dos sais, os processos de Osmose Reversa e Eletrodialise são utilizados em larga escala para obtenção de água doce. As membranas são sistemas de separação de materiais onde não há transformação química ou biológica do componente durante o processo de filtração. Uma membrana tem a característica de um filme fino e sólido, agindo na separação seletiva das substâncias, no caso a água dos sais, com a ajuda de uma força externa sobre elas (LIMA, 2006).

2.1.1 Osmose Reversa (*Reverse Osmosis- RO*)

A osmose reversa é o processo em que a água do mar é pressurizada e separada por membranas para produzir água doce e solução com alta concentração de sais. As membranas agem como polímeros que bloqueiam o transporte de sal, mas permitem o transporte de água devido a uma diferença de pressão na membrana. O custo da produção de água para a planta de osmose reversa é de aproximadamente 0,48 a 1,62 \$/m³ para plantas médias e entre 0,45 e 0,66 \$/m³ para grandes plantas incluindo custos de energia, custos de operação e manutenção e investimento de planta (KARAGIANNIS e SOLDATOS, 2008; SEMIAT, 2008; BARRAZA, 2011).

A Figura 1 representa um esquema de dessalinização por osmose reversa. No Tanque A da Figura 1, a água flui de baixa para alta concentração em uma membrana semipermeável, onde a água pura dilui a água salobra, com a mesma temperatura e pressão, a fim de alcançar as mesmas condições de concentração em ambos os lados. A diferença de altura observada entre os dois compartimentos do tanque, refere-se à diferença de pressão presente no processo. Aplicando uma alta pressão no líquido concentrado como mostra no Tanque B da Figura 1, o

fluxo pode ser separado e estabilizado, desde que a pressão seja suficientemente proporcional à concentração da solução. Quando a pressão aplicada é maior que a pressão osmótica, como mostra o Tanque C da Figura 1, o fluxo corre em direção contrária, resultando em um fluxo no sentido da solução de menor concentração salina, assim, os íons ficam retidos na membrana e a água doce é retirada no outro compartimento. Este processo é conhecido como Osmose Reversa, representada pela Figura 1 (LIMA, 2006; BARRAZA, 2011; SIGNORELLI, 2015).

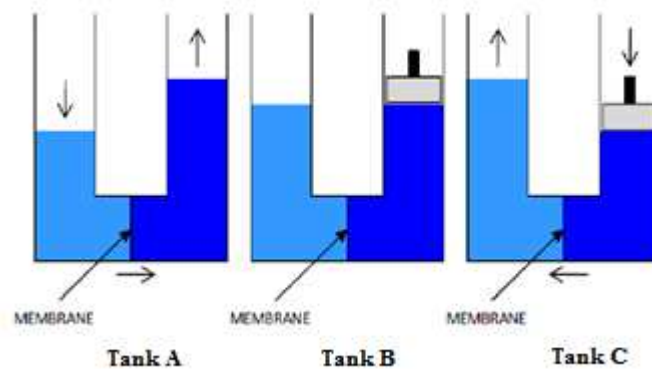


Figura 1: Esquema de Dessalinização por Osmose Reversa (BARRAZA, 2011).

2.1.2 Eletrodialise (Electrodialysis - ED)

A eletrodialise é uma tecnologia de dessalinização que utiliza um campo elétrico que remove os íons sal da água salobra, apresentando vantagens quando é conseguido um íon de baixa concentração. Em função disto, esta tecnologia é usada para dessalinizar água salobra com níveis totais de sólidos dissolvidos de 4.000 a 5.000 g/kg (AL-KARAGHOULI, RENNE, KAZMERSKI 2009; BARRAZA, 2011).

A água salina passa entre um par de eletrodos que, além de energia elétrica, necessita da utilização de membranas emparelhadas que permitam a passagem de cátions ou ânions, mas não de ambos. Os íons são separados movendo-se para seus respectivos pólos, atravessando ou sendo retidos por membranas permeáveis a cátions e permeáveis a ânions alternadamente, resultando em água dessalinizada, quando são removidos ânions Cl^- e NO_3^- ou água desmineralizada, quando são removidos cátions como K^+ e Na^+ . Sendo assim, em alguns compartimentos obtêm-se água potável, e em outros compartimentos água salina mais concentrada que a de entrada. A Figura 2 demonstra um esquema de dessalinização pelo processo de eletrodialise (BARRAZA, 2011; CRUZ, 2012).

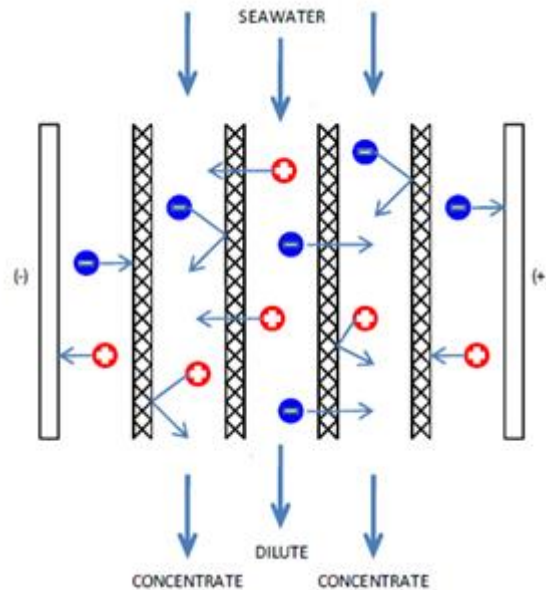


Figura 2: Sistema Dessalinização por Eletrodialise (BARRAZA, 2011).

2.2 Processos Térmicos de Dessalinização

O processo térmico é um método natural de dessalinização, que utiliza uma alta temperatura visando aquecer a água salgada até a sua vaporização, sendo então condensada e precipitada sobre a forma de água potável. Para atingir altas temperaturas o processo requer uma grande quantidade de energia, que pode ser obtida através da utilização de combustíveis fósseis ou de energia solar (GUERREIRO, 2009; EL-GHONEMY, 2012).

A utilização do vapor de água condensado é mais vantajosa para o processo de destilação, pois sua temperatura é mais fácil de ser controlada, além de possuir grande quantidade de calor latente que é liberado com a condensação. O fluxo de energia será mais eficiente de acordo com o coeficiente de transferência total de calor, podendo até mesmo diminuir a área de troca térmica da planta.

2.2.1 Destilação Multi Efeito (Multi-Effect Distillation - MED)

Na destilação de múltiplos efeitos, utiliza-se o método de redução de pressão interna na série de tanques que a água do mar percorre. O desempenho térmico desta planta aumenta com o número de efeitos, que varia de 4 a 16, com no máximo 24 efeitos por causa da energia consumida. A energia térmica baseada no consumo de combustível em plantas típicas de uma única tecnologia é de aproximadamente 40 a 65 kWh/m³ de água doce. A energia de bombeamento consome e se mantém por cerca de 0,5 kWh/m³. Semelhante à destilação flash

de múltiplo estágio - *MSF*, o consumo de energia dos processos de dessalinização térmica pode ser reduzido consideravelmente em plantas de dupla finalidade (cogeração). A energia térmica é reduzida até cerca de 4 a 7 kWh/m³, também semelhante a *MSF*. O custo de produção do *MED* em uma planta de cogeração varia entre 0,95 e 1,95 \$/m³ de água doce para plantas médias, e entre 0,52 e 1,01 \$/m³ para grandes plantas, incluindo custos de energia, operação e manutenção da planta (KARAGIANNIS e SOLDATOS, 2008; SEMIAT, 2008; BARRAZA, 2011).

No primeiro tanque a temperatura da água do mar é pré-aquecida e elevada até seu ponto de ebulição. Pode-se usar qualquer fonte de energia desde que esta tenha capacidade para tratar uma elevada quantidade de água. A água vaporizada no primeiro efeito é recolhida sobre a forma de destilado através do condensador do tanque. Este vapor de água pura é que vai fornecer calor ao efeito seguinte, sendo depois colhido como água potável. A água salgada que não evapora no primeiro efeito é retida no fundo do tanque. A água armazenada no fundo é bombeada para o próximo tanque, passando por um novo processo de vaporização. O próximo efeito trabalha com temperatura inferior ao efeito anterior, pois a pressão fica menor de um efeito para outro. Os efeitos vão se repetindo sucessivamente, como mostra a Figura 3, até que se obtenha a salmoura com alta concentração de sais ou se atinja a pressão atmosférica (SOUZA, 2002; CRUZ, 2012).

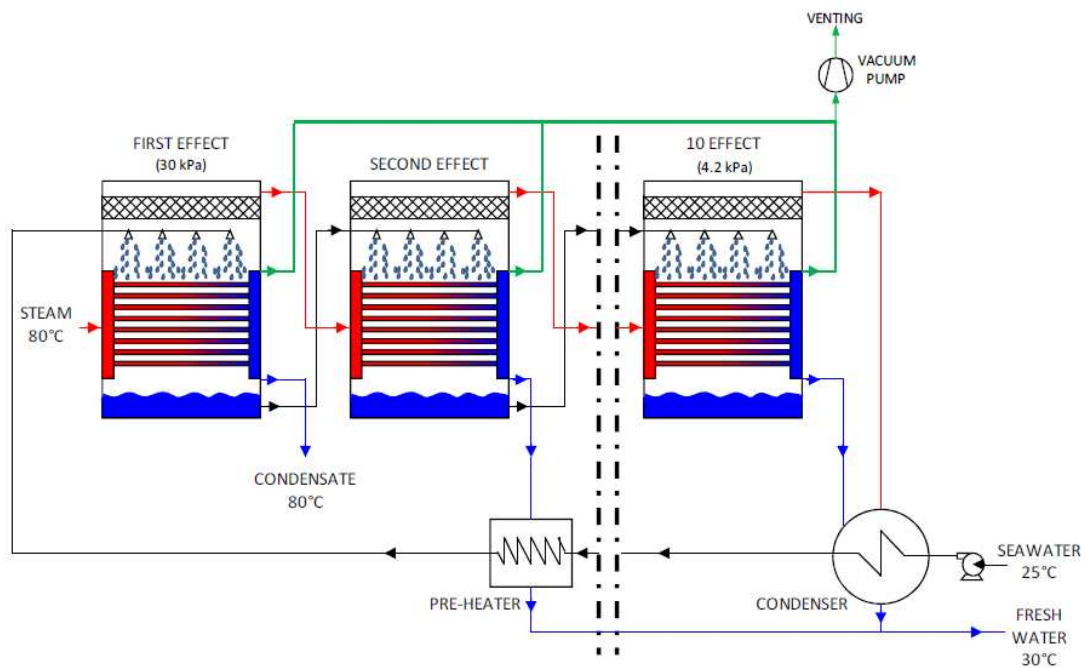


Figura 3: Diagrama de um Sistema de Destilação Multi Efeito - MED (BARRAZA, 2011).

2.2.2 Destilação por Compressão a Vapor (*Vapour Compression Distillation - VCD*)

Esse método evapora a água do mar usando o calor da compressão do vapor. O principal objetivo é aproveitar a redução do ponto de ebulição, reduzindo a pressão no recipiente onde a água do mar está contida. A água de alimentação é aquecida a uma temperatura acima da saturação, que se mantém no evaporador pela presença da salmoura e água fresca produzida em um trocador de calor. A água de alimentação aquecida é adicionada no evaporador. O vapor gerado é comprimido mecanicamente, através de um compressor, ou termicamente, através de um ejetor de vapor (AL-KARAGHOULI, RENNE, KAZMERSKI, 2009; BARRAZA, 2011).

2.2.2.1 Compressão Térmica de Vapor

Este método, também chamado de *Thermal Vapor Compression – TVC* adiciona pequenas quantidades de vapor a alta pressão através de um injetor, necessitando de várias etapas para obtenção de uma melhor eficiência do sistema. O método de compressão térmica evapora água salina por meio da extração de vapor d'água do recipiente principal através de um orifício na passagem de vapor. O vapor incidente desse orifício comprime o vapor de água extraído e a mistura dos mesmos é então condensada nas paredes do tubo pela diferença de temperatura, fornecendo energia e evaporando a água salina que entra em contato com o lado externo das paredes do tubo no recipiente (FORMOSO, 2010; CRUZ, 2012).

2.2.2.2 Compressão Mecânica de Vapor

O processo que utiliza o compressor mecânico de vapor, também chamado de *Mechanical Vapor Compression – MVC* ocorre em apenas uma etapa, onde a compressão eleva a temperatura e aumenta a pressão de vapor. Nesse método, a água salina que geralmente está em baixas temperaturas, condensa o vapor que foi comprimido no evaporador. O condensado é automaticamente aquecido pelo ponto de ebulição, em seguida usado como fonte de calor para produzir mais vapor e por fim repetir o ciclo (CRUZ, 2012).

Apesar de que os sistemas mecânicos apresentam o mesmo consumo de potência por unidade de água produzida independente do número de etapas, essa tecnologia tem sua capacidade máxima de conversão limitada pela capacidade do compressor. Esse método é então usualmente utilizado quando a necessidade de água doce é relativamente pequena, como em pequenas comunidades, navios ou pousadas de férias (FORMOSO, 2010).

Seu funcionamento pode ser a diesel ou a eletricidade, fazendo com que essa técnica seja muitas vezes utilizada como processo paralelo a outros tipos de dessalinização. Segundo Karagiannis & Soldatos (2008), o consumo específico da energia elétrica em plantas de compressão de vapor mecânica é cerca de 7 kWh/m^3 e os custos de produção de água são de aproximadamente $2,3 \text{ US \$/m}^3$ para produção de cerca de até $1.200 \text{ m}^3/\text{dia}$ de água fresca.

A Figura 4 representa um diagrama esquemático do sistema de compressão de vapor mecânica, onde a água de alimentação é aquecida a uma temperatura acima da saturação e mantida no evaporador, que opera em uma temperatura de 64°C a 70°C . O vapor gerado no processo é comprimido mecanicamente pelo compressor, gerando um vapor superaquecido que é utilizado como fonte de calor para a evaporação de salmoura e a obtenção de água fresca (BARRAZA, 2011).

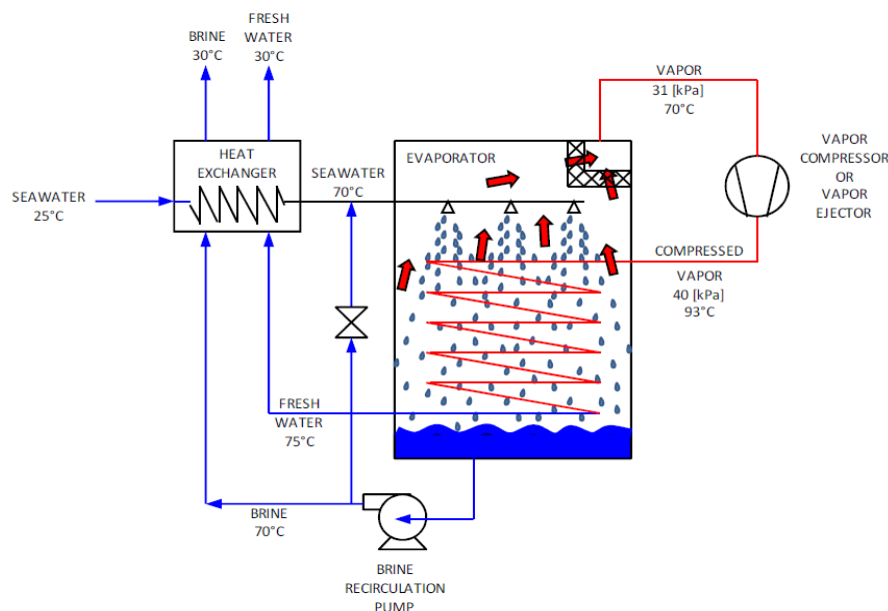


Figura 4: Diagrama de um Sistema de Dessalinização por Compressão de Vapor Mecânica - VC (BARRAZA, 2011).

2.2.3 Destilação Flash de Múltiplo Estágio (Multi-Stage Flash - MSF)

Esse método de dessalinização utiliza de sucessivas reduções na pressão da água do mar aquecida para a obtenção de água doce. O desempenho térmico desse sistema é proporcional ao número de estágios, com custo de capital limitado ao número de estágios a serem utilizados que varia entre 20 e 30 estágios. A energia térmica baseada no consumo de combustível está na faixa de 55 a 80 kWh/m^3 de produto. A energia de bombeamento é de cerca de $1,2$ a $4,5 \text{ kWh/m}^3$. O consumo de energia do *MSF* pode ser reduzido

consideravelmente quando ele é utilizado juntamente com uma usina de energia (cogeração). A cogeração funciona através do vapor extraído de uma turbina de contrapressão para fornecer a energia térmica primária necessária para o *MSF*, que tem um consumo de energia térmica de cerca de 4 a 7 kWh/m³, nestas condições. As plantas *MSF* existentes normalmente possuem capacidades que variam entre 100.000 e 880.000 m³/dia. O custo da produção de água doce em uma planta com cogeração varia entre 0,52 e 1,75 \$/m³ de rendimento de água doce incluindo custos de energia, operação e manutenção da planta (BORSANI e REBAGLIATI, 2005; KARAGIANNIS e SOLDATOS, 2008; SEMIAT, 2008; BARRAZA, 2011).

Primeiramente, antes de entrar no sistema, água salobra é pré-tratada com alguns produtos químicos capazes de evitar a corrosão do equipamento. A água tratada é então pré-aquecida de 90 a 120° C em cascata e injetada em um tanque sobre baixa pressão. À medida que a pressão da água do mar diminui, uma porção da mesma evapora, deixando no tanque os sais dissolvidos que passam para o próximo estágio. A porção de água evaporada e destilada em cada tanque é condensada ao entrar em contato com o resfriador, que é resfriado pela própria água do mar. A água resultante do condensador é recolhida para o tanque de água doce como forma de produto (SEMIAT, 2000).

A salmoura restante do primeiro estágio passa para o tanque seguinte, que opera em pressões menores que a anterior, e conseqüentemente menores temperaturas. O processo se repete sucessivamente em cada tanque, representando cada estágio, que só chega ao fim quando se atinge a pressão atmosférica ou quando a água apresenta alta concentração de sais, representada no esquema da Figura 5 (CRUZ, 2012).

