



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – UFCG
CENTRO DE EDUCAÇÃO E SAÚDE – CES
UNIDADE ACADÊMICA DE FÍSICA E MATEMÁTICA – UAFM
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA

DINIZ RAIMUNDO SANTOS FILHO

**ESTUDO DE PROCESSOS DE DESSALINIZAÇÃO COM ÊNFASE NA
TECNOLOGIA DE DESTILAÇÃO SOLAR PARA O TRATAMENTO DE ÁGUA**

CUITÉ – PB

2023

DINIZ RAIMUNDO SANTOS FILHO

**ESTUDO DE PROCESSOS DE DESSALINIZAÇÃO COM ÊNFASE NA
TECNOLOGIA DE DESTILAÇÃO SOLAR PARA O TRATAMENTO DE ÁGUA**

Monografia apresentada ao Curso de
Licenciatura em Física, como parte dos
requisitos necessários à obtenção do título de
Licenciado em Física.

Orientador: Prof. Dr. Joseclécio Dutra Dantas

CUITÉ – PB

2023

S237e Santos Filho, Diniz Raimundo.

Estudo de processos de dessalinização com ênfase na tecnologia de destilação solar para o tratamento de água. / Diniz Raimundo Santos Filho. - Cuité, 2023.

110 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Educação e Saúde, 2023.

"Orientação: Prof. Dr. Joseclécio Dutra Dantas".

Referências.

1. Água. 2. Dessalinização. 3. Água - purificação. 4. Água - tratamento - energia solar. 5. Purificação da água. 6. Energia do sol - dessalinização. I. Dantas, Joseclécio Dutra. II. Título.

CDU 556(043)

DINIZ RAIMUNDO SANTOS FILHO

**ESTUDO DE PROCESSOS DE DESSALINIZAÇÃO COM ÊNFASE NA
TECNOLOGIA DE DESTILAÇÃO SOLAR PARA O TRATAMENTO DE ÁGUA**

Monografia apresentada ao Curso de
Licenciatura em Física, como parte dos
requisitos necessários à obtenção do título de
Licenciado em Física.

Julgado e Aprovado em: __/_____/2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Joseclécio Dutra Dantas

Orientador – UAFM/CES/UFCG

Prof. Dr. Fábio Ferreira de Medeiros

Examinador Interno – UAFM/CES/UFCG

Prof. Dr. Heron Neves De Freitas

Examinador – UAFM/CES/UFCG

Prof. Dr. Jair Stefanini Pereira De Ataíde

Suplente – UAFM/CES/UFCG

Agradecimentos

Agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho. Em especial, agradeço aos professores do curso de Física do Centro de Educação e Saúde do Campus Cuité, que me proporcionaram uma formação de qualidade e me incentivaram a buscar o conhecimento.

Agradeço ao meu orientador, o professor Joseclécio Dutra Dantas, pela paciência, dedicação, orientação e confiança depositada em mim durante todo o processo de pesquisa. Agradeço aos professores Fábio Medeiros, Heron Freitas e Jair Stefanini que aceitaram fazer parte da banca.

Agradeço à minha esposa Sueli, pelo amor, apoio, compreensão e companheirismo em todos os momentos. Agradeço aos meus pais Diniz e Nicélia, pelo carinho, educação, valores e exemplos que me deram desde a infância.

Agradeço aos meus colegas de curso, pela amizade, parceria, troca de experiências e ajuda mútua.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelas bolsas do Programa Institucional de Bolsa de Iniciação à Docência e Residência Pedagógica, que me permitiram vivenciar a prática docente e ampliar meus horizontes profissionais, além de ajudar na minha permanência no curso. Também expresso minha gratidão à Universidade Federal de Campina Grande pela oportunidade de cursar o ensino superior em uma instituição pública de qualidade.

“A água de boa qualidade é como a saúde ou a liberdade: só tem valor quando acaba.”
(Guimarães Rosa)

Resumo

Este trabalho tem como tema os processos de dessalinização como alternativas para o tratamento de água, dando foco ao processo de destilação solar, uma técnica que utiliza a energia do sol para purificar a água. A destilação solar consiste em aquecer a água salgada ou contaminada em um dispositivo solar, fazendo-a evaporar e condensar em uma superfície mais fria, onde é coletada como água potável. Esse método é simples, barato e ecológico, podendo ser aplicado em regiões com escassez de água doce e abundância de radiação solar. O objetivo deste trabalho é revisar os conceitos teóricos que explicam o funcionamento da destilação solar, bem como suas vantagens e desvantagens em relação a outras técnicas de dessalinização. Para isso, foi realizada uma abrangente revisão da literatura por meio de diversos estudos publicados em livros, sites e artigos científicos disponíveis em plataformas de divulgação científica como a ScienceDirect, SCIELO e MDPI. Com base nessa revisão, foi possível apresentar os principais processos termodinâmicos envolvidos na destilação solar, as equações que os descrevem e a relevância da dessalinização para o cenário atual.

Palavras-chave: Água, Dessalinização, Energia renovável.

Abstract

This work has as its theme the desalination processes as alternatives for water treatment, focusing on the solar distillation process, a technique that uses the sun's energy to purify water. Solar distillation consists of heating saltwater or contaminated water in a solar device, causing it to evaporate and condense on a cooler surface, where it is collected as potable water. This method is simple, inexpensive, and environmentally friendly, and can be applied in regions with a shortage of fresh water and an abundance of solar radiation. The objective of this work is to review the theoretical concepts that explain the functioning of solar distillation, as well as its advantages and disadvantages in relation to other desalination techniques. For this, a comprehensive literature review was carried out through various studies published in books, websites, and scientific articles available on scientific dissemination platforms such as ScienceDirect, SCIELO, and MDPI. Based on this review, it was possible to present the main thermodynamic processes involved in solar distillation, the equations that describe them, and the relevance of desalination to the current scenario.

Keywords: Water, Desalination, Renewable Energy.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Classificação dos processos de dessalinização.	10
Figura 2 – Classificação de processos de dessalinização em relação à energia. . . .	10
Figura 3 – Mapa das usinas de dessalinização em todo o mundo, por tamanho e tecnologia.	13
Figura 4 – Diagrama de um processo de dessalinização por osmose reversa.	15
Figura 5 – Configuração básica de uma usina de Osmose Reversa.	15
Figura 6 – Usina de dessalinização RO em Ras al-Khair Arábia Saudita com produção estimada de 1 bilhão de litros por dia.	16
Figura 7 – Diagrama esquemático de uma unidade ED.	17
Figura 8 – Primeira planta comercial de eletrodialise foi construída em 1962 pela empresa Ionics, em Webster, Dakota do Sul, EUA	18
Figura 9 – Diagrama esquemático de uma unidade MSF.	20
Figura 10 – Planta MSF de 36 estágios em Point Loma, Califórnia.	20
Figura 11 – Diagrama esquemático da unidade MED.	21
Figura 12 – Planta de múltiplos efeitos em Freeport, Texas.	22
Figura 13 – Diagrama esquemático das unidades de Compressão de Vapor (MVC e TVC).	23
Figura 14 – A planta de destilação por compressão de vapor em Roswell, Novo México, durante a construção.	24
Figura 15 – Aparelho histórico de destilação solar.	25
Figura 16 – A primeira planta de destilação solar do mundo em Las Salinas, Chile .	25
Figura 17 – Classificação dos processos de dessalinização solar.	26
Figura 18 – Unidade de destilação solar passiva.	27
Figura 19 – Representação esquemática de um dessalinizador solar ativo com bomba de circulação e coletor solar FPC acoplados.	28
Figura 20 – Diagrama esquemático de um sistema de coletores solares acoplados a uma unidade de Destilação de Múltiplos Efeitos (MED).	29
Figura 21 – Diagrama esquemático de um sistema de painéis solares acoplados a uma unidade de Osmose Reversa (RO).	29
Figura 22 – Estrutura de um destilador solar passivo de dupla inclinação.	32
Figura 23 – Região semiárida do nordeste brasileiro.	38
Figura 24 – Comunidade rural: Sítio Luiz Gomes, no município de Caraúbas-PB. .	39
Figura 25 – Comunidade rural: Sítio Chagas, no município de Caraúbas-PB	39
Figura 26 – Comunidade rural: Sítio Barreiras, município de Caraúbas-PB	39
Figura 27 – Associação da transferência de calor por condução à difusão de energia devido à atividade molecular.	41
Figura 28 – Modos de transferência de calor: condução convecção e radiação. . . .	42

Figura 29 – Transferência de calor unidimensional por condução.	43
Figura 30 – Fluxo de calor unidimensional através de placas paralelas.	45
Figura 31 – Desenvolvimento das camadas limites de velocidade e temperatura na transferência de calor por convecção.	46
Figura 32 – Esfriamento de um ovo cozido por convecção forçada e livre.	47
Figura 33 – Absorção e emissão de radiação de uma superfície opaca de absorvidade α e emissividade ε	50
Figura 34 – Representação esquemática dos processos de reflexão, transmissão e absorção da radiação eletromagnética.	51
Figura 35 – Transferência de massa por difusão em uma mistura gasosa binária. . .	54
Figura 36 – Quando um líquido e seu vapor estão em equilíbrio dinâmico dentro de um recipiente fechado, a velocidade com que as moléculas deixam o líquido é igual à velocidade com que elas retornam.	58
Figura 37 – Ilustração da Lei de Dalton para uma mistura binária de gases.	59
Figura 38 – Fotografia do Sol em 30 de março de 2023	63
Figura 39 – Propagação da radiação solar para a Terra através da atmosfera.	64
Figura 40 – Componentes da radiação difusa sobre uma superfície inclinada.	66
Figura 41 – Relação Terra-Sol.	68
Figura 42 – Representação do ângulo de Zênite, ângulo de inclinação do eixo terres- tre, ângulo de latitude e ângulo horário solar.	69
Figura 43 – Representação dos ângulos de Zênite, Azimutes, ângulo de altitude solar, ângulo de incidência e ângulo de inclinação de uma superfície inclinada.	70
Figura 44 – As latitudes são medidas em graus, iniciando em 0° na Linha do Equador, até 90° nos polos.	73
Figura 45 – A longitude é medida em graus, iniciando (0°) e terminando (180°) no Meridiano de Greenwich.	74
Figura 46 – Seção da Terra mostrando β , θ , ϕ e $\phi - \beta$ para uma superfície voltada para o sul.	75
Figura 47 – Modos de transferência de calor interna e externa	85
Figura 48 – Coeficientes de transferência de calor associado ao destilador solar passivo.	88

Lista de gráficos

Gráfico 1 – Consumo de água doce mundial.	5
Gráfico 2 – Distribuição da água no mundo.	8
Gráfico 3 – Distribuição percentual das tecnologias de dessalinização.	11
Gráfico 4 – Distribuição mundial de usinas de dessalinização por área geográfica. .	12
Gráfico 5 – Capacidade global anual e cumulativa de dessalinização, 1970-2014. . .	12
Gráfico 6 – Principais tecnologias de dessalinização por capacidade em 2016. . . .	18
Gráfico 7 – Variação horária da produção de água destilada para diferentes níveis de água.	33
Gráfico 8 – Exemplo dos efeitos do dispersão de Rayleigh e da absorção atmosférica na distribuição espectral da irradiância direta.	65
Gráfico 9 – Frações de energia convectiva, evaporativa e radiativa.	98

