

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PECE – PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA EM ENGENHARIA

MARCUS VINÍCIUS MIRANDA RIBEIRO

Estudo Comparativo entre Dessalinizadores Solares Térmicos e de Osmose Reversa
Operado com Painéis Fotovoltaicos para Geração de Água Potável

São Paulo

2015

MARCUS VINÍCIUS MIRANDA RIBEIRO

Estudo Comparativo entre Dessalinizadores Solares Térmicos e de Osmose Reversa Operado com Painéis Fotovoltaicos para Geração de Água Potável

Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Área de concentração:
Energia Solar

Orientador:
Prof. Dr. Cláudio Roberto de Freitas Pacheco

São Paulo
2015

Catálogo-na-publicação

Ribeiro, Marcus Vinícius Miranda

Estudo Comparativo entre Dessalinizadores Solares Térmicos e de Osmose Reversa Operado com Painéis Fotovoltaicos para Geração de Água Potável / M. V. M. Ribeiro -- São Paulo, 2015. 93 p.

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1.Energia Solar 2.Dessalinização com Energia Solar I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia II.t.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a DEUS PAI, que me dá força, coragem, proteção e sabedoria para encarar a vida de frente e sempre colocando pessoas iluminadas em minha vida.

Ao Prof. Dr. Cláudio Pacheco, pela dedicação, paciência e compreensão durante o período de orientação da monografia. Pelos ensinamentos da disciplina e de vida passados. Pelos “puxões de orelha” para que entregássemos o melhor para tudo e principalmente pelas injeções de ânimo que foram de suma importância para que eu continuasse firme mediante a todas as dificuldades.

A todos os meus amigos, especialmente, Andrey, Artur e Edson pelo companheirismo e amizade, dentro e fora do ambiente acadêmico.

A minha filha, Alda Lorena, a SUNSHINE da minha vida.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo estimular os seus leitores a pensar em métodos alternativos de potabilização e purificação de águas salobras ou salinas, por meio do tratamento de dessalinização, utilizando-se a energia solar como fonte primária de energia para obtenção de água potável adequada para consumo humano em regiões de escassez deste bem natural, seja pela falta de rios, lençóis de água doce, chuvas, ausência de abastecimento por concessionárias de água, etc. Este estímulo dar-se-á com um estudo comparativo de duas técnicas já bem conhecidas: a destilação e a filtração por membranas, respectivamente, utilizando a energia solar como fonte térmica e elétrica de energia.

Assim, serão comparados nesse trabalho, os sistemas de osmose reversa e de destilação solar, no primeiro ocorrerá a conversão da energia solar em energia elétrica por meio de painéis fotovoltaicos para seu funcionamento e no segundo far-se-á o aproveitamento térmico direto da irradiação solar.

Para uma melhor compreensão e entendimento deste trabalho, será apresentado um estudo de caso para tratamento de água salobra no município de Riacho das Almas, localizado no Estado Brasileiro de Pernambuco.

Desse modo, esse estudo, poderá servir como base para que sejam realizados outros posteriores em qualquer localidade mundial com condições similares as aqui estudadas, levando em consideração os dados geográficos, solarimétricos e as características físico-químicas da água que será tratada pelos métodos que serão apresentados neste trabalho.

ABSTRACT

The following paper aims to encourage your readers to think about alternative purification methods of brackish or salt water through desalination using solar energy as primary energy source. Thus, drinking water for human consumption in regions of shortage of this very natural, due to the lack of rivers, freshwater aquifers and rainfalls, it can be obtained, even without water utilities.

This fact encouraged myself to do this comparative study about two techniques well known: distillation and membrane filtration, respectively, using solar energy as thermal and electrical energy source. Thus, will be compared in this work, reverse osmosis systems and solar distillation, in the first system will occur the conversion of solar energy into electricity through photovoltaic panels to its operation and in the second one, the solar irradiation will be used as heat supply to evaporate the water that will be treated.

In order to better comprehension and understanding of this work, it will be presented a study case for treatment of brackish water in the municipality of Riacho das Almas in the state of Pernambuco, located in Brazilian's northeast.

Thus, this study may serve as a basis to develop into the future, a criterial study for any global location with similar conditions here studied, taking into account the geographic data, solarimetric and the physicochemical characteristics of the water to be treated by the methods that will be presented in this paper.

LISTA DE FIGURAS

Figura.1 – Mapa do Estado de Pernambuco e localização do Município de Riacho das Almas.....	12
Figura.2 – Localização da cidade de Riacho das Almas no agreste Pernambucano. ...	13
Figura.3 – Divisão da população do município de Riacho das Almas – PE.....	14
Figura.4 – Média mensal das temperaturas máximas no mês de Junho de 2015.....	14
Figura.5 – Média mensal das temperaturas máximas no mês de Dezembro de 2014 ...	15
Figura.6 – Boletim Pluviométrico Diário para a data de 31/12/2014	15
Figura.7 – Boletim Pluviométrico Diário para a data de 30/06/2015	15
Figura.8 – Mapa da localização dos dessalinizadores por osmose reversa instalados no Estado de Pernambuco	18
Figura.9 – Possíveis combinações de tecnologias das principais fontes de energias renováveis e métodos de dessalinização.....	23
Figura.10 – Fontes renováveis de energia utilizadas nos processos de dessalinização	23
Figura.11 – Ilustração do método de destilação multi-estágios.....	27
Figura.12 – Ilustração do método de destilação multi-efeito	29
Figura.13 – Ilustração do método de destilação por compressão de vapor.....	31
Figura.14 – Ilustração do método de destilação por congelamento a vácuo	32
Figura.15 – Diagrama de um sistema de dessalinização por congelamento através de refrigerante secundário (DCRS).....	33
Figura.16 – Ilustração de um modelo de destilador solar	35
Figura.17 - Ilustração do princípio de funcionamento de eletrodialise com duas membranas.	36
Figura.18 – Modelo de membrana semipermeável utilizada em sistemas de osmose reversa.	37
Figura.19 – A membrana semipermeável em detalhes	38
Figura.20 – Ilustração simplificada do princípio da osmose reversa	40
Figura.21 – Planta de destiladores solares na Ilha de Patmos na Grécia.....	43

Figura.22 – Diferentes configurações de destiladores solares	45
Figura.23 – Fluxo de energia em um destilador solar	46
Figura.24 – Rede térmica que representa os mecanismos de troca de calor de um destilador solar	46
Figura.25 – Detalhes de projeto um destilador solar térmico	49
Figura.26 Características técnicas dos sistemas de osmose reversa da ProMinent	57
Figura.27 – Ilustração do conceito das horas de Sol pleno (HSP).....	59
Figura.28 – Equipamento de Osmose Reversa	60
Figura.29 – Dados solarimétricos do CRESESB para a cidade de Caruaru/PE.....	61
Figura.30 – Características elétricas nas condições STC (Standard Test Conditions) do módulo fotovoltaico CS6P-250M da fabricante Canadian Solar.....	62
Figura.31 - Características elétricas nas condições NOCT (Normal Operating Cell Temperature) do módulo fotovoltaico CS6P-250M da fabricante Canadian Solar.	62
Figura.32 – Características de temperatura do módulo CS6P-250M.....	63
Figura.33 – Curvas de corrente e tensão para diferentes valores de corrente e temperatura da célula.	63
Figura.34 – Tabela de módulos fotovoltaicos homologados pelo INMETRO.....	64
Figura.35 – Foto do inversor de frequência SMA SUNNY TRIPOWER 15000 TL-US	68
Figura.36 – Ilustração de módulos fotovoltaicos ligados em série	71
Figura.37 - Ilustração de módulos fotovoltaicos ligados em série e paralelo	73
Figura.38 - Resultados apresentados no artigo científico para algumas configurações de destiladores solares.	79
Figura.39 - Os custos médios da água destilada apresentados no artigo científico.....	80
Figura.40 - Estrutura de custos associada a um sistema de dessalinização por osmose reversa.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela.1 – Quantidade de ideal de água potável para o bem-estar e a higiene pessoal segundo a ONS.....	17
Tabela.2 – Combinações recomendadas entre métodos de dessalinização e fontes de energias renováveis.	24
Tabela.3 – Processo de destilação recomendados por concentração de sais dissolvidos em água	25
Tabela.4 - Apresentação de algumas configurações de destiladores solares para diferentes referências.	79
Tabela.5 - Planilha de custos dos sistemas de osmose reversa e SFV	82
Tabela.6 - Parâmetros Financeiros do Sistema de Destilação Solar.....	84
Tabela.7 - Fluxos de Caixa do Sistema de Destilação Solar.....	84
Tabela.8 – Parâmetros Financeiros do Sistema de Osmose Reversa – SFV	85
Tabela.9 – Fluxos de Caixa do Sistema de Osmose Reversa – SFV	85
Tabela.10 – Custos aproximados de uma unidade osmose reversa com capacidade de 2000 m³/dia.....	86
Tabela.11 – Tabela comparativa dos sistemas de dessalinização estudados nesse trabalho.....	86

LISTA DE ABREVIATURAS

APAC – Agência Pernambucana de Águas e Clima

ED – Eletrodialise (Electrodialysis)

HD – Umidificação-Desumidificação (Humidification–Dehumidification)

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

MED – Destilação multi-efeito (Multi-Effect Distillation)

MPPT – Rastreador do ponto de máxima potência (Maximum Power Point Tracker)

MSF ou MSFD – Destilação multi-estágios (Multi-Stage Flash Distillation)

MVC – Compressão Mecânica de Vapor (Mechanical Vapor Compression)

ONU – Organização das Nações Unidas

PV – Fotovoltaico (Photovoltaic)

ppm – partes por milhão

RE – Energia Renovável (Renewable Energy)

RO – Osmose Reversa (Reverse Osmosis)

SD – Destilação Solar (Solar Distillation)

TVC – Thermal Vapor Compression

VCD – Destilação por compressão de vapor (Vapour Compression Distillation)

SUMÁRIO

1	CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	11
1.1	Motivação para realização deste estudo	11
1.2	Objetivos	11
1.3	Caracterização da área de estudo.....	12
1.3.1	Localização geográfica	12
1.3.2	População	13
1.3.3	Dados climatológicos	14
1.3.4	Reportagem do Jornal Hoje sobre o dessalinizador por osmose reversa alimentado com painéis fotovoltaicos instalado em Riacho das Almas/PE	16
2	CAPÍTULO 2 – BASES PARA A REALIZAÇÃO DO ESTUDO.....	17
2.1	Consumo diário de água	17
2.2	Sistemas de dessalinização objetos do estudo	18
2.3	Metodologia para cumprimento dos objetivos estabelecidos	19
3	CAPÍTULO 3 – ESTADO DA ARTE: DESSALINIZAÇÃO	20
3.1	Introdução.....	20
3.1.1	Água	20
3.1.2	Dessalinização e Energia.....	21
3.1.3	Salinidade	22
3.2	Sistemas de dessalinização.....	22
3.2.1	Processos de Dessalinização Térmica	24
3.2.2	Processos de Dessalinização por Membranas.....	35
3.3	Detalhamento dos sistemas de dessalinização por destilação solar	41
4	CAPÍTULO 4 – DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO	50
4.1	Desempenho do destilador solar	50
4.1.1	Considerações adotadas para o cálculo da produção do destilador solar	54
4.1.2	Cálculo da produção de água destilada.....	54
4.2	Detalhamento do Sistema de Osmose Reversa	56
4.2.1	Premissas para o dimensionamento do sistema de osmose reversa alimentado eletricamente pelo sistema solar fotovoltaico.	56
4.2.2	Dimensionamento do gerador fotovoltaico para alimentação elétrica do sistema de osmose reversa.....	57
5	CAPÍTULO 5 – ANÁLISE DE INVESTIMENTO.....	74
5.1	Custos envolvidos em cada sistema	74
5.2	Análise econômica comparativa entre os sistemas de dessalinização.	83

5.3	Análise de retorno do investimento para os sistemas	84
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RESULTADOS		87
6.1	Conclusões.....	87
6.2	Comparação dos processos de dessalinização por destilação solar e osmose reversa.	88
BIBLIOGRAFIA.....		90

1 CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 Motivação para realização deste estudo

“A água está no centro do desenvolvimento sustentável. Os recursos hídricos, e a gama de serviços providos por esses recursos, contribuem para a redução da pobreza, para o crescimento econômico e para a sustentabilidade ambiental. Desde a segurança alimentar e energética até a saúde humana e ambiental, a água contribui para as melhorias no bem-estar social e no crescimento inclusivo, afetando os meios de subsistência de bilhões de pessoas.” (*Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos - ÁGUA PARA UM MUNDO SUSTENTÁVEL*, p. 2)

A motivação deste trabalho se dá pela importância da água para humanidade e pela falta desta às comunidades carentes, onde por razões geográficas ou políticas, esse bem essencial e de direito universal é escasso. Como exemplo às cidades do sertão nordestino, dar-se-á a cidade de Riacho das Almas, localizada no Estado de Pernambuco, dado a infraestrutura básica de fornecimento de água e eletricidade deficiente para a zona rural da cidade, que inclusive em função dessa deficiência, já dispõe de um sistema de osmose reversa alimentado eletricamente com painéis fotovoltaicos, abastecendo parcialmente a demanda básica de água potável da zona rural da cidade.

1.2 Objetivos

1. Realizar o estudo comparativo entre os sistemas de dessalinização citados sistema de destilação solar, objetivando o abastecimento de 5 litros de água tratada por habitante.
2. Comparar e demonstrar a viabilidade técnica e econômica de ambos os sistemas de dessalinização estudados usando a energia solar.

1.3 Caracterização da área de estudo

1.3.1 Localização geográfica

Riacho das Almas é um município do estado brasileiro de Pernambuco. Localiza-se a uma latitude 08° 08' 02" sul e a uma longitude 35° 51' 23" oeste, estando a uma altitude de 407 metros e possui uma área aproximada de 313,98 km². A **Figura 1** ilustra a divisão municipal do Estado de Pernambuco.



Figura.1 – Mapa do Estado de Pernambuco e localização do Município de Riacho das Almas

Fonte: WIKIPEDIA

A **Figura 2** destaca a localização da cidade de Riacho das Almas e a região (em azul claro) do agreste Pernambucano.



Figura.2 – Localização da cidade de Riacho das Almas no agreste Pernambucano.

Fonte: IBGE

1.3.2 População

Segundo, o último censo do ano de 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) a população de Riacho das Almas/PE é composta por 19.162 habitantes, sendo 10.400 habitantes pertencentes a população rural da cidade. A **Figura 3** ilustra como a população rural e urbana do município de Riacho das Almas está dividida segundo dados do último CENSO 2010 do IBGE.

População - Riacho das Almas (PE)

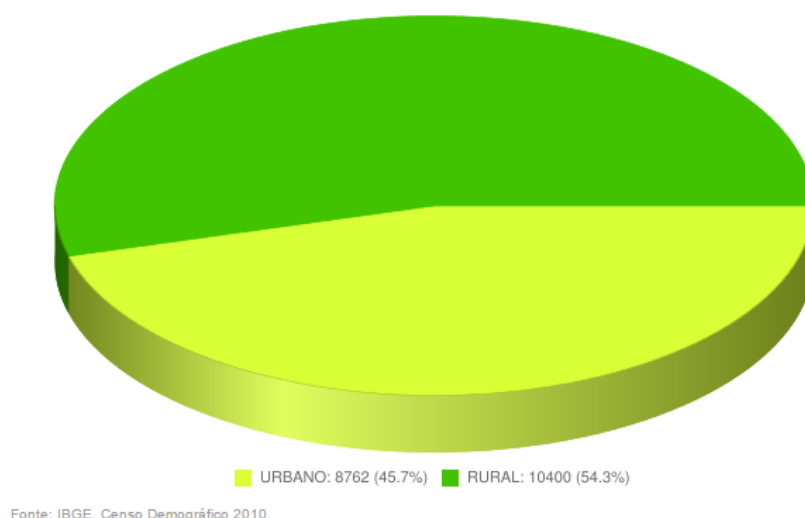


Figura.3 – Divisão da população do município de Riacho das Almas – PE

Fonte: IBGE

1.3.3 Dados climatológicos

Nas figuras abaixo podem ser observadas as médias mensais das temperaturas para os meses de junho e dezembro para o estado de Pernambuco, que correspondem, respectivamente, as estações de Inverno e Verão. Para esses meses, no município de Riacho das Almas, podem ser observadas temperaturas da ordem de 27°C para o mês de junho e 31°C para o mês de dezembro. A **Figura 4** indica a média mensal das temperaturas máximas no mês de junho de 2015 e a **Figura 5** no mês de dezembro de 2014.

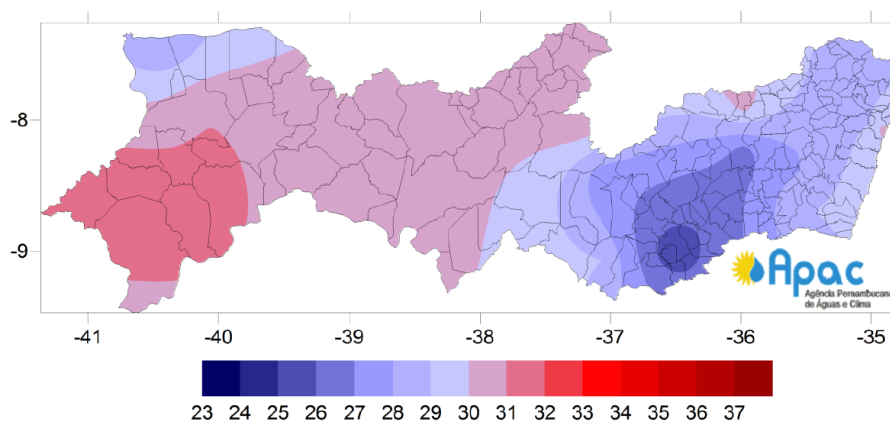


Figura.4 – Média mensal das temperaturas máximas no mês de Junho de 2015

Fonte: APAC

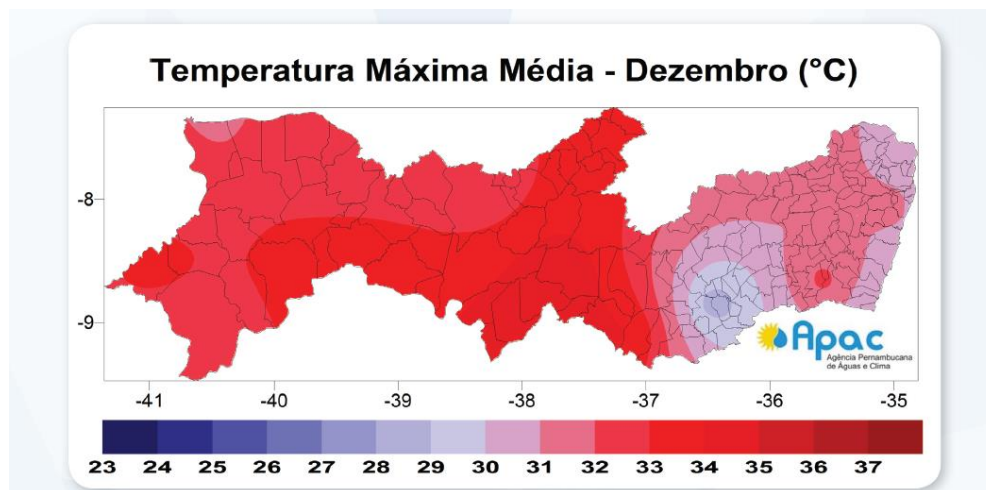


Figura.5 – Média mensal das temperaturas máximas no mês de Dezembro de 2014

Fonte: APAC

Como pode ser visto nos boletins pluviométricos mostrados nas **Figuras 6 e 7**, para os meses de Junho e Dezembro, o município de Riacho das Almas registrou, respectivamente, volumes de chuva entre 0 e 1 mm e 5 e 10 mm.

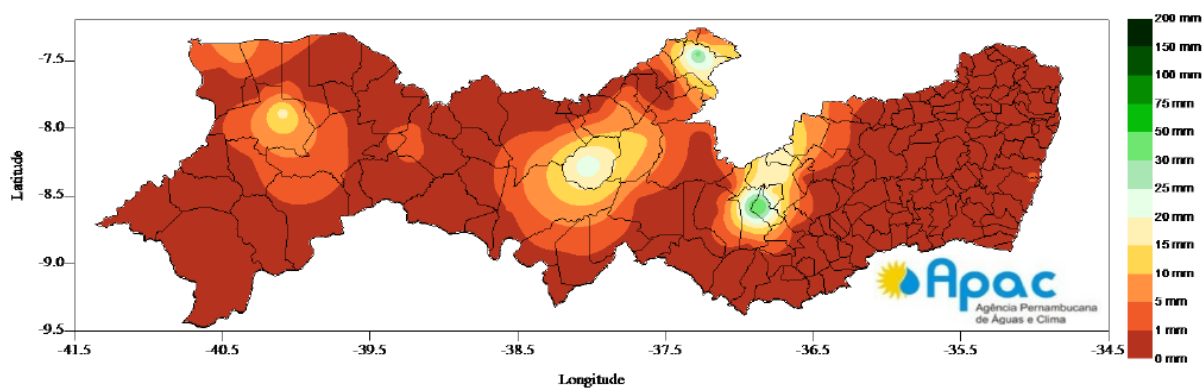


Figura.6 – Boletim Pluviométrico Diário para a data de 31/12/2014

Fonte: APAC

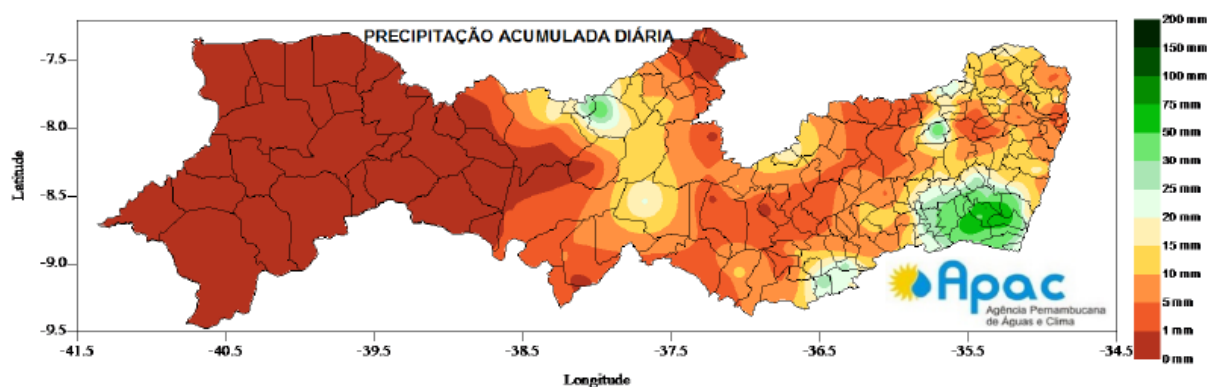


Figura.7 – Boletim Pluviométrico Diário para a data de 30/06/2015

Fonte: APAC

1.3.4 Reportagem do Jornal Hoje sobre o dessalinizador por osmose reversa alimentado com painéis fotovoltaicos instalado em Riacho das Almas/PE.

Segundo a reportagem do Jornal Hoje, do dia 20 de julho de 2015:

No sábado (20/07/2015), o Jornal Hoje mostrou uma reportagem feita no agreste pernambucano sobre a instalação de um aparelho chamado dessalinizador, que é movido a energia solar. A água dos poços artesianos na região é muito salgada, como acontece em quase todo o estado e o aparelho resolve o problema instantaneamente. O dessalinizador instalado em Riacho das Almas tem capacidade para tratar cinco mil litros de água todo dia. O que dá para abastecer cada morador com 20 litros por dia. Mas os dessalinizadores podem ser preparados para tratar mais ou menos água. O projeto do governo do estado é levar essa solução que está dando certo em Riacho das Almas para outras cidades de Pernambuco.