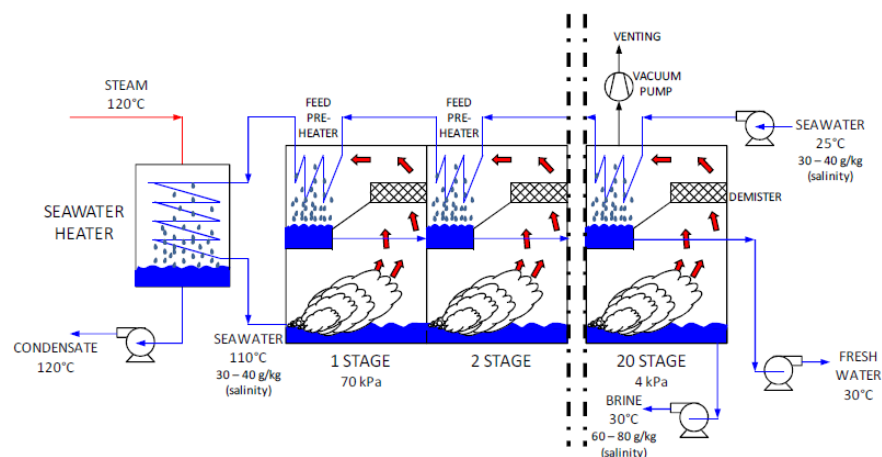


Figura 5: Representação Esquemática de Dessalinização Flash de Múltiplo Estágio - MSF (BARRAZA, 2011).

2.2.4 Congelamento (Freezing)

O processo de obtenção de água doce por congelamento é realizado resfriando-se a solução salina até que essa congele e forme gelo isento de sais que ficam na superfície dele. Desta forma é necessário lavar o gelo para enfim retirá-lo e deixar que volte ao estado líquido para conseguir água doce, sendo esse aspecto um dos que desfavorecem o método. As formas de congelar a água podem ser com auxílio de outro fluido resfriado ou com evaporadores a vácuo. Em geral, a principal vantagem é a menor necessidade energética para resfriar e congelar a água do mar que para evaporá-la, além de minimizar a corrosão nos equipamentos por trabalhar em baixas temperaturas (SIGNORELLI, 2015).

Quando a água congela, os sais dissolvidos na água são excluídos do gelo que é formado. A água salina arrefecida é pulverizada para uma câmara de vácuo a uma pressão de cerca de 0,004 atm. Uma porção da água sai como vapor, removendo mais calor da água fazendo com que o gelo se forme. O gelo flutua na salmoura e é lavado com água doce, que apresenta densidade menor do que a salmoura, permitindo que a água doce flua para fora do tanque, como mostrado na Figura 6. Em teoria, a dessalinização por congelamento tem uma necessidade de energia mais baixa do que outros processos térmicos, porém essa técnica é mais utilizada em regiões frias, para facilitar a formação de cristais de gelo de água doce (CRUZ, 2012).

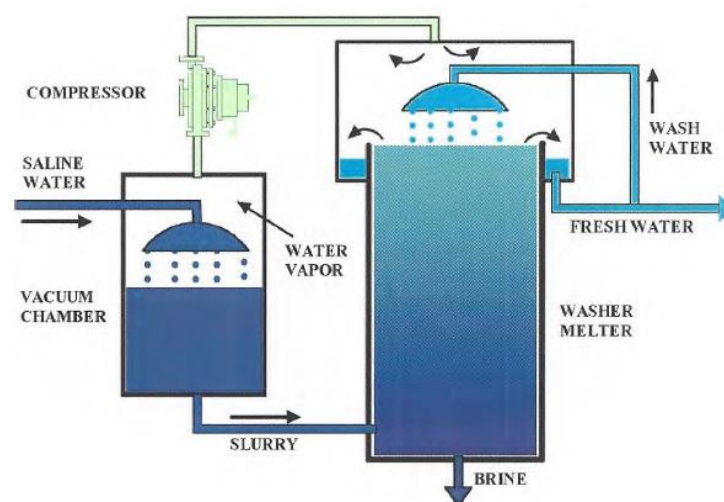


Figura 6: Sistema de Dessalinização por Congelamento (CLAYTON, 2006).

2.2.5 Destilação Solar

A destilação solar é o método mais simples de dessalinização por meio de processos térmicos. A água salgada é aquecida e evaporada em um tanque de superfície negra para auxiliar na absorção de calor através da incidência de raios solares sobre um telhado de vidro transparente que reveste o tanque e apresenta temperatura menor que a água vaporizada, como mostra a Figura 7. O vapor de água resultante é condensado na parte inferior do telhado e escorre pela cobertura, conduzindo a água destilada para o fundo do reservatório (CLAYTON, 2006; BARRAZA, 2011).

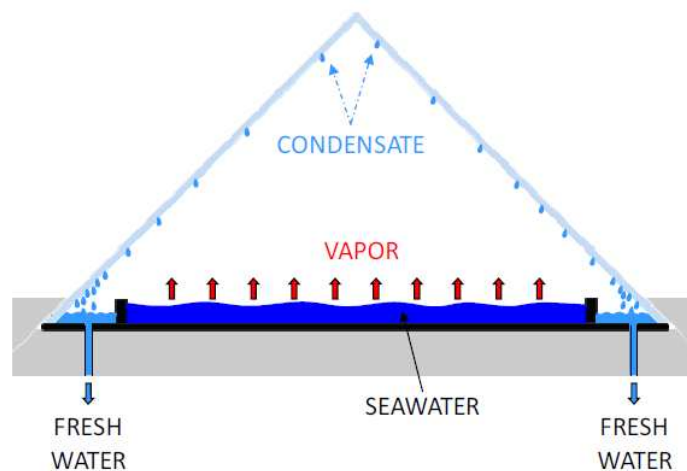


Figura 7: Diagrama de um Sistema de Destilação Solar (BARRAZA, 2011).

O método de dessalinização solar é uma solução atrativa economicamente, pois os custos de energia são muito baixos, visto que utiliza o calor cedido pela natureza. Porém, para melhor eficiência dessa técnica, é necessária uma área de implantação muito grande para a exposição da água ao sol.

A dessalinização proposta neste trabalho ocorre através de um destilador solar, pois é o equipamento que mais se adequa economicamente a regiões áridas, com elevada quantidade de água salobra e elevada radiação solar. O combustível utilizado nessa destilação é gratuito, renovável, silencioso e não poluente. A água proveniente desse processo é a de melhor qualidade dentre os outros, já que neste não há presença significativa de microrganismos e apresenta alta eficiência na remoção de sais. Além disso, essa técnica não requer grande tecnologia e mão de obra especializada, visto que o equipamento pode ser construído com um telhado de vidro e suportes feitos de madeira, metal ou concreto (MALUF, 2005).

2.2.5.1 Caracterização do Destilador Solar

O Destilador Solar remove o sal da água do mar por meio do aquecimento solar da mesma. Esse equipamento consiste de um tanque de superfície preferencialmente negra que contribua para a absorção de calor dos raios solares que incidem num telhado de vidro transparente.

A água do mar que alimenta o tanque será destilada por meio do aquecimento interno do tanque, pois quando o interior do tanque atingir 100°C a água pura irá evaporar e posteriormente será condensada ao entrar em contato com a cobertura de vidro, que estará com temperatura menor que a do tanque. A vaporização do sal presente na água do mar só aconteceria se atingisse 1400°C no interior do tanque, sendo assim, o sal se separa da água e fica retido no fundo do tanque para posterior recolhimento (COSTA, 2008).

Os raios solares ao chegarem à superfície de vidro com alta transparência são refletidos e absorvidos de maneira que a água no interior do tanque seja aquecida e evaporada. Uma parte da energia solar absorvida pelo telhado juntamente com a energia refletida é emitida para a água provocando o efeito estufa, que permite que a água seja aquecida a uma temperatura maior que a temperatura da cobertura. O tanque com a água troca calor com o telhado de vidro através dos processos de transferência de calor por radiação, convecção natural e transferência simultânea de calor e massa por evaporação (JORGE, 2011).

Para obter uma maior quantidade de água condensada, os processos de transferência de calor da cobertura para atmosfera e da água do tanque para a cobertura devem ser otimizados. A variação dos processos de transferência de calor está condicionada à radiação solar do local onde o equipamento está instalado, temperatura, latitude e longitude, velocidade do vento. Além disso, as características do equipamento também influenciam, como os materiais utilizados para sua construção, a espessura e inclinação do telhado, largura e profundidade do tanque (JORGE, 2011).

O material do equipamento deve ser selecionado levando em consideração seu custo-benefício, sua vida útil, resistência às variações de temperatura e corrosão, não devem ser tóxicos nem feitos de material que transmitam cheiro e gosto à água destilada. Segundo Maluf (2005), que fez uma análise comparativa entre diversos materiais candidatos à construção do tanque, como o concreto, a madeira, o vidro e a chapa de aço. Para ele, o concreto é o material mais utilizado. Apesar da possibilidade do surgimento de trincas, o tanque feito de concreto apresenta baixo custo e simplicidade de operação e manutenção.

A profundidade do tanque é inversamente proporcional à produção de água destilada. Os tanques mais rasos apresentam resultados mais eficientes que os tanques profundos, principalmente nas horas de maior índice de radiação solar. O aquecimento da água ocorre com maior lentidão e conseqüentemente sua evaporação é dificultada. Nos tanques mais rasos, a água atinge elevadas temperaturas mais rapidamente, aumentando a taxa de evaporação e a produção de destilado, porém à noite, a produção é descontinuada, pois não houve reserva de energia como aconteceria em um tanque profundo (TIWARI, 2006). Em áreas pouco povoadas, onde o consumo de água é menor, os tanques costumam ser construídos com profundidades que variam de 1,5 cm a 2,5 cm, com 2,5m de largura por comprimento de aproximadamente 100m (AL-HAYEKA, 2004).

Além do tanque, a cobertura também influencia na produtividade do processo, devendo transmitir o máximo de radiação solar para o interior do tanque. Para isso, a distância entre a cobertura de vidro e superfície da água não deve ultrapassar 7 cm, pois quanto menor a distância menor é a perda térmica por convecção, aumentando a eficiência do processo. O telhado necessita possuir melhor índice de refração e a maior transparência possível. A inclinação adequada do telhado é outra preocupação, tentando evitar o retorno das gotas de água condensada para o fundo do tanque, o valor ideal da inclinação varia de 10° a 15° (MCCRACKEN, 1985; MALUF, 2005).

A utilização do vidro temperado na cobertura se justifica pelo seu bom desempenho na produção de água destilada, além de ser resistente às altas temperaturas, porém seu custo é elevado e seu peso e espessura dificultam a transferência de calor e a construção e manutenção do equipamento. O acrílico pode substituir o vidro, resolvendo o problema do custo, porém a durabilidade e seu desempenho para armazenar calor no interior do tanque podem não ser tão eficientes quanto o vidro. A espessura de 4 mm do vidro é a mais apropriada para a construção do equipamento, visto que essa espessura permite um maior aquecimento da água, aumentando o coeficiente de transferência de calor por evaporação e por convecção, melhorando assim a eficiência do destilador bem como o aumento da quantidade de água destilada. O tamanho ideal do vidro para destiladores desse porte não deve ultrapassar 90 cm, pois elevaria o custo do equipamento (MALUF, 2005; MURUGAVEL, 2008; PANCHAL, 2011).

Na base da cobertura de vidro, é instalada uma calha de recolhimento necessária para coletar a água destilada e encaminhar a mesma para um tanque de armazenamento. Segundo Maluf 2005, o material mais indicado para construção dessa calha é o aço inoxidável, que apesar de

caro é um material que vai durar mais que os outros, além de não apresentar riscos à saúde nem gosto e cheiro à água que será destinada ao consumo da população.

O isolamento térmico é parte fundamental na construção do Destilador Solar, principalmente em locais úmidos e frios. Este deve ser colocado por debaixo do tanque e pode ser constituído de madeira, plástico, palha de coco, lã de vidro e areia. Além de barata, a areia está disposta de forma abundante nos litorais, sendo um bom material utilizado para amenizar as perdas de calor do processo, armazenando calor durante o dia e fornecendo calor para o tanque durante a noite, quando os raios solares não estão incidindo sobre o equipamento (COSTA, 2008).

Uma parcela extra de energia pode ser aplicada no tanque de água, garantindo uma maior e mais rápida evaporação, aumentando a eficiência do processo. Essa técnica se dá pela utilização de um coletor solar por aproveitamento de energia térmica das indústrias. Esse modo extra de energia é chamado de Destilação Solar Ativa. Caso nenhum modo de energia extra seja aplicado, é conhecida como Destilação Solar Passiva, que é um sistema mais economicamente viável (TIWARI, 2006).

2.2.5.2 Vantagens do Destilador Solar

As vantagens de se utilizar o Destilador Solar para a obtenção de água potável estão principalmente na simplicidade do método, sem a necessidade de equipamentos modernos nem tecnologia de ponta. Isso faz com que a operação e manutenção do equipamento sejam de fácil acesso, não precisando de mão de obra qualificada nem custos elevados com reparos e manutenção no equipamento. Além disso, o combustível utilizado para fornecer calor ao processo é gratuito e natural, sendo esse silencioso e não poluente.

Sendo assim, esse método é então o mais propício a regiões carentes, desprovidas de energia elétrica e que tenham deficiência de água potável disponível para consumo. Principalmente regiões com baixo índice pluviométrico, alta incidência de raios solares e abundância de água salobra, como é o caso das cidades nordestinas.

Se os destiladores forem construídos com um bom isolamento térmico, o calor armazenado na água permitirá que o processo ocorra também à noite, na ausência dos raios solares. A eficiência nesse período diminui, mas a produção de água destilada não é pausada. Além disso, a água produzida por esse método é a mais indicada para consumo, com menor quantidade de sais dissolvidos e menor contaminação microbológica se comparado com os outros métodos, desde que o equipamento seja operado de forma correta.

Como a água deve ser produzida próxima ao local de consumo, a instalação dos destiladores nessas regiões ainda gera empregos, aliviando a pressão em áreas urbanas e alavancando a economia local.

2.2.5.3 Desvantagens do Destilador Solar

A principal desvantagem da utilização do Destilador solar é a baixa produção. A quantidade da água destilada produzida depende da área do equipamento, gerando de três a cinco litros de água destilada por metro quadrado por dia. Sendo assim, esse tipo de método requer uma grande área de instalação do equipamento para produzir uma maior quantidade de produto por dia.

Além disso, a eficiência do método apresentado é altamente dependente das condições meteorológicas, podendo variar na quantidade de destilado produzido por dia de acordo com a intensidade da incidência de raios solares.

2.2.5.4 Análise Bibliográfica da Produção de Água Destilada Através do Destilador Solar Passivo

Há alguns anos, diversas análises experimentais e teóricas vêm sendo realizadas a fim de se obter um melhor método de dessalinização, que resulte em uma produção maior com menor custo de operação e manutenção.

Tayeb (1992) elaborou alguns métodos para dessalinizar a água do mar através de um destilador solar passivo, e constatou que o destilador coberto por telhado de vidro com uma única inclinação produz maior quantidade de água destilada do que o destilador coberto por telhado de acrílico com formato de meio cilindro.

Elkader (1998) obteve uma boa produção diária em relação aos outros autores, utilizando um destilador simples de alvenaria e cobertura de vidro, conseguindo atingir 5,6 L/dia.m² para a radiação solar incidente na cidade de El-Minia, Egito.

Tanaka (2000) comparou dois experimentos em que em um deles revestiu interna e externamente o tanque de madeira com chapas de aço inoxidáveis espelhadas, onde obteve uma quantidade de água destilada significativamente maior em relação ao tanque de madeira convencional.

Srivastava e Agrawal (2013) obtiveram melhores resultados quando acrescentaram no tanque de destilação, múltiplos absorventes porosos fabricados por tecido de juta escurecido. El-Bahi

Inan (1999) revestiu o tanque com folhas de ferro galvanizadas para produzir índices satisfatórios de água destilada por dia. Ayoub (2015) instalou um cilindro rotativo de alumínio no interior do tanque para manter o calor dentro do destilador e produzir maior destilado do que um destilador com tanque convencional.

Para Manivel (2013), utilizar um aquecedor para o telhado aumenta a eficiência do processo, pois o aquecimento do telhado aumenta a temperatura da água de alimentação e o processo de evaporação e condensação continua por algumas horas durante o período da noite.

Khare (2017) fez três experimentos onde alternou o material adicionado no fundo do tanque e concluiu ao adicionar cascalho preto no fundo do tanque aumentaria a eficiência do processo, mas não tanto quanto revestir o fundo do tanque com borracha preta. Spirandeli (2017) constatou maior produção diária de água destilada ao utilizar um tanque tipo escada, de zinco galvanizado, composto por quatro bandejas, quando comparado a um tanque convencional de alumínio nas mesmas condições.

A Tabela 1 apresenta uma comparação de diversas variações do Destilador Solar Passivo, bem como suas produções diárias. Os autores que utilizaram telhado de acrílico ou telhado de vidro de espessura maior que 4 mm para cobrir o destilador solar obtiveram resultados inferiores em comparação aos outros. O material utilizado para construção ou revestimento do tanque influenciaram na eficiência do processo, sendo que quando o tanque é revestido por material metálico as perdas de calor ficam menos recorrentes aumentando a eficiência do processo.