Lista de tabelas

Tabela 1 – Classificação da água de acordo com a quantidade de sólidos dissolvidos por litro de água.	9
Tabela 2 – Coeficientes de difusão binária para misturas gasosas diluídas a 1 atm.	56
Tabela 3 – Composição do ar seco ao nível do mar.	57
Tabela 4 – Dia do mês e valores de “n” recomendados.	70
Tabela 5 – Fatores de correção para cada tipo de clima	79
Tabela 6 – Os valores de C e n para diferentes intervalos de números de Grashof.	94

Lista de abreviaturas e siglas

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
ED	Electrodialysis
IOM	Institute of Medicine
MED	Multi-Effect Distillation
MSF	Multi-Stage Flash Distillation
MVC	Mechanical Vapor Compression
ONU	Organização das Nações Unidas
RO	Reverse Osmosis
SD	Solar Distillation
SI	Sistema Internacional de Medidas
TDS	Total Dissolved Solids
TVC	Thermal Vapor Compression
UA	Unidade Astronômica
UCLA	University of California - Los Angeles
VC	Vapor Compression

Lista de símbolos

A_i	Índice de Anisotropia
$D_{w,a}$	Coefficiente de Difusidade Mássica do Vapor de Água no Ar
E	Fator de Correção
E	Poder Emissivo
E_n	Poder Emissivo de um Corpo Negro
G_{bn}	Componente Normal da Irradiância Direta
G_{bt}	Irradiância Direta no Plano Inclinado Terrestre
G_b	Irradiância Direta
G_{cb}	Componente Horizontal da Irradiância Direta
G_{cnb}	Componente Normal da Irradiância Direta
G_d	Irradiância Difusa
G_{on}	Componente Normal da Irradiância Extraterrestre
G_{sc}	Constante Solar Efetiva
Gr	Número de Grashof
H	Irradiação Solar Diária no Plano Horizontal Terrestre
H_d	Irradiação Solar Diária Difusa no Plano Horizontal Terrestre
H_o	Irradiação Solar Diária no Plano Horizontal Extraterrestre
I	Irradiação Horária Total em uma Superfície Horizontal
I_T	Irradiação Horária Total em uma Superfície Inclinação
J_{dif}^*	Fluxo Molar por Difusão
J_{dif}	Fluxo de Massa por Difusão
K_T	Índice de Claridade Diário
L_{loc}	Longitude da Localização
L_{st}	Meridiano de Referência para o Fuso Horário Local
M_a	Massa Molar do Ar Atmosférico

M_w	Massa Molar da Água
N	Horas de Sol
Nu	Número de Nusselt
P	Pressão Total
Pr	Número de Prandtl
Q	Calor Total
R_{\odot}	Raio Solar
R_b	Fator de Conversão para Radiação Direta em Plano Inclinado
R_d	Fator de Conversão para Radiação Difusa em Plano Inclinado
R_r	Fator de Conversão para Radiação Refletida em Plano Inclinado
STD	Hora Padrão
ST	Hora Solar
T_{∞}	Temperatura da Camada Limite
$T_{g,in}$	Temperatura da Face Interna da Cobertura
T_{viz}	Temperatura da Vizinhança
T_w	Temperatura Superficial da Água
α	Absortância
α	Difusidade Térmica
α_s	Ângulo de Altitude Solar
β	Coefficiente de Expansão Volumétrica
β	Inclinação
δ	Ângulo de Inclinação do Eixo Terrestre
\dot{N}_{dif}	Taxa de Difusão Molar
\dot{Q}	Fluxo de Calor
\dot{m}_{dif}	Taxa de Transferência de Massa por Difusão
\dot{q}	Taxa de Transferência de Calor

\dot{q}_{bl}	Taxa Geral de Transferencia de Calor da Bacia para o Ambiente
$\dot{q}_{cv,w}$	Taxa de Transferência de Calor Convectivos entre a Água e a Cobertura
\dot{q}_{cv}	Taxa de Transferência de Calor por Convecção
\dot{q}_e	Taxa de Transferência de Calor Evaporativo
\dot{q}_r	Taxa de Transferência de Calor por Radiação
ϵ	Emissividade
γ	Ângulo de Azimute de Superfície
γ_s	Ângulo de Azimute Solar
λ	Longitude
μ	Viscosidade Cinética
ω	Ângulo Horário Solar
ϕ	Latitude
ρ	Refletância
ρ_a	Densidade Parcial do Ar Atmosférico
ρ_g	Refletância da Superfície do Vidro
ρ_w	Densidade Parcial do Vapor de Água
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
τ	Transmitância
τ_b	Transmitância Direta
τ_d	Transmitância Difusa
θ_i	Ângulo de Incidência
θ_z	Ângulo de Zênite Solar
∇	Operador Gradiente
d_m	Comprimento Característico
f	Fator de Modulação

g	Aceleração da Gravidade
h_D	Coefficiente de Transferência de Massa por Evaporação
h_{bl}	Coefficiente Geral de Transferencia de Calor da Bacia para o Ambiente
$h_{cv,g}$	Coefficiente de Transferência de Calor Radiativo da Cobertura
$h_{cv,w}$	Coefficiente de Transferência de Calor Convectivos entre a Água e a Cobertura
h_{cv}	Coefficiente de Transferência de Calor Convectivo Para o Fluido Interno
h_e	Coefficiente de Transferência de Calor Evaporativo
$h_{r,g}$	Coefficiente de Transferência de Calor Radiativo da Cobertura
$h_{r,w}$	Coefficiente de Transferência de Calor Radiativo entre a Água e a Cobertura
k_T	Índice de Claridade Horário
n	Número de Mols
A	Área
C_p	Calor Específico à Pressão Constante
L	Litro
L	Calor Latente de Vaporização da Água
L	Comprimento
R	Resistência Térmica
T	Temperatura Ambiente
T_s	Temperatura Superficial
T_{sky}	Temperatura Aparente do Céu
U	Coefficiente Geral de Transferência de Calor
V	Volume
dm^3	Decímetro Cúbico

k	Condutividade Térmica
m	Metro
m ²	Metro Quadrado
m ³	Metro Cúbico
p	Pressão Atmosférica
v	Velocidade do Vento
x	Taxa de Umidade

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1	Água e Planeta Terra	4
2.1.1	Demanda e Consumo da Água Doce	5
2.1.2	Qualidade da Água	6
2.2	Dessalinização	7
2.2.1	Processos por Membrana	14
2.2.1.1	Osiose Reversa (RO)	14
2.2.1.2	Eletrodiálise (ED)	16
2.2.2	Processos Térmicos	19
2.2.2.1	Destilação Flash de Múltiplos Estágios (MSF)	19
2.2.2.2	Destilação de Múltiplos Efeitos (MED)	21
2.2.2.3	Compressão de Vapor (VC)	23
2.2.2.4	Destilação Solar (SD)	24
2.3	Custos dos Processos de Dessalinização	30
2.3.1	Processos de destilação	30
2.3.2	Processos de Membrana	30
2.4	Destilador Solar Passivo	31
2.4.1	Construção	31
2.4.1.1	Bacia	32
2.4.1.2	Cobertura	33
2.4.1.3	Isolamento Térmico	34
2.4.2	Produtividade x Custos	34
2.4.3	Vantagens e Desvantagens da Dessalinização Solar	35
2.4.4	Uso de Destiladores Solares no Semiárido Brasileiro	37
2.5	Transferência de Calor	41
2.5.1	Transferência de Calor por Condução	43
2.5.1.1	Resistência Térmica para a Condução	44
2.5.2	Transferência de Calor por Convecção	46
2.5.3	Transferência de Calor por Radiação	48
2.6	Transferência de Massa	52
2.6.1	Composição de Misturas	52
2.6.2	Transferência de Massa por Difusão	54
2.7	Composição e Propriedades Termodinâmicas do Ar Úmido . .	56
2.7.1	Composição do Ar Atmosférico	56
2.7.2	Saturação e Pressão de Vapor	57

2.7.3	Lei das Pressões Parciais de Dalton	59
2.7.4	Equações de Gases Ideais para o Ar Úmido	60
2.7.5	Densidade Parcial	61
2.7.6	Taxa de Umidade e Pressão de Vapor	61
2.8	Modelos Ambientais para o Cálculo da Radiação	62
2.8.1	Energia Solar e Radiação	63
2.8.2	Geometria Solar	67
2.8.3	Medições de Radiação Solar	75
2.8.3.1	Radiação solar no plano horizontal extraterrestre	76
2.8.3.1.1	<i>Componente da Irradiância Solar Direta Extraterrestre</i>	76
2.8.3.1.2	<i>Irradiação Solar Horária Extraterrestre</i>	76
2.8.3.1.3	<i>Irradiação Solar Diária Extraterrestre</i>	77
2.8.3.2	Radiação Solar no Plano Horizontal Terrestre	77
2.8.3.2.1	<i>Irradiância Direta e Difusa</i>	77
2.8.3.2.2	<i>Irradiação horária Direta, Difusa e Total</i>	79
2.8.3.2.3	<i>Irradiação Diária Direta e Difusa</i>	80
2.8.3.3	Radiação Solar no Plano Inclinado Terrestre	82
2.8.3.3.1	<i>Irradiação Solar Total em Superfície Inclínada</i>	83
3	METODOLOGIA	85
3.1	Modelos Ambientais para a Radiação e Modelo do Balanço de Energia para o Destilador	85
3.1.1	Modelo Térmico	85
3.1.1.1	Balanço de Energia	85
3.1.2	Equações de Taxas	87
3.1.2.1	Taxas de Transferência de Calor Externo	88
3.1.2.1.1	<i>Cobertura</i>	88
3.1.2.1.2	<i>Base e Laterais</i>	90
3.1.3	Taxas de Transferência de Calor Interno	91
3.1.3.1	Taxa de Transferência de Calor por Radiação	91
3.1.3.2	Taxa de Transferência de Calor por Convecção	92
3.1.3.3	Transferência de Calor Evaporativo	94
3.1.3.4	Fracões de Energia	98
3.1.4	Eficiência Térmica	98
4	Considerações finais	100
	Referências	101

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é detentor de uma das maiores reservas de água doce do planeta Terra. Por outro lado, devido a sua extensão, formação geológica e clima, a distribuição de água presente no seu território se dá de forma desigual. Esse desequilíbrio faz com que existam algumas regiões com pouca água, denominadas de regiões semiáridas, onde a escassez de água doce é um problema (SIQUEIRA; LANNA; CAMPOS, 2021). Dados do Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento - SNIS revelam que quase 35 milhões de brasileiros não possuem acesso a serviços de tratamento de água potável, sendo as regiões Norte e Nordeste as que têm os menores percentuais de água tratada: 60% e 75%, respectivamente (BRASIL, 2021).

No cenário mundial, cerca de um quarto da população não tem acesso à água tratada (SIQUEIRA; LANNA; CAMPOS, 2021). Além disso, de acordo com a ONU (2019), calcula-se que atualmente cerca de 2,8 bilhões de pessoas enfrentam períodos de escassez de água. Essa situação preocupante é agravada pelo rápido crescimento populacional, com previsões de que a população mundial ultrapasse 9 bilhões de pessoas até 2050, resultando em um aumento significativo na demanda por água.

O crescimento econômico, caracterizado pelo aumento do consumo de produtos e serviços, é outro fator que agrava a crise hídrica. As atividades econômicas consomem uma quantidade de água doce cada vez maior, reduzindo significativamente a disponibilidade desse recurso e colocando em risco a capacidade das pessoas de acessarem água potável suficiente para suas necessidades básicas (SCHMITZ; BITTENCOURT, 2017).