Você tem aqui nessa região do semiárido, um exemplo de utilização sustentável dos recursos naturais. Temos o sol como fonte de energia para retirada da água salgada da terra, a separação entre água doce e para atender as pessoas”, fala o secretário de recursos hídricos de Pernambuco, Almir Cirilo.

Uma fábrica fica na região metropolitana do Recife e já produziu mais de mil dessalinizadores que estão espalhados pelo interior do Nordeste. Mas com energia do sol são apenas dois. Um em Pernambuco e outro no Maranhão.

Para abastecer uma cidade de 500 mil habitantes, levando em conta um consumo diário de 120 litros por pessoa, uma estação de dessalinizadores custaria US\$ 60 milhões – R\$ 192 milhões usando energia elétrica ou US\$ 120 milhões – R\$ 384 milhões - se o equipamento fosse movido à energia solar.

Os gastos de operação e manutenção saem 40% mais em conta com o equipamento solar. A máquina também pode tirar o sal da água do mar. É o que acontece em Fernando de Noronha. Lá ela trata 48 mil litros de água do mar por hora.

2 CAPÍTULO 2 – BASES PARA A REALIZAÇÃO DO ESTUDO

2.1 Consumo diário de água

A recomendação da Organização Mundial da Saúde (OMS) é que o consumo diário mínimo ideal de água potável por habitante para o bem-estar e higiene seja de aproximadamente 50 litros. Esse volume de água foi dividido conforme indicado na

Tabela 1:

Tabela.1 – Quantidade de ideal de água potável para o bem-estar e a higiene pessoal segundo a ONS.

Banho (8 minutos)	24 litros
Descarga acoplada (3 vezes/dia)	18 litros
Lavar as mãos (4 vezes/dia)	3,2 litros
Escovar os dentes (3 vezes/dia)	2,4 litros
Água potável para beber	2 litros
Total	49,6 litros

Considerando o número de habitantes do município e o volume de água potável recomendado na **Tabela 1** pela ONS, os sistemas de dessalinização poderiam ser dimensionados de forma a atender a totalidade da demanda do município por água potável. Porém, a água potável empregada para o uso na descarga acoplada do banheiro, poderia ser substituída por água não potável e, para esse fim poderá ser utilizada a água salobra antes do seu tratamento. Desse modo, seriam necessários somente 31,6 litros de água potável por habitante diariamente, porém somar-se-ia mais 3,4 litros à essa quantidade para fins de cocção, totalizando então 35 litros diários de água potável por habitante que o sistema de dessalinização deverá suprir.

Todavia, neste trabalho, no que se refere a parcela da população que será atendida e o volume de água dessalinizada serão adotadas as seguintes premissas:

Devido à falta ou carência de recursos hídricos na região da zona rural, somente os 10.400 habitantes pertencentes à essa região serão considerados para fins de dimensionamento dos sistemas discutidos nesse estudo comparativo;

O volume diário de água potável considerado por habitante neste estudo será de 5 litros, com objetivo de atender minimamente cada um dos 10.400 habitantes da zona rural do município de Riacho das Almas/PE com água potável para beber e cozinhar.

2.2 Sistemas de dessalinização objetos do estudo

Neste trabalho serão considerados dois sistemas de dessalinização para tratamento e potabilização da água salobra no Município de Riacho das Almas/PE, são eles: o *sistema de osmose reversa* alimentado eletricamente por um gerador solar fotovoltaico isolado da rede de distribuição de energia (sistema off-grid) e o *sistema térmico solar de destilação*.

Segundo a Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos (SRHE) do Estado de Pernambuco, atualmente, o Estado de Pernambuco conta com 141 dessalinizadores instalados por todo estado, como pode ser visto na **Figura 8**.

O município de Riacho das Almas/PE, dispõe hoje de um único dessalinizador, que utiliza a técnica de osmose reversa. O sistema é um dos únicos alimentado eletricamente com painéis fotovoltaicos.

Os dois sistemas serão comparados em função dos seguintes parâmetros:

1. Energia empregada;
2. Área necessária;
3. Custos de implantação e operação;

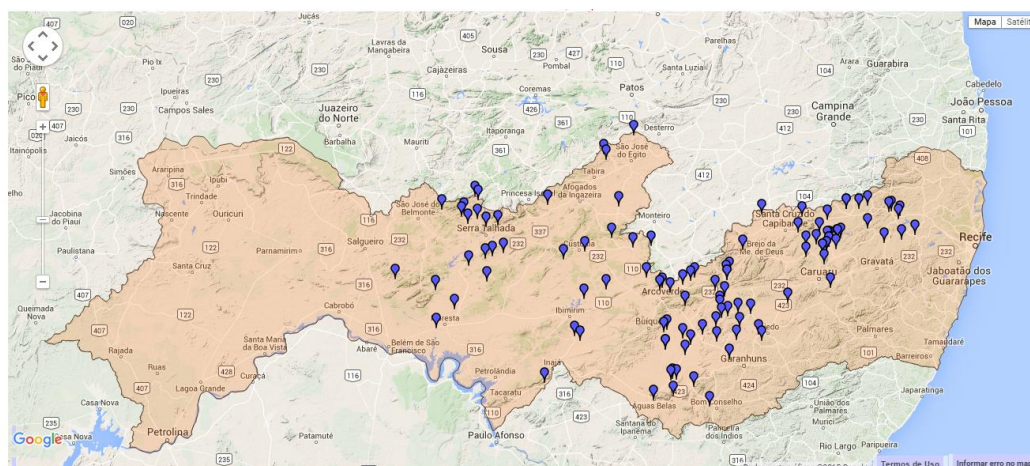


Figura.8 – Mapa da localização dos dessalinizadores por osmose reversa instalados no Estado de Pernambuco

Fonte: SRHE/PE

2.3 Metodologia para cumprimento dos objetivos estabelecidos

Para alcançar os objetivos propostos nesse trabalho será adotada a seguinte metodologia, como segue:

1. Os dados solarimétricos da região serão obtidos por meio do site do CRECESB;
2. Buscar-se-á fabricantes que comercializem equipamentos de dessalinização por osmose reversa;
3. Realizar-se-á a descrição técnica dos sistemas de dessalinização objetos desse estudo;
4. Estimar-se-ão as instalações de dessalinização utilizando energia solar de duas formas: via térmica, fazendo a conversão direta da energia solar em calor necessário para evaporação da água salina, num processo similar ao de destilação e por conversão indireta em energia mecânica para as bombas de um sistema de filtração por membrana utilizando técnica de osmose reversa, por meio de painéis fotovoltaicos alimentando eletricamente as bombas do sistema;
5. Deverão ser considerados os custos comerciais dos dois tipos de instalação – CAPEX (Implantação) e OPEX (O&M);
6. Estimar-se-á o custo específico em termos de volume produzido de água purificada em R\$/m³.
7. Quantificar-se-á a energia térmica (kWh_e) e elétrica (kWh_t), respectivamente necessárias, para funcionamento dos sistemas de destilação solar e de osmose reversa, objetivando-se o mesmo volume de água potável;
8. Verificar-se-á a área necessária para implementação de cada um dos sistemas de dessalinização estudados, visando atender a população rural do município de Riacho das Almas/PE com o volume diário de 5 litros de água;

3 CAPÍTULO 3 – ESTADO DA ARTE: DESSALINIZAÇÃO

3.1 Introdução

Segundo MATHIOULAKIS (2007), a *energia* é um parâmetro crítico para o desenvolvimento econômico e de vital importância para o desenvolvimento social e industrial, assim como é a qualidade da água. Em numerosas áreas pouco povoadas sofrem não somente com a indisponibilidade de água fresca, mas também com a de conexões com a rede elétrica ou qualquer outra fonte de energia. Para estas regiões a dessalinização é uma solução alternativa para o atendimento básico das necessidades desses povoados. No uso das energias renováveis para processos de dessalinização, há duas tecnologias diferentes: os sistemas de conversão de energia e os de dessalinização. O verdadeiro problema nessas tecnologias é conseguir o projeto econômico ótimo e fazer a avaliação das plantas combinadas a fim de ser economicamente viável para regiões remotas ou áridas. A conversão de energia à partir de fontes renováveis de energia, incluindo a solar, exige alto custo de investimento e pesquisas devem ser desenvolvidas intensamente a fim de que esse tipo de tecnologia atinja um grau de amadurecimento suficiente para ser explorada em larga escala.

3.1.1 Água

A quantidade total de água sobre o planeta é de 1.386 milhões de quilômetros cúbicos (km³) em volume, que se distribuem da seguinte forma: 97,5% nos oceanos, 1,8% na forma de gelo, 0,6% nas camadas subterrâneas, 0,015% nos lagos e rios, 0,005% de umidade do solo, 0,0009% em forma de vapor na atmosfera e 0,00004% na matéria viva.

Segundo os números acima citados tem-se que existe menos de 1% de água doce que pode ser explorada. Outro problema é que a água se encontra na superfície apresenta uma distribuição extremamente desigual, ou seja, enquanto ela é abundante em algumas regiões do mundo, como no Sul do Brasil, onde durante quase todo o ano proporciona um espetáculo de tirar o fôlego nas cataratas da Foz do Iguaçu, em outras regiões como no Nordeste, sua ausência é sinônimo de pobreza e

fome.

Estudos apontam que existe no Nordeste, uma disponibilidade atual de 300.000 m³ de água salinizada em poços e açudes inativos, que potencialmente poderiam abastecer mais de 12 milhões de habitantes no semiárido, região essa, muito castigada pela seca e uma das soluções para combater essa escassez de água potável são os sistemas de dessalinização.

3.1.2 Dessalinização e Energia

A única fonte de água praticamente inesgotável de água são os oceanos. Sua principal desvantagem, no entanto, e sua alta salinidade. Portanto, seria interessante se houvesse uma maneira de fazer a dessalinização dessa água com intuito de armazená-la.

De acordo com a OMS, o limite permitido de salinidade da água é de 500 partes por milhão (ppm) e em alguns casos especiais até 1.000 ppm. A maioria da água disponível na Terra tem sua salinidade acima de 10.000 ppm, e água do mar normalmente tem sua salinidade entre 35000 e 45.000 ppm na forma de sais dissolvidos totais. O excesso de salinidade da água causa o seu péssimo sabor, problemas estomacais e efeitos laxativos. O propósito de um sistema de dessalinização é limpar ou purificar a água salobra ou salina proveniente dos oceanos e fornecer água com sólidos dissolvidos totais (SDT) dentro do limite de 500 ppm ou menos.

Segundo KALOGIROU (2009), os processos de dessalinização requerem grande de energia para separação do sal da água do mar. Esse fato é muito significativo porque é um custo recorrente que poucas áreas desabastecidas de água potável podem pagar. Muitos países do Oriente Médio, em função da receita proveniente do petróleo, tem dinheiro suficiente para investir e manter sistemas de dessalinização. Entretanto, as classes inferiores ao redor do mundo nem tem o dinheiro e nem os recursos do petróleo para permiti-los progredir de maneira similar. De acordo com KALOGIROU (2009), a capacidade instalada de sistemas de dessalinização de água no ano 2000 foi de aproximadamente 22 milhões de metros cúbicos por dia (22×10^6 m³/d), o qual é esperado um drástico crescimento nas próximas décadas. O dramático crescimento para produção de água dessalinizada levou a uma série de problemas e os mais significantes deles são relacionados ao consumo de energia e a poluição do meio

ambiente causada pelo uso de combustíveis fósseis. No ano 2000 foi estimado que para produção de 22 milhões de metros cúbicos por dia ($22 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$) de água dessalinizada são necessários 203 milhões de toneladas de petróleo por ano (aproximadamente $8,5 \times 10 \text{ EJ/ano}$ ($8,5 \times 10^{18} \text{ J/ano}$) ou $2,36 \times 10^{12} \text{ kWh/ano}$ de combustível).

Neste presente trabalho serão abordados somente os processos de dessalinização por osmose reversa e por destilação, ambos utilizando a energia solar como fonte primária de energia.

3.1.3 Salinidade

A salinidade (do latim: salinitas) é uma medida da quantidade de sais existentes em massas de água naturais, como sejam um oceano, um lago, um estuário ou um aquífero. A forma mais simples de descrever a salinidade é como a razão entre a quantidade total de sólidos (em massa) dissolvidos e a massa da água que lhe serve de solvente (daí que a forma mais comum de expressão seja em g/Kg ou em percentagem (por cem) ou permilagem (por mil), sendo que 1 % representa 10 g/kg. Segundo a RESOLUÇÃO No 357, DE 17 DE MARÇO DE 2005, capítulo 1, art. 2º do CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA, seguem as seguintes definições:

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

3.2 Sistemas de dessalinização

Neste capítulo será realizada uma descrição básica geral dos sistemas de dessalinização. Existem diversos processos de dessalinização da água e podem ser agrupados em dois grupos principais, são eles:

- Processos de dessalinização térmica;
- Processos de dessalinização por membranas.

Na **Figura 9** podem ser vistas as combinações de diferentes fontes de energia renovável e a recomendação de aplicabilidade para cada método de dessalinização. Já a **Figura 10** indica por meio de um gráfico de pizza, a divisão de fontes de energia renovável que são utilizadas para fornecimento de energia para sistemas de dessalinização de água e como esses sistemas existentes estão proporcionalmente divididos em função de sua tecnologia.

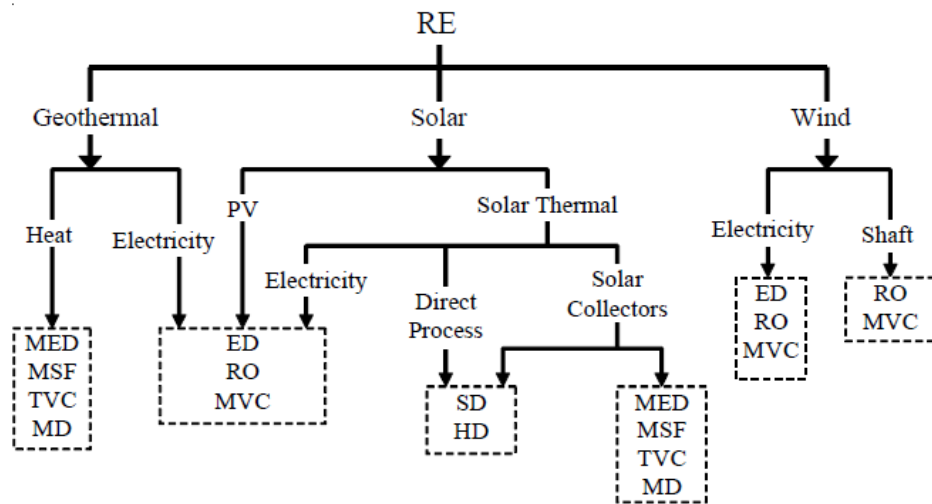
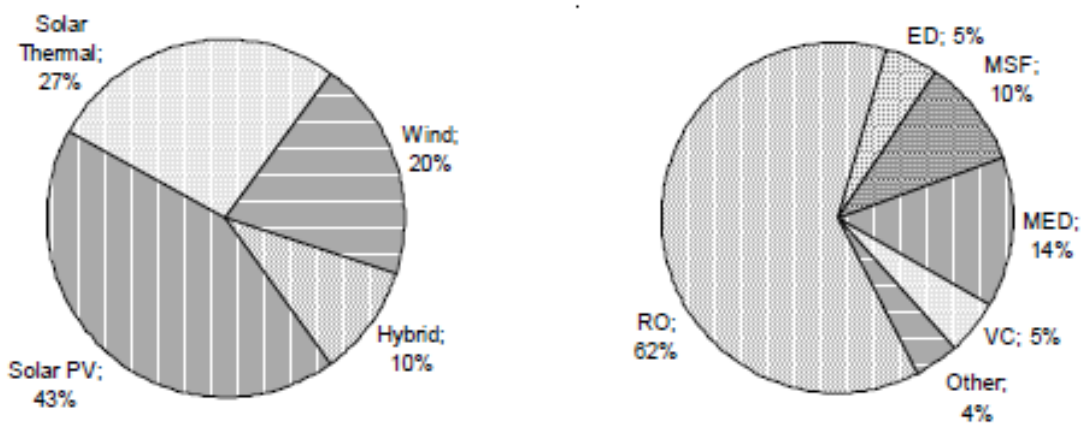


Figura.9 – Possíveis combinações de tecnologias das principais fontes de energias renováveis e métodos de dessalinização.

Fonte: MATHIOULAKIS et al. (2007)



1. Renewable energy-driven desalination processes and energy sources.

Figura.10 – Fontes renováveis de energia utilizadas nos processos de dessalinização

Fonte: MATHIOULAKIS et al. (2007)

A **Tabela 2** faz uma relação entre a água que se pretende realizar o tratamento e sua qualidade após esse, a fonte de energia renovável disponível, o volume diário de água desejado e as tecnologias de aproveitamento energético renovável e de dessalinização que podem ser combinadas.

Tabela.2 – Combinações recomendadas entre métodos de dessalinização e fontes de energias renováveis.

Recommended renewable energy–desalination combinations

Feed water quality	Product water	RE resource available	System size			Suitable combination
			Small (1–50 m ³ d ⁻¹)	Medium (1–50 m ³ d ⁻¹)	Large (1–50 m ³ d ⁻¹)	
Brackish water	Distillate	Solar	*			Solar distillation
	Potable	Solar	*			PV–RO
	Potable	Solar	*			PV–ED
	Potable	Wind	*	*		Wind–RO
	Potable	Wind	*	*		Wind–ED
Seawater	Distillate	Solar	*			Solar distillation
	Distillate	Solar		*	*	Solar thermal–MED
	Distillate	Solar			*	Solar thermal–MED
	Potable	Solar	*			PV–RO
	Potable	Solar	*			PV–ED
	Potable	Wind	*	*		Wind–RO
	Potable	Wind	*	*		Wind–ED
	Potable	Wind		*	*	Wind–MVC
	Potable	Geothermal		*	*	Geothermal–MED
Potable	Geothermal			*	Geothermal–MED	

Fonte: MATHIOULAKIS et al. (2007)

3.2.1 Processos de Dessalinização Térmica

O processo térmico corresponde ao processo natural do ciclo da água, ou seja, a água salgada aquece, evapora, condensa e precipita sob a forma de água potável.

Para evaporar a água é necessário atingir-se uma temperatura adequada em relação à temperatura ambiente e, ao mesmo tempo, assegurar uma grande quantidade de energia para manter o processo. Nos processos de dessalinização térmica, o exemplo mais simples é a destilação da água. O princípio da dessalinização da água por destilação é muito simples. A água salina é aquecida para gerar um feixe de vapor que é recolhido e depois condensado, resultando assim numa água não salina.

Existem diversas tecnologias de dessalinização por destilação dos quais se destacam:

- Destilação multi-estágios;
- Destilação múltiplo efeito;
- Destilação por compressão de vapor;
- Destilação solar.

Segundo MILLER (2003), nos processos térmicos existem também outros métodos diferentes das destilações mencionadas. Esses processos baseiam-se na refrigeração da água salina a fim de obterem a água congelada isenta dos sais. Estes métodos são compostos por diferentes etapas durante a dessalinização da água salina. Há uma fase em que há refrigeração da água salina para formação de cristais de gelo, há uma outra fase de remoção dos cristais de gelo flutuantes e em seguida aplica-se a energia térmica em forma de calor para derreter o gelo formado desprovido dos sólidos dissolvidos. Estes processos de dessalinização também são referenciados por processos de cristalização dos quais se destacam:

- Congelamento à vácuo;
- Dessalinização por congelamento através de refrigerante secundário;
- Dessalinização por formação de hidratos de gás ou clatratos¹

A **Tabela 3** indica processo mais indicado para cada faixa de concentração de sais presentes na água.

Tabela.3 – Processo de destilação recomendados por concentração de sais dissolvidos em água

Processo	Concentração
Destilação	10.000 a 50.000 mg/L
Congelamento	5.000 a 50.000 mg/L
Eletodialise	1.000 a 5.000 mg/L
Troca Iônica	10 a 2.000 mg/ L
Osmose Inversa	1.000 a 15.000 mg/ L

Fonte: MOURA, et al. (2007)

¹ Clatratos são "misturas", onde uma molécula pequena ou átomo grande, como o metano, xenônio e o óxido nítrico ficam presos em cavidades de cristais quando a solução é resfriada e um dos componentes se cristaliza.

Destilação Multi-Estágios

A técnica de destilação multi-estágios consiste numa série de câmaras onde a evaporação da água salina resulta da pressão aplicada. Atualmente a utilização dessa técnica corresponde a mais de 40% da capacidade de dessalinização mundial (FORMOSO, 2010).

Na destilação multi-estágios, MSFD (Multi-Stage Flash Distillation), a água salina é aquecida e vaporizada em várias câmaras e em seguida a água destilada oriunda do processo de condensação do vapor é coletada. No primeiro estágio, a água salina entra numa primeira câmara para ser aquecida (CLAYTON, 2006). A temperatura elevada no interior da primeira câmara faz com que uma parte da água se vaporize instantaneamente (GUERREIRO, 2009), então o vapor é recolhido sob a forma de destilado através do condensador da câmara (CLAYTON, 2006). A salmoura² restante passa para a fase seguinte, onde o processo ocorre agora a uma temperatura de operação inferior à anterior. Esta diminuição da temperatura deve-se à diminuição de pressão entre as fases consecutivas (GUERREIRO, 2009). O processo repete-se sucessivamente por diversas câmaras, consideradas estágios do processo, até que se atinge a pressão atmosférica e a salmoura atinja valores de concentração de sais muito elevados, sendo esta enviada para um meio receptor desta. O condensador é arrefecido pela própria água do mar que alimenta o sistema (CLAYTON, 2006).

Podem existir inúmeras etapas de vaporização que influenciarão o grau de aproveitamento da corrente de água salgada. Tipicamente, este método de destilação pode conter de quatro a quarenta câmaras, onde se realizam o aquecimento, a evaporação e a condensação dos vapores e cada extração do destilado numa câmara representa um estágio do processo. Por essa razão, esse método é designado por Destilação Multi-Estágio (MSFD). A **Figura 11** é um diagrama que ilustra o método de dessalinização por destilação em multi-estágios.

² salmoura: solução de água saturada de sal

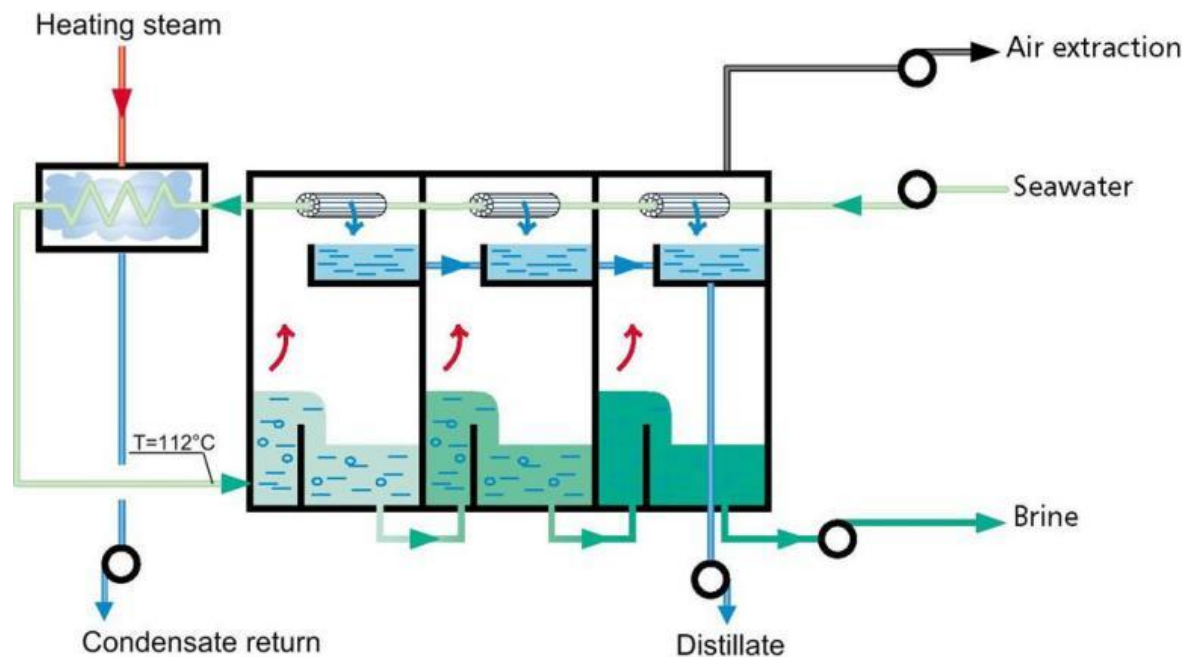


Figura.11 – Ilustração do método de destilação multi-estágios

Fonte: SIDEM VEOLIA - <http://www.sidem-desalination.com/en/Process/MSF/>

A destilação multi-estágios, MSFD (Multi-Stage Flash Distillation), usa qualquer outro tipo de fonte de energia para obtenção do calor necessário para o processo de destilação e tem capacidade para tratar grandes quantidades de água salina. No entanto, é uma técnica muito dispendiosa, uma vez que necessita de grande quantidade de energia para alimentar o processo (GUERREIRO, 2009).