Tabela 1: Comparação da Produção do Destilador Solar Passivo

REFERÊNCIA	ESPECIFICAÇÕES DO DESTILADOR	LOCAL	RADIAÇÃO SOLAR (W/m ²)	PRODUÇÃO (kg/dia)
TAYEB, 1992.	Tanque 30 cm x 80 cm. Cobertura de vidro, única inclinação.	El-Minia, Egito.	17000	0,313
TAYEB, 1992.	Tanque 30 cm x 80 cm. Cobertura de acrílico, formato de meio cilindro, 30 cm de diâmetro.	El-Minia, Egito.	17000	0,258
TAYEB, 1992.	Tanque 30 cm x 80 cm. Duas coberturas de acrílico, formato de meio cilindro, 15 cm e 30 cm de diâmetro cada. Quatro coletores para água condensada.	El-Minia, Egito.	17000	0,286
TAYEB, 1992.	Tanque 30 cm x 80 cm. Cobertura de acrílico, formato de meio cilindro, 38,6 cm de	El-Minia, Egito.	17000	0,206

		diâmetro.			
ELKADER, 1998.		Telhado de vidro única inclinação 35°, espessura 3 mm. Tanque 1m ² de alvenaria.	Port Said, Egito	15700	5,6
EL-BAHI INAN, 1999.	E	Bacia 1 m ² , revestida por folhas de ferro galvanizado, 0,35 mm de espessura e moldura de madeira, acompanhada de condensador externo. Telhado de vidro única inclinação 4° e 3 mm de espessura.	Ankara, Turquia.	9500	6,52
CAPPELLETTI, 2002.		Telhado única inclinação 45°. Tanque de acrílico, 1m ² .	Itália	7000	1,8
RADHWAN, 2005.		Material de Armazenamento de Calor Latente	Arábia Saudita	-	4,9
BADRAN, 2007.		Telhado única inclinação, 32°, 4 mm. Tanque 1m ² forrado de asfalto.	Jordânia	1200	4,21
AL-KARAGHOULI, 2009.		Telhado dupla inclinação. Tanque de acrílico, 0,45 m ² .	Bahrein	800	1,44
TANAKA, 2009.		Telhado de vidro 5 mm de espessura inclinação 20° e refletor espelhado 10°. Bacia com moldura de madeira, 355 m x 343 m.	Fukuoka, Japão.	695	0,9
TANAKA, 2009.		Telhado de vidro 5 mm de espessura inclinação 20° e refletor espelhado 10°. Bacia com moldura de madeira, 355 m x 343 m, revestida interna e externamente por chapas de aço inoxidáveis espelhadas.	Fukuoka, Japão.	695	2,9
PANCHAL; SHAH, 2011.		Telhado de vidro, inclinação 30°, 12 mm de espessura. Tanque 1 m ² alvenaria.	Índia	2700	0,58
PANCHA; SHAH, 2011.		Telhado de vidro, inclinação 30°, 12 mm de espessura. Tanque 1 m ² ferro galvanizado.	Índia	2700	3,8
ARUNKUMAR et al, 2012.		Bacia 0,95 m x 0,1 m, aço maciço e 0,15 m de serragem no fundo, tanque com moldura de madeira, 4mm de espessura. Cobertura hemisférica 0,945 de diâmetro, feita de acrílico e 3 mm de espessura.	Coimbatore, Índia.	-	4,2
MANIVEL, 2013.		Aquecimento de telhado.	Tamil Nadu, Índia	-	4,5
SRIVASTAVA AGRAWAL, 2013.	E	Bacia revestida de madeira, 0,8m x 0,65m, com isolamento térmico flutuante, múltiplos absorventes porosos de tecido de juta escurecido no fundo do tanque. Cobertura de vidro 3	Allahabad, Índia	1200	2

	mm, única inclinação 24°.			
SRIVASTAVA E AGRAWAL, 2013.	Bacia revestida de madeira, 0,8m x 0,65m. Cobertura de vidro 3 mm, única inclinação 24°.	Allahabad, Índia	12000	1,4
RAJASEENIVAS AN; RAJA; SRITHAR, 2014.	Coletor plano integrado com tecido de juta e cascalho preto	Tamil Nadu, Índia	-	5,68
AYOUB, 2015.	Telhado dupla inclinação de fibra de vidro. Tanque de fibra de vidro, 0,67m x 1,5m. Apresenta cilindro rotativo de alumínio no interior do tanque	Líbano	13888	3,4
AYOUB, 2015.	Telhado dupla inclinação de fibra de vidro. Tanque de fibra de vidro, 0,67m x 1,5m.	Líbano	13888	1,16
LUNA, 2016.	Telhado dupla inclinação, 25°. Tanque de alvenaria e ferrocimento, 1,20m x 2,30 m.	Parafba, Brasil.	1827	3,28
KHARE <i>etal</i> 2017.	Bacia revestida com folha metálica, 0,8 m x 1,0 m, paredes laterais revestidas de espelho e preenchidas com areia. Cobertura de Vidro única inclinação 26°, espessura 5 mm.	Jaipur, Índia.	-	0,290
KHARE <i>et al</i> 2017.	Bacia revestida com folha metálica, 0,8 m x 1,0 m, paredes laterais revestidas de espelho e preenchidas com areia. Cobertura de Vidro única inclinação 26°, espessura 5 mm. Adicionado cascalho preto no fundo do tanque.	Jaipur, Índia.	-	0,330
KHARE <i>et al</i> 2017.	Bacia revestida com folha metálica, 0,8 m x 1,0 m, paredes laterais revestidas de espelho e preenchidas com areia. Cobertura de Vidro única inclinação 26°, espessura 5 mm. Adicionada borracha preta no fundo do tanque.	Jaipur, Índia.	-	0,340
RAJ MANOKAR, 2017.	Bacia revestida com chapa de ferro no fundo e moldura de madeira, 0,5m x 1m. Cobertura de vidro única inclinação 10° e 4 mm de espessura.	Chennai, Índia	3264	3,434
SPIRANDELI, 2017.	Telhado única inclinação, 19°. Tanque tipo escada, de zinco galvanizado, composto por 4 bandejas, 1m².	Uberaba, Brasil.	3632	4,29
SPIRANDELI, 2017.	Telhado piramidal de 4 faces, 19°. Tanque de alumínio, 1m².	Uberaba, Brasil.	3632	3,26

2.3 Proposição de configurações para aumento da produtividade

Neste capítulo são apresentadas alternativas propostas por alguns autores que garantem um melhor desempenho na obtenção de água potável através da Destilação Solar, seja destilação passiva ou ativa. Além disso, um estudo comparativo entre as melhores tecnologias utilizadas, bem como seus resultados e observações no experimento estão dispostas em uma tabela.

2.3.1 Destilador Solar Tubular (Destilador Passivo)

Estudos experimentais foram realizados entre destiladores solares tubulares velho e novo construídos com diferentes coberturas de vidro por Ahsan *et al.* (2012). O velho destilador solar é composto por uma tampa tubular e uma tampa transparente de policloreto de vinil (PVC) em ambas as extremidades da tampa, além de uma calha preta semicircular dentro dela, como mostra a Figura 8.

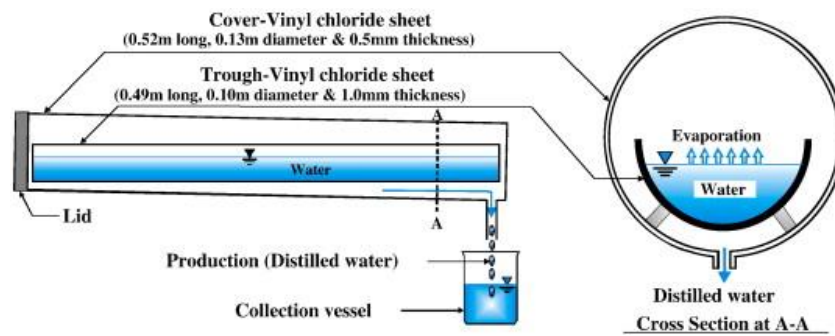


Figura 8: Destilador Solar Tubular Velho – Ahsan et al. (2012).

O novo destilador solar foi projetado para melhorar as limitações do antigo. Composto por uma estrutura com cobertura tubular revestida por um filme de polietileno e uma calha retangular mostrada na Figura 9. A estrutura foi montada com dois tubos de ferro galvanizado e um fio disposto nas direções longitudinal e transversal (em forma de espiral), respectivamente.

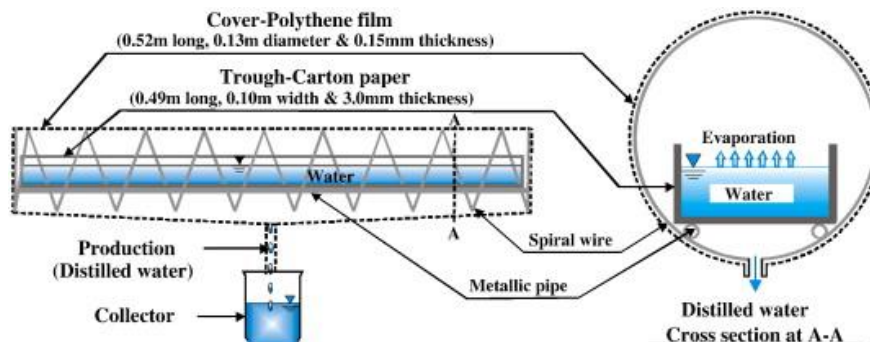


Figura 9: Destilador Solar Tubular Novo. Ahsan et al. (2012).

O autor relatou que o destilador que possuía cobertura com filme de polietileno apresentou melhor desempenho em relação ao destilador com a cobertura revestida de policloreto de vinil (PVC), por sua durabilidade, economia, leveza e facilidade de manuseio. Também a partir dos resultados experimentais, eles encontraram uma relação linear entre os coeficientes de transferência de calor total e os coeficientes de transferência de massa de evaporação.

2.3.2 Destilador Solar convencional usando aspersores de água e ventilador de arrefecimento

O efeito da integração de aspersores de água e ventilador de arrefecimento sobre o desempenho de um destilador solar convencional foi projetado como mostra a Figura 10, construído e conduzido a uma avaliação experimental.

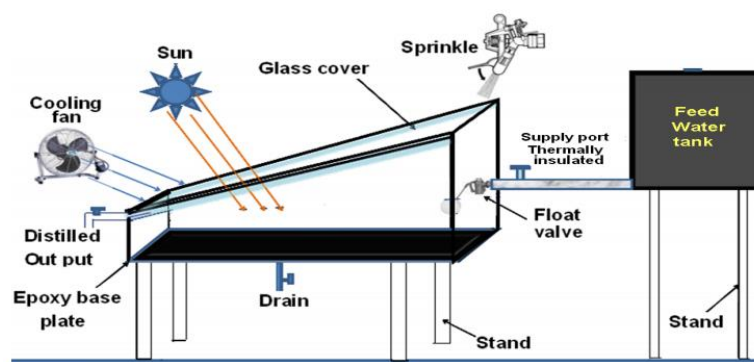


Figura 10: Destilador Solar inclinação única com aspersores de água e ventilador de arrefecimento – Ahmed e Alfaylakawi. (2012).

Para o autor, as técnicas foram adotadas a fim de diminuir a temperatura da superfície lateral da cobertura de vidro de condensação, aumentando o processo de condensação no tanque. Os resultados de seus experimentos mostram que aumentando a velocidade média do vento de 1,2 m/s para 3 m/s e 4,5 m/s, a produtividade foi aumentada em 8% e 15,5%, respectivamente. Também usando aspersores de água em intervalos predefinidos de 20 min e 10 min, a produtividade foi aumentada em 15,7% e 31,8%, respectivamente.

2.3.3 Destilador Solar multi bacia com dupla inclinação

Com o objetivo de utilizar o máximo calor dissipado, foram projetados destiladores solares multi-efeito. Nestes destiladores, a latitude de condensação é utilizada para aumentar a eficiência térmica da energia solar. Um destilador solar multi-efeito é mais produtivo do que um único efeito, já que usa energia disponível mais de uma vez. Um Destilador Solar multi bacia e dupla inclinação foi projetado por Rajaseenivasan e Murugavel. (2013). A bacia superior desta instalação foi modificada pela colocação de três tiras verticais igualmente espaçadas em ambas as encostas. O destilador formado fornece água destilada a partir de quatro válvulas de saída, tornando-a mais produtiva do que o destilador solar convencional. O esquema da instalação é representado na Figura 11.

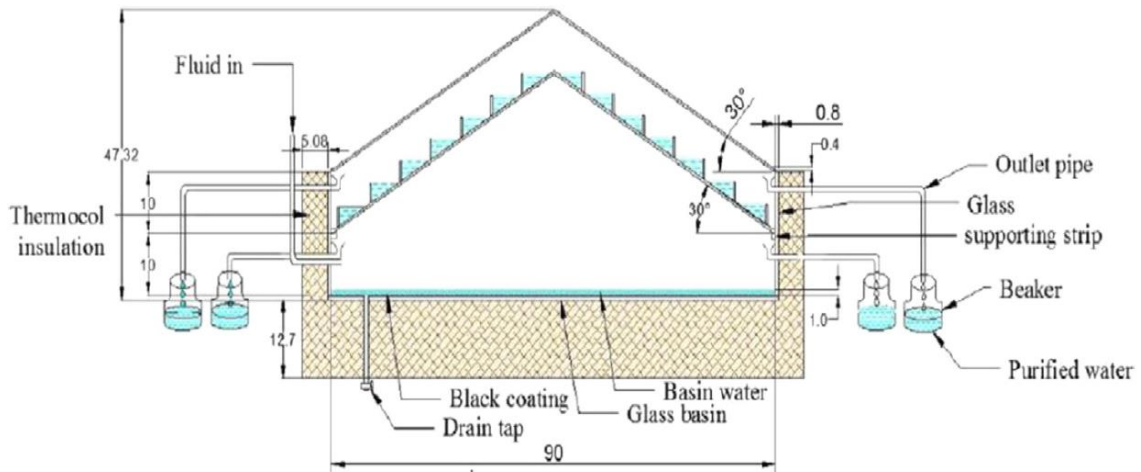


Figura 11: Destilador solar dupla bacia e inclinação - Rajaseenivasan e Murugavel (2013).

Foram comparados os resultados teóricos e experimentais da produção de uma única e dupla bacia para diferentes profundidades da água. Para todas as profundidades, o destilador de bacia dupla produz maior quantidade de destilado do que o destilador de bacia única. Ambos os destiladores proporcionam maior rendimento em menor profundidade. A bacia dupla produz quase 85% mais água potável do que a bacia única e sua eficiência é sempre maior do que a bacia única para todas as profundidades.

2.3.4 Destilador Solar tipo degrau com estabilizador vertical e esponjas.

Um destilador solar escalonado com aletas e esponja foi testado por Velmurugan et al. (2008) com o objetivo de aumentar a produtividade do destilador. Nesta configuração experimental 200 esponjas e 250 aletas são usadas e expostas superficialmente ao ar. O diagrama esquemático deste tipo de destilador é representado pela Figura 12.

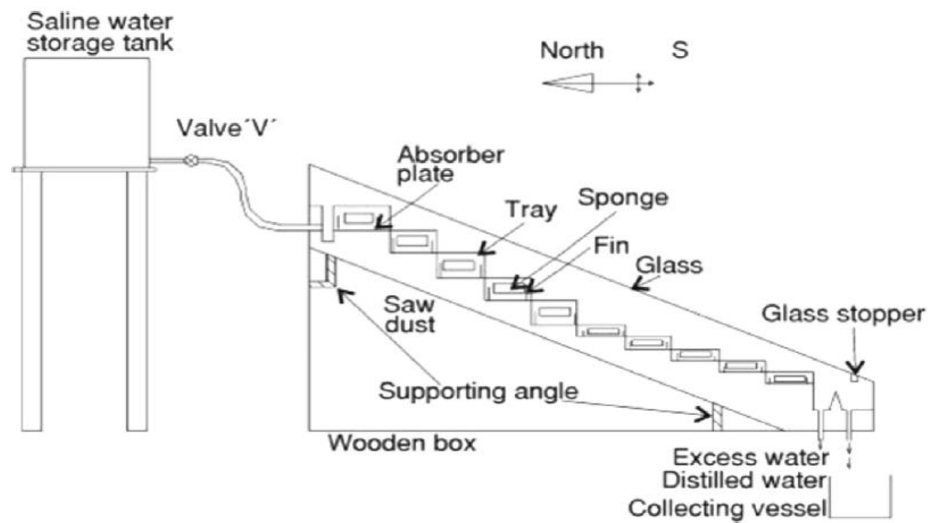


Figura 12: Destilador Solar tipo degrau com aletas e esponjas - Velmurugan et al. (2008).

A produtividade média nesta investigação foi 80% maior do que a do destilador solar convencional. A análise experimental também mostrou que a integração de um estabilizador vertical na placa da bacia produz maior evaporação do que a adição de esponjas (76% e 60,3%, respectivamente). Mas a produtividade máxima de 96% é obtida quando ambas são usadas na forma combinada.

2.3.5 Destilador Solar Multi-Efeito com fonte de calor externa

Rajan *et al.* (2014) trouxe uma nova técnica para aumentar a produtividade do destilador através da integração de multi-bacia com fonte de calor de biomassa. A bacia inferior foi equipada com um trocador de calor e separada da bacia superior por uma cobertura de vidro com uma espessura de 4 mm. A área de captação é pintada de preto para absorver a radiação solar máxima. Os pontos laterais e inferiores dos alambiques foram isolados com uma camada de isolamento de termopar de 0,004 m de espessura (0,15 W/(mK) de condutividade térmica) para reduzir as perdas de calor na lâmina. Um selante de borracha de silicone é usado para evitar o vazamento de vapor do destilador. A caldeira é tipo de tubo disparado internamente

com materiais de biomassa localmente disponíveis. As vistas internas e externas da configuração experimental são representadas pela Figura 13.

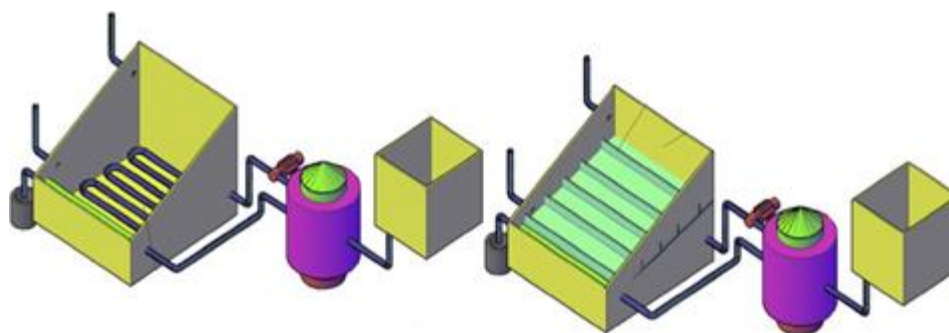


Figura 13: Destilador Solar Multi-Efeito com fonte de calor externa – Rajan *et al.* (2014).