A contaminação de fontes de água é outro problema que contribui para a escassez desse recurso. Atividades industriais, agrícolas e domésticas muitas vezes resultam na poluição e contaminação dos corpos d'água, comprometendo sua qualidade e tornando-a imprópria para consumo humano. O despejo inadequado de resíduos químicos, o uso indiscriminado de fertilizantes e pesticidas, bem como a falta de sistemas adequados de tratamento de água e saneamento básico, são alguns dos principais culpados pela degradação da qualidade da água (TUNDISI, 2008).

Além do mais, o aumento da temperatura média da Terra torna-se mais uma preocupação crescente, visto que está intimamente relacionado à escassez de água. As mudanças climáticas têm levado ao aumento das temperaturas globais, resultando em alterações nos padrões de precipitação e na evaporação da água, acarretando eventos extremos como secas prolongadas e inundações (WWF, 2022). Esse problema é agravado pelo fato de muitos países não terem capacidade de armazenar água suficiente e muitas vezes não possuem recursos para investir em infraestrutura de água e saneamento que chegam a representar 30% do desperdício de água tratada (TUNDISI, 2008).

Considerando esses problemas que afetam a disponibilidade de água, Boucekima (2002) coloca os processos de dessalinização como alternativas para aumentar a oferta

de água tratada às populações. Trata-se de um processo que envolve a remoção de sais minerais, resíduos sólidos, vírus, bactérias e produtos químicos dissolvidos na água, por meio de processos físicos e químicos. Diversos métodos desenvolvidos para esse fim já são amplamente utilizados em regiões de clima árido e semiárido, onde as fontes de água disponíveis são geralmente salgadas ou salobras, como a água do mar e as águas subterrâneas.

Historicamente, a dessalinização é um conceito e uma tecnologia que tem sido praticada desde tempos antigos. Existem registros de seu uso na era megalítica, por volta de 6000 a.C., quando períodos de clima quente no Mediterrâneo impulsionaram avanços na gestão dos recursos hídricos. Durante a Idade do Bronze, por volta de 1300 a.C., a dessalinização foi provavelmente implementada pelos marinheiros minoicos, que navegavam pelo Mar Mediterrâneo. Acredita-se que eles ferviam a água do mar para separar a água do sal e utilizá-la em suas atividades marítimas. Essas técnicas foram posteriormente disseminadas para outras civilizações, incluindo as civilizações gregas (ANGELAKIS *et al.*, 2021).

Na Grécia, os filósofos gregos expressaram opiniões filosóficas sobre a natureza da água, buscando compreender sua importância e papel fundamental na existência. Uma teoria conhecida como *Teoria dos Quatro Elementos* foi introduzida por Empédocles (cerca de 490-430 a.C.), que descreveu o mundo como sendo composto por quatro elementos fundamentais: terra, água, ar e fogo. Tales de Mileto, um filósofo que viveu entre aproximadamente 624-548 a.C., mencionou que a água do mar consistia em um imenso oceano que envolvia todo o planeta, considerando-a como o elemento principal da vida existente na Terra (DELYANNIS, 2003a).

Entretanto, foi somente no final dos tempos arcaicos, em Mileto (em torno de 500 a.C.), que os filósofos jônicos identificaram que toda a água doce do planeta podia ser reutilizada. Paralelo a isso, no período dos Reinos Combatentes na China (cerca de 475-221 a.C.), uma obra literária chamada *Clássico das Montanhas e dos Mares* cuja função era registrar conhecimentos geográficos, culturais e folclóricos da época, documentou que esteiras de bambu usadas para cozinhar arroz poderiam formar uma fina camada externa com funções de absorção e troca iônica capaz de remover o sal da água. Contudo, foi Aristóteles (384-322 a.C.) aquele quem melhor descreveu o processo de dessalinização da água baseado no ciclo natural da água em nosso planeta. Segundo Aristóteles *A água salgada quando se transforma em vapor torna-se doce, e o vapor não forma água salgada quando se condensa novamente* (ANGELAKIS *et al.*, 2021; DELYANNIS, 2003b).

Apesar desse conceito ser conhecido desde os tempos de Aristóteles, até a segunda metade do século XVIII, a produção de água potável por meio da dessalinização era realizada em grande parte por navegadores que dessalinizavam a água do mar por meio de processos térmicos como a fervura. Foi apenas no século XIX, devido à necessidade de água doce, mais precisamente durante a Segunda Guerra, que ocorreu um impulso

significativo no desenvolvimento de outras tecnologias de dessalinização. Isso se deu por meio do aprimoramento e do desenvolvimento de novos processos químicos e mecânicos, visando tornar a dessalinização mais eficiente (DELYANNIS, 2003a).

Devido a esse evento histórico, hoje existem vários sistemas de dessalinização disponíveis no mercado, os quais são geralmente separados entre processos térmicos e processos por membranas. Entre os processos térmicos, destacam-se a Destilação de Múltiplos Efeitos (MED¹), a Destilação Flash de Múltiplos Estágios (MSF²), a Compressão de Vapor (VC³) e a Destilação Solar (SD⁴) que utilizam o princípio da mudança de fase da água para separá-la de seus contaminantes. Entre os processos por membranas, destacam-se a dessalinização por Osmose Reversa (RO⁵) e a Eletrodialise (ED⁶), que utilizam o princípio da filtração para separar os rejeitos da água (BOUCHEKIMA, 2002; THIMMARAJU *et al.*, 2018; SIQUEIRA; LANNA; CAMPOS, 2021).

Segundo dados da Associação Internacional de Dessalinização (IDA), cerca de 28 milhões de m³ de água dessalinizada dos oceanos e mares regionais são produzidos diariamente por meios dessas tecnologias em todo o mundo. Segundo estimativas, até o final de 2015, existiam cerca de 18 mil instalações de dessalinização ao redor do mundo, sendo que 44% delas estavam localizadas no Norte da África e no Oriente Médio com uma capacidade de cerca de 12,1 milhões de m³ por dia, as quais usavam predominantemente processos térmicos para a dessalinização (ANGELAKIS *et al.*, 2021).

Atualmente, em resposta à crescente demanda por água e o esgotamento das fontes naturais, torna-se cada vez mais necessário desenvolver soluções eficientes e sustentáveis, capazes de suprir essa demanda sem gerar danos ao meio ambiente. Nesse contexto, entre as técnicas citadas anteriormente, a dessalinização por destilação solar se destaca como uma alternativa promissora, oferecendo uma abordagem economicamente viável e ambientalmente amigável para o fornecimento de água potável (AZEVEDO *et al.*, 2020).

Considerando o exposto, este trabalho tem como foco principal investigar os processos físicos envolvidos na dessalinização solar, visando avaliar seu comportamento termodinâmico. Além disso, busca-se analisar a viabilidade e eficiência da dessalinização solar como uma solução sustentável e de baixo custo para suprir as demandas de água potável em pequenas comunidades. Ao estudar esses aspectos, pretende-se contribuir para a difusão de tecnologias que possam promover a segurança hídrica e o desenvolvimento sustentável, enfrentando os desafios relacionados à disponibilidade de água no presente e no futuro.

¹ Sigla para *Multi-Effect Distillation*.

² Sigla para *Multi-Stage Flash Distillation*.

³ Sigla para *Vapor Compression*.

⁴ Sigla para *Solar Distillation*.

⁵ Sigla para *Reverse Osmosis*.

⁶ Sigla para *Electrodialysis*.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Água e Planeta Terra

A água é um recurso natural essencial para a vida na Terra. Ela está presente em todos os seres vivos, desde as plantas até os animais, participando de diversos processos biológicos, como a fotossíntese, a respiração e o metabolismo. Embora a ela cubra cerca de 70% da superfície da Terra, a maior parte é composta por água salgada dos oceanos. Apenas uma pequena fração, cerca de 2,5% é água doce, sendo a maior parte dela armazenada em geleiras e calotas polares. Desse total cerca de 0,77% apenas está disponível para consumo humano em rios, lagos, aquíferos, na umidade do solo, atmosfera e na biota. Essa disponibilidade limitada de água doce torna-a um recurso valioso e, muitas vezes, escasso em diversas regiões do mundo (GRASSI, 2001).

Ela tem uma enorme importância em diferentes aspectos da vida humana. O corpo humano, por exemplo, é composto principalmente por água, representando aproximadamente 60% do peso corporal de um adulto. Nele a água exerce papel fundamental no transporte de nutriente para as células, eliminação de resíduos não digeridos pelo corpo, proteção de órgãos e permite o metabolismo celular. Por esses motivos, consumir a quantidade de água adequada é essencial para a sobrevivência e o bem-estar dos seres humanos. De acordo com o Institute of Medicine (IOM), para adultos, é recomendada uma ingestão diária total de 3,7 litros de líquidos para homens e 2,7 litros para mulheres (AZEVEDO; PEREIRA; PAIVA, 2016).

A água também desempenha diversas funções ecológicas indispensáveis para a vida no planeta. Entre elas, destacam-se a regulação do clima, a purificação da água, a ciclagem de nutrientes e o controle do equilíbrio ecológico (PRADO *et al.*, 2018). Em relação ao clima, por exemplo, os diversos corpos d'água absorvem dióxido de carbono da atmosfera e o transformam em carbono orgânico através da fotossíntese de organismos fotossintetizantes, que pode ser armazenado no fundo de lagos, rios, estuários e mares ou consumido por outros organismos, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. Dentre esses organismos destaca-se o fitoplâncton, responsável por cerca de 50% da produção global de oxigênio e absorve até 30% do dióxido de carbono emitido pelo homem (MOTTA, 2008).

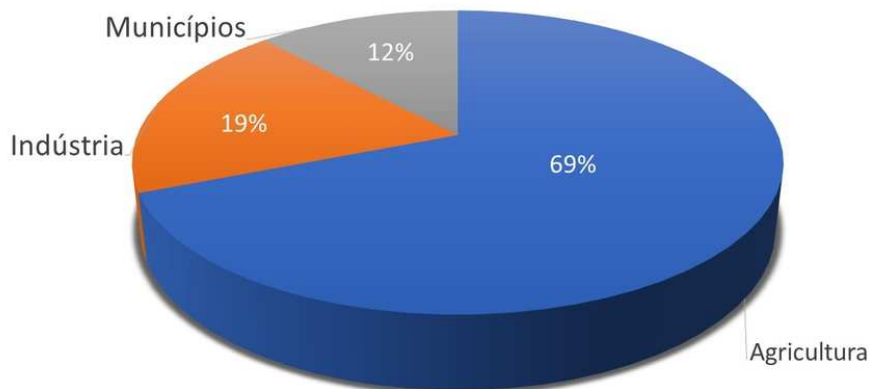
Além de sua importância biológica e ecológica, a água também é fundamental para o desenvolvimento econômico e social da humanidade. Ela é utilizada em diversos setores, como a agricultura, a indústria, a geração de energia, o transporte, o lazer e a saúde (SCHULER; LIMA; CRUZ, 2018).

2.1.1 Demanda e Consumo da Água Doce

O consumo de água doce tem apresentado um aumento significativo ao longo do último século, chegando a ser seis vezes maior do que no passado. Essa tendência de aumento é impulsionada pelo crescimento populacional, desenvolvimento econômico e mudanças nos padrões de consumo. Segundo dados do relatório mundial das Nações Unidas sobre desenvolvimento dos recursos hídricos (2021), o uso global de água doce continua a crescer a uma taxa aproximada de 1% ao ano desde a década de 1980. Essa projeção indica um aumento no consumo de quase 25% até o ano de 2030 (KONCAGÜL; TRAN; CONNOR, 2021).