Destilação Multi-Efeito

Segundo CLAYTON (2006) Destilação Multi-Efeito, MED, (Multi-Effect Distillation) emprega um certo número de estágios, normalmente entre 8 e 12, para produzir quantidades acumulativas de água destilada. Cada estágio é caracterizado por um recipiente (vaso) de pressão, atravessado por um feixe de tubos. Cada recipiente, por sua vez, tem uma pressão ambiente ajustada a níveis mais baixos do que a pressão atmosférica, de forma a permitir a ebulição da água em temperatura inferior àquela necessária ao nível do mar.

O processo de Destilação Multi-Efeito, MED – Multi-Effect Distillation, é semelhante ao de destilação multi-estágios, MSFD (Multi-Stage Flash Distillation), com a exceção de que o vapor obtido no primeiro compartimento por meio do aquecimento dos jatos

de água salina é utilizado para aquecer e evaporar a água salina no compartimento seguinte. A fração de água que não foi evaporada num compartimento é dirigida para o compartimento seguinte onde desempenhará uma *dupla função*, isto é, arrefecer o vapor no circuito e ao mesmo tempo ser reaquecida e vaporizada novamente. Neste sistema a temperatura diminui gradualmente nos sucessivos compartimentos e o processo termina quando o vapor não tem mais temperatura suficiente para evaporar a água salina num compartimento (KALOGIROU, 2009).

Segundo ALVES (2007), a temperatura máxima de operação neste tipo de destilador é da ordem de 64 a 70°C e a capacidade média varia de 2.000 a 20.000 m³/dia.

GUERREIRO (2009) comenta que a redução da temperatura de ebulição da água é importante para a redução dos custos de energia necessários ao processo e para prevenir incrustações nos equipamentos utilizados, pois certos sais dissolvidos em água fria precipitam-se quando a temperatura é elevada, como é o caso de certos carbonatos e sulfatos, não havendo assim, a necessidade de um complexo pré-tratamento da água salgada. Trata-se de uma técnica com baixo consumo elétrico, comparativamente a outras técnicas (MSFD ou osmose inversa). O consumo de energia nos sistemas que empregam esse processo varia entre 40 e 60 kWh/m³ de água produzida.

Segundo KALOGIROU (2009), a destilação multi-efeito MED (Multi-Effect Distillation), tal como a destilação multi-estágios (MSFD), adapta-se a qualquer tipo de fonte de calor e tem uma capacidade para dessalinizar grandes quantidades de água salgada. A **Figura 12** é um diagrama que ilustra o método de dessalinização por Destilação Multi-Efeito.

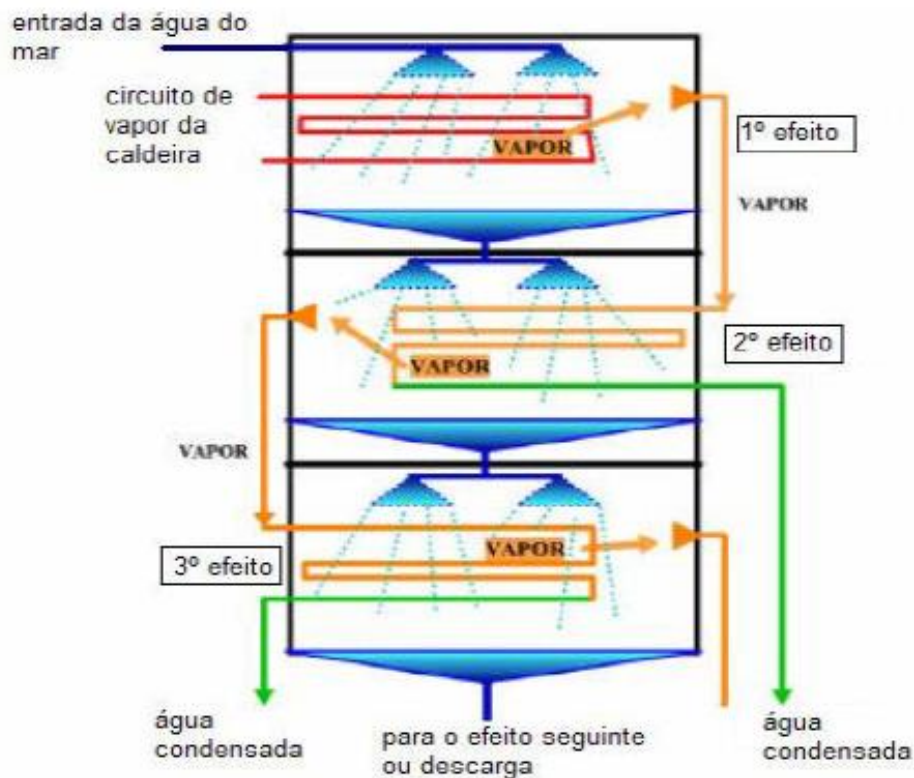


Figura.12 – Ilustração do método de destilação multi-efeito

Fonte: CRUZ, 2012

Destilação por Compressão de Vapor

O princípio de funcionamento da destilação por compressão de vapor, VCD - Vapour Compression Distillation, é semelhante ao da destilação de múltiplo-efeito (MED) com a diferença de que a VCD tem por base a compressão do vapor de água gerado na evaporação da água a altas pressões (GUERREIRO, 2009).

Este método de dessalinização é empregado na produção de água potável em estações de pequena e média escala, como em hotéis, barcos e pequenas comunidades. A capacidade destas unidades, em geral, é inferior a 100 m³/dia, embora existam algumas que atinjam 3000 m³/dia. O consumo energético varia de 7 a 12 kWh/m³ (CLAYTON, 2006).

Na técnica de destilação por compressão de vapor, há duas formas distintas de operação, são elas: A Compressão Mecânica de Vapor (MVC – Mechanical Vapor Compression) e a Compressão Térmica de Vapor (TVC – Thermal Vapor Compression). Na primeira, como era de se esperar, a compressão do vapor pode ser feita por meio de um compressor mecânico, enquanto na outra, são adicionadas

pequenas quantidades de vapor a alta pressão por meio de um injetor. A técnica MVC dá-se apenas numa única etapa, enquanto a TVC necessita de várias etapas ao longo do processo (GUERREIRO, 2009).

No processo MCD, obtém-se o vapor de água através do aquecimento da água salina usando uma fonte de calor designado por evaporador. O vapor gerado é comprimido com um compressor mecânico e encaminhado para o interior do evaporador. Da compressão, a temperatura e a pressão do vapor aumentam e a tubulação de água salina que alimenta o sistema, por se encontrar a uma temperatura mais baixa, condensa o vapor comprimido no trocador de calor e, simultaneamente, aquece-se, originando mais vapor, desse o modo o ciclo se repete (CLAYTON, 2006).

A capacidade máxima deste método é limitada pela capacidade do compressor. Por causa do elevado volume de vapor a baixa pressão que terá de ser comprimido é necessário utilizar um compressor de elevada capacidade (CLAYTON, 2006). O compressor mecânico pode funcionar por meio de um motor diesel ou elétrico. A faixa de temperatura máxima de operação é de 64 a 70°C.

Na unidade de compressão de vapor por meio de um jato de vapor, também chamado de termocompressor, um orifício no jato de vapor cria e extrai vapor de água do recipiente principal, criando uma pressão ambiente mais baixa nesse recipiente. O jato de vapor comprime o vapor de água extraído, esta mistura é condensada nas paredes do tubo para fornecer energia por meio do calor de condensação e evaporar a água salina que é aplicada no lado externo das paredes do tubo no recipiente (FORMOSO, 2010).

A compressão de vapor é considerada por alguns autores como sendo o processo de destilação mais eficiente e a sua capacidade de funcionar com temperaturas mais baixas possibilita a utilização de materiais metálicos, como o alumínio, reduzindo o ataque da corrosão (GUERREIRO, 2009).

Pode-se ver na **Figura 13** a representação do sistema que ilustra o método de destilação por compressão de vapor.

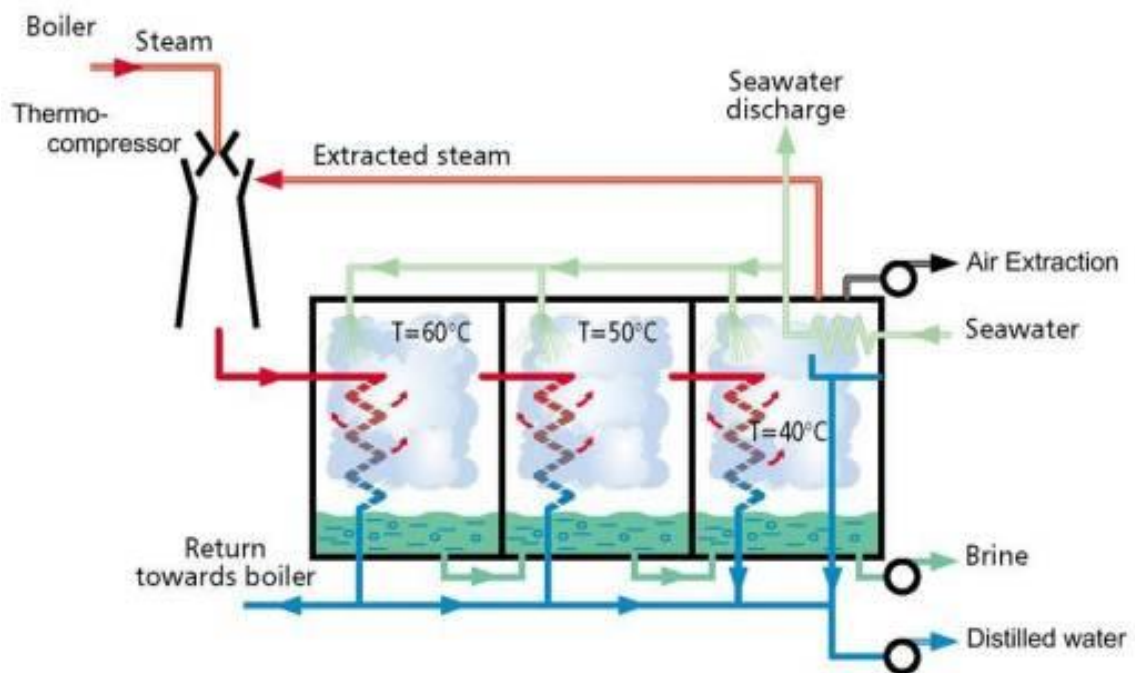


Figura.13 – Ilustração do método de destilação por compressão de vapor.

Fonte: SIDEM VEOLIA - <http://www.sidem-desalination.com/en/Process/MED/MED-TVC/>

Dessalinização por Congelamento a Vácuo

A dessalinização da água do mar por congelamento é utilizada em regiões frias em que a temperatura é inferior a 0°C . Ao congelar a água do mar a uma temperatura negativa próxima dos -2°C , formam-se cristais de gelo de água doce (ALVES, 2007). Na dessalinização por congelamento a vácuo, a água do mar é injetada para o interior de uma câmara de vácuo a uma pressão aproximadamente $0,004\text{ ATM}$. A esta baixa pressão, ocorre subitamente uma evaporação parcial da água injetada bem como a perda de calor da água, o que provoca o seu arrefecimento e a formação de cristais de gelo. Os cristais de gelo que flutuam na água salina são lavados com água doce para retirarem os sais adsorvidos e depois fundidos em água dessalinizada (CLAYTON, 2006). Esta água por ser menos densa que a água do mar é removida facilmente da câmara de lavagem e fundição, como está representado na **Figura 14**.

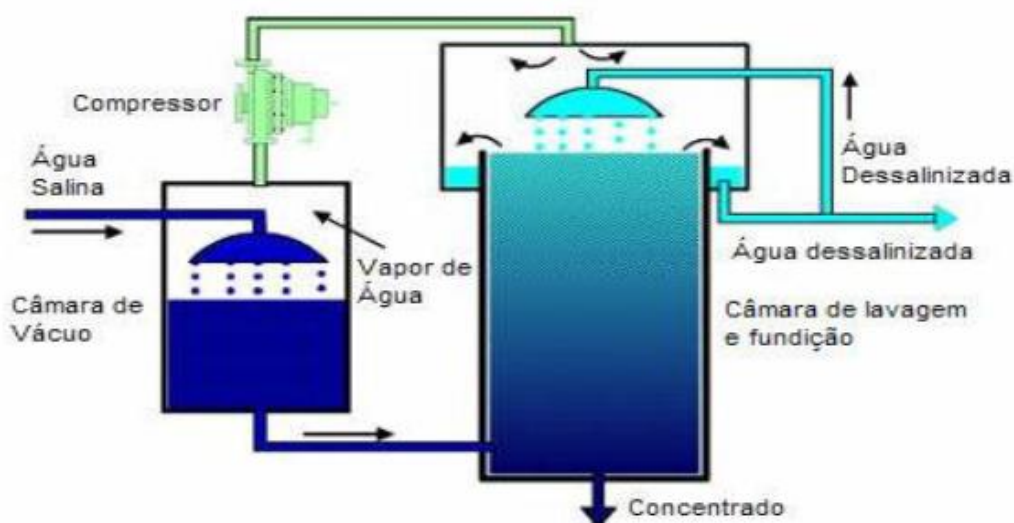


Figura.14 – Ilustração do método de destilação por congelamento a vácuo

Fonte: CRUZ, 2012

Este método de dessalinização da água do mar em teoria requer menos energia do que os outros processos de destilação térmica e é menos suscetível a problemas de formação de incrustações que afetam os demais métodos. No entanto, foram construídas poucas plantas de dessalinização por congelamento a vácuo (CLAYTON, 2006). A produção de água doce é em média de 40 a 50 l/m².dia a uma temperatura de -5°C e de 120 a 160 l/m².dia a -20°C.

À primeira vista dá-se a impressão que o congelamento a vácuo é um processo mais econômico que a destilação, mas de fato não o é, pois na destilação, uma boa parte da energia necessária para efetuar a evaporação da água é recuperada no calor libertado durante a condensação. Por outro lado, a produção de calor necessário à evaporação é, em geral, menos custosa que a requerida no congelamento da água salina. No entanto, este último processo apresenta algumas vantagens em relação à destilação: as baixas temperaturas minimizam os problemas de corrosão e a água doce obtida é fresca, mineralizada e bem oxigenada (ALVES, 2007).

Dessalinização por Congelamento através de Refrigerante Secundário

Na dessalinização por congelamento através de refrigerante secundário (DCRS) utiliza-se uma substância volátil e de baixa solubilidade na água do mar. Então, esta substância é comprimida e arrefecida até uma temperatura próxima da temperatura

de congelamento da água do mar e, posteriormente misturada com esta. Devido à baixa temperatura, embora a substância refrigerante se evapore, ela é capaz de arrefecer a água do mar provocando a formação dos cristais de gelo. O gás butano é uma das substâncias refrigerante secundárias normalmente empregadas. Este método de dessalinização tem uma certa vantagem em relação a destilação por compressão de vapor (VCD - Vapour Compression Distillation) por utilizar equipamentos de menor dimensão para obter a água destilada, todavia, a destilação por compressão de vapor oferece vantagens significativas por possuir uma elevada capacidade de transferência de calor (PEREIRA, 2007). A **Figura 15** ilustra o diagrama de um sistema de dessalinização por congelamento através de refrigerante secundário (DCRS).

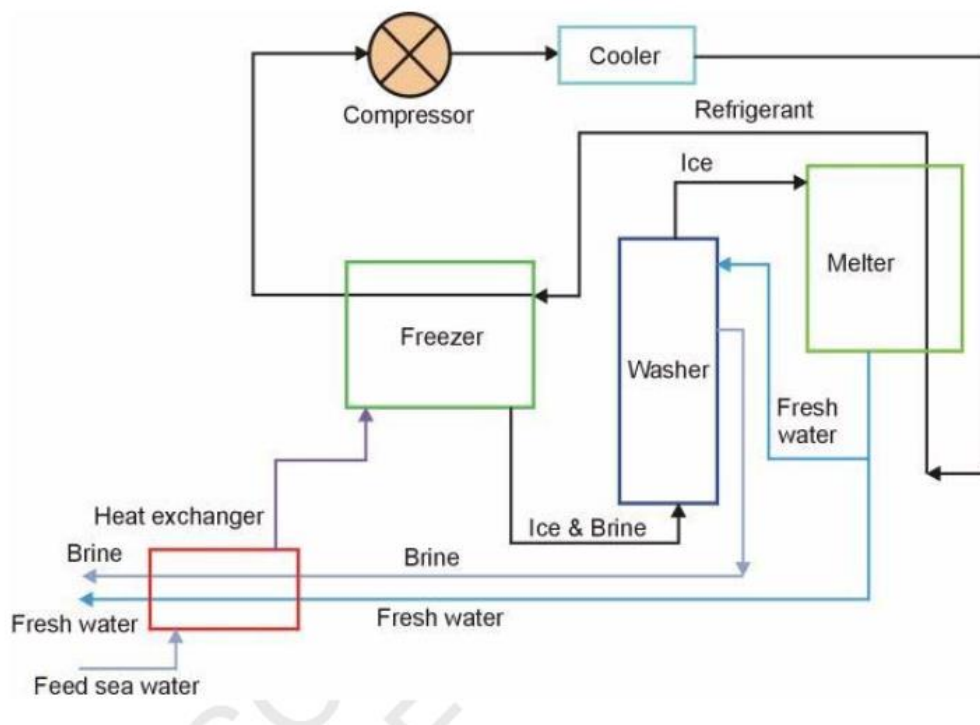


Figura.15 – Diagrama de um sistema de dessalinização por congelamento através de refrigerante secundário (DCRS).

Fonte: Z.LU AND L.XU, THERMAL DESSALINATION PROCESS

Dessalinização por formação de hidratos de gás ou clatratos

Gases hidratados ou clatratos de gases são agregações cristalinas entre as moléculas de água ligadas por ponte de hidrogénio em redor de uma molécula de gás. Neste método de dessalinização mistura-se a água salina com um gás que irá provocar a

formação do clatrato, dentro de um compartimento ou câmara de mistura. O clatrato formado precipita-se, separando-se assim da água do mar e facilitando a remoção física do precipitado. O clatrato após estar separado é aquecido depois, permitindo a retirada do gás e, obtendo assim uma água desprovida de sólidos ou sais dissolvidos. Este método é praticamente semelhante ao da dessalinização por congelamento através de refrigerante secundário (DCRS), sendo que a diferença entre eles, reside na temperatura de formação de clatratos, que é maior do que a temperatura de congelamento da água do mar, tornando este método menos dispendioso em termos energéticos (PEREIRA, 2007).

Dessalinização por Destilação com Energia Solar

Essa será uma das técnicas de dessalinização que será objeto deste estudo e comparada neste, em termos quantitativos e qualitativos, com a técnica de osmose reversa, futuramente explicada também neste trabalho.

A destilação solar embora utilize o calor cedido gratuitamente pela natureza, obviamente por meio do Sol, requer amplas áreas de terreno para exposição da água ao Sol, razão pela qual se restringe à produção de volumes de água doce reduzidos (ALVES, 2007).

A destilação solar tem sido usada durante muitos anos e a sua tecnologia é muito simples. Neste método a água do mar é depositada dentro de um tanque. Este tanque é composto de uma superfície negra que absorve calor e revestido com placas de vidro transparente que permitem a entrada da radiação solar. O calor proveniente da radiação solar aquece e evapora a água do mar. Então, o vapor desprovido de sais dissolvidos é condensado na superfície de vidro e coletado na forma de água destilada. Este método de destilação pode ser considerado como destilação de único efeito (CLAYTON, 2006).

A destilação solar corresponde a um dos dois métodos de dessalinização que serão comparados nesse trabalho e, portanto, será alvo de uma descrição mais detalhada a frente nesse estudo. A **Figura 16** ilustra um dos modelos de destiladores solares.

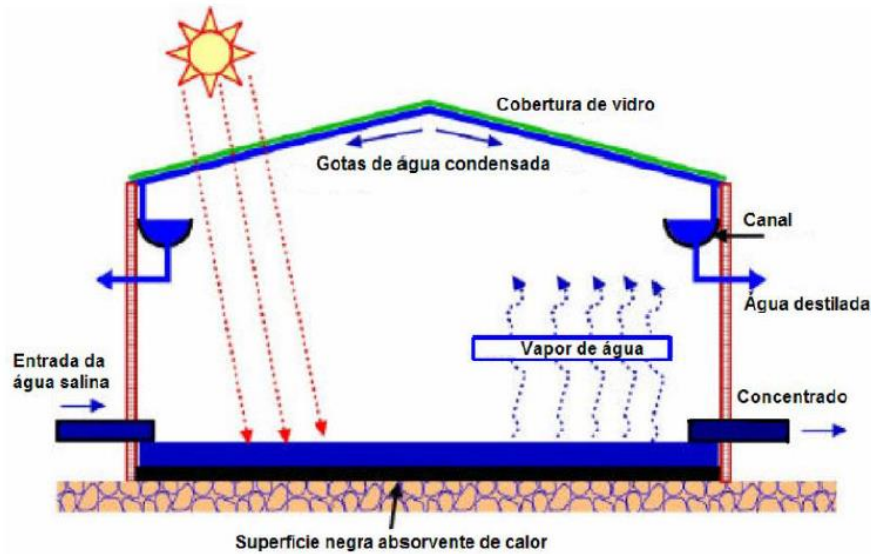


Figura.16 – Ilustração de um modelo de destilador solar

Fonte: CRUZ, 2012

3.2.2 Processos de Dessalinização por Membranas

Com o aparecimento das tecnologias com o uso de membranas, tornou-se possível tratar a água sem recorrer a produtos químicos, a custos relativamente baixos. Nos processos por membranas a dessalinização é feita empregando membranas sintéticas semipermeáveis que tem a capacidade de “filtrar” os sais dissolvidos quando se aplica um gradiente de pressão ou uma diferença de potencial elétrico entre as superfícies das membranas (MADAENI, 1999).

Comercialmente, as membranas são utilizadas em dois métodos de dessalinização importantes: a eletrodialise e a osmose inversa ou reversa. Ambos os sistemas utilizam a habilidade das membranas separarem seletivamente os sais da água (ALVES, 2007).

Dessalinização por Eletrodialise

A Eletrodialise (ED) é uma evolução da eletrólise. Na dessalinização por eletrodialise, uma determinada quantidade de água salgada é colocada num recipiente onde existem dois polos eletricamente alimentados por corrente contínua. As moléculas de cloreto de sódio dissociam-se em íons, indo os íons de sódio para o polo negativo e íons de cloro para o polo positivo. Outros sais também são afetados por este

fenômeno. Além da energia elétrica, a ED requer o uso de membranas especiais, semipermeáveis, as quais podem ser catiônicas ou aniônicas. As membranas são colocadas paralela e alternadamente formando vários compartimentos, sendo que as catiônicas permitem a passagem apenas de íons positivos, enquanto as aniônicas permitem a passagem de íons negativos. Devido ao campo elétrico formado entre os dois polos, situados entre o primeiro e o último compartimento, os íons migram para os polos de polaridade inversa, atravessando as membranas ou sendo retidos por elas. Obtêm-se assim compartimentos com água potável com uma determinada quantidade de sais, bem como compartimentos com água mais salgada que a original, conhecida como salmoura ou concentrado (ALVES, 2007).