Sendo assim, observa-se que a produtividade do Destilador aumenta com o aumento da energia alimentada pela biomassa. A produtividade desse modelo supera o destilador convencional em 73%.

2.3.6 Estudo Comparativo de técnicas de dessalinização

O estudo comparativo de técnicas de dessalinização utilizadas em destiladores solares visando a melhoria de seu desempenho pode ser observado através da Tabela 2, a partir do estudo prévio desenvolvido por Sivakumar e Sundaram (2013).

Tabela 2: Estudo comparativo das técnicas de dessalinização.

Autor	Modificações Utilizadas	Observações no Experimento	Resultados
El-Sebaili <i>et al.</i> , 2000	Placa absorvente suspensa.	18,5–20% de produtividade aumentada.	Tempo de pré-aquecimento da água de evaporação minimizado com a placa absorvente suspensa.
Naim <i>et al.</i> , 2003	Partículas de carvão.	Aumento de 15% na produtividade.	As partículas de carvão atuam como um bom meio de absorção.
Zeinab <i>et al.</i> , 2005	Leito revestido.	5–7.5% de melhoria da produtividade.	Uma camada de revestimento de bolas de vidro no leito auxilia no aquecimento da água

			parada no reservatório durante todo o dia e após o pôr do sol, aumentando a produtividade de água destilada.
Voropoulos <i>et al.</i> , 2003	Integração de um tanque de armazenamento.	Produtividade aumenta com o aumento da temperatura da água salina.	A implementação do tanque de armazenamento não é apenas para aumentar a temperatura da água salina, mas também para aumentar a diferença de temperatura entre a água salgada e a temperatura do vidro.
Naim <i>et al.</i> , 2003	Materiais de mudança de fase.	36,2% da eficiência foram alcançadas quando utilizados materiais de mudança de fase.	Utilização de material armazenador de energia, como emulsão de cera de parafina, óleo de parafina e mistura de água.
Nafey <i>et al.</i> , 2001	Borracha preta e cascalho.	Saída de água destilada é 20% maior com 10 mm de espessura de borracha preta no fundo do tanque e melhoria de 19% com 20 a 30 mm de cascalho.	Observa-se que a borracha preta e o cascalho absorvem e liberam energia solar de maneira ágil.
Akash <i>et al.</i> , 1998	Tapete de borracha preta, tinta preta e corante preto.	38%, 45% e 60% de produtividade aumentada pelo uso de tapete de borracha preta, tinta preta e corante preto, respectivamente.	A capacidade de absorção de corantes negros é maior que a de tinta preta e tapete de borracha preta.
Sakthivel <i>et al.</i> , 2010	Tecido de Juta	Aumento de 20% na capacidade de produção e 8% a mais de eficiência em comparação com um Destilador Solar convencional	O calor latente de condensação disponível entre a água salgada e a tampa de vidro é efetivamente usado pelo tecido de juta.
El-Sebaili <i>et al.</i> , 2009	Areia usada como	Com a adição de 10	A produtividade e

	meio de armazenamento de calor sensível.	kg de areia, a produtividade e a eficiência aumentam para 4,005 kg/m ² /dia e 37,8% respectivamente.	eficiência diárias dos destiladores diminuem com o aumento da massa da areia e da condutividade térmica do fundo da bacia.
Abdallah <i>et al.</i> , 2009	Materiais absorventes.	Esponjas resistentes revestidas de material metálico - 28%, esponjas não revestidas de material metálico - 43%, rochas vulcânicas - 60% mais produtividade do que o sistema convencional.	Absorção e permeabilidade de esponjas metálicas são boas propriedades que justificam a utilização das mesmas como um material absorvente em um ambiente solar.
Tiwari <i>et al.</i> , 1994	A análise térmica foi realizada para otimizar a inclinação da cobertura de vidro para obter o máximo rendimento.	Devido ao aumento da inclinação no verão e inverno, uma redução significativa no coeficiente de transferência de calor por evaporação foi observada. A inclinação ideal depende da localização e do material da cobertura.	O rendimento aumenta com o aumento da inclinação no inverno e vice-versa no verão.
Abdul Jabbar, 2011	O efeito do ângulo de inclinação da cobertura na produtividade foi revisada.	O aumento do ângulo de inclinação resulta em aumento de perdas térmicas da cobertura e diminuição do rendimento, devido ao aumento da radiação refletida.	Uma relação entre o ângulo de inclinação da cobertura e a produtividade da energia solar simples em várias estações é estabelecida juntamente com uma relação entre o ângulo de inclinação ótimo e o ângulo de latitude.
Al-Kharabsheh and Yogi Goswami, 2003	A pressão atmosférica e gravidade foram usadas para criar uma destilação a vácuo.	Produtividade do sistema convencional - 3,5 Kg/m ² /dia. Sistema modificado - 6,5 Kg/m ² /dia.	A uma profundidade de 0,04 m, a temperatura máxima de saída do coletor é igual a 61,21 °C e o produto de saída é

			1,3 kg de água e a pressão atinge um valor máximo de 4,7 kPa absoluto.
Nassar <i>et al.</i> , 2007	Sistema de dessalinização solar com base na evacuação.	303% de produtividade aumentada e taxa de desempenho 900% maior do que o sistema de salinização tipo telhado.	A concentração de intensidade solar foi feita pelo espelho côncavo e o modelo experimental é constituído por um tanque metálico elíptico localizado no foco do refletor côncavo.
Maroo and Yogi Goswami, 2009	A análise teórica foi feita para o sistema de dessalinização flash de estágio único e de dois estágios baseado na geração de vácuo passivo.	O sistema usa as forças naturais da gravidade e da pressão atmosférica para criar vácuo.	Caso I: Fonte de calor de temperatura constante, Produtividade e Relação de Desempenho para sistema de estágio único - 11,31 kg e 0,746. Sistema de estágio duplo - 13,9 kg e 1,42. Caso II: Destilador Solar com coletor, Sistema de estágio único - 5,54 kg e 0,748. Sistema de estágio duplo - 8,66 kg e 1,35.
Murugavel, 2011	Diferentes materiais de pavio e aletas.	A aleta retangular de alumínio coberta com tecido de algodão e disposta em sentido longitudinal foi mais eficaz.	Tecido de juta leve, folha de esponja, esteira de fibra de coco e pedaços de algodão descartados também foram testados.
Kabeel, 2009	Telhado em forma de pirâmide com quatro tampas de vidro.	O pavio de tecido de juta revestido com tinta preta é usado para aumentar a área da superfície de evaporação.	Produtividade de destilado modificada - 4,0 L/m ² e eficiência de 45%.
Janarthanan <i>et al.</i> , 2006	Pavio solar flutuante inclinado.	A eficiência do sistema de ciclo fechado é máxima a	A variação da eficiência do sistema de ciclo aberto

		baixa vazão de água.	depende do coeficiente de transferência de calor das superfícies do pavio para a umidade relativa e ambiente.
Hiroshi Tanaka, 2009	Pavio solar inclinado com refletor de placa externo.	O ângulo de inclinação do refletor seria menor que 25° ao longo do ano.	A quantidade diária de destilado pode ser aumentada inclinando o refletor para trás no inverno e para frente no verão.
Abdul Jabbar and Hussein, 2010	Destilador Solar com refletor interno e externo.	O Destilador solar mais produtivo no inverno é um tanque com ângulo de cobertura de 20° e um refletor interno e externo inclinado a 20°. Sua produtividade aumentaria em torno de 2,45 vezes comparado a um destilador simples sem refletores.	O rendimento diário do destilador sem refletores permaneceria quase o mesmo para qualquer ângulo de cobertura de vidro.
Garcia-Rodriguez <i>et al.</i> , 2002	Destilador flash de múltiplos estágios com taxa de desempenho de 10 e coeficiente de bomba de calor 2.	O desempenho estacionário de energia solar também foi comparado com um sistema de rastreamento solar de um eixo acoplado à bomba de calor.	O aumento percentual da produção de água doce na geração direta de vapor em comparação com as coletoras parabólicas convencionais entre 18 e 32%.
Abdallah <i>et al.</i> , 2008	(i) Espelhos refletores internos (ii) Bacia tipo degrau (iii) Sistema de rastreamento solar.	(i) Espelhos reflexivos - 30%. (ii) Bacia tipo degrau- 180% (iii) sistema de rastreamento solar - aumento de 380% na produtividade.	Espelhos reflexivos são usados para reduzir a perda de calor. Bacia tipo degrau gera 40% de aumento na área de superfície e o sistema de rastreamento solar é usado para detectar a direção onde a intensidade solar é maior.
Abdallah and Badran, 2008	Sistema de rastreamento solar.	22% de melhora na produtividade e 2% de melhora na	Sistema de rastreamento solar é utilizado para

		eficiência geral.	aumentar a temperatura da água, o que leva a uma maior produtividade.
Sahoo <i>et al.</i> , 2008	Forro da bacia escurecido com isolamento térmico.	Um revestimento de base escurecido com isolamento térmico inferior e lateral de 20 mm de espessura deu 6,05% a mais de produtividade.	A redução de flúor de 92-96% foi alcançada em comparação com amostras não tratadas.
Badran, 2007	Revestimento de asfalto e filme de resfriamento.	29% de produção aumentada pelo revestimento de asfalto e 22% melhorado pela aplicação de filme de resfriamento.	O desempenho do revestimento de asfalto foi comparado com o uso de tinta preta como o revestimento. O filme de resfriamento aumenta a diferença de temperatura entre tampa de vidro e água.
Schwarzer <i>et al.</i> , 2001	Coletor solar combinado com torre de dessalinização.	Rendimento solar modificado - 25 L/m ² dia, cinco vezes superior ao sistema solar convencional.	A água dessalinizada foi submetida a testes de laboratório e descobriu-se que estava livre de bactérias do grupo coliforme.
Dwivedi and Tiwari, 2010	Inclinação dupla integrada a um coletor de placa plana.	O destilador solar ativo de dupla inclinação sob modos naturais (2,791 kg/m ²) apresenta um rendimento 51% maior em comparação com o destilador solar passivo de dupla inclinação (1,838 kg/m ²).	A eficiência energética do destilador solar ativo de dupla inclinação é superior à eficiência energética do destilador solar passivo de dupla inclinação.
Gude <i>et al.</i> , 2012	Dessalinização sob baixa temperatura em dois estágios.	O consumo específico de energia do processo foi de 1500 KJ/Kg de energia térmica no Estado de Washington.	A planta de dessalinização com o custo do coletor solar de placa plana de baixa temperatura, é inferior a US \$ 7/m ³ .
Gude <i>et al.</i> , 2012	Dessalinização a	É necessária uma	O custo estimado

	baixa temperatura usando coletor solar.	área de coletor solar de 15 m ² com 1 m ³ de volume de Armazenamento de Energia Térmica ou 18 m ² com 3 m ³ de volume de Armazenamento de Energia Térmica para gerar a água doce.	com o Armazenamento de Energia Térmica é de US \$655 maior.
D'Antoni <i>et al.</i> , 2012	Revisão bibliográfica de Coletor Solar Térmico Compacto.	Fenômenos de transferência e armazenamento de calor, fenômenos de transferência de umidade e formação de gelo.	O conceito Coletor Solar Térmico Compacto é aplicado às demandas de água quente doméstica e demandas de aquecedor de ambiente.
Sampathkumar <i>et al.</i> , 2012	Modelo de aquecedor solar com coletor de tubos acoplado ao destilador solar.	A produtividade do coletor de tubo evacuado acoplado ao destilador solar foi dobrada quando comparada ao destilador solar simples.	A modificação aumentou o rendimento em 77%.
Mohamed <i>et al.</i> , 2011	Coletor solar de calha parabólica com o princípio umidificação – desumidificação.	O valor de eficiência térmica do coletor aumenta com o aumento da radiação solar até atingir o valor máximo e depois diminui.	O tempo de produção atinge um valor máximo de cerca de 42%, 37%, 33% e 29% durante o verão, primavera, outono e inverno, respectivamente.
Chafik, 2003	Programa de simulação dinâmica (TRNSYS).	Das 40 plantas de dessalinização levadas para o estudo de otimização, a planta de cinco estágios apresentou o melhor resultado.	A energia solar é usada para aquecer o fluxo de ar e, em seguida, o ar quente é umidificado pela água do mar e seguido pela desumidificação para obter água potável a partir dele.
Marmouch <i>et al.</i> , 2009	Princípio Umidificação-desumidificação.	O sistema com seis estágios de aquecimento e umidificação do ar, combinados com uma torre de	Quantidade máxima de água doce - mais de 37 L/m ² /dia.

		resfriamento é o melhor arranjo.	
Zhani <i>et al.</i> , 2010	Princípio Umidificação-desumidificação.	O sistema de dessalinização modificado consiste em um coletor de ar solar de placa plana, um coletor de água solar de placa plana, um umidificador, uma torre de evaporação e uma torre de condensação.	O período de retorno da instalação experimental foi encontrado em 6776 dias.
Alarcon-Padilla and Garcia-Rodriguez, 2007	Bomba absorção de calor de duplo efeito acoplado ao Destilador Multi Efeito.	Uma Bomba de Absorção de Calor é capaz de reduzir total ou parcialmente vazão mássica da água do mar resfriada para o processo Multi Efeito, diminuindo o bombeamento e o consumo da água do mar.	Três principais possibilidades consideradas 1. Bomba absorção de calor de duplo efeito acoplado ao Destilador Multi Efeito. 2. Coletores solares de temperatura média conectados à unidade Multi Efeito. 3. Coletores solares de baixa temperatura ligados à unidade Multi Efeito.
Palenzuela <i>et al.</i> , 2011	Plantas de Energia e Dessalinização Integradas.	Configuração do sistema: destilação multi-efeito de baixa temperatura, compressão de vapor térmico, juntamente com uma planta de Concentração de Potência Solar e osmose reversa.	A combinação de uma planta de osmose reversa e concentração de potencia solar tem uma eficiência melhor que as plantas com unidades multi efeito. A combinação de destilação multi-efeito a baixa temperature e compressão de vapor térmico é mais eficiente termodinamicamente combinadas.
Shaobo <i>et al.</i> , 2008	Tecnologia de pinça.	Os ganhos da taxa de saída repousa sobre a faixa de temperatura da destilação flash	A tecnologia Pinça é um método gráfico de identificação de medidas de eficiência

		multi estagio.	energética de interesse técnico e econômico.
Al-Hinai <i>et al.</i> , 2002	Destilador Solar de efeito único e duplo.	Produtividade do Destilador Solar único efeito - 4,15 kg/m ² /dia e Destilador Solar duplo efeito - 6,1 kg/m ² /dia.	A bacia rasa, o ângulo de inclinação da cobertura de 23°, a espessura de isolamento de 0,1 m e o revestimento de asfalto da placa solar foram os melhores parâmetros de projeto para ambos os destiladores solares.
Hawlader <i>et al.</i> , 2004	Dessalinização de bomba de calor assistida por energia solar.	A taxa de desempenho de bombas de calor situa-se entre 0,77 a 1,15 e o coeficiente de desempenho fica na faixa de 5,0 e 7,0.	A velocidade do compressor (1800 rpm) permitiu que o sistema produzisse 88,4% de eficiência.
Mari <i>et al.</i> , 2007	Destilador Solar tipo telhado.	A instalação do Destilador Solar tipo telhado diminui a radiação solar na estufa em 52%.	O Destilador Solar apresenta um duplo objetivo de produzir água destilada e atuando como uma cobertura de radiação para a área de cultivo.
Kumar E Bai, 2008	Com e sem condensação nas paredes laterais.	Foi analisado o desempenho de diferentes amostras, como água da torneira, água do mar e resíduos da indústria de laticínios.	Adotando condensação nas paredes laterais - 1,4 L/m ² /dia de produtividade e 30% de eficiência foram alcançados.
Dwivedi and Tiwari, 2009	Destilador Solar Passivo de telhado com única e dupla inclinação.	A única inclinação é melhor (499,41 L/m ²) em comparação com a inclinação solar dupla (464,68 L/m ²).	Os coeficientes de transferência de calor convectivos para destiladores solares de inclinação simples e dupla são de 1.463 W/m ² e 1.923 W/m ² respectivamente.
El-Sebaii <i>et al.</i> , 2008	Destilador Solar integrado com uma lagoa solar rasa.	Com a lagoa, a média anual de produtividade diária	A eficiência diária é 43,80% maior com a lagoa solar rasa.