Conforme o Gráfico 1, a agricultura é responsável por uma parcela significativa das retiradas de água doce em escala mundial, correspondendo a aproximadamente 69% do total. A maior parte dessa água é utilizada para a irrigação de culturas, cerca de 40%, mas também engloba o fornecimento de água para rebanhos bovinos e aquicultura. Vale ressaltar que em alguns países em desenvolvimento, essa proporção pode chegar a até 95% (EMBRAPA, 2019; KONCAGÜL; TRAN; CONNOR, 2021).

Gráfico 1 – Consumo de água doce mundial.



Fonte: Koncagül, Tran e Connor (2021).

A indústria, por sua vez, incluindo o setor energético, representa cerca de 19% do consumo de água doce. Esse setor engloba atividades industriais que requerem água em seus processos produtivos, bem como a geração de energia que envolve o uso de recursos hídricos. Por outro lado, os municípios respondem pelos outros 12% restantes, utilizados para atender às necessidades de abastecimento urbano, saneamento e outras demandas municipais. (KONCAGÜL; TRAN; CONNOR, 2021).

2.1.2 Qualidade da Água

Discutir a qualidade da água é um tema tão importante quanto a sua disponibilidade. Ao longo dos últimos 50 anos, tem-se observado um aumento significativo na deterioração da qualidade da água em todo o planeta. Esse problema está diretamente ligado ao aumento da poluição devido o crescimento da urbanização e da industrialização, principalmente após a Segunda Guerra Mundial (GRASSI, 2001).

A poluição da água é causada sobretudo por atividades humanas, as quais geram poluentes que chegam tanto às águas superficiais quanto às subterrâneas. Diversos poluentes, como dejetos humanos e animais, lixo, substâncias tóxicas provenientes de atividades agrícolas e industriais, bem como as práticas intensivas de cultivo associadas à Revolução Verde, que fazem o uso excessivo de produtos químicos, biotecnologia, mecanização, irrigação, monocultura e concentração de terras, têm um impacto significativo na qualidade da água destinada ao consumo humano (SODRÉ, 2012).

Estima-se que aproximadamente 80% de todas as águas residuais provenientes de atividades industriais e municipais sejam lançadas no meio ambiente sem passar por qualquer forma de tratamento. Esse cenário acarreta efeitos prejudiciais tanto para a saúde humana quanto para os ecossistemas. Como resultado, uma parcela significativa da população sofre com infecções causadas por organismos patogênicos. Anualmente, são registrados cerca de 250 milhões de casos de doenças transmitidas através da água (KONCAGÜL; TRAN; CONNOR, 2021).

Esses patógenos, tais como as bactérias, vírus e parasitas, são encontrados principalmente em fezes humanas e de animais. Eles têm a capacidade de se proliferar no ambiente, afetando indivíduos que entram em contato com a água. Atualmente, é amplamente reconhecido que a água é um dos principais meios de transmissão de doenças. Doenças como cólera e tifo, transmitidas pela água, causaram milhões de mortes no passado e continuam sendo uma das principais causas de doenças, especialmente em países subdesenvolvidos (GRASSI, 2001).

Além de microorganismos, esses esgotos também são responsáveis pelo despejo exacerbado de matéria orgânica nos sistemas aquáticos. Conforme explicado por Grassi (2001), quando essas substâncias orgânicas alcançam os corpos d'água, as bactérias iniciam o processo de decomposição, consumindo o oxigênio presente durante esse processo. Segundo o autor, o acúmulo de nutrientes como nitrogênio e fósforo promove o crescimento descontrolado de algas, que, por sua vez, consomem o restante do oxigênio disponível na água. Isso ocasiona a morte de animais e a multiplicação de organismos anaeróbicos. Conseqüentemente, forma-se uma água com odor desagradável, imprópria para o consumo humano e altamente tóxica para o ambiente.

Já Augusto *et al.* (2012) chamam a atenção para a degradação da qualidade da água decorrente das mudanças climáticas. Eles explicam que os problemas resultantes

dessas mudanças, juntamente com o desmatamento e a desertificação em regiões áridas, semiáridas e sub-úmidas secas, intensificam ainda mais esse problema. Isso ocorre porque as mudanças climáticas interrompem os padrões climáticos, provocando eventos extremos como secas severas e inundações que afetam a disponibilidade desse recurso, aumentando a escassez ou contaminando a água já disponível. Segundo os autores, estima-se que entre 2001 e 2018, 78% destes tipos de desastres naturais tiveram consequências imediatas na disponibilidade de água.

Outro fator importante é o aumento da temperatura média do planeta, que resulta no derretimento do gelo nos polos terrestres, levando ao aumento do nível do mar. Esse processo tem como consequências direta a diminuição das espécies de animais que vivem nesses locais e a salinização da água doce em regiões costeiras, invadidas pelo mar ao longo dos anos, afetando milhares de pessoas que dependem desses recursos (UNICEF, 2022).

Atrelado a tudo isso, a superexploração dos aquíferos subterrâneos vem se intensificando cada vez mais, comprometendo sua capacidade de recarga por longos períodos. Essa falta de sustentabilidade acarreta outras adversidades, como a contaminação e salinização das águas subterrâneas provenientes de aquíferos superficiais degradados, a drenagem de rios próximos e o afundamento do solo (AUGUSTO *et al.*, 2012).

Nesse contexto, torna-se importante disseminar tecnologias voltadas para o tratamento e reabilitação de águas prejudicadas ou salinas, com o objetivo de aumentar a disponibilidade de água para suprir as necessidades humanas. No entanto, para concretizar esse propósito, torna-se essencial compreender as propriedades químico-físicas da água, a fim de prever seu comportamento termodinâmico. Portanto, nas seções seguintes, analisaremos as variáveis e os processos físicos pertinentes para alcançar os objetivos estabelecidos nesta pesquisa. As próximas seções abordarão o conceito de calor e os mecanismos de transferência de calor que estabelecerão as equações fundamentais para calcular as trocas térmicas na destilação solar, também servindo como base para avaliar os processos de transferências de massa.

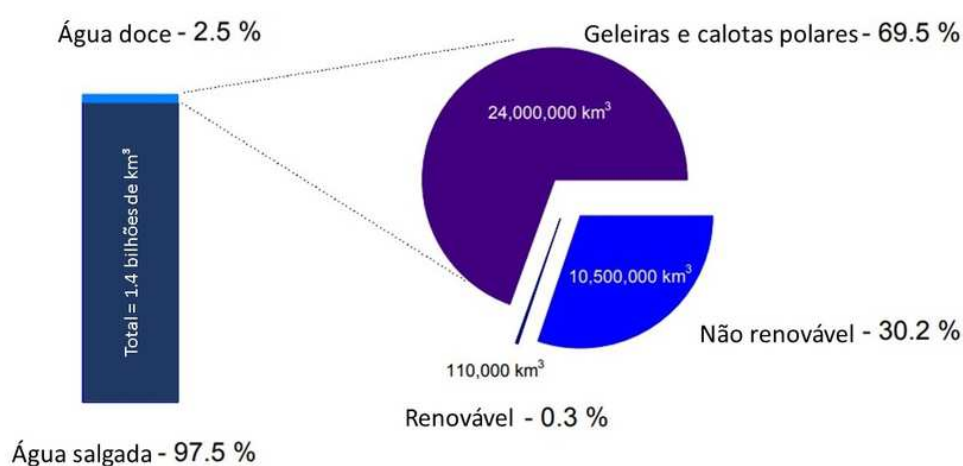
2.2 Dessalinização

A dessalinização da água consiste no processo de remover o excesso de sais minerais dissolvidos, principalmente o cloreto de sódio (NaCl), além de outros contaminantes a fim de torná-la potável (LIMA *et al.*, 2016). Esse processo envolve a separação dos rejeitos da água através de métodos como a osmose reversa, a destilação ou a eletrodialise, permitindo obter água de qualidade adequada para consumo humano ou outros usos. A dessalinização é uma solução importante para enfrentar a escassez de água potável em regiões onde as fontes de água doce são limitadas, contribuindo para suprir a demanda crescente por recursos hídricos seguros e de qualidade (BANCO MUNDIAL, 2019).

Uma das principais fontes de água para a dessalinização é a água do mar. De acordo

com Grassi (2001) cerca de 97,5% da água do planeta é salgada, portanto, inutilizável para a maioria das necessidades humanas sem que haja algum tratamento. De acordo com a Figura 2 esse percentual representa cerca de 14 bilhões de km^3 de água salgada localizada em mares e oceanos. Dentre os 2,5% de água doce, pouco menos de 70%, cerca de 24 milhões de km^3 de água, estão localizadas nas geleiras e calotas polares, portanto inacessíveis para consumo. Outros 30,2% então armazenadas no subsolo, aproximadamente 10,5 milhões de km^3 de água, sendo consideradas fontes não renováveis (MILLER, 2003).

Gráfico 2 – Distribuição da água no mundo.



Fonte: Adaptado de Miller (2003).

De acordo com Miller (2003) apenas 0,3% da água doce disponível em nosso planeta é proveniente de fontes naturalmente renováveis, como a água da chuva que garante a precipitação de cerca de 110.000 km^3 por ano de água doce sobre a Terra, distribuídas entre as diversas regiões do planeta.

Embora a maior parte da água no planeta seja salgada, ela não é necessariamente indisponível para uso humano. Diversas técnicas de tratamento podem ser utilizadas em águas brutas de diferentes qualidades, não se limitando apenas à água do mar. Água salobra, água de rios, águas residuais e até mesmo água potável fornecida pelos municípios podem ser tratadas por meio da dessalinização. Essas águas se diferenciam umas das outras com base na quantidade de Sólidos Totais Dissolvidos (TDS) presentes em cada categoria conforme os limites apresentados na Tabela 1 (EL-NASHAR, 2018).

Tabela 1 – Classificação da água de acordo com a quantidade de sólidos dissolvidos por litro de água.

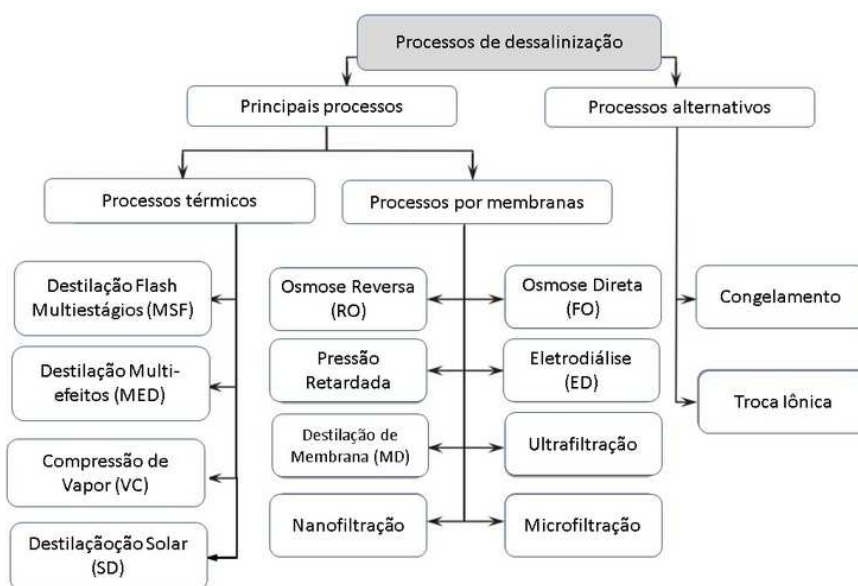
Tipo de água	TDS
Água do mar	15.000-50.000 mg/L
Água salobra	1.500-15.000 mg/L
Água do rio	500-3.000 mg/L
Água pura	menos de 500 mg/L
Águas residuais (domésticas não tratadas)	250-1000mg/L
Águas residuais (domésticas tratadas)	500-700 mg/L

Fonte: El-Nashar (2018).