A **Figura 17** é uma simplificação do princípio de funcionamento de eletrodialise com duas membranas.

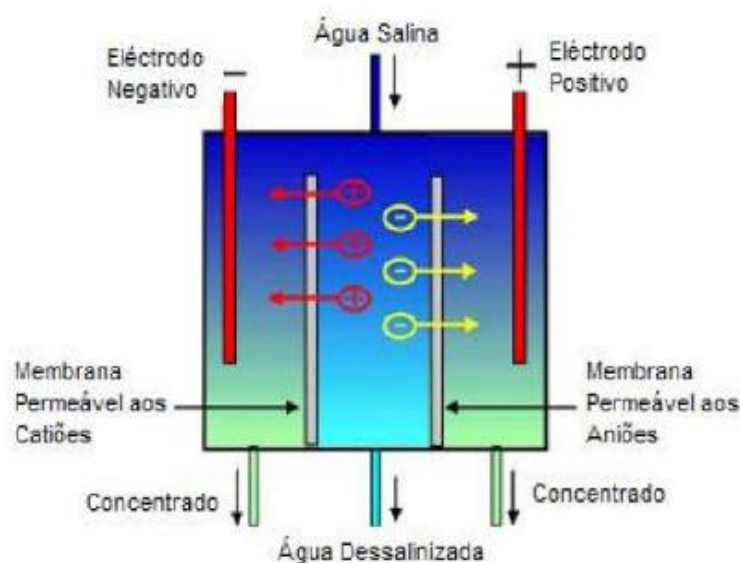


Figura.17 - Ilustração do princípio de funcionamento de eletrodialise com duas membranas.

Fonte: CRUZ, 2012

Usualmente, as unidades de eletrodialise possuem centenas de membranas com uma espessura de 0,5 mm e um espaçamento entre elas de 1 mm, por onde a água circula (ALVES, 2007). O consumo de energia é proporcional à quantidade de sais removidos, sendo o consumo de energia elétrica na ordem de 1,5 a 2 kWh/m³ de água tratada. A ED é responsável por aproximadamente 5% do volume mundial de água dessalinizada no mundo (KOBAYAMA, 2004).

Dessalinização por Osmose Inversa ou Reversa

Esse será um dos métodos de dessalinização objeto deste estudo comparativo e por essa razão haverá um melhor detalhamento desta técnica.

Osmose é o nome dado ao movimento da água entre meios com concentrações diferentes de solutos separados por uma membrana semipermeável. É um processo físico-químico importante na sobrevivência das células.

A água movimenta-se sempre de um meio hipotônico (menos concentrado em soluto) para um meio hipertônico (mais concentrado em soluto) com o objetivo de se atingir a mesma concentração em ambos os meios, tornando-os isotônicos, através de uma membrana semipermeável, ou seja, uma membrana cujos poros permitem a passagem de moléculas de água, mas impedem a passagem de outras moléculas.

A Osmose Reversa é um processo de separação que usa pressão para forçar uma solução através de uma membrana que retém o soluto em um lado e permite que o solvente passe para o outro lado. Mais formalmente, é o processo de forçar a solução de uma região de alta concentração de soluto através de uma membrana para uma região de baixa concentração de soluto, através da aplicação de uma pressão externa que exceda a pressão osmótica.

Na **Figura 18** pode ser visto a ilustração de um modelo de membrana semipermeável utilizada na grande maioria dos sistemas de osmose. Diz-se semipermeável devido a sua capacidade seletiva que permite a passagem do solvente, mas não de soluto, respectivamente neste caso, a água e o sal.

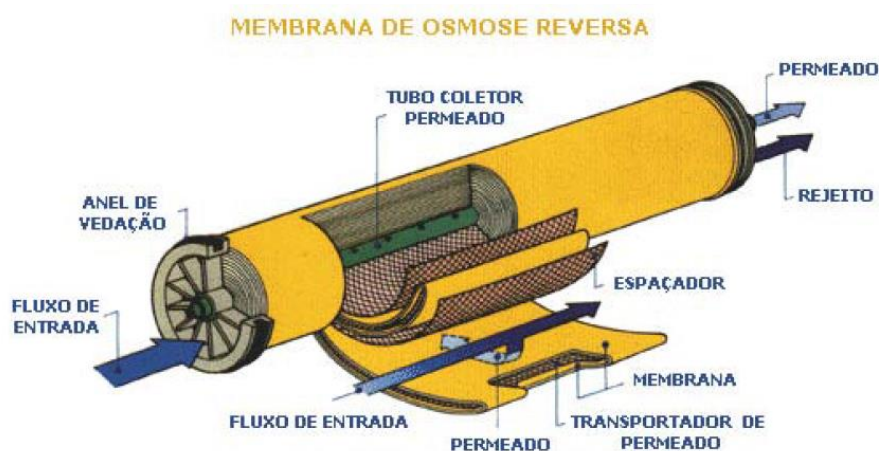


Figura.18 – Modelo de membrana semipermeável utilizada em sistemas de osmose reversa.

Fonte: <http://www.waterworks.com.br/tecnologia.php>

Na **Figura 19** a membrana semipermeável é vista em detalhes.

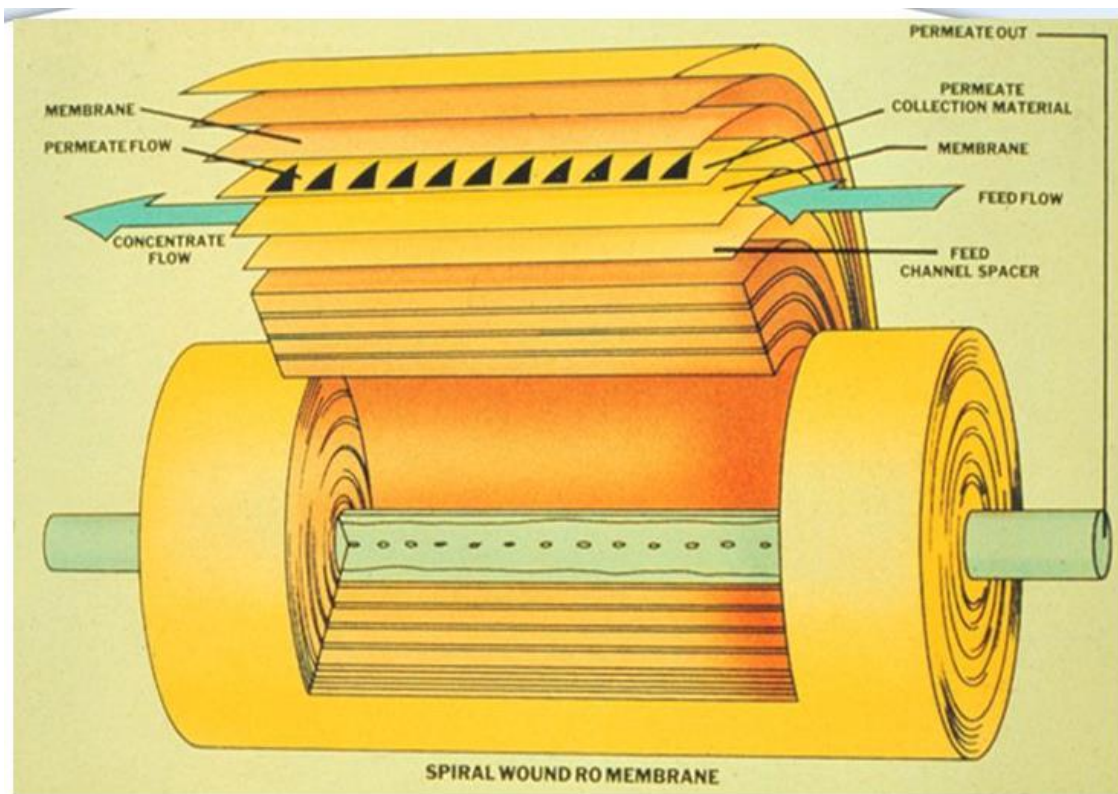


Figura.19 – A membrana semipermeável em detalhes

Fonte: VEOLIA WATER

As membranas usadas na osmose reversa têm uma camada de barreira densa, feita de polímeros, onde a maior parte da separação ocorre. Na maioria dos casos a membrana é projetada para permitir que passe somente água através dessa camada densa, enquanto previne a passagem de solutos (como íons de sal, por exemplo).

Princípio de Funcionamento da Osmose Reversa

Quando duas soluções com concentrações diferentes de soluto são misturadas, o volume total de soluto dessas soluções será distribuído uniformemente no total de solvente. Isso é conhecido como difusão, onde o soluto mover-se-á das áreas de alta concentração para outras áreas de menor concentração até que a concentração em toda a mistura seja uniforme, que é quando a mistura chega ao estado de equilíbrio. Ao invés de misturar as duas soluções juntas, isso pode acontecer colocando-as em dois compartimentos onde elas são separadas uma da outra por uma membrana

semipermeável.

A membrana semipermeável não permite que o soluto se mova de um compartimento para o outro, mas permite que o solvente o faça. Uma vez que o equilíbrio não seja alcançado pelo movimento de soluto do compartimento de alta concentração para o de baixa, ele é atingido pela movimentação do solvente das áreas de baixa concentração de soluto para áreas de alta concentração de soluto. Quando o solvente se move para fora das áreas de baixa concentração de soluto faz com que estas áreas se tornem mais concentradas. Por outro lado, quando o solvente se move para áreas de alta concentração, a concentração de soluto diminuirá. Este processo é chamado de osmose. A tendência que o solvente tem de fluir através da membrana semipermeável pode ser expressa como “Pressão Osmótica”. De modo análogo, esse fluxo pode ocorrer no sentido contrário quando aplicada uma pressão maior à pressão osmótica.

Na osmose reversa, aplica-se uma pressão no compartimento com alta concentração dos sais. Nesse caso, há duas forças influenciando o movimento da água: a pressão causada pela diferença na concentração de soluto entre os dois compartimentos (a pressão osmótica) e a pressão aplicada externamente.

Trata-se de um processo induzido, obtido por intermédio da aplicação mecânica de uma pressão superior à pressão osmótica, do lado da solução mais concentrada, fazendo com que ocorra um fluxo no sentido da solução de menor concentração salina (KOBAYAMA, 2004).

A taxa de rejeição de salmoura ou concentrado no final do processo varia entre 20-70% do volume total de água que entra no circuito, consoante a quantidade de sais na água bruta.

A **Figura 20** ilustra de forma simplificada o princípio da osmose inversa.

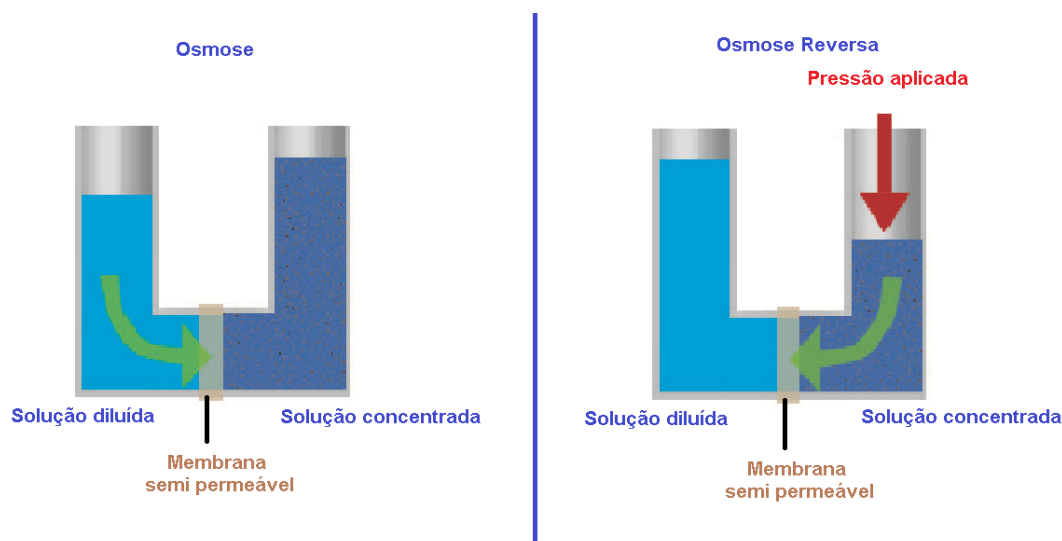


Figura.20 – Ilustração simplificada do princípio da osmose reversa

Fonte: <http://www.elessia.com/pt/principio-de-coagulacao-floculacao-2.html>

Segundo KOBAYAMA (2004), existem vários tipos de membranas, podendo ser citadas as mais utilizadas: acetato de celulose, poliamidas e polissulfonas [7]. Em geral, a membrana é composta por poros de dimensões atômicas (< 10 Angstrom – $100 \mu\text{m}$), retendo assim todas as partículas superiores à sua dimensão (ALVES, 2007). Quanto à configuração geométrica, há modelos enrolados em espiral, planas em placas, tubular ou em fibras ocas e a vida útil da membrana é um fator crítico, variando entre 3 e 5 anos e seu desempenho é afetado, não só pela compactação, mas também por incrustações e entupimentos.

Sistemas de Dessalinização Híbridos

Um sistema de dessalinização híbrido consiste em uma combinação de dois ou mais processos de dessalinização operando em uma única instalação, permitindo incorporar as melhores características de cada um dos processos. As configurações híbridas (membrana / térmica / potência) são caracterizadas pela flexibilidade na operação, menor consumo específico de energia, baixo custo de construção (quando comparado com os custos dos sistemas construídos separadamente), alta disponibilidade da instalação e melhor combinação entre água e energia. O sistema de dessalinização híbrido é econômico para estações de maior porte, isto é, aquelas

com capacidade de iguais ou superiores a 100000 m³/dia.

Um exemplo de um sistema híbrido seria uma unidade de destilação associada a uma de osmose reversa, construída como parte de uma estação com duplo propósito, a geração de eletricidade e a dessalinização. A principal vantagem desse sistema seria uma diminuição do custo da água dessalinizada.

Os sistemas de dessalinização híbrida, combinando os processos de dessalinização térmica e de osmose reversa associados com sistemas de geração de energia elétrica são considerados atualmente uma boa alternativa econômica para as plantas de evaporação de dupla finalidade.

3.3 Detalhamento dos sistemas de dessalinização por destilação solar

Introdução

O uso de energia solar em processos térmicos de dessalinização é uma das mais promissoras aplicações de energia renovável para dessalinização da água do mar.

A primeira aplicação conhecida de destilação solar foi em 1872 quando um destilador em La Salinas no deserto norte do Chile iniciou suas três décadas de operação para fornecer água potável para animais utilizados na mineração de nitrato. O destilador utilizou um recipiente raso com fundo preto para manter a água salgada e absorver a radiação solar, a água vaporizada da salmoura, condensou-se no lado de dentro de uma cobertura inclinada transparente, correu para as cubas e foi coletada em tanques no final do destilador. A maioria dos destiladores construídos e estudados desde então, foram baseados nos mesmos conceitos, embora muitas variações na geometria, materiais, métodos de construção e operação tenham sido empregados.

Segundo DUFFIE (2013), uso de energia solar em processos térmicos de dessalinização é uma das mais promissoras aplicações de energia renovável para dessalinização da água do mar. Na operação, a radiação solar é transmitida através da cobertura e absorvida pela água salgada e pelo recipiente. A solução é aquecida, a água evapora e o vapor sobe para a cobertura por convecção, onde é condensado no lado de dentro da cobertura. O condensado segue pelo por gravidade para as cubas coletoras nas bordas inferiores da cobertura, esta deve ser suficientemente inclinada para que a tensão superficial da água faça o condensado escorrer até as

cubas coletoras sem cair de volta no recipiente do destilador. A cuba é construída com afastamento suficiente ao longo de sua extensão para que o condensado flua para extremidade inferior do destilador, onde drena para o sistema de coleta da água destilada. A operação do destilador pode ser contínua ou por batelada.

As condições que favorecem a utilização de destiladores solares, são:

- Escassez de fonte de água doce;
- Energia solar suficiente;
- Pequenas demandas de água potável (ao contrário de outras técnicas de dessalinização solar, os destiladores solares são mais adequados para baixas demandas de água potável), conforme abaixo:
 - ✓ Para volumes diário de água potável de 1000 litros (1 m³) ou mais, os sistemas de osmose reversa ou eletrodialise devem ser consideradas aos destiladores solares;
 - ✓ Para volumes diário de água potável de 200.000 litros (200 m³), outras técnicas de dessalinização serão normalmente mais econômicas comparadas aos destiladores solares;
- Fornecimento de combustível caro e/ou não confiável;
- Limitações de mão de obra técnica para a operação e manutenção dos equipamentos;
- A disponibilidade de materiais de baixo custo de construção e de mão de obra.

As etapas básicas de um destilador solar são:

1. Recebimento da radiação solar
2. Produção do vapor d'água à partir da água salina ou salobra
3. Condensação do vapor d'água (condensado)
4. Coleta do condensado (água pura)

Qualidade da água

O processo de destilação remove impurezas, como sais e elimina organismos microbiológicos. Os destiladores solares são eficazes em remover:

- Sais e minerais (Na, Ca, As, Fl, Fe e Mn);
- Bactérias (E.Coli, cholera e botulinus);
- Parasitas (giardia, cryptosporidium);
- Metais pesados (Pb, Cd, Hg).

A **Figura 21** mostra uma unidade de dessalinização utilizando destiladores solares, localizada na Ilha de Patmos na Grécia.

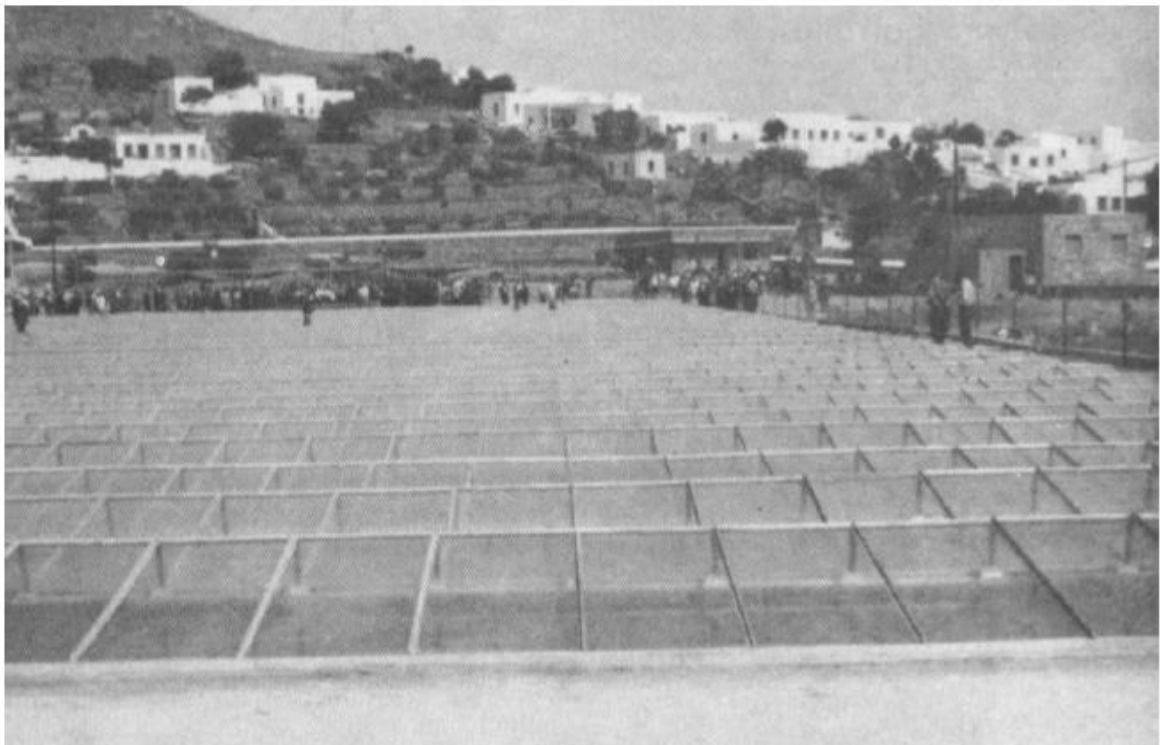


Figura.21 – Planta de destiladores solares na Ilha de Patmos na Grécia

Fonte: JORDÃO, 2013

Desempenho do destilador solar

- A taxa de produção do destilador solar depende do projeto e as condições climáticas de operação;
- A intensidade da energia solar incidente no destilador de intensidade é o parâmetro mais importante que afeta a sua produção;
- Outros parâmetros que afetam o desempenho de destilador são: velocidade do vento, temperatura do céu, a temperatura ambiente, concentração de sal, formação de algas na água, as camadas de minerais no revestimento do recipiente do destilador;
- A eficiência do destilador refere-se à quantidade de energia utilizada no seu processo de vaporização da água sobre a quantidade de energia solar incidente sobre ele;
- Existem diferentes perdas, como: reflexão e absorção na superfície, as perdas de calor para os lados e fundo e por radiação (a construção do destilador precisa ser hermética).

Classificação dos sistemas de destilação solar

Na base de várias modificações e modos de operação introduzidos nos destiladores solares convencionais, os sistemas de destilação solar são classificados como passivos e ativos. Nos destiladores solares ativos, uma energia térmica extra for fornecida por outro dispositivo externo no recipiente do destilador solar passivo para acelerar o processo de evaporação. O dispositivo externo pode ser um coletor concentrador, o rejeito térmico de uma planta industrial ou simplesmente uma caldeira convencional. Se não for utilizado qualquer dispositivo externo para acelerar o processo de evaporação, diz-se que o destilador solar é um destilador solar passivo. (KALOGIROU, 2009)

Quando comparados com os sistemas passivos, os sistemas ativos conseguem uma melhoria aproximada de 3 a 4 vezes na produção de água dessalinizada, embora sejam menos eficientes termicamente (TIWARI, 2009). A destilação solar passiva é a solução economicamente mais recomendada para fornecimento de água potável, enquanto o sistema ativo é a solução mais atrativa do ponto de vista comercial

(TIWARI, 2007).

Segundo KALOGIROU (2009), na literatura os destiladores solares térmicos estão disponíveis em diferentes configurações, tais como: o destilador solar de inclinação única com condensador passivo, o de câmara de condensação dupla, o vertical, o cônico, o absorvedor invertido e o de múltiplo efeito.

A **Figura 22**, mostra diferentes configurações de destiladores solares térmicos.

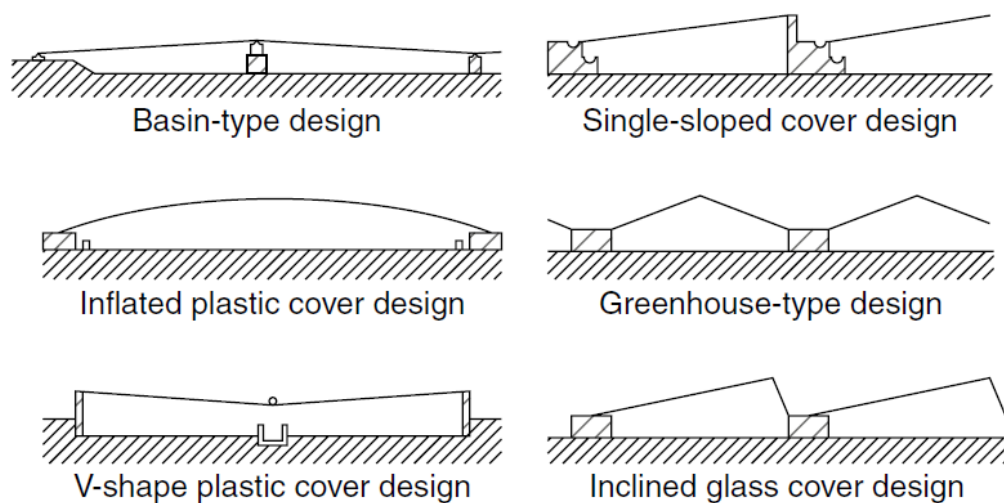


Figura.22 – Diferentes configurações de destiladores solares

Fonte: KALOGIROU, 2009

Modelamento térmico do destilador solar

O modelo térmico dos destiladores solares passivos é desenvolvido recorrendo-se às equações de balanço de energia.