		é 52,36% maior.	
Abdul Jabbar <i>et al.</i> , 2009	Correlações de desempenho.	Os principais parâmetros que regem a produtividade do destilador solar são a profundidade da água salgada, a radiação solar e o ângulo de inclinação da cobertura.	A produtividade do destilador é influenciada pela profundidade da água salgada é de até 33%. Utilizando uma cobertura com apenas um ângulo de inclinação, a produtividade pode chegar em 63%. O rendimento do destilador aumentou em 20% devido à adição de corante solúvel escuro à salmoura.
Nafey <i>et al.</i> , 2010	Programa de Modelagem desenvolvido pelo Matlab / Simulink.	Para desenvolver o projeto conceitual de novas configurações em dessalinização solar, o programa de modelagem Matlab / SimuLink pode ser usado.	O código projetado pode converter as linguagens de programação, como Visual Basic, Visual C, Visual C ++ e Visual Fortran, e as variáveis de planta também são transformáveis.
Reddy <i>et al.</i> , 2012	Destilação solar multi estágio de evacuação.	Devido à fina camada de água nos estágios, o rendimento do destilado aumenta com a diminuição do fluxo de massa. Diminuindo ainda mais a taxa de fluxo de massa, o rendimento do destilado diminui.	Mais adequado para as demandas rurais e urbanas na faixa de 10 a 30 Kg/m ² /dia.
Ahsan <i>et al.</i> , 2012	Destilador Solar Tubular antigo e novo.	Material de revestimento usado no Destilador Solar Tubular antigo - folha de cloreto de vinil. Destilador Solar Tubular novo - filme de polietileno.	O custo de fabricação e o peso do Destilador Solar Tubular novo foram reduzidos em 92% e 61% em relação ao antigo, respectivamente.
Tiwary <i>et al.</i> , 1985	Destilador Solar Multi Pavio.	A produtividade do destilador solar	Destilador Solar é adequado para:

		menor que 1000 L/dia é considerada como sistema de pequena escala.	- sistema de grande escala - concreto com revestimento reforçado com fibra preta - sistema de pequena escala - pavio de plástico reforçado com fibra.
Dev <i>et al.</i> , 2011	Destilador Solar de Absorção Invertida.	Um Destilador Solar de Absorção Invertida contém um refletor curvado dentro da bacia, utilizado para aquecer da superfície até o fundo do interior da bacia.	A profundidade máxima da água deve ser 0,03 m para o Destilador Solar de Absorção Invertida.
Dev e Tiwari, 2012	Coletor Tubular de evacuação acoplado ao Destilador Solar.	Coletor Tubular de evacuação acoplado ao Destilador Solar fornece água quente e potável.	Rendimento do destilador solar convencional - 327 kg/m ² /ano. Rendimento do Destilador Solar com Coletor Tubular de evacuação acoplado - 630 kg/m ² /ano.
Bassam <i>et al.</i> , 2001	Telas de tamanhos diferentes colocadas na bacia.	Os efeitos da cor da tela, posição, número de telas, cor da parede lateral e corante na água da bacia também foram investigados.	O aumento na produção diária do destilador foi de 11 a 103% em comparação com uma instalação sem telas nas mesmas condições.
El-Zahaby <i>et al.</i> , 2011	Sistema de pulverização transversal recíproca usado no Destilador Solar.	A utilização do sistema de pulverização, permite administrar a profundidade da água como uma fina película de água salina restabelecida, de uma maneira particular, no destilador solar.	Dentro de um período de 10 h de trabalho 6,355 L/m ² de água potável foi produzida com alta eficiência de 77,35%.
Kianifar <i>et al.</i> , 2012	Sistema de dessalinização solar em forma de pirâmide.	Durante o verão, a unidade ativa apresenta maior eficiência que a	A análise econômica mostra uma redução considerável no custo de produção da água

		passiva, enquanto no inverno não há diferença considerável entre a eficiência das unidades. A eficiência é maior quando a lâmina d'água na bacia é menor.	(8–9%) quando o sistema ativo é usado.
Abdullah, 2013	Degrau do Destilador Solar na profundidade de 5 mm.	O ar quente de um aquecedor solar para Destilador Solar tipo Degrau aumenta a temperatura da água salina e a técnica de arrefecimento da cobertura de vidro aumenta a diferença de temperatura entre a água salgada e a temperatura exterior do vidro.	A eficiência do destilador solar alcançada é de 65% e 53% pela adaptação da técnica adotada separadamente e foi 112% superior ao sistema de destilador solar convencional quando ambas as técnicas incorporaram degraú no Destilador Solar.
Arunkumar <i>et al.</i> , 2012	Destilador Solar Hemisférico.	A área de superfície do Destilador Solar Hemisférico é maior que do Destilador Solar de única inclinação.	A variação do rendimento de destilado é de 3,58 a 3,68 L/m ² /dia sem resfriamento e de 4,18 a 4,2 L/m ² /dia com resfriamento.
Ziabari <i>et al.</i> , 2013	Destilador Solar tipo cascata.	A fina camada de água na placa absorvente ajudou a evaporação da água salobra e melhorou a produtividade.	A produção média de água doce para Destilador Solar tipo cascata é de cerca de 6,7 L/m ² /dia, o que mostra um aumento de 26% em comparação com Destilador Solar convencional.
Omara <i>et al.</i> , 2013	Degrau do Destilador Solar (5 mm de Largura e 120mm de profundidade)	A produtividade dos destiladores solares modificados com refletores é 75% maior do que a convencional.	A eficiência diária do destilador modificado com refletores internos e destilador convencional é de aproximadamente 56% e 34% respectivamente.
Rai <i>et al.</i> , 1990	O efeito da massa de	O desempenho do	A adição de sal

	<p>água na bacia, a salinidade da água, o filme de destilação, termossifão e a circulação forçada da água da bacia foram estudados.</p>	<p>destilador foi melhor quando houve chuvas de pequena duração e depois o céu estava claro.</p>	<p>aumenta a tensão superficial e, conseqüentemente, diminui a taxa de evaporação. O rendimento da operação no modo de circulação forçada é 50% maior do que o modo termossifão e 120% mais do que o convencional.</p>
Singh <i>et al.</i> , 1995	<p>Efeito da orientação no desempenho.</p>	<p>A eficiência térmica instantânea aumenta com o aumento da inclinação devido ao aumento da radiação solar na superfície inclinada.</p>	<p>O rendimento máximo de um destilador solar de inclinação dupla foi atingido na inclinação da cobertura de vidro 55° durante o período de inverno para as condições climáticas de Delhi.</p>
Singh e Tiwari, 2005	<p>Performances mensais e anuais de destiladores solares ativos e passivos foram estudadas para cinco estações meteorológicas.</p>	<p>A radiação solar é um dos parâmetros meteorológicos e varia dependendo da latitude.</p>	<p>(i) O rendimento anual é máximo quando a inclinação da cobertura do vidro de condensação é igual à latitude do espaço. (ii) A inclinação ideal do coletor para um coletor de placa plana é 28,58°.</p>
Kumar <i>et al.</i> , 2000	<p>Otimização da cobertura de vidro e inclinação do coletor.</p>	<p>A inclinação da cobertura de vidro do destilador solar única inclinação acoplada ao coletor de placas planas variou de 15° a 45° para as condições climáticas de Delhi.</p>	<p>Inclinação ideal da tampa de vidro – 15°. Inclinação do coletor de placa plana – 20°.</p>
Akash <i>et al.</i> , 2000	<p>Destilador Solar com vários ângulos de inclinação de coberturas 15°, 25°, 35°, 45° e 55°.</p>	<p>Um ótimo ângulo de inclinação da cobertura para a produção de água foi de 35°.</p>	<p>O efeito da salinidade da água na dessalinização solar foi estudado e descobriu-se que a produção de água diminui com a</p>

			salinidade.
Tripathi e Tiwari, 2004	Fracionamento Solar usando AUTOCAD 2000.	A mudança na altura da parede para uma determinada área da bacia e a largura do destilador para uma determinada altura afeta a produção diária.	Devido ao aumento das perdas do tanque para o ar ambiente, o consumo diário diminui com o aumento da largura do destilador solar.
Zurigat e Abu-Arabi 2004	O efeito da velocidade do vento na produtividade diária do destilador solar.	A espessura da água para cobrir a primeira cobertura de vidro e a vazão mássica da água que entra no segundo efeito tem um efeito marginal sobre a produtividade do destilador generativo.	Constatou o aumento da produtividade em mais de 50%, aumentando a velocidade do vento de 0 para 10 m/s.

Fonte: SIVAKUMAR, SUNDARAM; 2013 – (Modificado).

3 MODELAGEM MATEMÁTICA

Este capítulo apresenta as características do Destilador Solar utilizado e os mecanismos que atuam no Destilador Solar Passivo, para o desenvolvimento da modelagem matemática para dessalinizar a água, para posterior simulação no programa computacional EES[®]. Esta simulação é necessária para realização de uma análise paramétrica de um Destilador Solar capaz de produzir maior quantidade de água potável em um menor intervalo de tempo e que seja economicamente viável.

3.1 Método de Dessalinização Proposto

O método de dessalinização proposto é representado por um Destilador Solar Passivo, representado pela Figura 14. O tipo de Destilador foi escolhido observando-se as necessidades e condições presentes em uma região árida, subdesenvolvida e com elevado número de litorais.

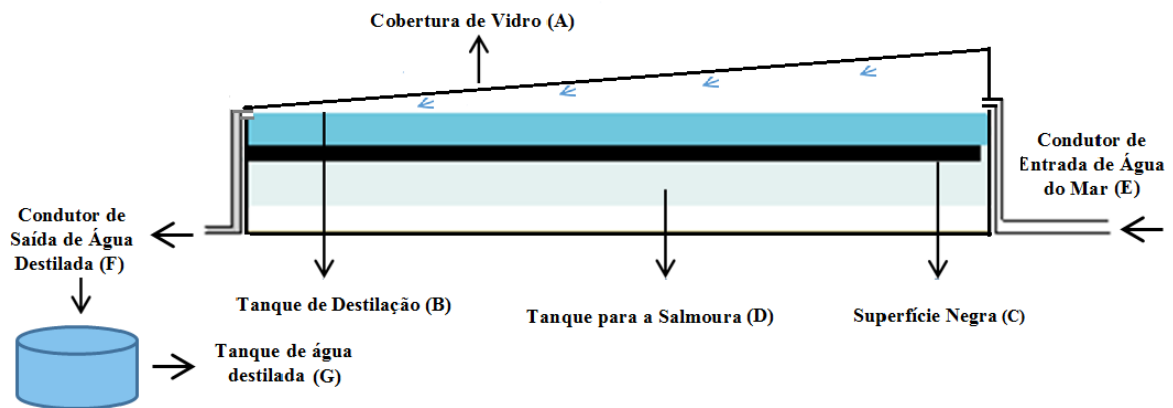


Figura 14: Destilador Solar Passivo Proposto.

O equipamento apresenta Cobertura de Vidro, Figura 14 (A) contendo única inclinação, visto que a região metropolitana de Fortaleza encontra-se em uma zona de baixa latitude, sendo esta equivalente a $-3,72^\circ$. Assim o equipamento será capaz de absorver a maior quantidade possível de raios solares durante o dia inteiro.

O Tanque de Destilação, Figura 14 (B) é confeccionado por tijolos maciços e assentamento feito com argamassa, capazes de suportar altas temperaturas sem perder suas propriedades físico-químicas, tanto que são utilizados para a construção de lareiras e chaminés. Além disso, possuem baixo coeficiente de dilatação térmica, alta resistência à compressão, corrosão, impactos e choques térmicos. O tanque ainda será pintado de preto, assim a Superfície Negra, Figura 14 (C) irá ajudar no aumento da absorção de radiação solar.

Por baixo do tanque de destilação, será necessário um Tanque para a Salmoura, Figura 14 (D), onde a mesma será drenada e encaminhada para o mar. Além disso, faz-se necessário um Condutor de Entrada da Água do Mar, Figura 14 (E) e um Condutor de Saída de Água Destilada, Figura 14 (F). Logo em seguida, um Tanque de Água Destilada, Figura 14 (G) será instalado para recolher e armazenar a água potável.

Para aumentar a produtividade de água destilada, o foco principal será no aumento da quantidade de água evaporada, porém todas as outras formas de transferência de energia de dentro do tanque para fora devem ser eliminadas. As equações do balanço de energia de cada componente são baseadas nas suas temperaturas médias e são desenvolvidas para a modelagem matemática do Destilador Solar Passivo proposto.

Alguns parâmetros do Destilador serão fixados para auxiliar na simulação e na análise paramétrica, como as dimensões e o material do tanque e a espessura e o material da

cobertura. Inicialmente, a altura da coluna de água dentro do tanque será de 0,01 m ($H_{\text{bacia}} = 0,01$ m), o tanque terá uma largura de 20 m ($L_{\text{bacia}} = 20$ m) e uma profundidade de 3 m ($W_{\text{bacia}} = 3$ m). A cobertura será de vidro com espessura 4 mm ($\alpha_c = 0,07$) e o material utilizado para a construção do tanque será o concreto ($k_{\text{isol}} = 0,6$). A análise paramétrica será realizada alterando um dos parâmetros mantendo todos os demais fixos, assim pode-se concluir qual o desempenho do Destilador a partir das características específicas do mesmo.

3.2 Equações da Modelagem Matemática

Para que possam ser calculadas as diversas temperaturas presentes no Destilador Solar instalado, faz-se necessária a resolução de algumas equações de balanço de energia presentes neste capítulo.

3.2.1 Balanço de Energia na Cobertura

A Figura 15 apresenta o balanço de energia na cobertura.

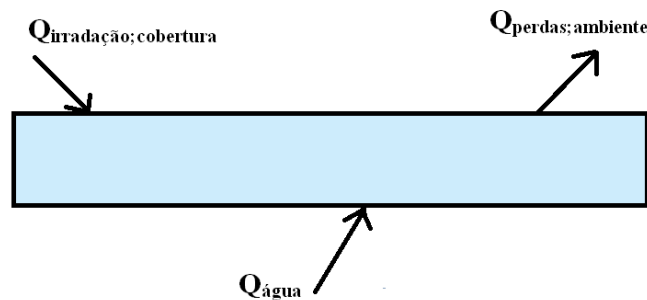


Figura 15: Balanço de Energia na Cobertura.

A equação de balanço térmico para a cobertura da unidade é representada pela Equação 1.

$$Q_{\text{irradiação; cobertura}} + Q_{\text{água}} = Q_{\text{perdas; ambiente}} \quad (1)$$

O calor irradiado sobre a cobertura é representado pela Equação 2.

$$Q_{\text{irradiação; cobertura}} = \alpha_c I_s A_c \quad (2)$$

Onde:

α_c = absorvidade da cobertura;

I_s = radiação solar [W/m^2];

A_c = área da cobertura [m^2];

O calor da água é representado pela Equação 3.

$$Q_{\text{água}} = h_{tw}(T_w - T_c)A_b \quad (3)$$

Onde:

h_{tw} = coeficiente total de transferência de calor [$W/(m^2K)$];

T_w = temperatura da água [K];

T_c = temperatura da cobertura [K];

A_b = área da bacia [m^2];

As perdas de calor para ambiente são calculadas pela Equação 4.

$$Q_{\text{perdas,ambiente}} = h_{1g}(T_c - T_a)A_c \quad (4)$$

h_{1g} = Coeficiente de transferência de calor convectivo e radiativo [$W/(m^2K)$];

T_a = Temperatura ambiente [K].

Para Dunkle (1961), coeficiente total de transferência de calor da superfície da água para a cobertura é representado pela soma dos coeficientes de radiação, coeficiente de convecção natural e coeficiente de evaporação, que representa a transferência de calor no interior do tanque, demonstrado pela Equação 5.

$$h_{tw} = h_{rw} + h_{cw} + h_{ew} \quad (5)$$

Onde:

h_{rw} = coeficiente de radiação [$W/(m^2K)$];

h_{cw} = coeficiente de convecção [$W/(m^2K)$];

h_{ew} = coeficiente de evaporação [$W/(m^2K)$].

O coeficiente de radiação e a condensação que ocorre da mistura de ar e vapor para a cobertura é calculado pela Equação 6 (DUNKLE, 1961).

$$h_{rw} = \varepsilon_{eff}\sigma(T_w^2 + T_c^2)(T_w + T_c) \quad (6)$$

Onde:

ε_{eff} = emissividade efetiva;

σ = constante de Stefan-Boltzmann [$W/(m^2K^4)$].

A emissividade efetiva pode ser calculada pela Equação 7 (DUNKLE, 1961).

$$\varepsilon_{eff} = \left[\frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1 \right]^{-1} \quad (7)$$

Segundo Dunkle (1961), o coeficiente de convecção natural representa a transferência de calor por convecção que ocorre a partir da mistura de ar e vapor para a cobertura. O coeficiente de convecção natural é calculado pela Equação 8.

$$h_{cw} = 0,884 \left[T_w - T_c + \frac{(P_w - P_c)T_w}{268,9 \times 10^3 - P_w} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

Onde:

P_w = pressão da água [Pa];

P_c = pressão da cobertura [Pa].

As pressões parciais de vapor de água P_w e P_c em função da temperatura podem ser obtidas a partir da Equação 9 e Equação 10 (DUFFFIE E BECKMAN, 1991).

$$P_w = \exp \left[25,317 - \frac{5144}{T_w} \right] \quad (9)$$

$$P_c = \exp \left[25,317 - \frac{5144}{T_c} \right] \quad (10)$$

O coeficiente de evaporação ocorre do tanque para a mistura de ar e vapor e pode ser representado pela Equação 11 (DUNKLE, 1961).

$$h_{ew} = 16,273 \times 10^{-3} \times h_{cw} \times \frac{P_w - P_c}{T_w - T_c} \quad (11)$$

3.2.2 Balanço de Energia da Água

A Figura 16 apresenta o balanço energia da água.

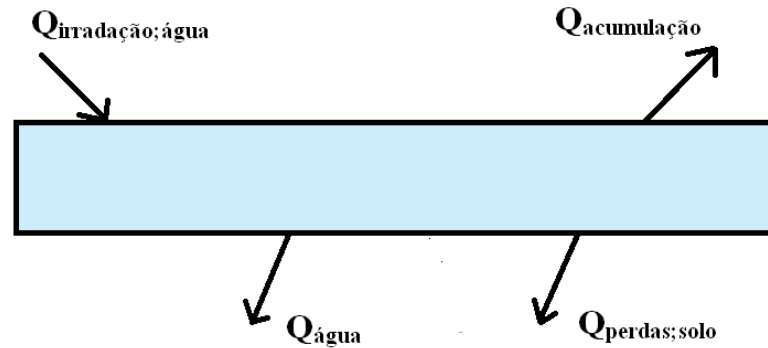


Figura 16: Balanço de Energia da Água.

O balanço energético para a água deve ser representado pela Equação 12 (DUFFFIE E BECKMAN, 1991).

$$Q_{\text{irradiação; água}} = Q_{\text{acumulação}} + Q_{\text{água}} + Q_{\text{perdas; solo}} \quad (12)$$

O calor de irradiação sobre a água é representado pela Equação 13.

$$Q_{\text{irradiação; água}} = \alpha_w(1 - \alpha_c)I_s A_b \quad (13)$$

Onde:

α_c = absortividade da cobertura;

α_w = absortividade da água.

O calor de acumulação é calculado pela Equação 14.

$$Q_{\text{acumulação}} = m_w c p_w \left[\frac{dT_w}{dt} \right] \quad (14)$$

Onde:

$c p_w$ = calor específico da água [Ws/(kgK)];

m_w = massa da água [kg].