Existem dois tipos principais de dessalinização: os que usam membranas e os que usam calor. A diferença entre eles está na mudança de estado da água. Nos processos térmicos, a água evapora e se separa dos rejeitos. Nos processos por membrana, a água passa por filtros e não muda de estado. Cada um desses métodos apresenta vantagens e desvantagens específicas, permitindo uma seleção adequada de acordo com os requisitos e as condições locais (BOUCHEKIMA, 2002).

Conforme apontado por Alsadaie *et al.* (2017), dentre os processos térmicos de escala industrial, o mais antigo e mais utilizado atualmente é a Destilação Flash de Múltiplos Estágios (MSF). Já entre os processos de membrana, a Osmose Reversa (RO) é o processo mais difundido atualmente, devido à sua eficiência e custo reduzido. Além desses métodos convencionais de dessalinização, existem também processos alternativos menos comuns. Entre esses processos alternativos estão o Congelamento, que utiliza o congelamento da água para separar os sais, e a Troca Iônica, que envolve a remoção de íons indesejados da água por meio de resinas de troca iônica.

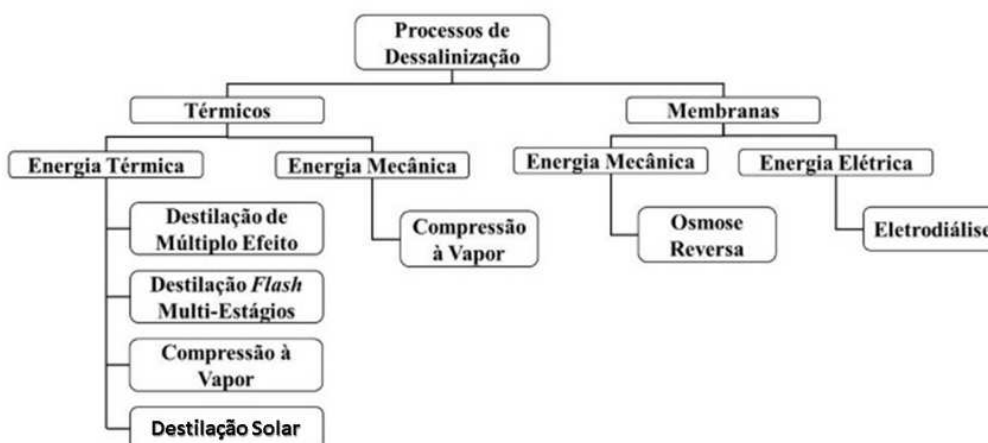
Figura 1 – Classificação dos processos de dessalinização.



Fonte: Adaptado de Alsadaie *et al.* (2017).

Além de serem classificados em relação à formação de fase, como na Figura 1, os processos de dessalinização também possuem uma classificação em relação à fonte de energia usada pelo processo. Em relação à energia requerida pelo processo, esta pode ser oriunda de fonte térmica, mecânica ou elétrica, conforme ilustrado na Figura 2 (SIQUEIRA; MARTINS; VIANA, 2022).

Figura 2 – Classificação de processos de dessalinização em relação à energia.



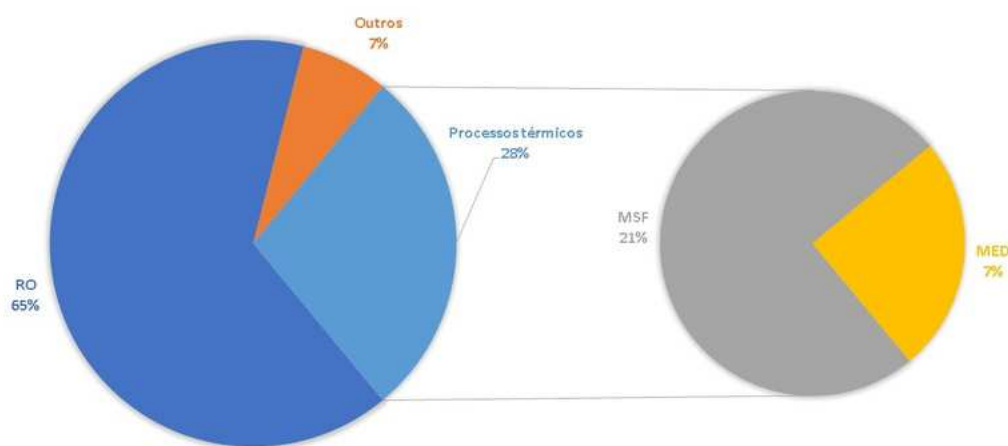
Fonte: Adaptado de Siqueira, Martins e Viana (2022).

Dados recentes mostraram que as usinas de dessalinização em operação pelo mundo produzem pouco mais de 100 milhões de metros cúbicos de água potável diariamente.

Sendo que a maioria dessas usinas utilizam tecnologias como a Osmose Reversa (RO), a Destilação Flash Multi-estágios (MSF) e a Destilação de Multi-efeitos (MED) para realizar o processo de dessalinização (TOTH, 2020; AL-AMSHAWEE *et al.*, 2020).

Percentualmente, a RO chega a representar cerca de 65% do total das plantas de dessalinização em operação no mundo. Já as plantas de dessalinização térmica representam cerca de 28% da capacidade total instalada, sendo que 21% usam o processo MSF e 7% usam o processo MED, conforme disposto no Gráfico 3.

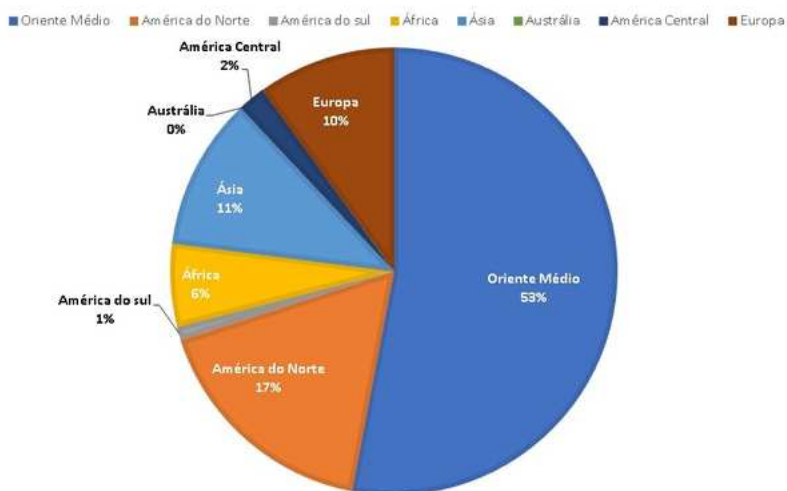
Gráfico 3 – Distribuição percentual das tecnologias de dessalinização.



Fonte: Adaptado de Toth (2020).

A dessalinização através dessas tecnologias tem sido substancial em países de alta renda, como Arábia Saudita, Emirados Árabes Unidos e Kuwait, que dependem fortemente da dessalinização para suprir suas necessidades de água potável (JONES *et al.*, 2019). Em contraste, muitos outros vem adotando a dessalinização como um dos métodos de diversificação de alternativas de abastecimento água como resposta aos novos desafios de flutuações climáticas. O Gráfico 4 ilustra a distribuição das usinas de dessalinização de acordo com sua localização geográfica na última década.

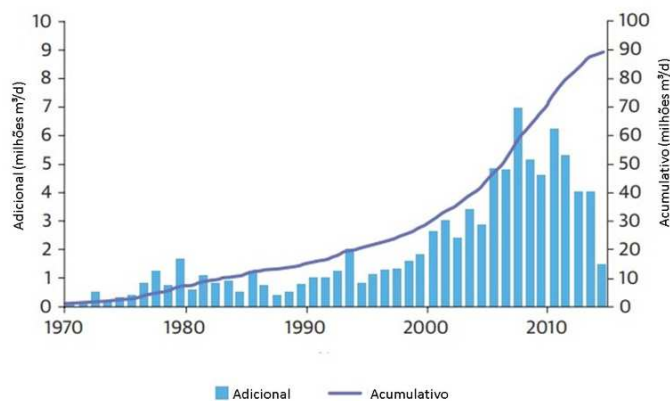
Gráfico 4 – Distribuição mundial de usinas de dessalinização por área geográfica.



Fonte: Adaptado de Zotalis *et al.* (2014).

Segundo Zotalis *et al.* (2014), a crescente demanda por água potável impulsiona cada vez mais o crescimento do mercado global de dessalinização. O autor argumenta ainda que esse aumento na demanda é principalmente atribuído ao uso doméstico, resultado do crescimento populacional. Dados do BANCO MUNDIAL (2019), ilustrados na Figura 5, refletem o resultado disso sobre o acréscimo e o efeito acumulativo das capacidades instaladas anualmente em todo o mundo desde 1970 até 2014.

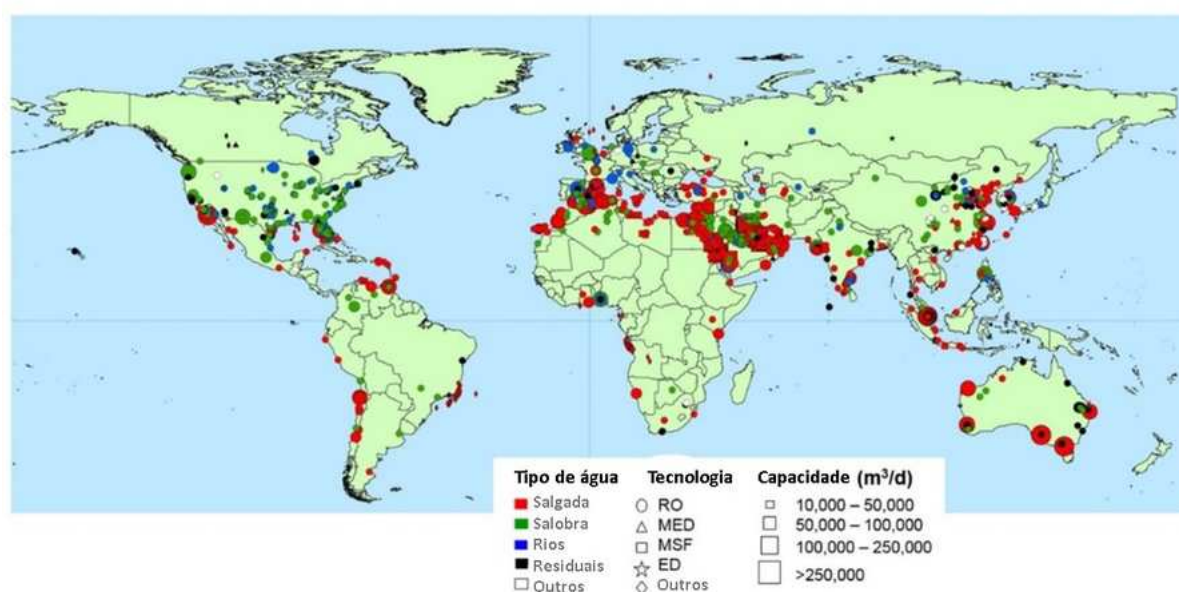
Gráfico 5 – Capacidade global anual e cumulativa de dessalinização, 1970-2014.



Fonte: Adaptado de BANCO MUNDIAL (2019).