Na **Figura 23** podem ser observados os diversos mecanismos de transferência de energia em forma de calor presentes na destilação solar passiva.

Quando se faz um projeto de uma unidade de destilação solar, procura-se maximizar o calor de evaporação Q_{evap} , isto é, a condução da radiação solar absorvida da cobertura do condensador pelo vapor d'água, pois esta é diretamente proporcional a produtividade do destilador. Todas as outras transferências de energia do recipiente para seus arredores deverão ser suprimidas, devendo-se eliminar, na medida do possível, todas as outras formas de transferência de energia do tanque para o meio exterior circundante. A maior parte do fluxo de energia pode ser avaliado a partir de

princípios básicos, mas fugas e perdas de fronteira são difíceis de quantificar e podem ser agrupadas em um único termo genérico determinado experimentalmente para um destilador em particular (DUFFIE,2013). Desde modo, a quantidade de água evaporada também é maximizada, aumentando assim a produtividade da unidade de destilação.

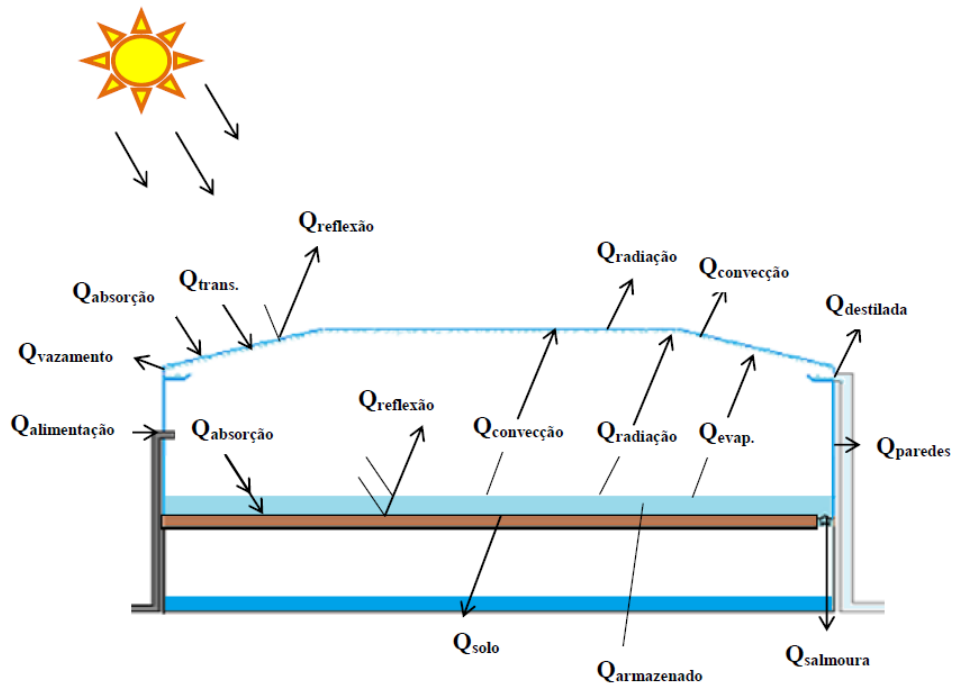


Figura.23 – Fluxo de energia em um destilador solar

Fonte: CRUZ, 2012

A Figura 24 é uma simplificação térmica de um destilador solar.

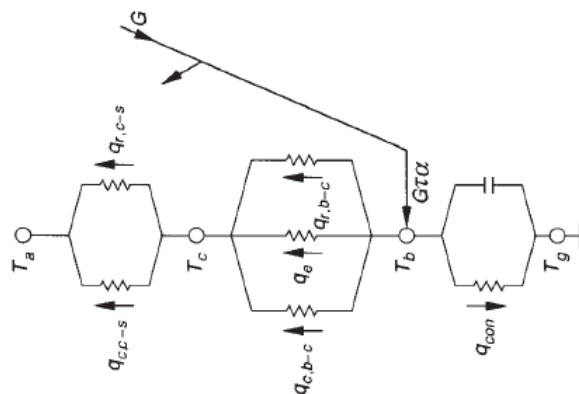


Figura.24 – Rede térmica que representa os mecanismos de troca de calor de um destilador solar

Fonte: DUFFIE; BECKMAN, 2013

Vantagens e desvantagens dos destiladores solares

As vantagens dos destiladores solares

Segundo DA CRUZ (2012), a destilação solar é, de entre as tecnologias existentes, a que mais se adequa técnica e economicamente às regiões subdesenvolvidas e desprovidas de energia elétrica, que tenham carências de água potável embora com reservas de água salgada para a respectiva destilação, além dos elevados índices de radiação solar.

A técnica de destilação solar, constitui-se como uma técnica muito simples, sem a necessidade de grandes recursos tecnológicos, nem dispositivos e equipamentos eletrônicos ou partes (mecânicas) móveis ou qualquer outro tipo de sofisticação, tendo uma operação bastante simples, não requerendo altos custos de operação e manutenção e, nem tão pouco mão-de-obra qualificada. Pode ser instalada próxima ao local onde há procura de água e onde a água de alimentação encontra-se disponível, diminuindo custos significativos com o transporte da água de alimentação até o dispositivo de dessalinização e deste até a comunidade atendida. Também, podem ser usados materiais e mão-de-obra locais, contribuindo para o desenvolvimento da economia local. O combustível utilizado na destilação é gratuito e de origem renovável e assim, o processo é silencioso, não poluente e autônomo do ponto de vista energético. A taxa de produção de destilado é proporcional à área da instalação, o que se traduz num custo por unidade de medida de água praticamente constante, não diminuindo este com o aumento da capacidade, em contrapartida com outras técnicas de destilação. A destilação solar é a técnica que melhor qualidade de água produz, já que esta é totalmente desprovida de micro-organismos. É possível que haja produção de destilado mesmo durante a noite, devido ao calor armazenado na massa de água. Com a destilação solar, locais sem condições de residência podem começar a ser povoados, aliviando-se a pressão nas áreas urbanas e, criando-se novos pontos de interesse e turismo no planeta.

As desvantagens dos destiladores solares

Uma das grandes desvantagens da destilação solar é a sua baixa capacidade de produção (TIWARI, 2009). Devido à baixa produção por unidade de área, esta tecnologia solar requer uma grande área de instalação para produzir grandes quantidades de água. Em locais onde tais áreas não estão disponíveis, ou o seu preço por m² seja elevado, a escolha terá de recair em outras alternativas. Para os destiladores solares passivos, a produção diária de destilado é, em média, de 1-3 kg/m²/dia, enquanto para os destiladores solares ativos esse número sobe para aproximadamente 3-7 kg/m²/dia (TIWARI, 2009). Quando as necessidades de água potável, num determinado lugar, excedam os 200 m³/dia, devem ser considerados outros tipos de tecnologias, o que não corresponde ao caso em estudo. Uma outra condicionante dos destiladores solares advém de o fato da produção de água ser altamente dependente das condições meteorológicas. A energia solar está disponível somente pela metade do dia. Isto implica que o processo opera somente durante a metade do tempo disponível, a menos que algum dispositivo de armazenamento seja usado para operar o sistema durante os períodos de baixa insolação e à noite. Como a água destilada não é própria para o consumo humano a longo prazo, devido às nossas necessidades fisiológicas, pequenas quantidades de sais devem ser adicionadas precisamente à água proveniente do processo de destilação antes que ela seja consumida pelo usuário (MALUF, 2005).

Como o período de maior necessidade de água coincide com o período de melhor desempenho do sistema, será considerado que, a princípio, um aumento do número de horas em operação para além do tempo em que o Sol brilha, aumentaria significativamente o custo do sistema.

4 CAPÍTULO 4 – DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO

4.1 Desempenho do destilador solar

Os destiladores solares são os sistemas de dessalinização mais amplamente analisados. O desempenho de um destilador solar convencional pode ser previsto por diversos métodos, tais como: por simulações computacionais, análise periódica e transitória e por métodos iterativos e numéricos. Na maioria desses métodos, as relações básicas de transferência de massa e calor interno, dadas por DUNKLE (1961) serão usadas. (DUFFIE,2013)

O procedimento de DUNKLE (1961) é resumido por TIWARI et al. (2003). De acordo com esse procedimento, a evaporação horária por metro quadrado para um destilador solar é dada pela **Equação 4.1.1**. (DUFFIE,2013)

$$q_{ew} = 0.0163 h_{cw} (P_w - P_g) \quad [W/m^2] \quad (4.1.1)$$

Onde,

q_{ew} = evaporação horária por metro quadrado do destilador solar (W/m^2).

P_w = pressão parcial de vapor na temperatura da água (N/m^2).

P_g = pressão parcial de vapor na temperatura do vidro (N/m^2).

h_{cw} = coef. de transferência de calor por convecção da superfície da água para a do vidro ($W/m^2 \cdot ^\circ C$).

A pressão parcial de vapor de água de saturação nas temperaturas da água e do vidro são dadas pela **Equação 4.1.2**:

$$P_s = 100(0.004516 + 0.0007178t_w - 2.649 \times 10^{-6}t_w^2 + 6.944 \times 10^{-7}t_w^3) \quad (4.1.2)$$

O coeficiente de transferência de calor por convecção pode ser obtido pela **Equação 4.1.3**:

$$Nu = \frac{h_{cw}d}{k} = C(Gr \times Pr)^n \quad (4.1.3)$$

Onde

d = espaçamento médio entre as superfícies da água e do vidro (m).

k = condutividade térmica da humidade do ar ($W/m^2 \cdot ^\circ C$).

C = constante

n = constante

Gr = número de Grashof (Adimensional)

Pr = número de Prandl (Adimensional)

Os Números de Grashof e Prandl são dados, respectivamente pelas **Equações 4.1.4 e 4.1.5**:

$$Gr = \frac{g\beta\rho^2(\Delta T)d^3}{\mu^2} = \frac{g\beta(\Delta T)d^3}{\nu^2} \quad (4.1.4)$$

$$Pr = \frac{c_p\mu}{k} \quad (4.1.5)$$

Onde

g = constante gravitacional, = $9,81 \text{ m/s}^2$

β = coeficiente de expansão volumétrica do fluido (1/K)

ρ = densidade do fluido (kg/m^3)

ΔT = diferença de temperatura entre a superfície e o fluido (K)

μ = viscosidade dinâmica do fluido ($kg/m \cdot s$)

ν = viscosidade cinética do fluido (m^2/s)

c_p = calor específico do fluido ($J/kg \cdot K$)

Utilizando as **Equações 4.1.1 e 4.1.3**, a produção horária de água destilada por metro quadrado da unidade de destilação solar \dot{m}_w é dada pela **Equação 4.1.6**:

$$\dot{m}_w = 3600 \frac{q_{ew}}{L_v} = 0.0163 (P_w - P_g) \left(\frac{k}{d}\right) \left(\frac{3600}{L_v}\right) C(Gr \times Pr) \quad (4.1.6)$$

Onde $L_v = \text{calor latente de vaporização (kJ/kg)}$

Adotando uma variável que chamaremos de R e atribuindo um valor a ela conforme **Equação 4.1.7**

$$R = 0.0163 (P_w - P_g) \left(\frac{k}{d}\right) \left(\frac{3600}{L_v}\right) \quad (4.1.7)$$

A produção horária de água destilada é simplificada conforme **Equação 4.1.8**

$$\dot{m}_w = RC(Gr \times Pr) \quad (4.1.8)$$

Deve ser observado que, na **Equação 4.1.6**, o produto de Gr e Pr é conhecido como *número de Rayleigh*, Ra. Segundo DUNKLE (1961 apud DUFFIE, 2013), as constantes C e n são calculadas por análise de regressão para uma conhecida produção horária de água destilada nas temperaturas da água e da cobertura de condensação e dos parâmetros de projeto para destiladores solares de qualquer tamanho e forma conforme KUMAR e TIWARI (1996 apud DUFFIE, 2013).

Segundo TIWARI (2002), a eficiência instantânea de uma unidade de destilação é dada pela **Equação 4.1.9**

$$\eta_i = \frac{q_{ew}}{G_t} = \frac{h_{cw}(T_w - T_g)}{G_t} \quad (4.1.9)$$

Simplificando esta **Equação 4.1.9**, podemos escreve-la conforme a **Equação 4.1.10**.

$$\eta_i = F' \left[(\alpha\tau)'_{eff} + U_L \left(\frac{T_{w0} - T_a}{G_t} \right) \right] \quad (4.1.10)$$

Onde T_{w0} = *tempertatura do recipiente com a água a zero grau, $t = 0$ (°C)*

Segundo TIWARI e NOOR (1996 apud DUFFIE, 2013), a equação anterior descreve a curva característica do destilador solar em termos do seu fator de eficiência (F'), do produto da eficiência da absorvância $(\alpha\tau)'_{eff}$ e transmitância e o coeficiente global de perdas de calor (U_L).

A análise detalhada das equações da eficiência instantânea de uma unidade de destilação (η_i) explica que um coeficiente global de perda (U_L) superior maximiza a evaporação, deixando-a mais rápida, o que resulta numa produção maior de água destilada pelo destilador solar.

Segundo GARG e MANN (1976 apud DUFFIE, 2013), os parâmetros meteorológicos como o vento, a radiação solar, a temperatura do céu e do ambiente, a concentração de sal, a formação de algas na água e camadas de minerais no recipiente do destilador solar, afetam significativamente o seu desempenho.

Para um melhor desempenho dos destiladores solares convencionais, são sugeridas por vários pesquisadores as seguintes modificações:

- Reduzir do coeficiente de perda do fundo do recipiente do destilador;
- Reduzir a profundidade da água;
- Utilizar um refletor;
- Utilizar condensadores internos e externos;
- Utilizar corantes;
- Utilizar carvão;
- Utilizar um elemento de armazenagem;
- Utilizar cubos de esponja;
- Resfriar a cobertura de condensação;
- Utilizar um destilador solar inclinado;
- Aumentar a área de evaporação;

4.1.1 Considerações adotadas para o cálculo da produção do destilador solar

Para os cálculos para obtenção da produtividade de água do destilador solar, serão observados os seguintes parâmetros:

- *Volume de água por habitante*

Devido ao baixo volume de água destilada produzido pelo destilador solar será considerado o volume de cinco litros por habitante (5 litros_{H₂O}/habitante).

Considerando somente a população rural de Riacho das Almas/PE de 10.400 habitantes, seriam necessários 52.000 litros de água potável diariamente (52 m³/dia) para abastecer toda a população rural.

- *Temperaturas da água e do vidro*

As temperaturas da água (T_w) e do vidro (T_g) que serão adotadas serão, respectivamente, 55°C e 45°C. (KALOGIROU,2009)

- *Constantes e coeficiente de transferência de calor por convecção da superfície da água para a do vidro*

Serão atribuídas as constantes *C* e *n* e para o coeficiente *h_{cw}*, os seguintes valores como segue: *C* = 0,032; *n* = 0,41 e *h_{cw}* = 2,48 W/m².K

4.1.2 Cálculo da produção de água destilada

A partir da Equação 4.1.2 e das temperaturas da água e do vidro, as respectivas pressões parciais da água e do vidro podem ser obtidas, conforme abaixo:

$$P_w = 100(0.004516 + 0.0007178t_w - 2.649 \times 10^{-6}t_w^2 + 6.944 \times 10^{-7}t_w^3)$$
$$= 100 (0.004516 + 0.0007178 \times 55 - 2.649 \times 10^{-6} \times 55^2 + 6.944 \times 10^{-7} \times 55^3)$$

$$P_w = 15.15 \text{ kPa}$$

$$P_g = 100(0.004516 + 0.0007178t_g - 2.649 \times 10^{-6}t_g^2 + 6.944 \times 10^{-7}t_g^3)$$
$$= 100 (0.004516 + 0.0007178 \times 45 - 2.649 \times 10^{-6} \times 45^2 + 6.944 \times 10^{-7} \times 45^3)$$

$$P_g = 9.47 \text{ kPa}$$

A partir da Equação 4.1.1, obtém-se:

$$q_{ew} = 00163 \times 2,48 (15.15 - 9.47) \times 10^3$$
$$q_{ew} = 229.6 \text{ W/m}^2$$

A partir das tabelas de vapor, o calor latente de vaporização da água a temperatura de 55°C é 2370,1 KJ/kg. Desse modo, podemos a partir da Equação 4.1.6, obter a massa de água destilada produzida por área unidade de área do destilador solar, conforme abaixo:

$$\dot{m}_w = 3600 \frac{q_{ew}}{L_v} = 3600 \times \frac{229,6}{2370.1 \times 1000} = 0.349 \text{ kg/m}^2$$

A *massa específica ou densidade*, ρ , de um fluido é a massa por unidade de volume. Em unidades SI, a massa específica ou densidade é medida em Kg/m³. A massa específica ou densidade aproximada da água em temperatura ambiente é de 1000 kg/m³.

$$\rho_{H_2O} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

O *volume específico*, v , é o volume ocupado por unidade de massa de fluido e é calculado com sendo o inverso da massa específica do fluido, conforme **Equação 4.1.11**:

$$v = \frac{1}{\rho} \tag{4.1.11}$$

Então pode-se, facilmente, calcular a produção volumétrica por metro quadrado do destilador solar, como segue:

$$\dot{m}_w = \frac{0.349 \text{ kg/m}^2}{1000 \text{ kg/m}^3} = 3.49 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2} = 0.349 \text{ litros/m}^2$$

Para abastecer cada habitante pertencente a zona rural do município de Riacho das Almas/PE com 5 litros de água potável, precisaríamos de uma produção diária de água potável de 52 m³, ou seja, 52.000 litros/dia. A partir desse valor de produção diária é possível calcular por meio da **Equação 4.1.12**, a área de destiladores solares necessária para atingi-lo.

$$\text{Área necessária} = \frac{\text{Volume necessário}}{\text{Volume de produção por área de destilador solar}} \quad (4.1.12)$$

$$\text{Área necessária} = \frac{52.000 \text{ litros}}{0.349 \frac{\text{litros}}{\text{m}^2} \times 3,83\text{h/dia}}$$

$$\text{Área (coletora) necessária} = 38.902,6 \text{ m}^2$$

Assumindo que a área coletora obtida no cálculo tem lados iguais, podemos concluir que cada lado da planta de dessalinização utilizando destiladores solares teria aproximadamente 200 metros.

$$\text{Lado} = \sqrt{38.902,6} = 197,2 \text{ m} \cong 200 \text{ metros}$$

4.2 Detalhamento do Sistema de Osmose Reversa

4.2.1 Premissas para o dimensionamento do sistema de osmose reversa alimentado eletricamente pelo sistema solar fotovoltaico.

População atendida pelo sistema

Para o dimensionamento do sistema de osmose reversa será considerado somente a população rural do município de Riacho da Almas/PE, que segundo o último censo 2010 do IBGE, é composta por 10.400 habitantes.

Volume de água tratada por habitante

Para que os sistemas de osmose reversa e o de destilação solar térmica sejam comparados em bases iguais (mesma escala de produção), adotaremos que o sistema de osmose reversa deverá abastecer cada um dos 10.400 habitantes da


população rural de Riacho das Almas/PE com somente 5 litros de água potável. Dessa maneira, o sistema deveria fornecer 52.000 litros/dia (52 m³/dia).

Alimentação elétrica do sistema de osmose reversa

O sistema de osmose reversa será eletricamente alimentado *em sua totalidade* pelo sistema solar fotovoltaico off grid sem suporte de baterias e funcionará somente nos períodos em que tiver energia solar suficiente para manter a operação do sistema.

4.2.2 Dimensionamento do gerador fotovoltaico para alimentação elétrica do sistema de osmose reversa.

A **Figura 26** indica algumas das características técnicas dos sistemas de dessalinização por osmose reversa da PROMINENT, a potência instalada para o modelo PRO 0600TW do fabricante é 4 kW.



Plant	Permeate capacity at 15 °C water temperature	Number of 8" membranes	Connected load	Dimensions H x W x D
	l/h	No.	kW	mm
PRO 0300TW	3,000	3	3.0	1,800 x 4,000 x 1,000
PRO 0400TW	4,000	4	3.0	1,800 x 3,000 x 1,000
PRO 0500TW	5,000	5	4.0	1,800 x 4,000 x 1,000
PRO 0600TW	6,000	6	4.0	1,800 x 4,000 x 1,000
PRO 0700TW	7,000	6	5.5	1,800 x 4,000 x 1,000
PRO 0800TW	8,000	7	5.5	1,800 x 4,000 x 1,000
PRO 0900TW	9,000	7	7.5	1,800 x 4,000 x 1,000

Figura.26 Características técnicas dos sistemas de osmose reversa da ProMinent

Fonte: PROMINENT

Segundo ZILLES (2012), para o dimensionamento do sistema fotovoltaico será o utilizado o método de dimensionamento conforme **Equação 4.2.1**.

$$E = PFV (HSP) N (TD) \quad (4.2.1)$$

Onde:

E [kWh/dia] = Energia diária média anual a ser fornecida pelo gerador fotovoltaico.

(HSP) [h] = Horas de Sol Pleno média diária mensal do mês crítico

PFV [kW/painel] = Potência máxima de um painel fotovoltaico na temperatura de célula TC [°C]

N = Número de painéis fotovoltaicos que compõe o gerador

TD [adimensional] = Taxa de desempenho do gerador, recomendado no Brasil 0,7 a 0,8.

As Horas de Sol Pleno (HSP)

Segundo PINHO; GALDINO (2014), um gerador fotovoltaico tem suas características elétricas dependentes basicamente da irradiância e da temperatura nos módulos. A influência da irradiância solar é muito mais significativa do que a da temperatura. A irradiância pode variar significativamente em curtos intervalos de tempo (da ordem de segundos), especialmente em dias com nuvens, mas a variação da temperatura é amortecida pela capacidade térmica dos módulos. Nas estimativas de produção de energia elétrica, é útil ignorar os efeitos de variação da irradiância a cada instante e considerar a totalidade da energia elétrica convertida em intervalos horários. Como há uma forte linearidade entre a produção de energia e a irradiação horária, este conceito pode ser estendido, gerando uma forma bastante conveniente de se expressar o valor acumulado de energia solar ao longo de um dia: o número de Horas de Sol Pleno (HSP). Esta grandeza reflete o número de horas em que a irradiância solar deve permanecer constante e igual a 1kW/m^2 (1000 W/m^2), de forma que a energia resultante seja equivalente à energia disponibilizada pelo Sol no local em questão, acumulada ao longo de um dado dia.

Para o cálculo das Horas de Sol Pleno (HSP) é considerada a energia solar incidente no plano do coletor média diária mensal do mês crítico \overline{HT} , conforme a **Equação 4.2.2**.

Onde,

\overline{HT} [kWh/m²dia] = Energia solar incidente no plano do coletor média diária mensal do mês crítico.

$$HSP = \frac{\overline{HT}}{1} \left[\frac{\frac{kWh}{m^2 dia}}{\frac{kWh}{m^2 h}} \right] = \overline{HT} \left[\frac{h}{dia} \right] \quad (4.2.2)$$

A **Figura 27** auxilia na compreensão das Horas de Sol Pleno.