O calor perdido para o solo é representado pela Equação 15.

$$Q_{\text{perdas; solo}} = U_s(T_w - T_a)A_b \quad (15)$$

Onde:

U_s = Coeficiente de perdas de calor para o solo [W/(m²K)].

O coeficiente de perdas de calor para o solo é calculado pela Equação 16.

$$U_s = U_b + U_{lat} \quad (16)$$

Onde:

U_b = Coeficiente de perdas de calor para o solo pelo fundo [W/(m²K)];

U_{lat} = Coeficiente de perdas de calor para o solo pela lateral [W/(m²K)].

O coeficiente de perdas de calor para o solo pelo fundo é calculado pela Equação 17.

$$U_b = \frac{k_{isol}}{e_{isol;fundo}} \quad (17)$$

Onde:

k_{isol} = coeficiente de isolamento [W/(mK)];

$e_{isol;fundo}$ = espessura do isolamento do fundo [m].

O coeficiente de perdas de calor para o solo pela lateral é calculado pela Equação 18.

$$U_{lat} = \frac{k_{isol}A_{lat}}{e_{isol,lat}A_b} \quad (18)$$

Onde:

$e_{isol;lateral}$ = espessura do isolamento da lateral [m];

A_{lat} = Área lateral da bacia [m²].

3.2.3 Massa Evaporada

A quantidade de massa evaporada pode ser representada tanto pela Equação 19 como pela Equação 20.

$$\dot{q}_{ew} = \dot{m}_{ew}h_{fg} \quad (19)$$

$$\dot{q}_{ew} = A_c h_{ew}(T_w - T_c) \quad (20)$$

Onde:

h_{fg} = Calor latente de vaporização de água [J/kg].

A quantidade de água destilada produzida deve então ser calculada pela Equação 21 (DUFFFIE E BECKMAN, 1991).

$$\dot{m}_{ew} = \frac{A_c h_{ew} (T_w - T_c)}{h_{fg}} \quad (21)$$

3.2.4 Eficiência

A eficiência térmica global do Destilador Solar Passivo seria então a razão entre o somatório da quantidade de água destilada produzida no dia multiplicada pelo calor latente de vaporização da água e o somatório da radiação solar que incide na área da cobertura ao longo de um dia e pode ser calculada a partir da Equação 22 (DUFFFIE e BECKMAN, 1991).

$$\eta = \frac{\sum \dot{m}_{ew} h_{fg}}{\sum (I_s A_c)} \quad (22)$$

3.2.5 Variáveis Acessórias

As variáveis acessórias dependem da geometria proposta do destilador. Para um tanque retangular, a massa de água presente na bacia é representada pela Equação 23.

$$m_w = \rho_w V_{bacia} \quad (23)$$

O volume da bacia é calculado pela Equação 24.

$$V_{bacia} = W_{bacia} L_{bacia} H_{bacia} \quad (24)$$

A área da bacia é calculada pela Equação 25.

$$A_b = W_{bacia} L_{bacia} \quad (25)$$

A área da cobertura é representada pela Equação 26.

$$A_c = A_b \quad (26)$$

A área lateral da bacia é calculada pela Equação 27 e Equação 28.

$$A_{lat} = P_{lat} H_{bacia} \quad (27)$$

$$P_{lat} = 2(L_{bacia} + W_{bacia}) \quad (28)$$

3.2.6 Propriedades

$\rho_w = \text{massa específica da água} = 1000 \text{ kg} / \text{m}^3$.

$\varepsilon_c = \text{emissividade da cobertura (vidro, 4 mm)} = 0,9$

$\varepsilon_w = \text{emissividade da água} = 0,97$

$\alpha_c = \text{absorvidade da cobertura} = 0,07$

α_w = absorvidade da água = 0,8

k_{isol} = coeficiente de isolamento (alvenaria) = $0,6 \text{ W/mK}$

$e_{isol;fundo}$ = espessura do isolamento do fundo = $50 \times 10^{-3} \text{ m}$

$e_{isol,lat}$ = espessura do isolamento da lateral = $25 \times 10^{-3} \text{ m}$

h_{fg} = calor latente de vaporização de água $2346,6 \times 10^3 \text{ J/kg}$

A modelação da radiação solar, da temperatura ambiente e da velocidade do vento será realizada pelo estudo das condições climatológicas da cidade de Fortaleza. Os dados meteorológicos foram coletados de um arquivo *Typical Meteorological Year (TMY)*, que é um agrupamento de dados meteorológicos selecionados para um local específico, listando valores horários da radiação solar e elementos meteorológicos durante um período de um ano.

3.3 Sistema Computacional Utilizado

O software aplicativo *Engineering Equation Solver*[®] (EES) será utilizado para o cálculo do modelo numérico a ser desenvolvido. O EES é capaz de resolver múltiplas equações envolvendo funções termodinâmicas de variadas propriedades como temperatura, entalpia, entropia, condutibilidade térmica e pressão. Neste programa serão resolvidas as múltiplas equações algébricas propostas, bem como equações diferenciais, equações com variáveis complexas, regressão linear e não-linear, além de fornecer análises, tabelas capazes de calcular simultaneamente o resultado de uma ou mais equações para diversos valores de uma dada variável e gerar gráficos ou obter equações por regressão linear, características fundamentais para avaliação do método de dessalinização proposto.

O principal objetivo dessa simulação é fazer uma análise paramétrica das propriedades da instalação, para assim chegar a um modelo de Destilador Solar que produza o maior volume de água destilada em menor quantidade de tempo. Para isso, a simulação será realizada variando os valores do comprimento, largura e profundidade do tanque, inclinação e espessura da cobertura e altura da lâmina de água.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo é apresentada a análise paramétrica de algumas características do Destilador Solar Passivo, que foi realizada através dos resultados da simulação no *software* EES, além de alternativas propostas por alguns autores que garantem um melhor desempenho na obtenção de água potável através da Destilação Solar.

4.1 Altura da Coluna de Água no Tanque

Foram consideradas três alturas distintas da coluna de água presente em um Destilador Solar, visando à análise da produção total de água destilada para o dia 17 de janeiro, dia típico de verão. Os outros parâmetros e características do Destilador foram mantidos. Esta análise é representada pela Figura 17.

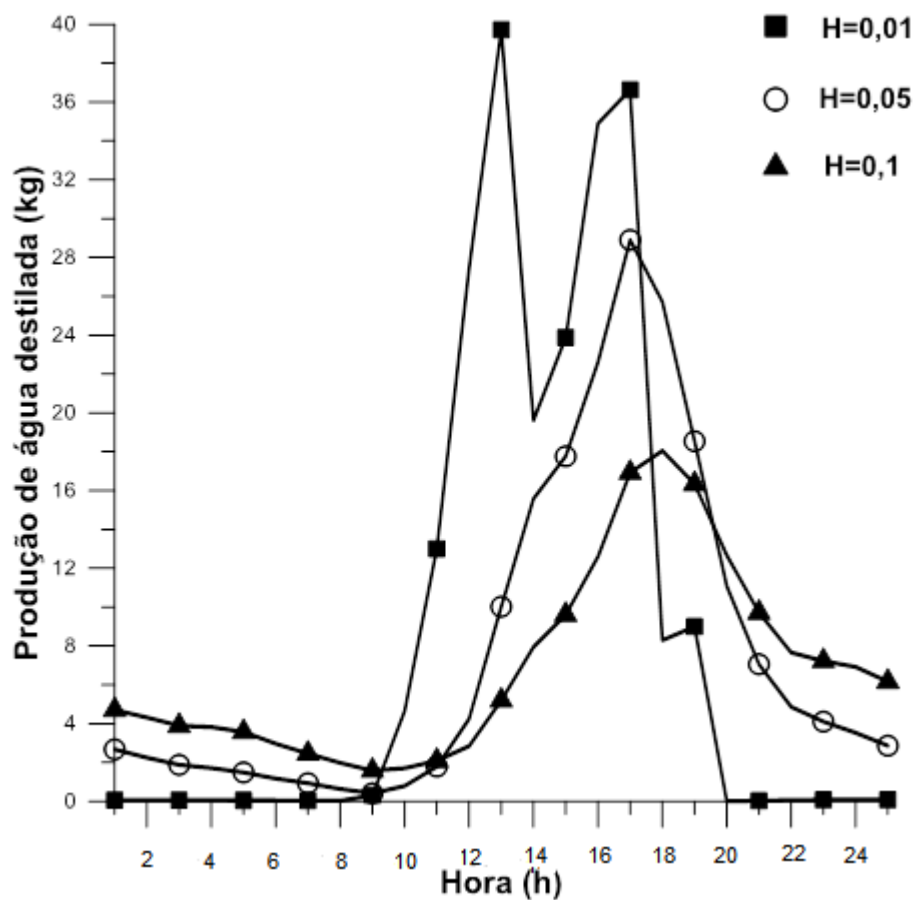


Figura 17: Produção horária de água destilada.

Considerando um dia típico de verão às 12 horas, quando ocorre maior índice de radiação solar, a produção de água destilada é de 6,91 kg ($\dot{m}_{ew} = 6,91$ kg) para um Destilador que possui a coluna de água de 0,1 m ($H_{\text{bacia}} = 0,1$ m). Utilizando o mesmo Destilador no mesmo dia e horário, porém com a altura da coluna de água medindo 0,05 m ($H_{\text{bacia}} = 0,05$ m), a produção de água destilada é de 16,88 kg ($\dot{m}_{ew} = 16,88$ kg). Quando considerado um Destilador com a altura da coluna de água de 0,01 m ($H_{\text{bacia}} = 0,01$ m) a produção de água destilada aumenta para 39,72 kg ($\dot{m}_{ew} = 39,72$ kg).

Pode-se observar então que quanto menor é a altura da coluna de água dentro do tanque, maior é a produção de água destilada. Isso se deve ao fato de que quanto mais alta é a coluna de água dentro da bacia, maior é a distância entre a superfície da água salina a ser aquecida e o fundo da bacia, prejudicando a transferência de calor e diminuindo a eficiência do processo.

4.2 Material e Espessura da Cobertura

Segundo Elango (2015), podem ser utilizados diversos tipos de materiais de superfície transparente além do vidro simples, como o vidro 6 mm ou o acrílico simples e refletido. Comparou-se a eficiência da produção de água destilada durante o período solar do dia 17 de janeiro. Nesta análise, o parâmetro variado foi o material e a espessura da cobertura, onde cada tipo apresenta um valor para a absorvidade da cobertura. A eficiência é apresentada considerando três tipos de coberturas para o Destilador Solar representado pela Figura 18.

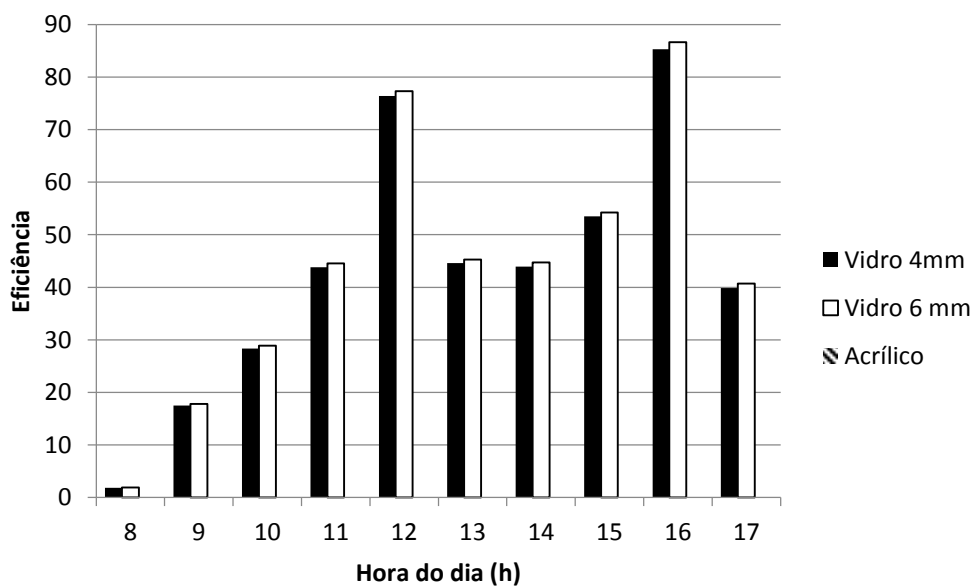


Figura 18: Eficiência do destilador para diversas coberturas.

Como se pode observar na Figura 18, o vidro é o material que tem uma melhor eficiência na produção de água destilada quando se comparada ao acrílico. Nesta análise o Destilador padrão proposto no trabalho, possuindo cobertura de vidro 4 mm apresentou uma produção de água destilada 31,2% maior em relação ao Destilador construído com cobertura de acrílico. O acrílico é um material também muito utilizado na cobertura para construção de um Destilador Solar, por ser um material de custo inferior ao vidro.

A cobertura de vidro possuindo espessura 6 mm por sua vez apresentou melhores resultados em relação ao Destilador proposto, com a cobertura de vidro 4 mm. O vidro de maior espessura tem custo elevado, mas produz maior quantidade de água destilada por hora quando se comparada ao vidro de menor espessura, porém a diferença de produção é pequena quando se comparada ao custo. Nesta análise, o vidro 6 mm apresentou produção 1,16% maior em relação ao vidro 4 mm.

4.3 Largura do Tanque

A largura do tanque, também influencia na produção de água destilada através de um Destilador Solar Passivo. A Figura 19 apresenta a comparação da produção de água potável para três tamanhos diferentes de tanque.

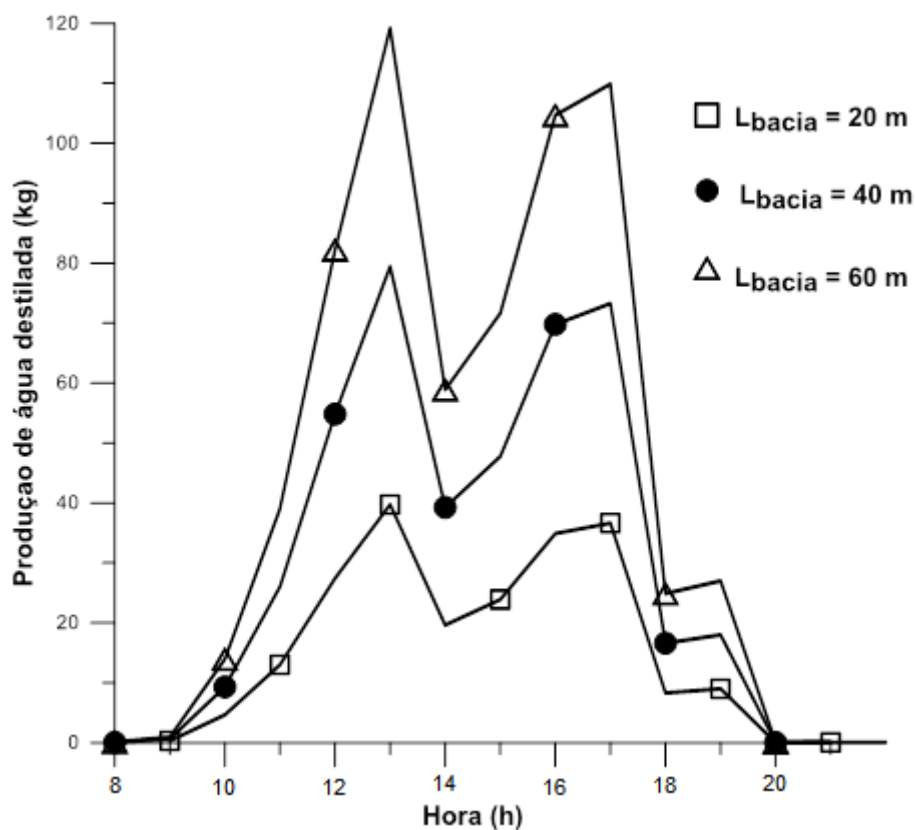


Figura 19: Produção horária dos Destiladores Solares.

Como mostra a Figura 19, quanto maior a largura do tanque, maior quantidade de água potável o Destilador Solar será capaz de produzir, comprovando a necessidade de um local de maior amplitude para a construção do Destilador Solar. Este parâmetro influencia na Equação 24, onde quanto maior é a largura do tanque maior será o volume de água a ser destilada.

Neste caso, considerando o horário de maior radiação solar ($H=12$ h) o tanque com largura igual a 60 metros ($L_{\text{bacia}}=60$ m) apresenta uma produção de água destilada 50,05 % maior do que um tanque que possui largura igual a 40 m ($L_{\text{bacia}}=40$ m). O segundo tanque por sua vez tem uma produção de água destilada 64,3 % maior que um tanque que possui largura igual a 20 m ($L_{\text{bacia}}=20$ m), parâmetro fixo para a construção do destilador solar proposto nesse trabalho.

4.4 Estação do Ano

Comparou-se ainda a produção de água destilada neste mesmo Destilador Solar em um dia típico de verão e um dia típico de inverno. A Figura 20 apresenta a quantidade de água destilada produzida por hora para os dias 17 de janeiro e 24 de junho, dias típicos de verão e de inverno, respectivamente.