Esse aumento de capacidade se deve principalmente a países do Oriente Médio, que atualmente detêm cerca de 44% da capacidade global instalada. É importante destacar que a dessalinização é uma tecnologia cara e que exige grandes investimentos em infraestrutura e tecnologia. Entretanto, os benefícios da dessalinização, como a garantia do abastecimento de água potável em regiões áridas e a redução da pressão sobre os recursos hídricos naturais, têm levado cada vez mais países a investir nessa tecnologia (ANGELAKIS *et al.*, 2021; TIWARI; SINGH; TRIPATHI, 2003).

Figura 3 – Mapa das usinas de dessalinização em todo o mundo, por tamanho e tecnologia.



Fonte: Adaptado de Curto, Franzitta e Guercio (2021).

O mapa da Figura 3 apresenta a distribuição geográfica das usinas de dessalinização ao redor do mundo, categorizadas conforme o tipo de tecnologia, a salinidade da água de alimentação e a capacidade instalada. Estas usinas são predominantemente concentradas no Oriente Médio, uma região caracterizada pela escassez de água doce e uma demanda considerável. As usinas, representadas no mapa por meio das cores vermelha, verde, azul e preta, fazem uso de diferentes fontes de água e tecnologias. A cor vermelha indica a utilização de água salgada do mar, a cor verde denota o aproveitamento de água salobra, encontrada em estuários e aquíferos. Por sua vez, a cor azul aponta para o uso de água de rios, e, por fim, a cor preta destaca o emprego de águas residuais.

2.2.1 Processos por Membrana

2.2.1.1 Osmose Reversa (RO)

A osmose reversa é uma tecnologia de membrana que permite a remoção de impurezas e sais da água por meio de um processo de filtração por pressão. Essa tecnologia tem sido amplamente utilizada na dessalinização de água do mar, tratamento de água para consumo humano e industrial, além de outras aplicações (CURTO; FRANZITTA; GUERCIO, 2021).

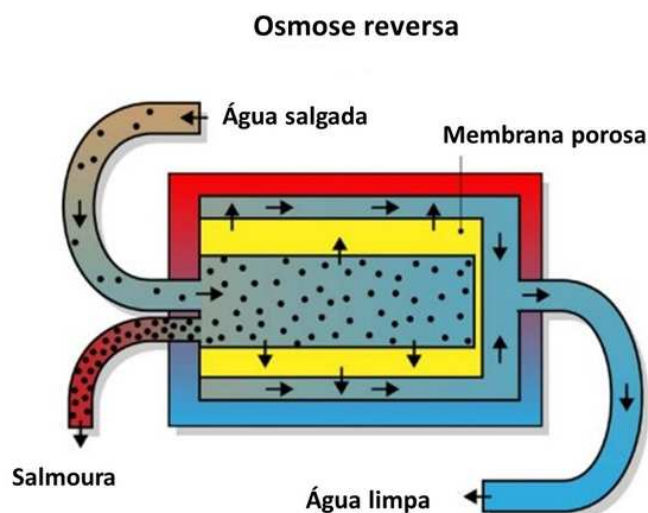
A tecnologia de osmose reversa surgiu a partir dos estudos sobre a osmose, um processo natural que ocorre quando soluções de diferentes concentrações são separadas por uma membrana semipermeável (THIMMARAJU *et al.*, 2018). A história dessa tecnologia começa no ano de 1854, quando o físico britânico Thomas Graham descobriu o processo e criou o termo “osmose” para descrevê-lo (BRITANNICA, 2022).

No entanto, a tecnologia de osmose reversa só começou a ser desenvolvida na década de 1950, quando cientistas e engenheiros começaram a explorar a possibilidade de utilizar membranas semipermeáveis para remover sais e outras impurezas da água. Os primeiros experimentos com membranas semipermeáveis foram realizados por Sidney Loeb e Srinivasa Sourirajan na Universidade da Califórnia em Los Angeles (UCLA) em 1959 (SILVA, 2013; DELYANNIS; BELESSIOTIS, 2010).

Loeb e Sourirajan criaram uma membrana fina e porosa, composta por um polímero sintético, capaz de filtrar água salgada e remover a maioria dos sais e impurezas. Essa membrana, conhecida como membrana de osmose inversa, foi patenteada em 1961 e rapidamente se tornou uma tecnologia importante na dessalinização de água do mar (PETROCHEM, 2023).

A osmose reversa ocorre quando uma solução salina é submetida a uma pressão maior do que a pressão osmótica, forçando a água a passar por uma membrana semipermeável e deixando para trás os sais e impurezas, daí o termo osmose reversa. Esse processo é representado na Figura 4, a qual ilustra o funcionamento de uma membrana de osmose reversa.

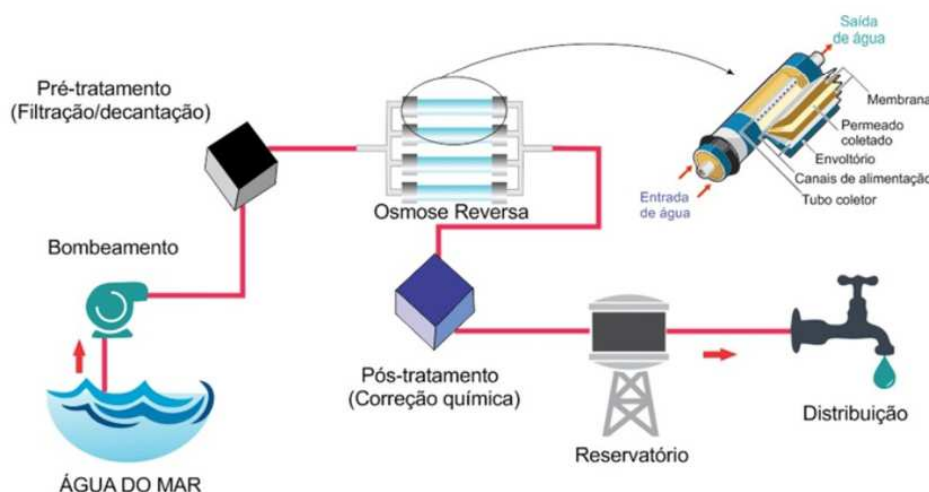
Figura 4 – Diagrama de um processo de dessalinização por osmose reversa.



Fonte: Adaptado de Al-Karaghoul, Renne e Kazmerski (2009).

Em uma usina de osmose reversa, como a da Figura 6, o processo de dessalinização é realizado em etapas, começando com a pré-filtração para remover partículas maiores e impurezas. Em seguida, a água passa pela membrana semipermeável, onde ocorre a remoção das impurezas com até 0,1 nanômetros de tamanho. Após isso, a salmoura retorna ao pré-tratamento ou é descartada, enquanto a água limpa é encaminhada ao reservatório para posterior distribuição (SILVA; QUIRINO, 2020).

Figura 5 – Configuração básica de uma usina de Osmose Reversa.



Fonte: SILVA e QUIRINO (2020).

A eficiência da osmose reversa depende de vários fatores, incluindo a qualidade da água de alimentação, a pressão e temperatura de operação, o tipo e qualidade da membrana utilizada e o sistema de pré-tratamento. De acordo com Lim *et al.* (2021), a osmose reversa pode remover até 99% dos sais dissolvidos na água, tornando-a própria para consumo humano e outras aplicações.

Figura 6 – Usina de dessalinização RO em Ras al-Khair Arábia Saudita com produção estimada de 1 bilhão de litros por dia.



Fonte: Belton (2015).

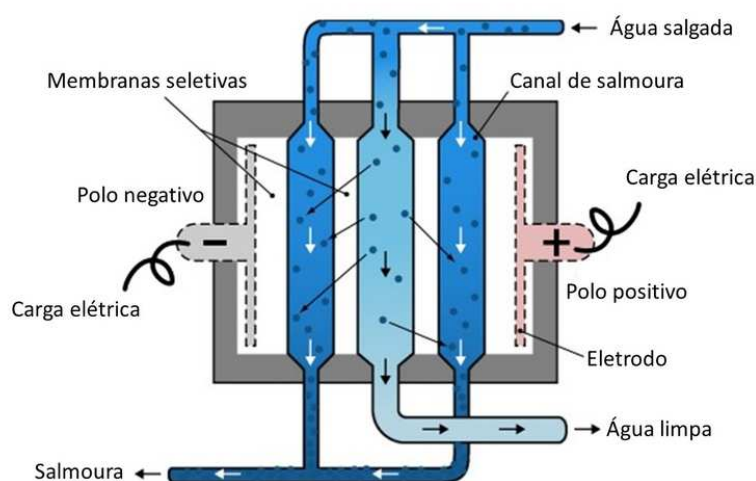
2.2.1.2 Eletrodiálise (ED)

A eletrodiálise é uma tecnologia utilizada para a dessalinização da água, que consiste na aplicação de uma corrente elétrica em soluções salinas para separar os íons por meio de membranas seletivas (AMORIM *et al.*, 2005). Esta técnica tem se mostrado uma alternativa promissora para o tratamento de água salobra ou água do mar, que pode ser utilizada para consumo humano e em processos industriais (ALVES, 2017).

Al-Amshawee *et al.* (2020) relatam que o princípio de dessalinização utilizando a eletrodiálise foi defendido pela primeira vez em 1890. No entanto, o processo de eletrodiálise só foi desenvolvido na década de 1950 pela empresa estadunidense Ionics. Essa empresa patenteou um equipamento para remover os sais da água por meio de membranas de troca iônica também desenvolvidas por ela, tecnologia essa que passou a ser usada para o tratamento de água (BUSINESS, 2023). A empresa Ionics foi responsável pela construção da primeira planta comercial de eletrodiálise, erguida em 1962 na cidade de Webster em Dakota do Sul, EUA, com capacidade de produzir 950 m³/dia. Desde então, a tecnologia de eletrodiálise tem evoluído continuamente, tornando-se cada vez mais eficiente e econômica. Atualmente, a eletrodiálise é um dos principais métodos de dessalinização, sendo amplamente utilizada em países com escassez de água potável (DELYANNIS; BELESSIOTIS, 2010).

Nesse processo, é aplicado um potencial elétrico para forçar a passagem de íons através dessas membranas seletivas, conforme representado na Figura 7. Os componentes de um unidade de eletrodialise incluem um sistema de pré-tratamento, uma pilha de membranas seletivas, uma bomba de circulação de baixa pressão, uma fonte de alimentação de corrente contínua (retificador ou sistema fotovoltaico) e um sistema de pós-tratamento (GURRERI *et al.*, 2020).

Figura 7 – Diagrama esquemático de uma unidade ED.



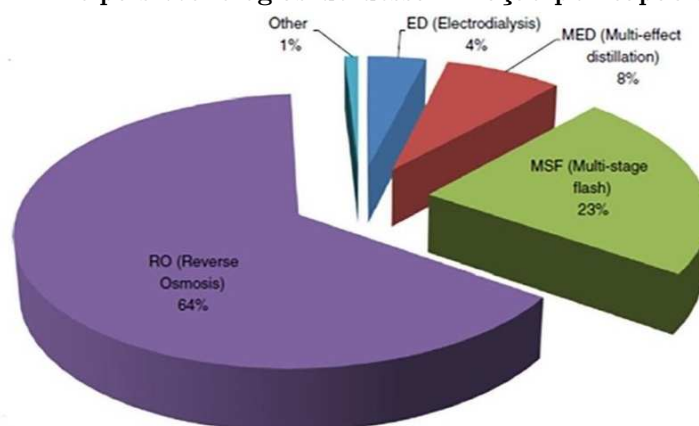
Fonte: Al-Karaghoul e Kazmerski (2013).