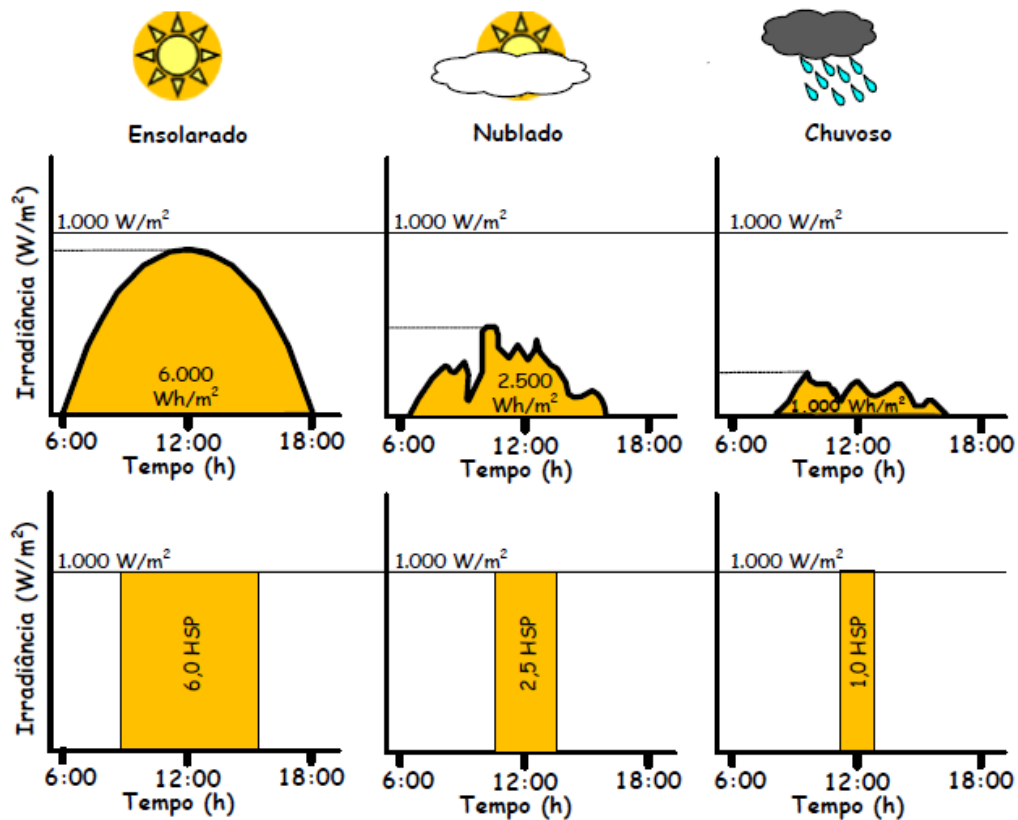


Figura.27 – Ilustração do conceito das horas de Sol pleno (HSP)

Fonte: PINHO; GALDINO (2004)

Determinação do número de painéis solares fotovoltaicos

Como o equipamento terá previsão de 10 horas por dia, teremos um consumo diário médio estimado de energia de 40 kWh/dia. Um modelo de equipamento de dessalinização por osmose reversa da fabricante PROMINENT, pode ser visto na

Figura 28, que ilustra um modelo de equipamento de dessalinização por osmose reversa da fabricante PROMINENT.



Figura.28 – Equipamento de Osmose Reversa

Fonte: PROMINENT

Conforme os dados solarimétricos obtidos no site do CRECESB, que podem ser vistos na **Figura 29**, para a cidade de Caruaru, para os cálculos será adotada a irradiação solar diária média mensal [kWh/m².dia], considerando o ângulo de inclinação dos painéis com o ângulo igual a latitude aproximada do município considerado, neste caso, Caruaru. Que o município com medição de irradiação e velocidade do vento pelo CRECESB, mais próximo mais próximo de Riacho das Almas/PE.

Como esperado, o mês de junho é o mês com a pior irradiação solar, pois é o período do ano em que estamos em pleno inverno aqui no Brasil. Então, o mês de junho será considerado o mês crítico para consideração dos dados de irradiação no plano inclinado obtidos no site do CRECESB.

Dados do equipamento de osmose reversa escolhido

Fabricante: ProMinent

Modelo: PRO 0600TW

Capacidade (@ água a 15°C) = 6 m³/h

Potência = 4 kW

$$\text{Consumo específico} = \frac{4 \text{ kWh/h}}{6 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times 1 \text{h}} \quad (4.2.3)$$

$$\text{Consumo específico} = 0,67 \text{ kWh/m}^3$$

Na **Figura 29** podem ser vistos os dados solarimétricos do CRESESB para a cidade de Caruaru.

Cálculo no Plano Inclinado

Estação: Caruaru
Município: Caruaru, PE - BRA
Latitude: 8,2° S
Longitude: 35,976111° O
Distância do ponto de ref. (8,2° S; 35,976° O): 0 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
<input checked="" type="checkbox"/>	Plano Horizontal	0° N	5,44	5,53	5,28	4,69	4,50	3,61	4,39	4,83	4,78	5,72	6,36	6,00	5,09	2,75
<input checked="" type="checkbox"/>	Ângulo igual a latitude	8° N	5,20	5,39	5,28	4,82	4,75	3,83	4,67	5,03	4,83	5,62	6,08	5,68	5,10	2,25
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior média anual	5° N	5,30	5,45	5,29	4,78	4,67	3,76	4,57	4,96	4,82	5,66	6,20	5,81	5,11	2,44
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior mínimo mensal	28° N	4,33	4,73	4,96	4,86	5,08	4,16	5,08	5,21	4,67	5,03	5,07	4,61	4,82	1,05

Irradiação Solar no Plano Inclinado –Caruaru–Caruaru, PE-BRA

8,2° S; 35,976111° O

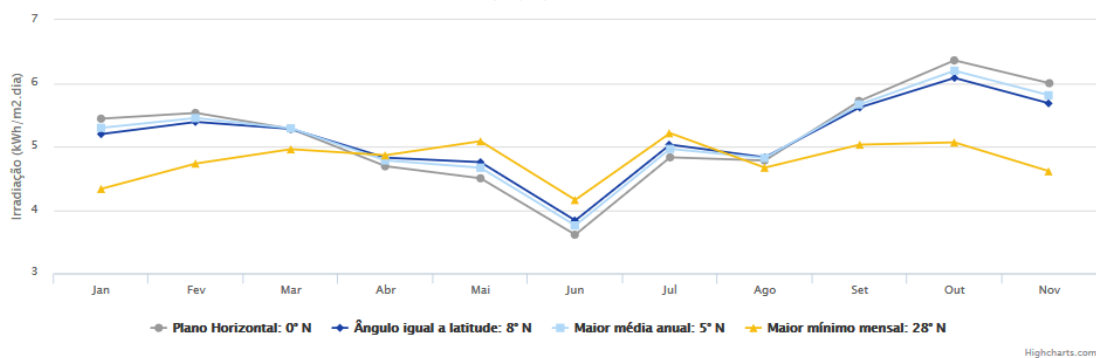


Figura.29 – Dados solarimétricos do CRESESB para a cidade de Caruaru/PE

Fonte: CRECESB

Desse modo, a energia solar incidente no plano do coletor média diária mensal do mês crítico considerado, \overline{HT} , será o destacado em vermelho na figura, com $\overline{HT} = 3,83 \text{ kWh/m}^2.\text{dia}$.

Módulo Fotovoltaico

O módulo fotovoltaico escolhido para o desenvolvimento desse trabalho será o **CS6P-250M** da fabricante CANADIAN SOLAR. A premissa para a escolha do painel solar fotovoltaico que comporá o sistema foi a sua participação no Programa de Etiquetagem do INMETRO, todavia, o desempenho apresentado em termos de eficiência energética, produção média de energia e sua classificação energética foram mandatórios para escolha. As **Figuras de 30, 31 e 32** referem-se às características técnicas retiradas da folha de dados do módulo solar fotovoltaico CS6P-250M.

Electrical Data					
STC	CS6P-240M	CS6P-245M	CS6P-250M	CS6P-255M	CS6P-260M
Nominal Maximum Power (Pmax)	240W	245W	250W	255W	260W
Optimum Operating Voltage (Vmp)	30.2V	30.3V	30.4V	30.5V	30.7V
Optimum Operating Current (Imp)	7.95A	8.09A	8.22A	8.35A	8.48A
Open Circuit Voltage (Voc)	37.3V	37.4V	37.5V	37.7V	37.8V
Short Circuit Current (Isc)	8.46A	8.61A	8.74A	8.87A	8.99A
Module Efficiency	14.92%	15.23%	15.54%	15.85%	16.16%
Operating Temperature	-40°C~+85°C				
Maximum System Voltage	1000V (IEC) /600V (UL)				
Maximum Series Fuse Rating	15A				
Application Classification	Class A				
Power Tolerance	0 ~ +5W				

Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000W/m², spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C

Figura.30 – Características elétricas nas condições STC (Standard Test Conditions) do módulo fotovoltaico CS6P-250M da fabricante Canadian Solar.

Fonte: Canadian Solar

NOCT	CS6P-240M	CS6P-245M	CS6P-250M	CS6P-255M	CS6P-260M
Nominal Maximum Power (Pmax)	173W	177W	180W	184W	188W
Optimum Operating Voltage (Vmp)	27.5V	27.6V	27.7V	27.8V	28.0V
Optimum Operating Current (Imp)	6.29A	6.40A	6.51A	6.62A	6.70A
Open Circuit Voltage (Voc)	34.2V	34.3V	34.4V	34.6V	34.7V
Short Circuit Current (Isc)	6.85A	6.97A	7.08A	7.18A	7.28A

Under Normal Operating Cell Temperature, Irradiance of 800 W/m², spectrum AM 1.5, ambient temperature 20°C, wind speed 1 m/s

Figura.31 - Características elétricas nas condições NOCT (Normal Operating Cell Temperature) do módulo fotovoltaico CS6P-250M da fabricante Canadian Solar.

Fonte: Canadian Solar

Temperature Characteristics

Temperature Coefficient	Pmax	-0.45%/°C
	Voc	-0.35 %/°C
	Isc	0.060 %/°C
Normal Operating Cell Temperature	45±2°C	

Figura.32 – Características de temperatura do módulo CS6P-250M

Fonte: Canadian Solar

A **Figura 33** mostra as curvas de corrente e tensão para diferentes valores de irradiação e temperatura.

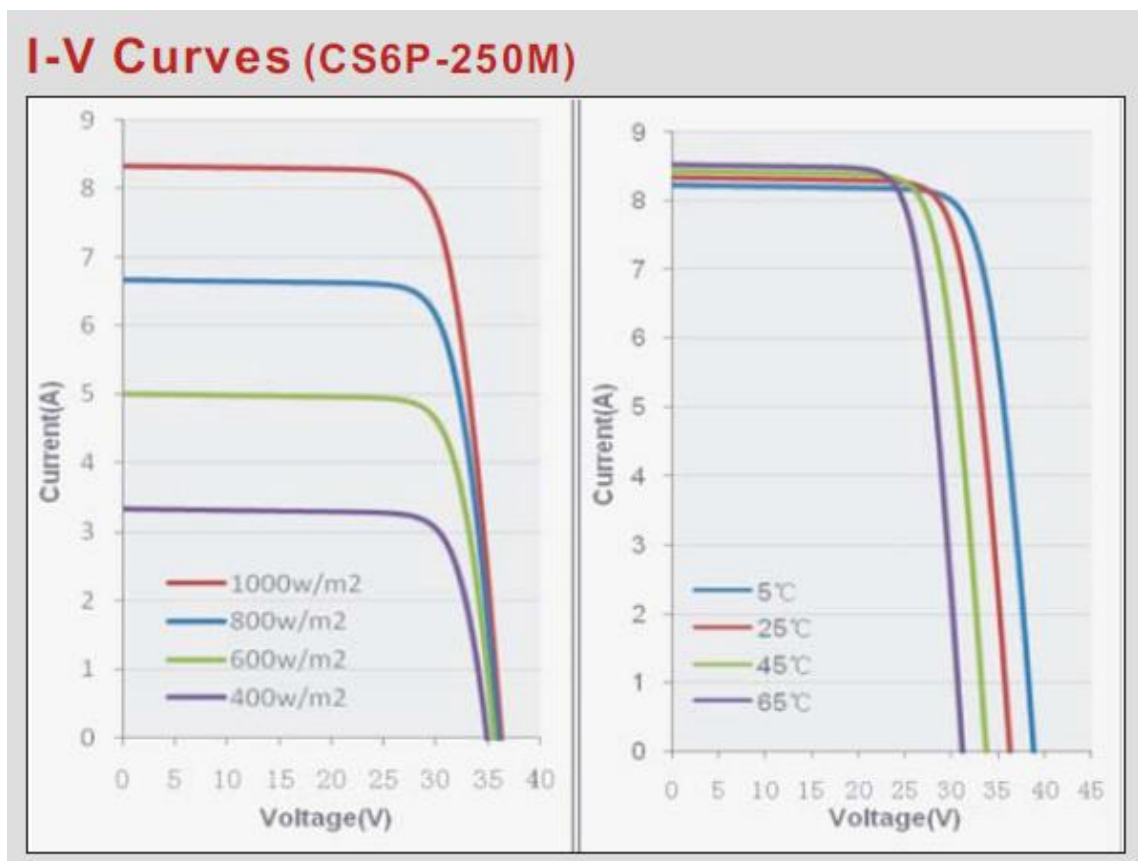


Figura.33 – Curvas de corrente e tensão para diferentes valores de corrente e temperatura da célula.

Fonte: Canadian Solar

A **Figura 34** refere-se à lista de módulos fotovoltaicos homologados pelo INMETRO. Nela está destacado em vermelho o módulo CS6P-250M da Canadian Solar.

EMPRESA	MARCA	MODELO / CÓDIGO	MATERIAL	Características Físicas			
				Comprimento (mm)	Largura (mm)	Área (m²)	Peso (kg)
BRASIL SOLAR ENERGIAS RENOVÁVEIS COMÉRCIO E INDÚSTRIA S/A	LIJAO	LN24030/P-3-240	Silício Poli Cristalino	1650	990	1,63	20,5
CANADIAN SOLAR BRASIL SERVIÇOS DE CONSULTORIA EM ENERGIA SOLAR LTDA	CANADIAN	C96P 235P	Silício Poli Cristalino	1638	982	1,61	19
CANADIAN SOLAR BRASIL SERVIÇOS DE CONSULTORIA EM ENERGIA SOLAR LTDA	CANADIAN	C96P 240P	Silício Poli Cristalino	1638	982	1,61	19
CANADIAN SOLAR BRASIL SERVIÇOS DE CONSULTORIA EM ENERGIA SOLAR LTDA	CANADIAN	C96P 245P	Silício Poli Cristalino	1638	982	1,61	19
CANADIAN SOLAR BRASIL SERVIÇOS DE CONSULTORIA EM ENERGIA SOLAR LTDA	CANADIAN	C96P 250P	Silício Poli Cristalino	1638	982	1,61	19
CANADIAN SOLAR BRASIL SERVIÇOS DE CONSULTORIA EM ENERGIA SOLAR LTDA	CANADIAN	C96P-240M	Silício Mono Cristalino	1638	982	1,61	19
CANADIAN SOLAR BRASIL SERVIÇOS DE CONSULTORIA EM ENERGIA SOLAR LTDA	CANADIAN	C96P-249M	Silício Mono Cristalino	1638	982	1,61	19
CANADIAN SOLAR BRASIL SERVIÇOS DE CONSULTORIA EM ENERGIA SOLAR LTDA	CANADIAN	C96P-250M	Silício Mono Cristalino	1638	982	1,61	19
CTC COMERCIO, IMPORTAÇÃO E EXPORTAÇÃO LTDA	TNS SOLAR	TN-36-5M45	Silício Mono Cristalino	636	542	0,34	3,9
CTC COMERCIO, IMPORTAÇÃO E EXPORTAÇÃO LTDA	TNS SOLAR	TN-36-5M90	Silício Mono Cristalino	1196	542	0,65	7,8
CTC COMERCIO, IMPORTAÇÃO E EXPORTAÇÃO LTDA	TNS SOLAR	TN60-6M240	Silício Mono Cristalino	1640	992	1,63	23,5
CTC COMERCIO, IMPORTAÇÃO E EXPORTAÇÃO LTDA	TNS SOLAR	TN-60-6P230	Silício Poli Cristalino	1640	992	1,63	23,5
CTC COMERCIO, IMPORTAÇÃO E EXPORTAÇÃO LTDA	TNS SOLAR	TN-72-5M190	Silício Mono Cristalino	1580	808	1,28	15,5

Circuito Aberto	Curto Circuito	Ponto Máx. Potência		POTÊNCIA (W)	TEMPERATURA (Condições Normais de Operação)	PRODUÇÃO MÉDIA DE ENERGIA (kWh/mês)	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (%)	CLASSIFICAÇÃO ENERGÉTICA	N° DO REGISTRO DO OBJETO	DATA INICIAL DO REGISTRO	DATA FINAL DO REGISTRO
		TENSÃO (V)	CORRENTE (A)								
37,25	8,32	31,05	7,73	240	48	30,00	14,7	A	000436/2013	19/12/2012	
36,90	8,46	29,80	7,90	235	45	29,43	14,6	A	002758/2013	16/1/2013	
37,00	8,59	29,90	8,03	240	45	30,01	14,9	A	002758/2013	16/1/2013	
37,10	8,74	30,00	8,17	245	45	30,64	15,2	A	002758/2013	16/1/2013	
37,20	8,87	30,10	8,30	250	45	31,23	15,5	A	002758/2013	16/1/2013	
37,30	8,46	30,20	7,95	240	45	30,01	14,9	A	002917/2013	1203/2013	
37,40	8,61	30,30	8,09	245	45	30,64	15,2	A	002917/2013	1203/2013	
37,50	8,74	30,40	8,22	250	45	31,24	15,5	A	002917/2013	1203/2013	
22,60	2,59	18,90	2,39	45	45	5,65	13,1	B	002251/2013	23/1/2013	
22,50	5,26	18,10	4,97	90	45	11,24	13,9	A	002251/2013	23/1/2013	
37,10	8,52	30,30	7,92	240	45	30,00	14,8	A	002251/2013	23/1/2013	
37,10	8,34	29,40	7,84	230	45	28,81	14,2	A	001979/2013	14/2/2013	

Figura.34 – Tabela de módulos fotovoltaicos homologados pelo INMETRO

Fonte: INMETRO

Cálculos para obtenção do número de painéis:

Estimativa da Temperatura de Operação da Célula do Painel Fotovoltaico é dada pela Equação 4.2.4:

$$T_c = T_a + \frac{G_T}{800} [T_{NOC} - 20] \times 0,9 \quad (4.2.4)$$

Estimativa da Potência de Pico é dada pela **Equação 4.2.5**:

$$P_{FV} = P_{FV}^0 \times \frac{G_T}{G_{ref}} [1 + \gamma_{mp}(T_c - T_{cref})] \eta_{SPMP} \quad (4.2.5)$$

Sendo:

T_c [°C] = Temperatura da célula

T_a [°C] = Temperatura ambiente

T_{NOC} [°C] = Temperatura nominal de operação da célula

T_{cref} [°C] = Temperatura da célula nas condições STC

G_T [W/m²] = Radiação solar média no plano de célula

G_{ref} [W/m²] = Radiação solar nas condições STC

γ_{mp} [°C⁻¹] = Coeficiente de temperatura para potência máxima (negativo)

P_{FV}^0 [W] = Potência nominal do Painel Fotovoltaico

P_{FV} [W] = Potência do Painel Fotovoltaico

η_{SPMP} = Eficiência do seguidor de ponto de potência máxima

TD = Taxa de desempenho do gerador, recomendado no Brasil 0,7 a 0,8.

E_{OR} = Energia elétrica diária necessária para alimentação do equipamento de osmose reversa

➤ Para o painel Canadian Solar modelo CS6P-250M

- Energia diária necessária [E] = 40 kWh/dia
- Temperatura ambiente [T_a] = 35°C (máxima para a região)
- Temperatura nominal de operação da célula [T_{NOC}] = 45°C
- Radiação solar média no plano de célula [G_T] = 1000 W/m²
- Potência nominal do Painel Fotovoltaico [P_{FV}^0] = 250 W
- Radiação solar nas condições STC [G_{ref}] = 1000W/m²
- Coeficiente de temperatura para potência máxima [γ_{mp}] = - 0,45%/°C = -0,0045/°C
- Temperatura da célula nas condições STC [T_{cref}] = 25°C
- Eficiência do seguidor de ponto de potência máxima [η_{SPMP}] = 0,95

$$T_c = 35 + \frac{1000}{800} [45 - 20] \times 0,9$$

$$T_c = 63,13 \text{ } ^\circ\text{C}$$

A potência do painel ou módulo fotovoltaico pode ser dada pela **Equação 4.2.6**:

$$P_{FV} = P_{FV}^0 \times \frac{G_T}{G_{ref}} [1 + \gamma_{mp}(T_c - T_{cref})] \times \eta_{SPMP} \quad (4.2.6)$$

$$P_{FV} = 250 \times \frac{1000}{1000} [1 - 0,0045(63,13 - 25)] \times 0,95$$

$$P_{FV} = 196,75 \text{ W}$$

$$\text{HSP} = \frac{\overline{\text{HT}}}{1} \left[\frac{\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{dia}}}{\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{h}}} \right] = \overline{\text{HT}} \left[\frac{\text{h}}{\text{dia}} \right]$$

$$\text{HSP} = \frac{3,83}{1} \left[\frac{\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{dia}}}{\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{h}}} \right] = 3,83 \left[\frac{\text{h}}{\text{dia}} \right]$$

TD = 0,75 (Taxa de desempenho adotada para o gerador fotovoltaico, recomendado no Brasil 0,7 a 0,8)

$$E_{OR} = 40 \text{ kWh/dia}$$

Conforme a **Equação 4.2.1** a energia do gerador fotovoltaico pode ser obtida como segue:

$$E = P_{FV} \times \text{HSP} \times N \times \text{TD}$$

Então, o número de painéis e a potência do gerador fotovoltaico podem ser calculados conforme abaixo:

$$N = \frac{E}{P_{FV} \times HSP \times TD}$$

$$N = \frac{40000}{196,75 \times 3,83 \times 0,75}$$

$$N = 70,78 \cong 70$$

$$\mathbf{N = 70 \text{ painéis}}$$

$$P_{GFV} = N \times P_{FV}$$

$$P_{GFV} = 70 \times 196,75$$

$$P_{GFV} = 13772,5 \text{ W}$$

$$\mathbf{P_{GFV} \cong 13,8 \text{ kW}}$$

Inversor de Frequência

FDI = Fator de dimensionamento do inversor

P_{INV}^0 = potência nominal do inversor (W)

P_{GFV}^0 = potência nominal do gerador fotovoltaico (W)

YF = Produtividade anual do gerador fotovoltaico (kWh/kWp.ano) em uma certa localidade

Segundo ZILLES (2012), estudo recomenda que: $0,6 < FDI < 0,9$, conforme **Equação 4.2.7.**

$$FDI = \frac{P_{INV}^0}{P_{GFV}^0} \quad (4.2.7)$$

Na **Figura 35**, o inversor de frequência 15000 Watts do fabricante SMA.



Figura.35 – Foto do inversor de frequência SMA SUNNY TRIPOWER 15000 TL-US

Fonte: SMA

Alguns dados como a tensão e corrente de entrada e saída do inversor de frequência escolhido nesse estudo podem ser vistos conforme abaixo na **Tabela 4**.