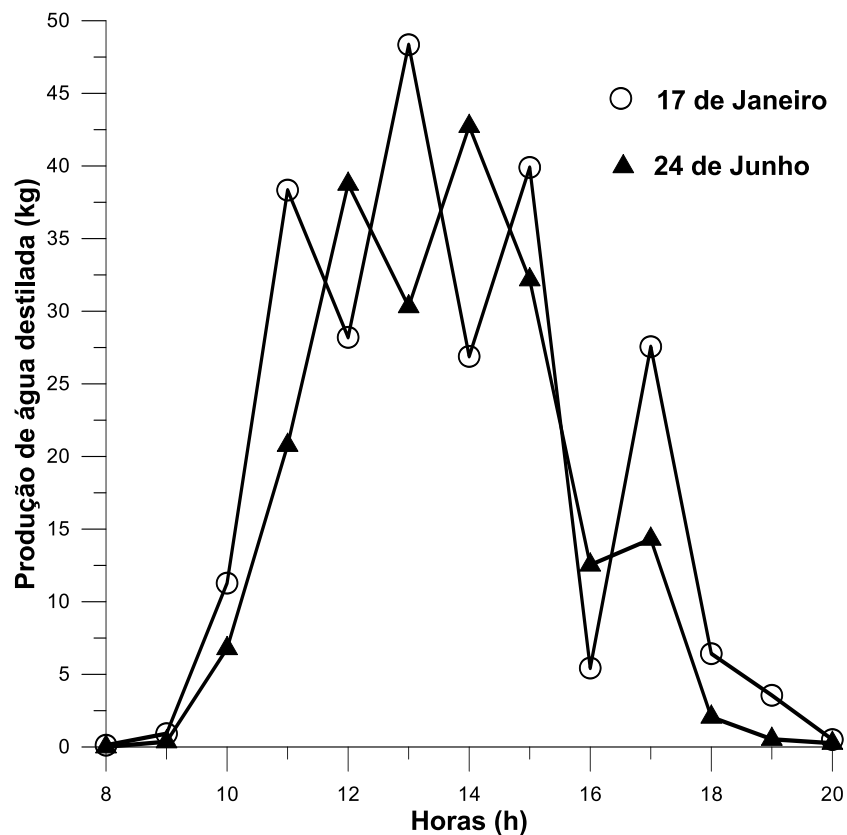


Figura 20: Produção horária do Destilador no verão e no inverno.

Neste caso, no verão o Destilador Solar conseguiu produzir maior quantidade de água destilada quando se comparado ao inverno. A produção de água destilada às 12 horas no dia 17 de janeiro foi 59,46 % maior do que a produção de água destilada às 12 horas do dia 24 de junho. Isto se deve ao fato de que na primeira análise, no período do verão, a radiação solar era igual a 712 W/m^2 ($I_s=712 \text{ W/m}^2$) e na segunda análise, no período do inverno, a radiação solar foi de 568 W/m^2 ($I_s=568 \text{ W/m}^2$) para aquele dia e horário.

No entanto, a produção total resultante em um dia de inverno não se difere em grande escala quando se comparado à produção no verão, pelo fato de que mesmo no inverno, a cidade de Fortaleza possui radiação solar suficiente para dar continuidade ao processo de destilação da água do mar, por esse motivo esta cidade foi eleita para a construção do Destilador Solar com a finalidade de se obter uma a maior quantidade de água destilada capaz de suprir as necessidades da população local. A produção total de água destilada em um dia de verão e um dia de inverno são representadas pela Figura 21.

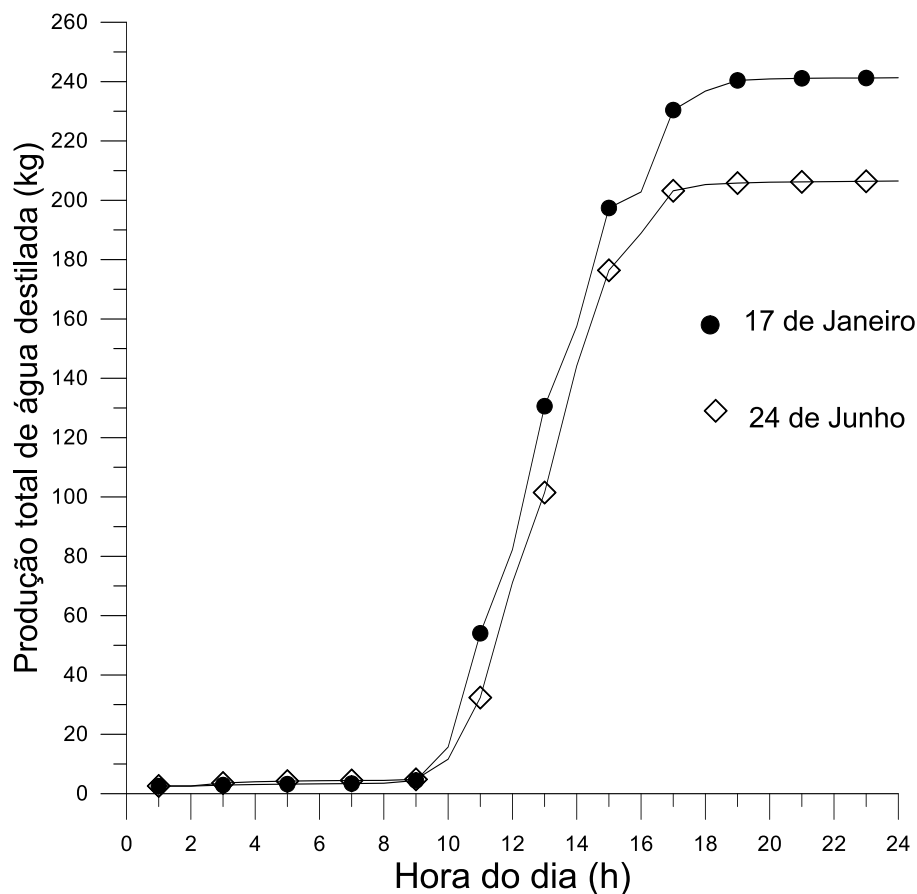


Figura 21: Produção Total Diária do Destilador no Verão e no Inverno.

Como se pode observar na Figura 21, a produção total de água destilada ao fim do dia 17 de Janeiro foi maior do que a produção no dia 24 de Junho, devido à maior incidência de raios solares na cidade no período de verão. Porém, como na cidade de Fortaleza mesmo no inverno ainda há grande incidência de raios solares, a produção de água destilada ao fim do dia 24 de Junho, dia típico de inverno, superou as expectativas.

A produção total de água destilada no dia típico de verão foi de 241,3 kg e no dia típico de inverno foi de 206,5 kg de água destilada. Sendo assim, no verão consegue-se produzir 16,86% de água destilada a mais que no inverno, quando se trata da cidade de Fortaleza. Por isso a importância da escolha do Destilador correto para cada local e demanda a ser tratada.

4.5 Material do Tanque

Como observado no estado da arte, o material do tanque de destilação também influencia na eficiência do processo. Para isso, foram feitas duas simulações para dois materiais distintos. A Figura 22 apresenta as perdas de calor para o solo para cada material do Destilador.

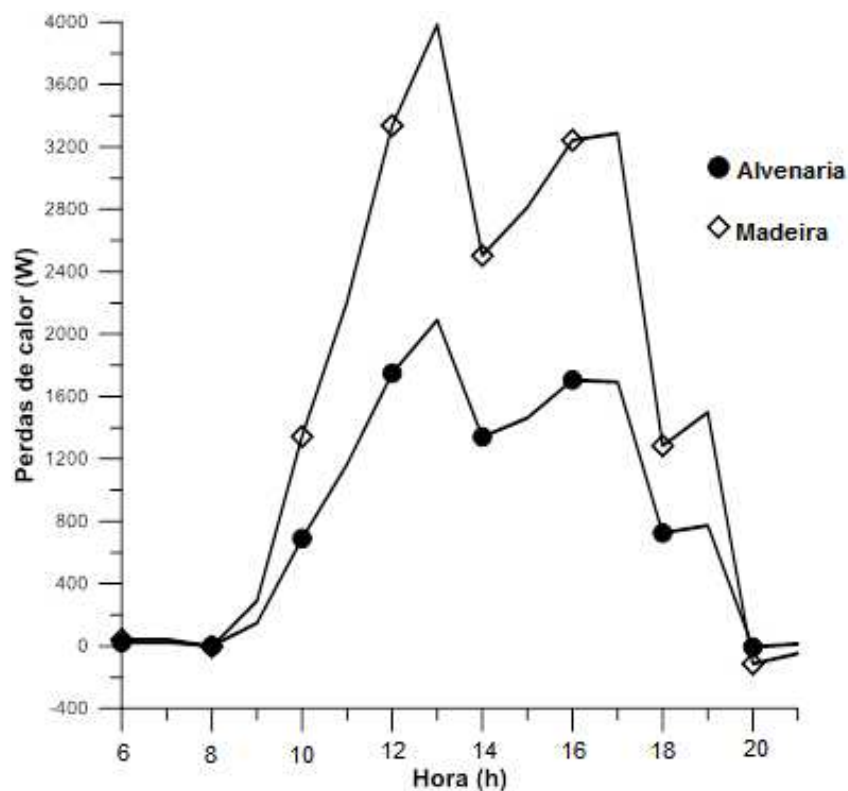


Figura 22: Perdas de calor para o solo.

Comprovando a revisão bibliográfica, o tanque de destilação construído de alvenaria tem menor capacidade de perdas de calor do que um tanque feito de madeira, portanto quanto menor é a perda de calor do interior do tanque, maior será a eficiência do processo.

Nesta análise o parâmetro variado foi o coeficiente de isolamento que apresenta valores diferenciados para cada tipo de material. Na primeira simulação o isolamento utilizado foi o da alvenaria ($k_{\text{isol}}=0,6 \text{ W/(mK)}$), parâmetro fixo no destilador proposto neste trabalho. Para a segunda simulação utilizou-se a madeira que apresente coeficiente de isolamento igual a $0,17(k_{\text{isol}}=0,17 \text{ W/(mK)})$.

Sendo assim, pode-se concluir que quanto maior o isolamento do material, menor será a perda de calor, aumentando a eficiência do processo. Por isso então alguns autores utilizam diversos tipos isolamentos extras no interior do tanque, como borracha preta, cortiça, esferas de vidro e revestimento de asfalto, para reduzir a perda de calor para o solo e para o ambiente.

5. CONCLUSÃO

O modelo matemático construído possibilitou uma simulação das variáveis resultantes do destilador proposto. Este modelo foi aplicado no programa computacional EES e a partir dele foi realizada uma análise paramétrica onde as características do destilador foram sendo ajustadas. Esta análise tem como objetivo obter um destilador solar com melhores resultados e que produza a maior quantidade de água potável possível.

A análise paramétrica através dos resultados do *software* EES permitiu a conclusão de algumas características indispensáveis para um bom e eficiente funcionamento do Destilador Solar. Na primeira modificação do programa, onde se variou a altura da coluna de água dentro da bacia do destilador, pôde-se concluir que quanto menor é a altura de água dentro da bacia maior quantidade de água destilada o sistema irá produzir. Isto se deve ao fato de que o aquecimento da coluna de água é dificultado quando se tem uma grande quantidade de água dentro da bacia. A transferência de calor que irradia da cobertura até toda a água salina é mais demorada, sendo assim menor é a evaporação e condensação capaz de produzir água destilada.

Outro fator importante que influencia na produção do destilador é o material escolhido para a cobertura da bacia. Como já mencionado na revisão bibliográfica, a cobertura de vidro tem maior capacidade de transferir calor para o interior da bacia em relação ao acrílico. Apesar da diferença do resultado não ser tão relevante, a durabilidade do vidro é bem maior do que o

acrílico. Além disso, foi feita uma análise relacionando as dimensões do vidro e constatou-se que o vidro de espessura de 6 mm seria mais eficiente do que o vidro de espessura de 4 mm, isto porque o vidro de maior espessura tem maior capacidade de conservar o calor dentro do tanque. Uma espessura menor que 4 mm tornaria a cobertura muito frágil e não seria economicamente viável.

O material da bacia assim como seu tamanho também influencia na eficiência do processo. Como já previsto através da revisão, quanto maior a largura da bacia, maior é a produção de água portátil, diferente do que acontece com a altura da bacia. A escolha do material é também primordial como constatou a análise realizada entre um tanque construído de alvenaria e um tanque construído de madeira. A madeira apresentou maior índice de perdas de calor, diminuindo a eficiência do processo.

Com base nos estudos realizados, além da análise paramétrica dos resultados da simulação realizada no *software* EES, o Destilador Solar foi o método de dessalinização com a melhor viabilidade de instalação. Esse tipo de dessalinizador é o que melhor atende as necessidades da população de Fortaleza ou qualquer outra cidade com as mesmas condições meteorológicas e de população. O Destilador deve ser construído com material de alvenaria em um local amplo, com o máximo de largura e o mínimo de altura possível. Ele deve possuir cobertura de vidro de espessura média, além de inclinação única, capaz de absorver toda a radiação solar incidente naquela estação.

Alguns autores realizaram uma análise comparativa de técnicas de dessalinização utilizadas em destiladores solares visando a melhoria de seu desempenho. A maioria deles ressaltam a importância da implementação de materiais absorventes no interior da bacia. A adição de partículas de carvão no fundo do tanque atuam como um bom meio de absorção de calor e pode aumentar a produção em até 15%. Uma camada de revestimento de bolas de vidro no leito auxilia no aquecimento da água parada no reservatório durante todo o dia e após o pôr do sol, aumentando a produtividade de água destilada em até 7,5%. O mesmo ocorre com a implantação de borracha preta, cascalho, areia, esponjas revestidas de materiais metálicos que conferem além de absorção, permeabilidade ao processo. A utilização do tecido de juta que apresenta um aumento de 8% na eficiência em relação ao destilador solar convencional.

O aumento do ângulo de inclinação resulta em aumento de perdas térmicas da cobertura e diminuição do rendimento, devido ao aumento da radiação refletida. Espelhos reflexivos são usados para reduzir a perda de calor. Bacia tipo degrau gera 40% de aumento na área de

superfície e o sistema de rastreamento solar é usado para detectar a direção onde a intensidade solar é maior. Sistema de rastreamento solar é utilizado para aumentar a temperatura da água, o que leva a uma maior produtividade.

A combinação de uma planta de osmose reversa e concentração de potência solar tem uma eficiência melhor que as plantas com unidades multi-efeito. A combinação de destilação multi-efeito a baixa temperatura e compressão de vapor térmico são mais eficientes termodinamicamente combinadas.

O efeito da integração de aspersores de água e ventilador de arrefecimento sobre o desempenho de um destilador solar convencional também aumenta na produtividade do processo. Outra técnica para aumentar a produtividade do destilador seria através da integração de multi-bacia com fonte de calor de biomassa a um destilador solar convencional.

REFERÊNCIAS

- ABDALLAH, S.; BADRAN, O.; ABU-KHADER, M. M. Performance evaluation of a modified design of a single slope solar still. **Desalination**, v. 219, n. 1-3, p. 222-230, 2008.
- ABDALLAH, S.; ABU-KHADER, M. M.; BADRAN, O. Effect of various absorbing materials on the thermal performance of solar stills. **Desalination**, v. 242, n. 1-3, p. 128-137, 2009.
- ABDULLAH, A. S. Improving the performance of stepped solar still. **Desalination**, v. 319, p. 60-65, 2013.
- ABDUL JABBAR, K. N.; HUSSEIN, I. A. Effect of inclination of the external reflector on the performance of a basin type solar still at various seasons. **Energy for Sustainable Development**, v. 13, n. 4, p. 244-249, 2009.
- ABDUL JABBAR, K. N.; HUSSEIN, I. A. Effect of inclination of the external reflector of simple solar still in winter: An experimental investigation for different cover angles. **Desalination**, v. 264, n. 1-2, p. 129-133, 2010.
- ABDUL JABBAR, K. N.; HUSSEIN, I. A. Experimental study on the effect of internal and external reflectors on the performance of basin type solar stills at various seasons. **Desalination and Water Treatment**, v. 27, n. 1-3, p. 313-318, 2011.
- AHMED, H. M.; ALFAYLAKAWI, K. A. Productivity enhancement of conventional solar stills using water sprinklers and cooling fan. **Journal of Advanced Science and Engineering Research**, v. 2, n. 3, p. 168-177, 2012.
- AHSAN, A.; IMTEAZ M.; RAHMAN A.; YUSUF B.; FUKUHARA T. Design, fabrication and performance analysis of an improved solar still. **Desalination**, v. 292, p. 105-112, 2012.
- AKASH, B. A.; MOHSEN, M. S.; OSTA, O.; ELAYAN, Y. Experimental evaluation of a single-basin solar still using different absorbing materials. **Renewable energy**, v. 14, n. 1-4, p. 307-310, 1998.
- AKASH, B. A.; MOHSEN, M. S.; NAYFEH, W. Experimental study of the basin type solar still under local climate conditions. **Energy conversion and management**, v. 41, n. 9, p. 883-890, 2000.
- AL-HAYEKA, I.; BADRAN, O. O. The effect of using different designs of solar stills on water distillation. **Desalination**, v. 169, n. 2, p. 121-127, 2004.
- AL-HINAI, H.; AL-NASSRI, M. S.; JUBRAN, B. A. Parametric investigation of a double-effect solar still in comparison with a single-effect solar still. **Desalination**, v. 150, n. 1, p. 75-83, 2002.
- AL-KARAGHOULI, A. A.; ALNASER, W. E. Experimental comparative study of the performances of single and double basin solar-stills. **Applied Energy**, v. 77, n. 3, p. 317-325, 2004.
- AL-KARAGHOULI, A.; RENNE, D.; KAZMERSKI, L.L. Solar and wind opportunities for water desalination in the Arab regions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 9, p. 2397-2407, 2009.
- AL-KHARABSHEH, S.; GOSWAMI, D. Yogi. Experimental study of an innovative solar water desalination system utilizing a passive vacuum technique. **Solar Energy**, v. 75, n. 5, p. 395-401, 2003.
- AL-SHAYJI, K. A. M. **Modeling, simulation, and optimization of large-scale commercial desalination plants**. Tese de Doutorado. Virginia Tech, 1998.