O princípio de operação da ED envolve a conexão de eletrodos (geralmente feitos de nióbio ou titânio revestidos com platina) a uma fonte externa de corrente contínua em um recipiente contendo água salgada e membranas seletivas de íons postas em paralelo de modo que formem canais para a passagem de água.

A medida que a água salobra flui entre esses canais e a eletricidade carrega os eletrodos, íons positivos são atraídos para o polo negativo e passam através de membranas seletivas de cátions, enquanto íons negativos são atraídos para o polo positivo e atravessam membranas seletivas de ânions, criando canais alternados, isto é, canais para drenar a salmoura e canais centrais para a captação de água limpa. O resultado é uma redução de até 92% na salinidade (ALVES, 2017; AL-KARAGHOULI; KAZMERSKI, 2013).

Segundo Al-Amshawee *et al.* (2020) após os anos 2000 a eletrodialise juntamente com a RO, passaram a compor cerca de 70% das usinas de dessalinização existentes. De acordo com os autores, dados de 2016 mostraram que as usinas de dessalinização tinham capacidade para produzir aproximadamente 100 milhões de metros cúbicos por dia, com a ED representando cerca de 4% desse total, conforme disposto no Gráfico 6.

Gráfico 6 – Principais tecnologias de dessalinização por capacidade em 2016.



Fonte: Al-Amshawee *et al.* (2020).

Os principais países que utilizam essa tecnologia para dessalinização são Estados Unidos, França e Japão. Além de sua aplicação na dessalinização, a eletrodialise também é utilizada em processos industriais, como a purificação de produtos químicos, a recuperação de metais em soluções salinas e produção de água ultrapura, utilizando equipamentos semelhantes ao da Figura 8, desenvolvido pela Ionics (AMORIM *et al.*, 2005).

Figura 8 – Primeira planta comercial de eletrodialise foi construída em 1962 pela empresa Ionics, em Webster, Dakota do Sul, EUA .

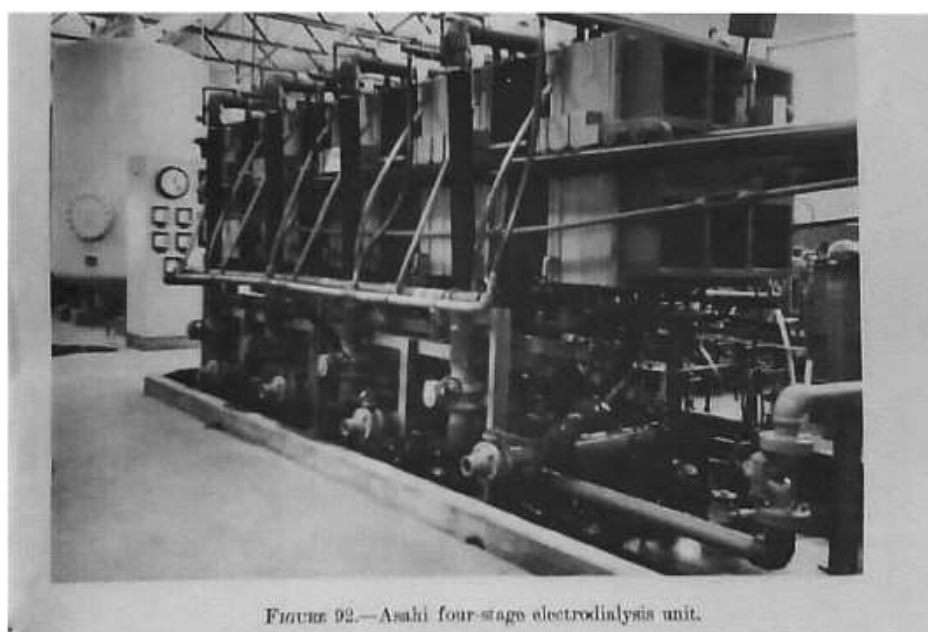


FIGURE 92.—Asahi four-stage electrodiagnosis unit.

Fonte: Delyannis e Belessiotis (2010).

Após seu desenvolvimento em 1950 a tecnologia tem evoluído e se tornado cada vez mais eficiente, tornando-se uma das alternativas para abastecimento em países com

escassez de água potável. Com a crescente demanda por água potável em todo o mundo, é provável que a eletrodialise continue a ser uma tecnologia importante para o tratamento de água (CHEN *et al.*, 2008).

2.2.2 Processos Térmicos

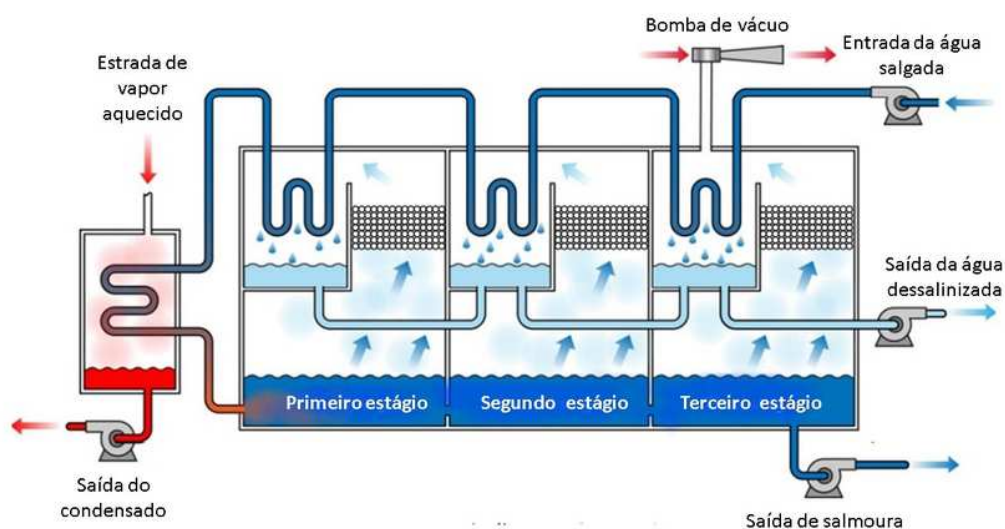
2.2.2.1 Destilação Flash de Múltiplos Estágios (MSF)

A dessalinização pelo processo MSF remove o sal da água do mar por meio da evaporação e condensação em vários estágios. Nesse processo, a água do mar é aquecida em um evaporador, formando vapor que é resfriado em uma série de condensadores, resultando em água doce. A dessalinização MSF é uma tecnologia comum e eficaz para produzir água potável em regiões costeiras onde a água doce é escassa, mas exige alto consumo de energia e é relativamente cara em comparação com outros métodos de dessalinização (AL-KARAGHOULI; KAZMERSKI, 2013).

A história da dessalinização MSF para produção comercial ocorreu no Golfo Pérsico no final dos anos cinquenta. Até o início dos anos 90 as plantas de MSF com produção maior que 4.000 m³/dia produziam mais de 7 milhões de m³/dia de água dessalinizada, dos quais 80% estavam localizadas no Golfo Pérsico (EL-SAIE, 1993). Morris (1993) afirma que processo de destilação MSF foi desenvolvido pelo Professor R.S. Silver em 1957 e as primeiras plantas foram construídas em 1960.

Desde então, a MSF tornou-se uma das técnicas mais avançadas e eficientes de dessalinização, com aplicações em todo o mundo. Toth (2020) destaca a evolução contínua da MSF, com a incorporação de tecnologias avançadas de otimização de energia e modelagem de processos para melhorar a eficiência e a eficácia da técnica. Atualmente, as unidades de dessalinização que usam o processo MSF tem uma produção de água destilada que variam de 10.000 a 35.000 m³ /dia e consistem em uma série de estágios que podem ser de 4 a 40, como a da Figura 10 (AL-KARAGHOULI; KAZMERSKI, 2013).

Figura 9 – Diagrama esquemático de uma unidade MSF.



Fonte: Adaptado de Al-Karaghoul e Kazmerski (2013).

A Figura 9 apresenta um diagrama esquemático que ilustra o processo de funcionamento de uma unidade MSF. Nela cada estágio possui uma câmara flash, onde a água do mar ferve devido à baixa pressão provocada pelas bombas de vácuo. A pressão da água salgada é reduzida gradualmente ao longo dos estágios, fazendo com que ela evapore mais à medida que a temperatura diminui. Dessa forma, o processo MSF produz água destilada com uma salinidade muito baixa, entre 95% e 99% menor que a da água do mar (AL-KARAGHOULI; KAZMERSKI, 2013).

Figura 10 – Planta MSF de 36 estágios em Point Loma, Califórnia.



Fonte: Delyannis e Belessiotis (2010).

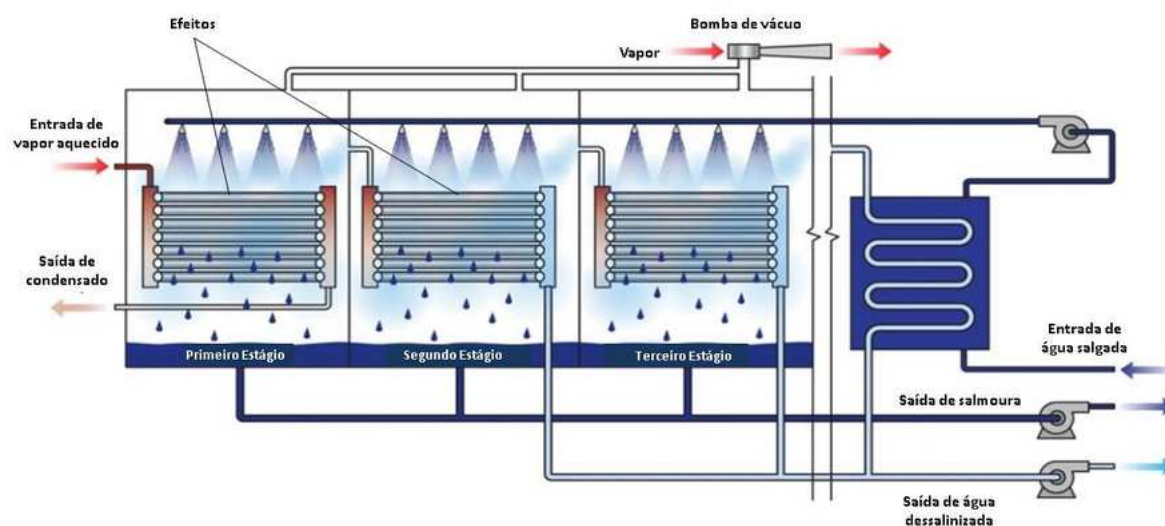
2.2.2.2 Destilação de Múltiplos Efeitos (MED)

A dessalinização por destilação múltiplos efeitos é um dos processos de dessalinização térmica que usa fontes de calor para evaporar a água do mar e, em seguida, condensá-la em água doce. O processo envolve vários estágios de evaporação e condensação, usando diferentes temperaturas e pressões para maximizar a eficiência do processo (SIQUEIRA; MARTINS; VIANA, 2022).

A tecnologia MED foi a primeira a ser usada em aplicações de destilação de água do mar em pequena escala. Três pequenas fábricas foram erguidas pela primeira vez, por volta de 1930, para a cidade de Jeddah, na Arábia Saudita e em Curaçao e Aruba, nas Antilhas Holandesas. Essas fábricas consistiam em unidades de dois e três efeitos (DANFOSS, 2023; DELYANNIS; BELESSIOTIS, 2010).