Tabela.4 – Dados do inversor SMA SUNNY TRIPOWER 15000 TL-US

Dados do Inversor
Fabricante: SMA
Modelo: Sunny Tripower 15000 TL-US
Faixa de tensão (DC) de entrada: 150 ~ 1000 V _{dc} para dois strings
Tensão máxima (DC) de entrada sem carga (V _{OC}) = 1000 V _{dc}
Corrente Máxima (DC) de Entrada I _{MAX} = 66 A / 33 A por string
Potência máxima (DC) de entrada = 15.300 W
Faixa de tensão (AC) de saída = 244 ~ 305 V _{ac}
Número de fases = 3 (3F+N+T)
Frequência = 60 Hz
Potência elétrica nominal máxima (AC) de saída = 15000W

FONTE: SMA

Cálculo da potência nominal do gerador fotovoltaico, conforme **Equação 4.2.8**:

$$P_{GFV}^0 = \text{Potência Painel}_{pico} \times \text{Número de Painéis} \quad (4.2.8)$$

$$P_{GFV}^0 = 250 \times 70 = 17500 \text{ W}$$

Cálculo do fator de dimensionamento do inversor (FDI):

$$FDI = \frac{P_{INV}^0}{P_{GFV}^0}$$

$$FDI = \frac{15000}{17500}$$

$$FDI = 0,857 \text{ (OK)}$$

$$(0,6 < FDI < 0,9)$$

Cálculos das Strings

V_{mp} = Tensão de máxima potência

I_{mp} = Corrente de máxima potência

I_{sc} = Corrente de curto circuito

T_c [°C] = Temperatura da célula

T_{cref} [°C] = Temperatura da célula nas condições STC

γ_{oc} [°C⁻¹] = Coeficiente de temperatura para tensão de circuito aberto (negativo)

γ_{sc} [°C⁻¹] = Coeficiente de temperatura para tensão de curto-circuito (negativo)

η = Rendimento do painel

P_{mp} = Potência do painel

Por meio das **Equações 4.2.9 a 4.2.11** é possível a obtenção da corrente e tensão de máxima potência e rendimento do módulo fotovoltaico.

$$V_{mp}(T_c [^{\circ}C]) = V_{mp}(T_{cref} [^{\circ}C]) \times [1 + \gamma_{oc}(T_c - T_{cref})] \quad (4.2.9)$$

$$I_{mp}(T_c [^{\circ}C]) = I_{mp}(T_{cref} [^{\circ}C]) \times [1 + \gamma_{sc}(T_c - T_{cref})] \quad (4.2.10)$$

$$\eta = P_{mp}/(G_T \times A) \quad (4.2.11)$$

$$V_{mp}(63,13^{\circ}C) = 30,4 (25^{\circ}C) \times [1 - 0,0035(63,13 - 25)]$$

$$V_{mp}(63,13^{\circ}C) = 26,34 V$$

$$I_{mp}(63,13^{\circ}C) = 8,22 (25^{\circ}C) \times [1 + 0,0006(63,13 - 25)]$$

$$I_{mp}(63,13^{\circ}C) = 8,41 A$$

$$G_T = 1000 W/m^2$$

$$\text{Área (A)} = 1,61 m^2$$

$$\eta = 196,75/(1000 \times 1,61)$$

$$\eta = 0,122 \cong 12\%$$

Número de painéis em série e paralelo (Fileira ou STRING)

Para encontrar a melhor configuração do gerador fotovoltaico, serão testadas diferentes associações dos painéis fotovoltaicos afim de compatibilizar quantidade de painéis com as características de tensão e corrente de entrada do inversor de frequência. (BARROS, 2009) (De forma a obter-se a melhor distribuição dos painéis compatível com as características do inversor)

Configuração 1

Duas fileiras (STRINGS), compostas por 35 painéis cada uma, sendo uma fileira por entrada MPPT do inversor, totalizando 35 painéis por entrada do inversor. A **Figura 36** ilustra uma ligação série de dois painéis.

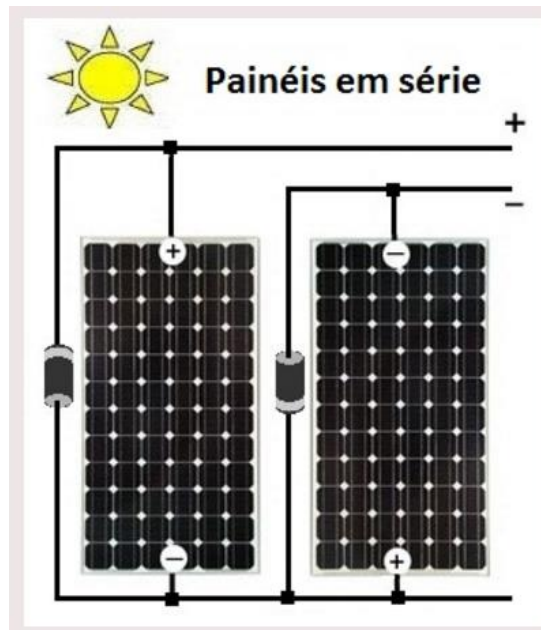


Figura.36 – Ilustração de módulos fotovoltaicos ligados em série

Fonte: Notas de aula da disciplina ERG-006 - Energia Solar I - (PECE/Poli/USP)

Tensão

Faixa de tensão de entrada admissível = 150~1000 V (por entrada MPPT do inversor)

$$V_{mp}(T_c [^{\circ}C]) \times \text{Número de painéis em série} < \text{máxima tensão admissível} \quad (4.2.12)$$

$$26,34 (63,13^{\circ}C) \times 35 \text{ paineis} = 921,9 V < 1000 V (OK)$$

$$V_{mp}(T_{cref} [^{\circ}C]) \times \text{Número de painéis em série} < \text{máxima tensão admissível} \quad (4.2.13)$$

$$30,4 (25^{\circ}C) \times 35 \text{ paineis} = 1064 V > 1000 V (NOK)$$

Corrente

Corrente Máxima (DC) de Entrada I_{MAX} = 66 A / 33 A por string (por entrada MPPT do inversor)

$$I_{mp}(T_c [^{\circ}C]) \times \text{Número de Strings em paralelo} < \text{máxima corrente admissível} \quad (4.2.14)$$

$$8,22 (25 ^{\circ}C) = 8,22 A < 33 A$$

$$8,41 (63,13 ^{\circ}C) \times 2 \text{ strings} = 16,82 A < 66 A (OK)$$

Nessa configuração a corrente DC de entrada ficou dentro dos limites do inversor, porém a tensão DC máxima de entrada do inversor ultrapassou 6,4% do limite de 1000 V, ficando em 1064 V. O que configura uma situação não recomendada, mesmo porque a temperaturas inferiores a 25°C (pouco provável de ocorrer em pleno semiárido nordestino em dias ensolarados), pode ocorrer o aumento da tensão de saída dos painéis fotovoltaicos, conseqüentemente, ultrapassando ainda mais a tensão de entrada máxima do inversor.

Configuração 2

Quatro fileiras (STRINGS), compostas por 18 painéis cada uma, sendo duas fileiras em paralelo por entrada MPPT do inversor, totalizando 36 painéis por entrada.

Observação: Como 70 não é um número divisível por 4, foi acrescentado mais 2 painéis à solução do gerador fotovoltaico, totalizando assim 72 painéis nessa configuração. A **Figura 37** ilustra a ligação série e paralelo dos módulos fotovoltaicos.

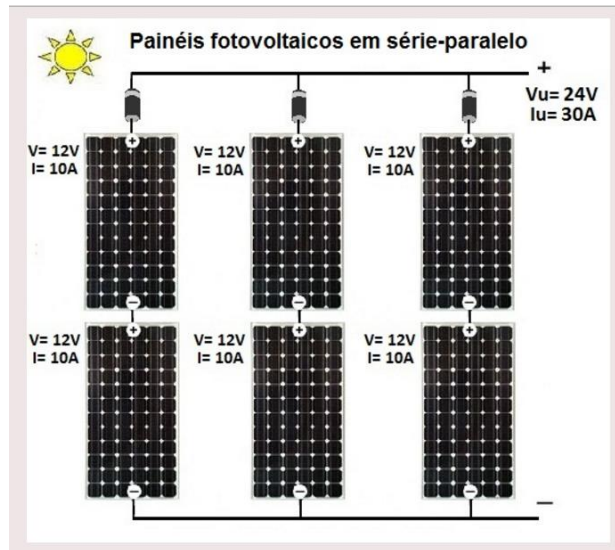


Figura.37 - Ilustração de módulos fotovoltaicos ligados em série e paralelo
 Fonte: Notas de aula da disciplina ERG-006 - Energia Solar I - (PECE/Poli/USP)

Tensão

Faixa de tensão de entrada admissível = 150~1000 V (por entrada MPPT do inversor)

$$V_{mp}(T_c [^{\circ}C]) \times \text{Número de painéis em série} < \text{máxima tensão admissível}$$

$$26,34 (63,13^{\circ}C) \times 18 \text{ painéis} = 474,12 V < 1000 V (OK)$$

$$V_{mp}(T_{cref} [^{\circ}C]) \times \text{Número de painéis em série} < \text{máxima tensão admissível}$$

$$30,4 (25^{\circ}C) \times 18 \text{ painéis} = 547,2 V < 1000 V (OK)$$

Corrente

Corrente Máxima (DC) de Entrada I_{MAX} = 66 A / 33 A (por entrada MPPT do inversor)

$$I_{mp}(T_c [^{\circ}C]) \times \text{Número de Strings em paralelo} < \text{máxima corrente admissível}$$

$$8,22 (25^{\circ}C) \times 2 \text{ strings} = 16,44 A < 33 A$$

$I_{mp}(T_{cref} [^{\circ}C]) \times \text{Número de Strings em paralelo} < \text{máxima corrente admissível}$

$$8,41 (63,13 ^{\circ}C) \times 2 \text{ strings} = 16,82 A < 33A (OK)$$

Nessa configuração, a tensão e corrente DC fornecidas pelo conjunto de painéis ficaram dentro dos limites máximos admissíveis de cada entrada do inversor. Desse modo, cada entrada será alimentada em condições ideais de geração por tensão na casa dos 547,2 Volts e 16,44 Amperes, totalizando uma potência de 17992 Watts (8996 Watts/entrada), somando-se a potência das duas entradas. Adotando esse valor como potência de entrada para recálculo do Fator de Utilização do Inversor (FDI), teremos:

$$FDI = \frac{15000}{17992}$$

$$FDI = 0,834 (0,6 < FDI < 0,9)$$

Segundo (ZILLES, 2008), o valor de FDI igual a 0,834 encontrado para essa aplicação, indica uma boa utilização do inversor, no que se refere a potência de entrada prática no inversor em relação à sua potência nominal.

5 CAPÍTULO 5 – ANÁLISE DE INVESTIMENTO

5.1 Custos envolvidos em cada sistema

Devido às dificuldades encontradas para a obtenção dos custos de implementação destes sistemas na localidade em estudo optou-se por utilizar custos médios aproximados obtidos em estudos realizados por grupos de pesquisa ao redor do mundo. Sempre que foi possível inseriram-se valores praticados no mercado brasileiro no que tange a serviços e equipamentos.

Comparativo dos custos de produção da água nos sistemas de dessalinização objetos do estudo

➤ Premissas e metodologia de cálculo.

Para realizar o comparativo e a estimativa dos custos de produção para cada um dos sistemas de dessalinização objeto desse estudo, foram adotadas as premissas e metodologia de cálculo, como segue:

Taxa de juros (i) = 5% a.a

Período considerado (n) = 20 anos

Número de dias no ano = 350 dias (previsão de 15 dias por ano para manutenção dos sistemas)

Produção de água potável = 52 m³/dia = 18.200 m³/ano

$$\text{Custo de produção de água potável (R\$/m}^3\text{)} = \frac{\text{CAPEX} + n \times \text{OPEX(O\&M)}}{\text{Produção no período } n} \quad (5.1.1)$$

Sistema de Osmose Reversa alimentado por painéis SFV

CAPEX = Sist. OR + Sist. SFV + Instalação + Obra (em R\$)

OPEX (O&M) = 15% a.a do CAPEX (em R\$/ano)

Destilador Solar

CAPEX = Produção dos destiladores (Custo/m² x área necessária + perdas de material) + Instalação + Obra (em R\$)

OPEX (O&M) = 1% a.a do CAPEX (em R\$/ano)

Ressalta-se que um sistema OR possui na substituição periódica de suas membranas e na necessidade de um operador permanente um valor de OPEX muito superior ao de um destilador solar cuja intervenção básica de operação consiste no descarte do rejeito do concentrado proveniente do processo de destilação quando o volume dos sais atinge o valor máximo para esta operação.

➤ **Custo de implantação de uma planta de destiladores solares térmicos**

Os destiladores solares não são produzidos em escala comercial, deste modo o custo de implantação da planta de dessalinização para atender a demanda de água de 52 m³/dia será estimada com base no valor do custo do vidro, adotado a premissa de que este representa aproximadamente 40% do custo total do destilador solar térmico, sendo outros 60% diluídos entre o restante dos materiais.

Para o cálculo do custo da obra para preparação do terreno, captação da água salobra e instalação dos destiladores, estimar-se-á 18% do custo total da produção dos destiladores.

O valor comercial obtido do vidro temperado, por meio de pesquisas feitas a distribuidores, varia de R\$ 115 a 206,00 por m². Todavia, esse é o valor médio de mercado praticado para venda em retalhistas, acrescido de impostos e margens de lucro. É de se esperar que as quantidades necessárias para a produção dos destiladores solares, visto sua grande área envidraçada, sejam vendidas por preços menores, aqui estimados em 30% dos valores praticados por retalhistas. Então adotar-se-á o valor de R\$ 34,50/m² de vidro temperado.

A área necessária de destiladores solares térmicos para atender a demanda de 52 m³/dia foi calculada anteriormente nesse trabalho é de 39.902,6 m², ou seja, 40.000 m².

Durante a produção dos destiladores é normal que haja algumas perdas de material, portanto, será estimado um percentual de perda de 15%.

Desse modo o custo de produção dos destiladores solares térmicos pode ser obtido conforme a seguinte sequência de cálculos.

Se o custo do vidro representa 40% do custo total de produção do destilador, o custo de produção pode ser encontrado facilmente conforme **Equação 5.1.2:**

$$\text{Custo de produção} = \frac{\text{Custo do vidro}}{0,4} \quad (5.1.2)$$

$$\text{Custo do vidro (R\$)} = \text{Área de necessária (m}^2\text{)} \times \frac{\text{custo do vidro(R\$)}}{\text{m}^2} \times \%perdas \quad (5.1.3)$$

$$\text{Custo do vidro} = 40.000 \text{ m}^2 \times \text{R\$ } 34,50/\text{m}^2 \times 1,15$$

$$\text{Custo do vidro} = \text{R\$ } 1.587.000,00$$

$$\text{Custo total de produção} = \frac{\text{R\$ } 1.587.000,00}{0,4}$$

$$\text{Custo total de produção} = \text{R\$ } 3.967.500,00$$

Os custos de obra e instalação foram estimados em 18% do custo total de produção dos destiladores solares. Desse modo:

$$\text{Custo de obra e instalação} = 0,18 \times \text{Custo total de produção} \quad (5.1.4)$$

$$\text{Custo de obra e instalação} = 0,18 \times \text{R\$ } 3.967.500,00$$

$$\text{Custo de obra e instalação} = \text{R\$ } 714.150,00$$

De posse dos custos calculados de produção, obra e instalação, o CAPEX pode ser obtido como segue:

$$\text{CAPEX} = \text{Custo total de produção} + \text{Custo de obra e instalação} \quad (5.1.5)$$

$$\text{CAPEX} = \text{R\$ } 3.967.500,00 + \text{R\$ } 714.150,00$$

$$\text{CAPEX} = \text{R\$ } 4.681.650,00$$

Como informado nas premissas de cálculo, o OPEX, que basicamente, refere-se aos custos anuais de operação e manutenção do site, será estimado em 1% a.a do CAPEX do projeto para implementação dos destiladores solares térmicos.

$$\text{OPEX} = 0,01 \times \text{CAPEX} \quad (5.1.6)$$

$$\text{OPEX} = 0,01 \times \text{R\$ } 4.681.650,00$$

$$OPEX = R\$ 46.816,50/ano$$

$$Custo\ de\ produção\ de\ água\ potável\ (R\$/m^3) = \frac{CAPEX + n \times OPEX(O\&M)}{Produção\ no\ período\ n}$$

$$Custo\ de\ produção\ de\ água\ potável\ \left(\frac{R\$}{m^3}\right) = \frac{R\$ 4.681.650,00 + 20 \times R\$ 46.816,50}{18.200 \times 20}$$

$$Custo\ de\ produção\ de\ água\ potável\ \left(\frac{R\$}{m^3}\right) = R\$ 15,43/m^3$$

$$Custo\ de\ produção\ de\ água\ potável\ \left(\frac{R\$}{l}\right) = R\$ 0,015/l$$

KABEEL (2010) faz uma estimativa do custo de produção de água potável para diferentes configurações de destiladores solares, conforme pode ser visto na **Tabela 4** e nas **Figuras 38 e 39**. O objetivo de apresentar os resultados obtidos por KABEEL (2010) em seu artigo científico é ter uma base comparativa para os valores do custo da água obtidos pelo método de dessalinização por destilação solar apresentados neste trabalho.

Tabela.4 - Apresentação de algumas configurações de destiladores solares para diferentes referências.

Table 1
The different review types and area of solar stills, climatic condition and daylight hours.

No. Ref.	Type of solar still	Area, m ²	Climatic condition	Daylight hours
Fath et al. [1]	Single-slope	1.527	Egypt	6–18
Samee et al. [2]	Single-slope	0.54	Pakistan	10–19
Kumar and Tiwari [3]	Single-slope	1	India	9–17
Kumar and Tiwari [3]	With solar collector	1	India	9–17
Badran and Tahaine [4]	With solar collector	1	Jordan	8–18
Abdel-Rehim and Lasheen [5]	With solar concentrator	1	Egypt	9–19
Abdallah and Badran [6]	With sun tracking	1	Jordan	7–18
Fath et al. [1]	Pyramid-shaped	1.527	Egypt	6–18
Al-Hinai et al. [7]	Pyramid-shaped	1	Oman	8–20
Badran et al. [8]	Pyramid with collector	0.922	Jordan	8–17
Velmurugan et al. [9]	With fin type	1	India	9–17
Velmurugan et al. [10]	With wick and fin type	1	India	9–17
Ismail [11]	Transportable hemispherical	0.5	Canada	9–17
Velmurugan et al. [12]	Stepped with fins and sponges	0.5	India	9–17
Abdallah et al. [13]	Stepped with sun tracking	0.48	Jordan	8–18
Sadinieni et al. [14]	A weir-type	0.969	USA	8–22
Velmurugan and Srithar [15]	With sponge and pond	1	India	8–17
El-Sebaai et al. [16]	With a shallow solar pond	1	Egypt	8–18
El-Bahi and Inan [17]	With separate condenser	1	Turkey	8–18

Fonte: KABEEL et al, 2010

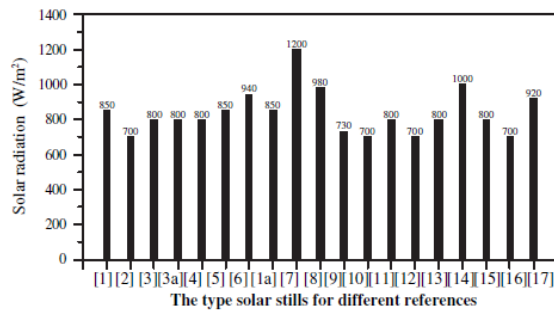


Fig. 15. The solar radiation for different types of solar stills.

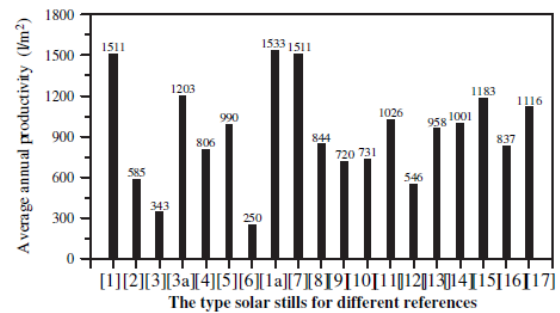


Fig. 18. The average annual productivity for different types of solar stills.

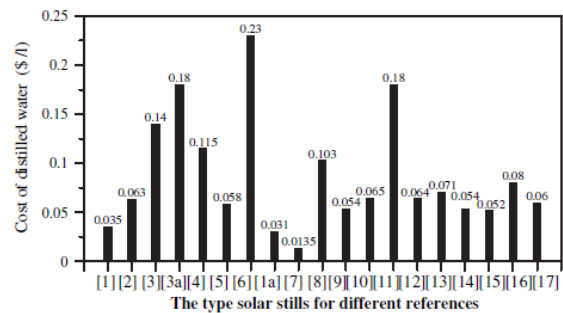
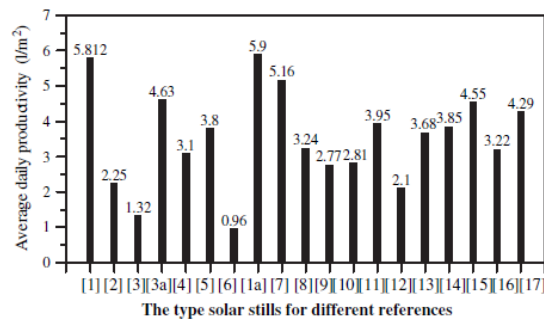


Figura.38 - Resultados apresentados no artigo científico para algumas configurações de destiladores solares.

Fonte: KABEEL et al, 2010

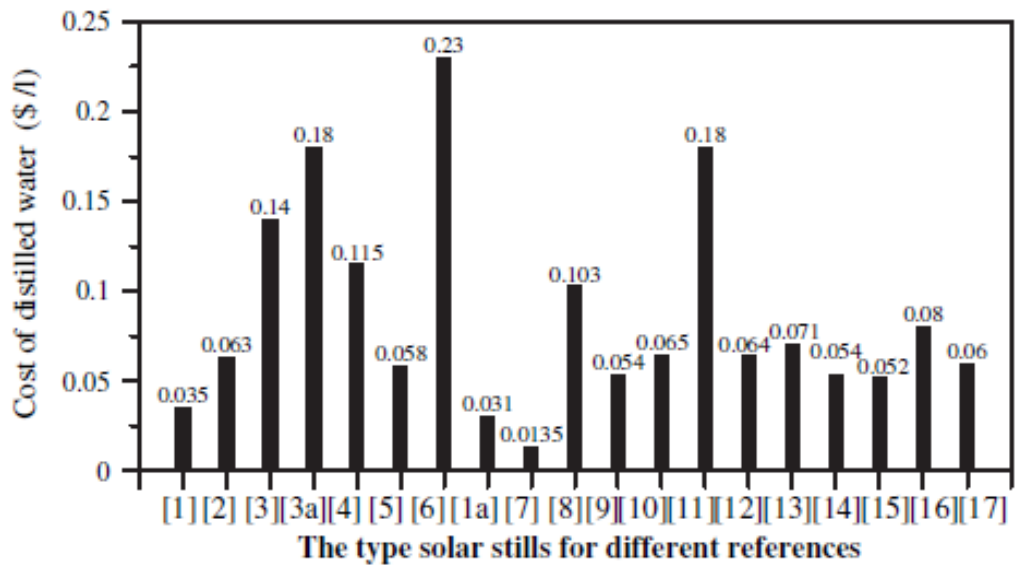


Figura.39 - Os custos médios da água destilada apresentados no artigo científico.

Fonte: KABEEL et al, 2010

Custo de implantação de um sistema de osmose reversa eletricamente alimentado por painéis solares fotovoltaicos (SFV)

A estrutura de custos associada a um sistema de dessalinização por osmose reversa pode ser dada conforme **Figura 40**.