- ALARCÓN-PADILLA, D.; GARCÍA-RODRÍGUEZ, L. Application of absorption heat pumps to multi-effect distillation: a case study of solar desalination. **Desalination**, v. 212, n. 1-3, p. 294-302, 2007.
- ARUNKUMAR, T., JAYAPRAKASH R., DENKENBERGER D., AHSAN A., OKUNDAMIYA M. S., KUMAR, S., TANAKA H., AYBAR, A. S. An experimental study on a hemispherical solar still. **Desalination**, v. 286, p. 342-348, 2012.
- AYOUB, G. M., AL-HINDI, M.; MALAEB, L. A solar still desalination system with enhanced productivity. **Desalination and water treatment**, v. 53, n. 12, p. 3179-3186, 2015.
- BADRAN, O. O. Experimental study of the enhancement parameters on a single slope solar still productivity. **Desalination**, v. 209, n. 1-3, p. 136-143, 2007.
- BARRAZA, R. **Solar Desalination Systems Research and Modeling Process**. 2011. These of Doctored. University of Wisconsin-Madison, 2011.
- BASSAM A. K. ABU-HIJLEH, M. ABU-QUDIAS & S. AL-KHATEEB. Experimental study of a solar still with screens in basin. **International journal of solar energy**, v. 21, n. 4, p. 257-266, 2001.
- BORSANI, R.; REBAGLIATI, S. Fundamentals and costing of MSF desalination plants and comparison with other technologies. **Desalination**, v. 182, n. 1-3, p. 29-37, 2005.
- CAPPELLETTI, G. M. An experiment with a plastic solar still. **Desalination**, v.142, p.221-227, Foggia, Italy, 2002.
- CHAFIK, E. A new type of seawater desalination plants using solar energy. **Desalination**, v. 156, n. 1-3, p. 333-348, 2003.
- CLAYTON, R. **Desalination for Water Supply FR/R0013**, Review of Current Knowledge, Foundation for Water Research, U.K, Feb. 2006.
- COSTA, C. G. **Destilação Solar: aplicação no tratamento de efluentes líquidos de laboratórios**. Dissertação para obtenção do título de Mestre em Química Analítica (106 páginas). Universidade de Brasília – Instituto de Química, Agosto, 2008.
- CRUZ, C. **Dessalinização da Água do Mar Através da Energia Solar-Caso de Estudo Salamansa-Cabo Verde**. 2012. Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente. Universidade do Algarve, Faro, 2012.
- D'ANTONI, M.; SARO, O. Massive solar-thermal collectors: a critical literature review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 6, p. 3666-3679, 2012.
- DUFFIE, A, BECKMAN, W. A, **Solar Engineering of Thermal Processes**. New York, John Wiley & Sons, 1991.
- DEV, R.; ABDUL-WAHAB, S. A.; TIWARI, G. N. Performance study of the inverted absorber solar still with water depth and total dissolved solid. **Applied energy**, v. 88, n. 1, p. 252-264, 2011.
- DEV, R.; TIWARI, G. N. Annual performance of evacuated tubular collector integrated solar still. **Desalination and water Treatment**, v. 41, n. 1-3, p. 204-223, 2012.
- DUNKLE, R. V. Solar Water Distillation, the Roof Type Solar Still and Multiple Effect Diffusion Still. Developments in Heat Transfer, ASME, **Proceedings of the International Heat Transfer**, Part V, University of Colorado, Vol. 895, 1961.

- DWIVEDI, V. K.; TIWARI, G. N. Comparison of internal heat transfer coefficients in passive solar stills by different thermal models: an experimental validation. **Desalination**, v. 246, n. 1-3, p. 304-318, 2009.
- DWIVEDI, V. K.; TIWARI, G. N. Experimental validation of thermal model of a double slope active solar still under natural circulation mode. **Desalination**, v. 250, n. 1, p. 49-55, 2010.
- EL-BAHI, A.; INAN, D. A solar still with minimum inclination, coupled to an outside condenser. **Desalination**, v. 123, n. 1, p. 79-83, 1999.
- EL-GHONEMY, A.M.K. **Water desalination systems powered by renewable energy sources: Review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, 1537 – 1556, 2012.
- EL-SEBAILI, A. A. RAMADAN, M. R. I.; ABOUL-ENEIN, S.; SALEM, N. Thermal performance of a single-basin solar still integrated with a shallow solar pond. **Energy conversion and Management**, v. 49, n. 10, p. 2839-2848, 2008.
- EL-SEBAILI, A. A.; AL-HAZMI, M. S.; FAIDAH, A. S.; AL-GHAMDI, A. A.. Active single basin solar still with a sensible storage medium. **Desalination**, v. 249, n. 2, p. 699-706, 2009.
- EL-ZAHABY, A. M.; KABEEL, A. E.; BAKRY, A. I.; EL-AGOUZ, S. A.; HAWAM, O. M. Enhancement of solar still performance using a reciprocating spray feeding system—An experimental approach. **Desalination**, v. 267, n. 2-3, p. 209-216, 2011.
- ELANGO, T.; MURUGAVEL, K. Kalidasa. The effect of the water depth on the productivity for single and double basin double slope glass solar stills. **Desalination**, v. 359, p. 82-91, 2015.
- ELKADER, M. A. An Investigation of the parameters involved in simple solar still with inclined yute. **Renewable Energy**, v.14, nº 1-4, p. 333-338, Port Said, Egypt, 1998.
- FORMOSO, S. C. **Sistema de tratamento de água salobra: alternativa de combate à escassez hídrica no semi-árido sergipano**. 2010. 137 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2010.
- GARCIA-RODRIGUEZ, L. Seawater desalination driven by renewable energies: areview. **Desalination**, v. 143, n. 2, p. 103-113, 2002.
- GUDE, V. G.; NIRMALAKHANDAN, N., DENG, S.; MAGANTI, A. Feasibility study of a new two-stage low temperature desalination process. **Energy conversion and management**, v. 56, p. 192-198, 2012.
- GUERREIRO, M. L. F. B. **Dessalinização para produção de água potável - Perspectivas para Portugal**. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil - Especialização em Hidráulica, 80 f. Universidade do Porto, Julho de 2009.
- HAWLADER, M. N. A. DEY, P. K.; DIAB, S.; CHUNG, C. Y. Solar assisted heat pump desalination system. **Desalination**, v. 168, p. 49-54, 2004.
- JANARTHANAN, B.; CHANDRASEKARAN, J.; KUMAR, S. Performance of floating cum tilted-wick type solar still with the effect of water flowing over the glass cover. **Desalination**, v. 190, n. 1-3, p. 51-62, 2006.
- JORGE, B. **Simulação de processos de destilação solar de água salgada**. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica (118 páginas). Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2011.

- KABEEL, A. E. Performance of solar still with a concave wick evaporation surface. **Energy**, v. 34, n. 10, p. 1504-1509, 2009.
- KARAGIANNIS, I. C.; SOLDATOS, P. G. Water desalination cost literature: review and assessment. **Desalination**, v. 223, n. 1-3, p. 448-456, 2008.
- KHARE, V. R.; SINGH A. P.; KUMAR H.; KATRI R. Modelling and performance enhancement of single slope solar still using CFD. **Energy Procedia**, v. 109, p. 447-455, 2017.
- KIANIFAR, A.; HERIS, S. Z.; MAHIAN, O. Exergy and economic analysis of a pyramid-shaped solar water purification system: active and passive cases. **Energy**, v. 38, n. 1, p. 31-36, 2012.
- KUMAR, S.; TIWARI, G. N.; SINGH, H. N. Annual performance of an active solar distillation system. **Desalination**, v. 127, n. 1, p. 79-88, 2000.
- KUMAR, K. V.; BAI, R. K. Performance study on solar still with enhanced condensation. **Desalination**, v. 230, n. 1-3, p. 51-61, 2008.
- LEITE, R. F. C.; PEREIRA, L. A. G.; BORTOLO, C. A. Extensão e suas práticas: crise hídrica, sensibilização da comunidade escolar e uso da água. **Revista Intercâmbio**, v. 8, p. 61-78, 2017.
- LIMA, A. E. F.; SILVA, D. R.; SAMPAIO, J. L. F.. As tecnologias sociais como estratégia de convivência com a escassez de água no semiárido cearense. **Conexões-Ciência e Tecnologia**, v. 5, n. 3, 2011.
- LIMA, G. A. **Sistema de dessalinização por osmose reversa acionado por gerador fotovoltaico com conversor de frequência**. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2006.
- LUNA, F. M. **Desenvolvimento e testes de um dessalinizador solar com pré-aquecimento de água**. 2016. 101 f. Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.
- MALUF, A. P. **Destiladores Solares no Brasil**. Monografia para a obtenção do título de especialista em Fontes Alternativas de Energia (39f). Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005.
- MANIVEL, R.; RUFUSS, D. Dsilva Winfred; SIVAKUMAR, S. Experimental investigation of solar desalination system with roof heating. **International Journal of Earth Science and Engineering**, v. 7, n. 4, p. 1459-1464, 2013.
- MARI, E. G.; COLOMER, R. P. G.; BLAISE-OMBRECHT, C. A. Performance analysis of a solar still integrated in a greenhouse. **Desalination**, v. 203, n. 1-3, p. 435-443, 2007.
- MARMOUCH, H.; ORFI, J.; NASRALLAH, S. B. Effect of a cooling tower on a solar desalination system. **Desalination**, v. 238, n. 1-3, p. 281-289, 2009.
- MAROO, S. C.; GOSWAMI, D. Y. Theoretical analysis of a single-stage and two-stage solar driven flash desalination system based on passive vacuum generation. **Desalination**, v. 249, n. 2, p. 635-646, 2009.
- MCCRACKEN, H.; GORDES, J. Understanding solar stills, Arlington/USA: **Vita**, v. 5, 33p. 1985.

- MOHAMED, A. M. I.; EL-MINSHAWY, N. A. Theoretical investigation of solar humidification–dehumidification desalination system using parabolic trough concentrators. **Energy Conversion and Management**, v. 52, n. 10, p. 3112-3119, 2011.
- MURUGAVEL, K. K., CHOCKALINGAM, K. K. S. K.; SRITHAR, K. **Progresses in Improving the Effectiveness of the Single Basin Passive Solar Still**. **Desalination**, 220, 677-686, 2008.
- MURUGAVEL, K. K.; SRITHAR, K. Performance study on basin type double slope solar still with different wick materials and minimum mass of water. **Renewable Energy**, v. 36, n. 2, p. 612-620, 2011.
- NAFEY, A. S., ABDELKADER, M.; ABDELMOTALIP, A.; MABROUK, A. A. Solar still productivity enhancement. **Energy conversion and management**, v. 42, n. 11, p. 1401-1408, 2001.
- NAFEY, A. S.; SHARAF, M. A.; GARCÍA-RODRÍGUEZ, Lourdes. A new visual library for design and simulation of solar desalination systems (SDS). **Desalination**, v. 259, n. 1-3, p. 197-207, 2010.
- NAIM, Mona M.; EL KAWI, Mervat A. Abd. Non-conventional solar stills Part 1. Non-conventional solar stills with charcoal particles as absorber medium. **Desalination**, v. 153, n. 1-3, p. 55-64, 2003.
- NASCIMENTO, F. R.. **Degradação ambiental e desertificação no Nordeste Brasileiro: o contexto da Bacia Hidrográfica do Rio Acaraú-Ceará**. Tese de Doutorado, Universidade Federal Fluminense. Rio de Janeiro, 2006.
- NASSAR, Y. F.; YOUSIF, S. A.; SALEM, A. A. The second generation of the solar desalination systems. **Desalination**, v. 209, n. 1-3, p. 177-181, 2007.
- OMARA, Z. M.; KABEEL, A. E.; YOUNES, M. M. Enhancing the stepped solar still performance using internal reflectors. **Desalination**, v. 314, p. 67-72, 2013.
- PALENZUELA, P.; ZARAGOZA, G.; ALARCÓN, D.; BLANCO, J. Simulation and evaluation of the coupling of desalination units to parabolic-trough solar power plants in the Mediterranean region. **Desalination**, v. 281, p. 379-387, 2011.
- PANCHAL, H.N.; SHAH, P.K. Effect of Varying Glass cover thickness on Performance of Solar still: in a Winter Climate Conditions. **International Journal Of Renewable Energy Research (IJRER)**, Vol.1, No.4, pp.212-223, 2011.
- RADHWAN, A. M. Transient performance of a stepped solar still with built-in latent heat thermal energy storage. **Desalination**, v. 171, n. 1, p. 61-76, 2005.
- RAI, S. N.; DUTT, D. K.; TIWARI, G. N. Some experimental studies of a single basin solar still. **Energy conversion and Management**, v. 30, n. 2, p. 149-153, 1990.
- RAJ, S. V.; MANOKAR, A. M. Design and Analysis of Solar Still. **Materials Today: Proceedings**, v. 4, n. 8, p. 9179-9185, 2017.
- RAJASEENIVASAN, T.; MURUGAVEL, K. Kalidasa. Theoretical and experimental investigation on double basin double slope solar still. **Desalination**, v. 319, p. 25-32, 2013.
- RAJASEENIVASAN, T.; RAJA, P. Nelson; SRITHAR, K. An experimental investigation on a solar still with an integrated flat plate collector. **Desalination**, v. 347, p. 131-137, 2014.

- RAJAN, A. S.; RAJA, K.; MARIMUTHU, P. Multi basin desalination using biomass heat source and analytical validation using RSM. **Energy conversion and management**, v. 87, p. 359-366, 2014.
- REDDY, K. S.; KUMAR, K. R.; O'DONOVAN, T. S.; MALLICK, T. K. Performance analysis of an evacuated multi-stage solar water desalination system. **Desalination**, v. 288, p. 80-92, 2012.
- SAHOO, B. B.; SAHOO, N.; MAHANTA, P.; BORBORA, L.; KALITA, P.; SAHA, U. K. Performance assessment of a solar still using blackened surface and thermocol insulation. **Renewable Energy**, v. 33, n. 7, p. 1703-1708, 2008.
- SAKTHIVEL, M.; SHANMUGASUNDARAM, S.; ALWARSAMY, T. An experimental study on a regenerative solar still with energy storage medium—Jute cloth. **Desalination**, v. 264, n. 1-2, p. 24-31, 2010.
- SAMPATHKUMAR, K.; SENTHILKUMAR, P. Utilization of solar water heater in a single basin solar still—an experimental study. **Desalination**, v. 297, p. 8-19, 2012.
- SCHWARZER, K.; VIEIRA, M. E.; FABER, C.; MÜLLER, C. Solar thermal desalination system with heat recovery. **Desalination**, v. 137, n. 1-3, p. 23-29, 2001.
- SEMIAT, R. Desalination: Present and future. **Water International**, v. 25, n. 1, p. 54-65, 2000.
- SEMIAT, R. Energy issues in desalination processes. **Environmental science & technology**, v. 42, n. 22, p. 8193-8201, 2008.
- SHAOBO, H.; ZHANG, Z.; HUANG, Z.; XIE, A. Performance optimization of solar multi-stage flash desalination process using Pinch technology. **Desalination**, v. 220, n. 1-3, p. 524-530, 2008.
- SIGNORELLI, M. R. **Dessalinização: métodos e possibilidades**. 2016. 67f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2015.
- SILVA, J. F. A. **Panorama global da distribuição e uso de água doce e análise de custos de uma planta de osmose reversa acionada com diferentes fontes de energia**. 2015. 237 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Gestão) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2015.
- SINGH A.K.; TIWARI, G.N.; SHARMA, P. B.; KHAN, E. Optimization of orientation for higher yield of solar still for a given location. **Energy Conversion and Management**, v. 36 (3), p. 175–87, 1995.
- SINGH, H. N.; TIWARI, G. N. Monthly performance of passive and active solar stills for different Indian climatic conditions. **Desalination**, v. 168, p. 145-150, 2004.
- SIVAKUMAR, V.; SUNDARAM, E. Ganapathy. Improvement techniques of solar still efficiency: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 28, p. 246-264, 2013.
- SOUZA, L. F. **Thermal Analysis Of A Dessalinizador Of Multiple Effect For Obtaining Of Drinkable Water**. 2002. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2002.
- SOUZA, L. F. **Dessalinização como fonte alternativa de água potável**. Norte Científico, v. 1, n. 1, 2011.

SPIRANDELI, A. B. L.; PRADO, G. O.; SOUSA, N. G. Desenvolvimento De Um Destilador Solar Tipo Escada E Análise De Desempenho Em Relação A Um Destilador Solar Com Cobertura Piramidal. Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, UFSCar – São Carlos – SP, 2017.

SRIVASTAVA, P. K.; AGRAWAL, S. K. Experimental and theoretical analysis of single sloped basin type solar still consisting of multiple low thermal inertia floating porous absorbers. **Desalination**, v. 311, p. 198-205, 2013.

TANAKA, H.; NOSOKO, T.; NAGATA, T. Parametric investigation of a basin-type-multiple-effect coupled solar still. **Desalination**, v. 130, n. 3, p. 295-304, 2000.

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

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.; MADURI; GARG, H. P. Effect of water flow over the glass cover of a single basin solar still with an intermittent flow of waste hot water in the basin. **Energy Conversion and Management**, v. 25, n. 3, p. 315-322, 1985.

TIWARI, G. N.; THOMAS, J. M.; KHAN, Emran. Optimisation of glass cover inclination for maximum yield in a solar still. **Heat Recovery Systems and CHP**, v. 4, p. 447-55, 1994.

TIWARI, A. K.; TIWARI, G. N. Effect of water depths on heat and mass transfer in a passive solar still: in summer climatic condition. **Desalination**, v. 195, n. 1-3, p. 78-94, 2006.

TRIPATHI, R.; TIWARI, G. N. Performance evaluation of a solar still by using the concept of solar fractionation. **Desalination**, v. 169, p. 69-80, 2004.

VELMURUGAN, V.; GOPALAKRISHNAN, M.; RAGHU, R.; SRITHAR, K. Productivity enhancement of stepped solar still: Performance analysis. **Thermal Science**, v. 12, n. 3, p. 153-163, 2008.

VOROPOULOS, K.; MATHIOULAKIS, E.; BELESSIOTIS, V. Experimental investigation of the behavior of a solar still coupled with hot water storage tank. **Desalination**, v. 156, n. 1-3, p. 315-322, 2003.

ZEINAB, A. S.; ASHRAF, L. Improving the performance of solar desalination systems. **Renewable Energy**, v. 30, n. 13, p. 1955-1971, 2005.

ZIABARI, F. B.; SHARAK, A. Z.; MOGHADAM, H.; TABRIZI, F. F. Theoretical and experimental study of cascade solar stills. **Solar energy**, v. 90, p. 205-211, 2013.

ZHANI, K.; BACHA, H. B. Experimental investigation of a new solar desalination prototype using the humidification dehumidification principle. **Renewable Energy**, v. 35, n. 11, p. 2610-2617, 2010.

ZURIGAT, Y. H.; ABU-ARABI, M. K. Modelling and performance analysis of a regenerative solar desalination unit. **Applied thermal engineering**, v. 24, n. 7, p. 1061-1072, 2004.