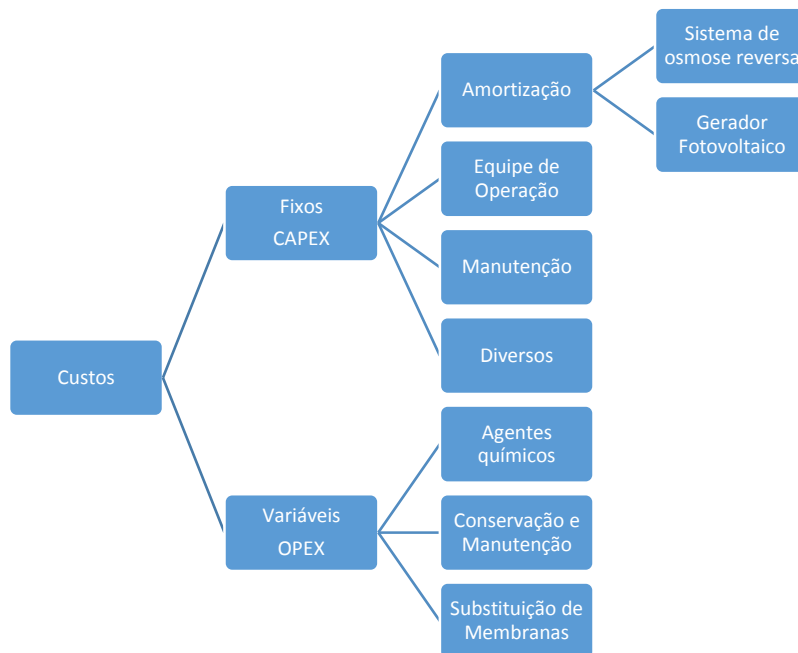


Figura.40 - Estrutura de custos associada a um sistema de dessalinização por osmose reversa

Os valores dos sistemas de osmose reversa variam basicamente em função da salinidade da água de entrada e de sua capacidade de produção de água tratada. Já os custos de operação e manutenção (O&M), em função da periodicidade de substituição dos cartuchos e membranas que compõe o sistema, dos custos com agentes químicos para pre e pós tratamento da água, e da necessidade de mão-de-obra fixa para operação e manutenção.

Diferentemente da planta de destiladores solares, os sistemas de osmose reversa e solar fotovoltaico ocuparão uma área muito menor e exigiram menores investimentos com obras civis. Desse modo, para o cálculo do custo da obra para preparação do terreno, construção de abrigo em alvenaria para o sistema de osmose reversa e captação da água salobra, para estimar-se-á 15% do custo total do sistema.

Na planilha dos custos de aquisição dos equipamentos, foi adotado imposto de 40% e 15% de taxas de importação em cima dos custos em reais (R\$) para os sistemas de osmose reversa e solar fotovoltaico. Para o cálculo do custo da mão-de-obra de instalação para o sistema de osmose reversa, foi estimado o custo de 20% do valor sistema.

Desse modo, o custo de produção da água tratada pelo sistema de osmose reversa alimentado eletricamente pelos painéis solares fotovoltaicos pode ser obtido conforme a seguinte sequência de cálculos.

Na **Tabela 5** os custos relativos a aquisição dos equipamentos para o sistema de osmose reversa e solar fotovoltaico são mostrados em detalhes.

O custo de obra foi estimado em 15% do custo total do sistema. Desse modo:

$$\text{Custo de obra} = 0,15 \times \text{Custo total do sistema} \quad (5.1.7)$$

$$\text{Custo de obra} = 0,15 \times \text{R\$ } 775.130,93$$

$$\text{Custo de obra} = \text{R\$ } 116.269,64$$

De posse dos custos de obra e instalação, o CAPEX pode ser obtido como segue:

$$\text{CAPEX} = \text{Custo total do sistema} + \text{Custo de obra e instalação} \quad (5.1.8)$$

$$\text{CAPEX} = \text{R\$ } 775.130,93 + \text{R\$ } 116.269,64$$

$$CAPEX = R\$ 891.400,57$$

Tabela.5 - Planilha de custos dos sistemas de osmose reversa e SFV

CUSTOS DOS EQUIPAMENTOS E INSTALAÇÃO DO SISTEMA DE OSMOSE REVERSA ALIMENTADO PELO SFV			
Gerador Fotovoltaico			
Item	Quantidade	Valor em Dólar	Valor em Reais
INVERSOR SUNNY TRIPOWER 15000 TL-US	1	\$5.396,00	R\$ 20.936,48
PAINEL SOLAR CANADIAN SOLAR C6SP-250P	72	\$300,00	R\$ 83.808,00
ESTRUTURA DE MONTAGEM E FIXAÇÃO DE 12 PAINÉIS 1,60 m x1,00 m	6	\$1.998,82	R\$ 46.532,53
CABEAMENTO	1	\$800,00	R\$ 3.104,00
DISJUNTORES	2	\$128,78	R\$ 999,33
STRINGS BOXES	2	\$300,00	R\$ 2.328,00
MISCELÂNEA	1	\$500,00	R\$ 1.940,00
TOTAL PARCIAL MATERIAL			R\$ 159.648,34
IMPOSTOS			R\$ 63.859,34
TAXAS DE IMPORTAÇÃO			R\$ 23.947,25
TOTAL			R\$ 247.454,93
Gerador Fotovoltaico - MÃO-DE-OBRA			
Item	Potência (Wp)	Custo/Wp	Custo Total
Valor de mão-de-obra/Wp instalado	18000	R\$ 1,25	R\$ 22.500,00
Custo TOTAL - GERADOR FOTOVOLTAICO			R\$ 269.954,93
Sistema de Osmose Reversa			
Item	Quantidade	Valor em Dólar	Valor em Reais
Sistema de Osmose Reversa	1	\$70.000,00	R\$ 271.600,00
IMPOSTOS			R\$ 108.640,00
TAXAS DE IMPORTAÇÃO			R\$ 40.740,00
TOTAL			R\$ 420.980,00
Sistema de Osmose Reversa - MÃO-DE-OBRA			
Item	Custo Total		
Valor de mão-de-obra de instalação	R\$ 84.196,00		
Custo TOTAL - SISTEMA DE OSMOSE REVERSA			R\$ 505.176,00
CUSTO TOTAL DO SISTEMA (OR + SFV)		R\$ 775.130,93	

Fonte: Próprio autor

Como informado nas premissas de cálculo, o OPEX para o sistema de osmose reversa, refere-se aos custos anuais de operação e manutenção do site e será estimado em 15% a.a do CAPEX do projeto em função da periodicidade de substituição dos cartuchos e membranas que compõe o sistema de osmose reversa, dos custos com agentes químicos para pre e pós tratamento da água, da necessidade de mão-de-obra fixa para operação e manutenção (O&M) do sistema de osmose reversa e periódica para o sistema solar fotovoltaico.

$$OPEX = 0,15 \times CAPEX \quad (5.1.9)$$

$$OPEX = R\$ 133.710,09/ano$$

$$Custo\ de\ produção\ de\ água\ potável\ (R\$/m^3) = \frac{CAPEX + n \times OPEX(O\&M)}{Produção\ no\ período\ n}$$

$$Custo\ de\ produção\ de\ água\ potável\ (R\$/m^3) = \frac{R\$ 891.400,57 + 20 \times R\$ 133.710,09}{18.200 \times 20}$$

$$Custo\ de\ produção\ de\ água\ potável\ (R\$/m^3) = R\$ 9,80/m^3$$

$$Custo\ de\ produção\ de\ água\ potável\ \left(\frac{R\$}{l}\right) = R\$ 0,0098/l \cong R\$ 0,01/l$$

5.2 Análise econômica comparativa entre os sistemas de dessalinização.

Para que seja possível fazer a análise do retorno do investimento, faz-se necessário estimar uma receita bruta anual para cada um dos sistemas que estão sendo comparados nesse trabalho. Como pode ser observado, para o cálculo da receita bruta anual foram considerados os valores em R\$/m³ da água anteriormente obtidos para cada um dos sistemas, o volume diário necessário de água e a previsão de dias do ano em que os sistemas estarão em operação. É importante observar que foram considerados 350 dias, pois estão previstos 15 dias para conservação e manutenção dos sistemas.

Fluxo de caixa anual para o destilador solar

$$R\$ \frac{15,43}{m^3} \times 52 \frac{m^3}{dia} \times 350\ dias = R\$280.826,00$$

Fluxo de caixa anual para o sistema de osmose reversa com SFV

$$R\$ \frac{9,80}{m^3} \times 52 \frac{m^3}{dia} \times 350\ dias = R\$178.360,00$$

5.3 Análise de retorno do investimento para os sistemas

Destilador Solar

Tabela.6 - Parâmetros Financeiros do Sistema de Destilação Solar

Parâmetros Financeiros			Resultado Financeiro	
CAPEX	-R\$ 4.681.650	Ilo	Payback simples	16,7 anos
Receita Anual	R\$ 280.826	FLC	Payback Descontado	36,8 anos
Taxa de desconto	5%	r	VPL	-R\$ 1.181.937
Período (anos)	20	n	TIR	1,8%

Tabela.7 - Fluxos de Caixa do Sistema de Destilação Solar

Ano	FLC	FLCD	FLCA
0	-4.681.650	-4.681.650	-4.681.650
1	280.826	267.453	-4.414.197
2	280.826	254.717	-4.159.479
3	280.826	242.588	-3.916.891
4	280.826	231.036	-3.685.855
5	280.826	220.035	-3.465.820
6	280.826	209.557	-3.256.264
7	280.826	199.578	-3.056.686
8	280.826	190.074	-2.866.612
9	280.826	181.023	-2.685.589
10	280.826	172.403	-2.513.186
11	280.826	164.193	-2.348.993
12	280.826	156.374	-2.192.618
13	280.826	148.928	-2.043.690
14	280.826	141.836	-1.901.854
15	280.826	135.082	-1.766.772
16	280.826	128.650	-1.638.123
17	280.826	122.523	-1.515.599
18	280.826	116.689	-1.398.910
19	280.826	111.132	-1.287.778
20	280.826	105.840	-1.181.937

Sistema de Osmose Reversa com SFV

Tabela.8 – Parâmetros Financeiros do Sistema de Osmose Reversa – SFV

Parâmetros Financeiros			Resultado Financeiro	
CAPEX	-R\$ 891.401	I ₀	Payback simples	5,0 anos
Receita Anual	R\$ 178.360	FLC	Payback Descontado	5,9 anos
Taxa de desconto	5%	r	VPL	R\$ 1.331.359
Período (anos)	20	n	TIR	19,4%

Tabela.9 – Fluxos de Caixa do Sistema de Osmose Reversa – SFV

Ano	FLC	FLCD	FLCA
0	-891.401	-891.401	-891.401
1	178.360	169.867	-721.534
2	178.360	161.778	-559.756
3	178.360	154.074	-405.682
4	178.360	146.737	-258.945
5	178.360	139.750	-119.195
6	178.360	133.095	13.900
7	178.360	126.757	140.657
8	178.360	120.721	261.378
9	178.360	114.972	376.351
10	178.360	109.498	485.848
11	178.360	104.283	590.131
12	178.360	99.318	689.449
13	178.360	94.588	784.037
14	178.360	90.084	874.121
15	178.360	85.794	959.915
16	178.360	81.709	1.041.624
17	178.360	77.818	1.119.442
18	178.360	74.112	1.193.554
19	178.360	70.583	1.264.137
20	178.360	67.222	1.331.359

Para fins de comparação a **Tabela 10** mostra os custos aproximados de uma planta de dessalinização com sistema de osmose reversa com capacidade de 2000 m³/dia.

Tabela.10 – Custos aproximados de uma unidade osmose reversa com capacidade de 2000 m³/dia.

TABLE 1. APPROXIMATE COSTS OF A 367 gal/min (2,000 m ³ /d) INDUSTRIAL RO UNIT (10-yr life)								
Industrial RO	Present value, 10 yr	75% Recovery			Percent of total	90% Recovery		
		Cost, gal/d	Cost per 1,000 gal	Present Value, 10 yr		Cost, gal/d	Percent of total	Cost per 1,000 gal
Capex	\$521,195	\$0.99	\$0.28	6%	\$521,195	\$0.99	12%	\$0.28
Energy	\$480,727	\$0.91	\$0.26	6%	\$600,909	\$1.14	14%	\$0.32
O&M	\$1,148,252	\$2.17	\$0.62	13%	\$1,148,252	\$2.17	26%	\$0.62
Brine	\$6,436,578	\$12.18	\$3.48	75%	\$2,145,526	\$4.06	49%	\$1.16
Total	\$8,586,752	\$16.25	\$4.64	100%	\$4,415,882	\$8.36	100%	\$2.39

Fonte: CHEMICAL ENGINEERING JULY 2014 - www.che.com

Tabela.11 – Tabela comparativa dos sistemas de dessalinização estudados nesse trabalho.

Tabela comparativa de custos e dados financeiros		
Parâmetros	Osmose Reversa alimentado por SFV	Destilador Solar
Capex (R\$)	R\$ 891.400,57	R\$ 4.681.650,00
Opex (R\$)	R\$ 133.710,09	R\$ 46.816,50
Custo da Água Potável (R\$/m ³)	R\$ 9,80	R\$ 15,43
Receita Anual (R\$/ano)	R\$ 178.360,00	R\$ 280.826,00
Payback Simples (anos)	16,7	5
Payback Descontado (anos)	36,8	5,9
VPL (R\$)	-R\$ 1.181.937,00	R\$ 1.331.359,00
TIR (%)	1,8	19,4

Fonte: Próprio autor

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RESULTADOS

6.1 Conclusões

1. Neste trabalho o custo de implantação do sistema de dessalinização por destilação solar mostrou-se superior quando comparado com o sistema por osmose reversa alimentado eletricamente com painéis solares fotovoltaicos. Mas isso pode se dar por várias razões, dentre elas o custo estimado do vidro para o sistema por destilação solar;
2. Em termos do custo por volume de água tratada produzida por cada um dos sistemas de dessalinização, podemos concluir que o custo da água pelo sistema de osmose reversa (*R\$ 0,010/l*) é 1,5 vezes menor quando comparado com o sistema de destilação solar (*R\$ 0,015/l*);
3. O custo operacional de um sistema de destilação solar apresentou-se muito inferior quando comparado com o sistema de dessalinização baseado em osmose reversa, pois não há custos significativos com operação e manutenção, nem tão pouco substituição periódica de componentes do sistema, tais como cartuchos e membranas;
4. Num sistema de dessalinização baseado em osmose reversa devem ser considerados os custos relacionados com a substituição das membranas, manutenções preventivas e mão de obra para operação do sistema.
5. As membranas semipermeáveis utilizadas no processo de osmose reversa têm uma vida útil muito curta e o custo para substituí-las pode chegar a metade do custo total do tratamento de dessalinização.
6. O sistema de osmose reversa apresenta grande vantagem frente ao destilador solar no que se refere a produção de água dessalinizada por área necessária para implantação dos sistemas;

7. Em termos tecnológicos, a tecnologia de destilação solar, faz sentido somente para pequenas comunidades, onde o estado de extrema pobreza não permite que tecnologias como a de osmose reversa seja disponibilizada para a comunidade;
8. Uma das vantagens do destilador solar, frente ao sistema de osmose reversa é a possibilidade de poder ser construído artesanalmente por moradores de comunidades mais pobres;
9. Para sistemas de dessalinização solar térmica, faz sentido considerar a possibilidade do uso de outras tecnologias, tais como a dos coletores concentradores fornecendo calor para sistemas de dessalinização térmica multi-estágios ou por compressão de vapor;
10. A eficiência e a qualidade da água tratada do dessalinizador solar térmico, diferentemente do destilador por osmose reversa, não depende da salinidade da água de entrada;

6.2 Comparação dos processos de dessalinização por destilação solar e osmose reversa.

Processos de dessalinização por destilação solar:

- Tem baixo consumo de eletricidade;
- Necessitam de grande extensão de terreno;
- Os destiladores solares podem ser produzidos com materiais de baixo custo;
- Tem baixa eficiência;
- Não dependem da salinidade da água;
- Produzem água destilada de qualidade;
- A água destilada deve ser acrescida de sais e minerais para o consumo humano;
- Os destiladores solares podem ser construídos de forma artesanal a custos baixos para atendimento de comunidades carentes.

Processos de dessalinização por osmose reversa:

- Tem elevado consumo eletricidade;
- Frequentemente precisam de pré-tratamentos físico-químicos importantes;
- Precisam de uma extensão média de terreno, quase sempre menores quando comparada a sistemas por destilação;
- Necessitam de uma fonte externa de energia elétrica para alimentação das bombas que exercem a pressão osmótica ao sistema;
- Eliminam bactérias e vírus quando associados a sistemas de desinfecção;
- A presença de íons específicos pode limitar a eficiência do sistema e as suas possibilidades de aplicação, sendo que a sua aplicação está diretamente ligada as características físico-químicas da água;
- É recomendável do ponto de vista econômico que este processo seja usado primeiramente com águas com menos concentração de sais, que teoricamente, aumentaria a vida útil das membranas do sistema de osmose reversa.

BIBLIOGRAFIA

ALVES, C. (2007). **Tratamento de águas de abastecimento**, 2ª Edição, Publindústria, 301-320.

ANDRADE, E., BEZERRA, L., ANTUNES, F. (2008). **Sistema autônomo sem baterias para dessalinização de água salobra** - 9 páginas. Universidade Federal do Ceará. Brasil, 2008.

ARUNKUMAR, T. et al. **Experimental Study on Various Solar Still Designs**. ISRN Renewable Energy v. 2012, p. 1–10, 2012.

BERGMAN, THEODORE L. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 7. ed. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2014. 672 p.

ÇENGEL, YUNUS A.; BOLES, MICHAEL A. **Termodinâmica**. Porto Alegre: AMGH, 2013. 1020 p.

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

CURINGA, A. M.; LIMA, L. B. de M.; DE SOUZA, L. F. **Projeto de Concentrador Solar para Dessalinização**. 2013, Currais Novos: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, 2013. p.2603–2612.

DA CRUZ, CAROLINA E. M. **Dessalinização da água do mar através de energia solar** – Caso de estudo: Salamansa-Cabo Verde. Universidade do Algarve, 2012. 132 p.

DAL BIANCO. BRENO DE MELLO. **Dessalinização à Partir de Destilador Solar**. Curitiba: 2013.

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

DI BERNARDO, LUIZ; DANTAS, ANGELA DI BERNARDO. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. 2a ed. São Carlos: RiMa Editora, 2005. 792 p.

DOMINEGHETTI, NEWTON CESAR GOMES FERREIRA. **Estudo de Viabilidade Técnica-Econômica de Utilização de Energia Solar Fotovoltaica na Irrigação de Lavouras no Nordeste do Brasil**. Universidade de São Paulo, 2015. 93 p.

DOS REIS, LINEU B. **Geração de Energia Elétrica**. 2a ed. Barueri: Editora Manole Ltda., 2011. 460 p.

DUFFIE, JOHN A.; D BECKMAN, WILLIAM A.: **Solar Engineering of Thermal Processes**, 4th Edition. Wiley, 2013, 910 p.

DUNKLE, R. V. (1961). **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

FIORENZA, G.; SHARMA, V. K.; BRACCIO, G. **Techno-economic evaluation of a solar powered water desalination plant**. Energy Conversion and Management v. 44, n. 14, p. 2217–2240.

FORMOSO, S. C. (2010). **Sistema de tratamento de água salobra: alternativa de combate à escassez hídrica no semi-árido sergipano**. Dissertação para a obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente (137 páginas). Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão – Brasil, Fevereiro de 2010.

GABELICH, CHRISTOPHER J. **Non Thermal Technologies for Salinity Removal**. 1st. ed. Colorado River: AWWA Research Fundation, 187 p., 2001.

GUERREIRO, M. L. F. B. (2009). **Dessalinização para produção de água potável - Perspectivas para Portugal**. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil - Especialização em Hidráulica (80 páginas). Universidade do Porto, Julho de 2009.

JOO, SUNG HEE; TANSEL, BERRIN. **Novel technologies for reverse osmosis concentrate treatment: A review**. Journal of Environmental Management v. 150, p. 322–335, mar. 2015.

KABEEL, A. E.; HAMED, A. M.; EL-AGOUZ, S. A. **Cost analysis of different solar still configurations**. Energy v. 35, n. 7, p. 2901–2908, 2010.

KABEEL, A. E.; HAMED, A. M.; EL-AGOUZ, S. a. **Cost analysis of different solar still configurations**. Energy v. 35, n. 7, p. 2901–2908, 2010a.

KALOGIROU, SOTERIS. **Economic analysis of a solar assisted desalination system**. Renewable Energy v. 12, n.4, p. 351–367, 1997.

KALOGIROU, SOTERIS. **Solar Energy Engineering: Processes and Systems**, 1st Edition, Academic Press / Elsevier, 2009, 760 p.

KEREN, Y. et al. **Theoretical and experimental comparison of conventional and advanced solar pond performance**. Solar Energy v. 51, n.4, p. 255–270, 1993.

KOBIYAMA, M., CHECCHIA, T., SILVA, R. (2004). **Tecnologias Alternativas para Aproveitamento de Águas** (115 páginas). Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Brasil, 2004.

LARANJEIRA, C. P. F. (2010). **Estudo Numérico dos Escoamentos em Canais de Dessalinização por Osmose**. Dissertação (Mestrado), Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, outubro de 2010.

MADAENI, S. S. (1999). **The application of membrane technology for water disinfection**. Chemical Engineering Department, Razi University. Water Research 33, 301-308.

MALUF, A. P. (2005). **Destiladores Solares no Brasil**. Monografia para a obtenção do título de especialista em Fontes Alternativas de Energia (39 páginas). Minas-Gerais – Brasil, 2005.

MANKIW, N. GREGORY. **Introdução à Economia**. 6a ed. São Paulo: Cengage Learning, 2013. 824 p.

MATHIOULAKIS, E.; BELESSIOTIS, V.; DELYANNIS, E. **Desalination by using alternative energy: Review and state-of-the-art**. Desalination v. 203, n. 1-3, p. 346–365.

MILLER, J. E. (2003). **Review of Water Resources and Desalination Technologies** (54 pages). Materials Chemistry Department, Sandia National Laboratories. Albuquerque, March 2003.

MORAN, MICHAEL J. et al. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2014. 820 p

MOURA, J.P.; MONTEIRO, G.S.; **Aplicações do processo de osmose reversa para o aproveitamento de água salobra do semi-árido nordestino**; XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2008.

NASCIMENTO, SEBASTIÃO V. Engenharia Econômica - **Técnica de Avaliação e Seleção de Projetos de Investimentos**. 1a ed. ed. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda., 2010. 272 p.

PACHECO, C.R.F. **Separação por Membranas. Química e Derivados** p. 44–45, jul. 2012.

PEREIRA, D. C. F. (2007). **Detecção de subprodutos da desinfecção com cloro em água dessalinizada**. Dissertação para Mestrado em Química, 139 páginas. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Porto, 2007.

PINHO, M. Â. (2009). **Meio de cultivo a base de concentrado de dessalinização obtido por osmose inversa para Arthrospira (Spirulina) platensis**. Dissertação apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do título de Mestre em Ciência dos Alimentos (85 páginas). Florianópolis, 2009.

RICHTER, CARLOS. **A. Água - Métodos e Tecnologia de Tratamento.** 1a Ed. ed. São Paulo: Blucher, 2011. 341 p.

ROSA, DANIEL J.M. **Sistemas Fotovoltaicos Domiciliares de Dessalinização de Água Para Consumo Humano: Um Estudo de Sua Viabilidade e Configurações.** Universidade de São Paulo, 2013. 117 p.

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

TIWARI, G. N., DIMRI, V, & CHEL, A. (2009). **Parametric Study of an Active and Passive Solar Distillation System: Energy and Exergy Analysis.** Desalination, 242, 1-18.

TIWARI, G. N., SINGH, H. N., & TRIPATHI, R. (2003). **Present Status of Solar Distillation.** Solar Energy, 75, 367-373.

VYAS, HARSH et al. **Modus operandi for maximizing energy efficiency and increasing permeate flux of community scale solar powered reverse osmosis systems.** Energy Conversion and Management v. 103, p. 94–103, out. 2015.

ZILLES, ROBERTO et al. **Sistemas Fotovoltaicos Conetados à Rede Elétrica.** 1a ed. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2012. 208 p.