O processo MED tem como principal característica uma baixa faixa de temperatura de operação para a salmoura que varia entre 60-70°C (AL-SHALI; ETTOUNEY, 2007). Ele conta uma série de evaporadores chamados de *efeitos* que normalmente variam entre 2 e 16 (Figura 11)(AL-KARAGHOULI; KAZMERSKI, 2013). Seu modo de funcionamento utiliza o princípio da redução decrescente de pressão ambiente dentro das câmaras de efeito. Esse processo permite que a água que alimenta do destilador MED sofra múltiplas ebulições sem que seja necessário adicionar mais calor após o primeiro efeito (KHAWAJI; KUTUBKHANAH; WIE, 2008).

Figura 11 – Diagrama esquemático da unidade MED.



Fonte: Adaptado de Al-Karaghoul e Kazmerski (2013).

Segundo Al-Karaghoul e Kazmerski (2013), o calor utilizado no processo de dessalinização é, em grande parte, proveniente da queima de combustível fóssil e do calor residual de usinas. Esse calor é utilizado para aumentar a temperatura da salmoura no

primeiro estágio para cerca de 70°C, o que possibilita a evaporação de parte da salmoura devido à baixa pressão gerada pelas bombas de vácuo. O vapor de água produzido no primeiro estágio é então direcionado para o próximo estágio através de tubos, onde o calor latente do vapor é usado para ferver água salgada adicional, produzindo vapor de água em série. Através desse processo, as unidades de dessalinização MED, como a da Figura 12, conseguem produzir normalmente entre 600 e 30.000 m³/dia de destilado com redução de até 98,6% na salinidade.

Figura 12 – Planta de múltiplos efeitos em Freeport, Texas.



Fonte: Delyannis e Belessiotis (2010).

Em comparação com o processo MSF, o processo de dessalinização MED é uma tecnologia que consome menos energia. Além disso, esse processo tem um desempenho mais elevado e eficiente do ponto de vista termodinâmico e de transferência de calor. Isso significa que o processo MED requer menos energia para produzir a mesma quantidade de água doce do que o processo MSF, além de ter uma maior eficiência na remoção de contaminantes (GAIO, 2016).

Outra vantagem do processo MED é que ele pode ser facilmente adaptado para trabalhar em conjunto com outras tecnologias de energia renovável, como energia solar ou eólica. Esses recursos fazem com que essa técnica possa se tornar uma opção mais sustentável para fornecer água potável no futuro. Além disso, o processo MED é capaz de lidar com águas salobras com salinidades mais altas do que outras tecnologias de dessalinização. Esse fato representa uma vantagem importante em áreas onde a água do mar é predominante ou onde a água subterrânea tem altas concentrações de sais dissolvidos (ALSADAIE *et al.*, 2017) .

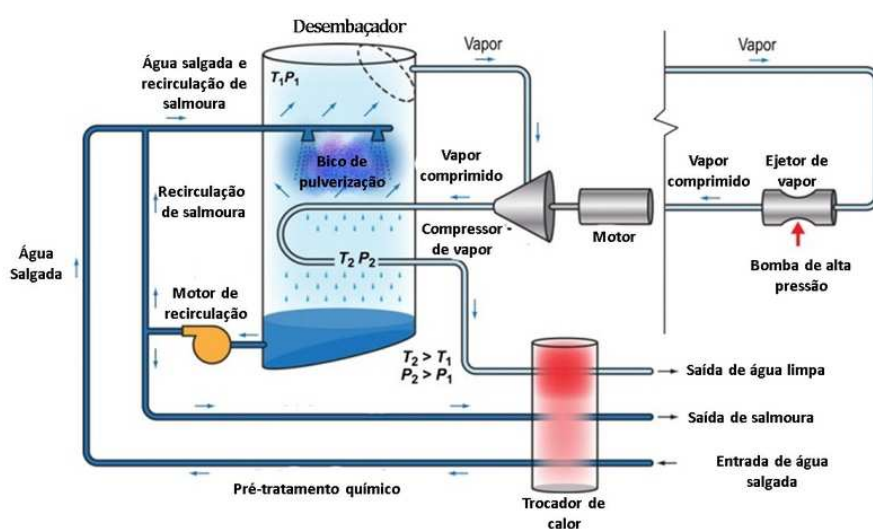
2.2.2.3 Compressão de Vapor (VC)

A dessalinização por compressão de vapor (VC) é um método similar ao processo MED, porém utiliza o calor produzido por um compressor para evaporar a água salgada (AL-KARAGHOULI; KAZMERSKI, 2013). O processo foi desenvolvido no início do século XX e começou a ser produzido em escala industrial na década de 1930, graças a melhorias em seu desempenho e eficiência. Segundo Birkett (1984), essa tecnologia desempenhou um papel importante no fornecimento de água potável durante a Segunda Guerra Mundial.

Diversas usinas de compressão de vapor foram construídas em vários países ao redor do mundo, sendo um exemplo a planta inaugurada em julho de 1963 em Roswell, Novo México (Figura 14). No entanto, de acordo com Delyannis e Belessiotis (2010), as unidades construídas apresentaram graves problemas de dimensionamento, o que afetou significativamente a sua eficiência.

Segundo Miller (2003), a dessalinização por compressão de vapor ocorre inicialmente pela redução da pressão interna para provocar a evaporação da água salgada. Isso é realizado por meio de bombas de alta pressão que retiram a salmoura e o vapor do tubo vertical de destilação. Conforme ilustrado pelo diagrama da Figura 13, à medida que a água evapora dentro do tubo, o vapor é direcionado para um compressor de vapor. Em seguida, o vapor é comprimido pelo compressor, aumentando sua pressão e temperatura. Posteriormente, o vapor é expelido em alta pressão para um encanamento dentro do destilador, onde cede calor para o ambiente interno. Esse processo possibilita a condensação do vapor dentro do encanamento a uma temperatura inferior àquela da evaporação inicial. O vapor comprimido é então resfriado em um trocador de calor até se condensar totalmente e ser coletado para o tratamento final.

Figura 13 – Diagrama esquemático das unidades de Compressão de Vapor (MVC e TVC).



Fonte: Adaptado de Al-Karaghoulí e Kazmerski (2013).

Existem dois métodos de operação para realizar o processo descrito. O primeiro método é a Compressão Mecânica de Vapor (MVC), que utiliza um compressor mecânico movido por eletricidade. Já o segundo método é a Compressão de Vapor Térmico (TVC), que utiliza um ejetor movido por vapor. Esses processos são normalmente utilizados em pequenas e médias plantas de dessalinização. As unidades de MVC, em média, produzem cerca de 3.000 m³/dia, enquanto as unidades de TVC são capazes de produzir cerca de 20.000 m³/dia de água destilada, ambos os métodos alcançando uma redução de até 98% na salinidade (AL-KARAGHOULI; KAZMERSKI, 2013).

Figura 14 – A planta de destilação por compressão de vapor em Roswell, Novo México, durante a construção.

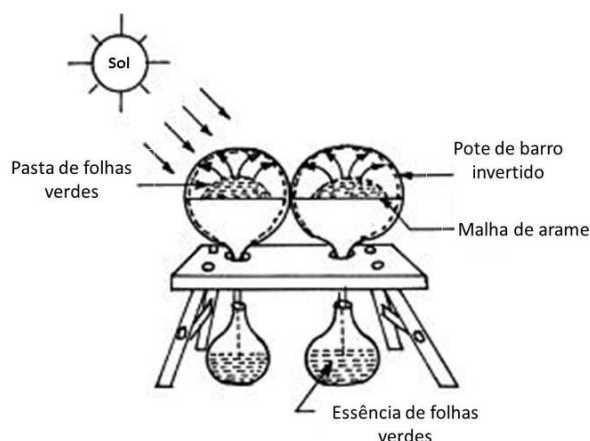


Fonte: Delyannis e Belessiotis (2010).

2.2.2.4 Destilação Solar (SD)

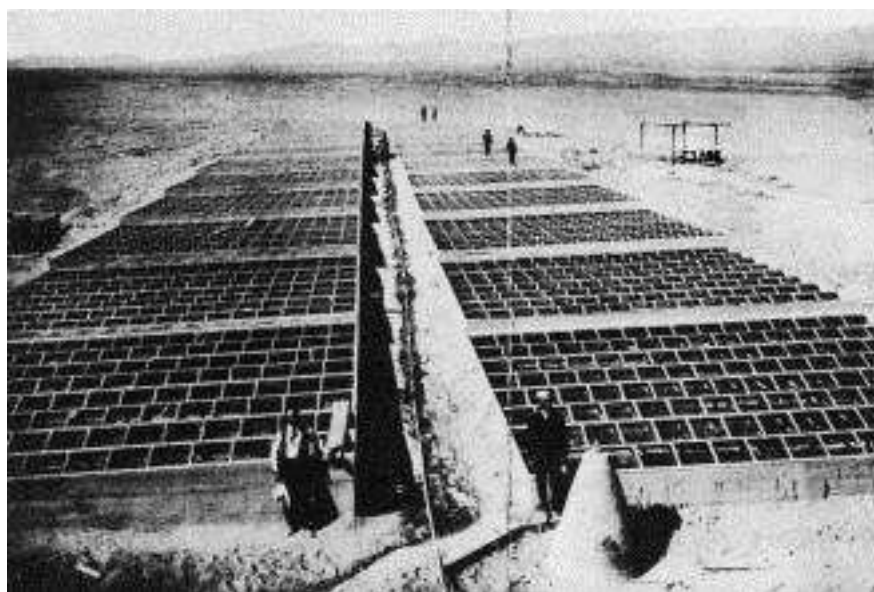
A destilação solar é um método amplamente utilizado ao longo da história por diversas civilizações. Consiste em expor um líquido aos raios solares, permitindo a evaporação da água, a separação dos contaminantes presentes e a subsequente condensação do vapor para obter água purificada. Esse processo replica o ciclo natural da água em nosso planeta, onde a evaporação ocorre na superfície dos oceanos formando as nuvens. Ao perder calor, esse vapor se condensa, resultando na precipitação de água pura (BIRKETT, 1984; TORRI, 2015).

Uma das primeiras documentações desse processo remonta ao século XVI, quando alquimistas árabes utilizavam grandes potes de barro, como os da Figura 15, expostos à intensa radiação solar. O objetivo era concentrar soluções alcoólicas diluídas, extratos de ervas para aplicações médicas, bem como para a produção de vinho e diversos óleos perfumados (DELYANNIS, 2003a; TIWARI; SINGH; TRIPATHI, 2003).

Figura 15 – Aparelho histórico de destilação solar.

Fonte: Adaptado de Tiwari, Singh e Tripathi (2003).

Entretanto, desde essa época até o século XIX, não houve aplicações significativas para a destilação solar. Somente em 1872, dois anos após o registro da primeira patente de destilador solar, foi construída a primeira grande usina de dessalinização na cidade de Las Salinas, no Chile (Figura 16). Essa usina pioneira aproveitava os efluentes de alta salinidade de uma mina de Salitre para fornecer água potável aos trabalhadores da mina e suas famílias. A estrutura dos dessalinizadores era composta por estruturas de madeira cobertas por folhas de vidro, abrangendo uma área construída de 4.450 m², com 64 compartimentos, em um terreno de 7.896 m². Essa usina de destilação solar passiva operou por 40 anos, produzindo cerca de 22,70 m³ de água potável por dia (DELYANNIS, 2003a).

Figura 16 – A primeira planta de destilação solar do mundo em Las Salinas, Chile .

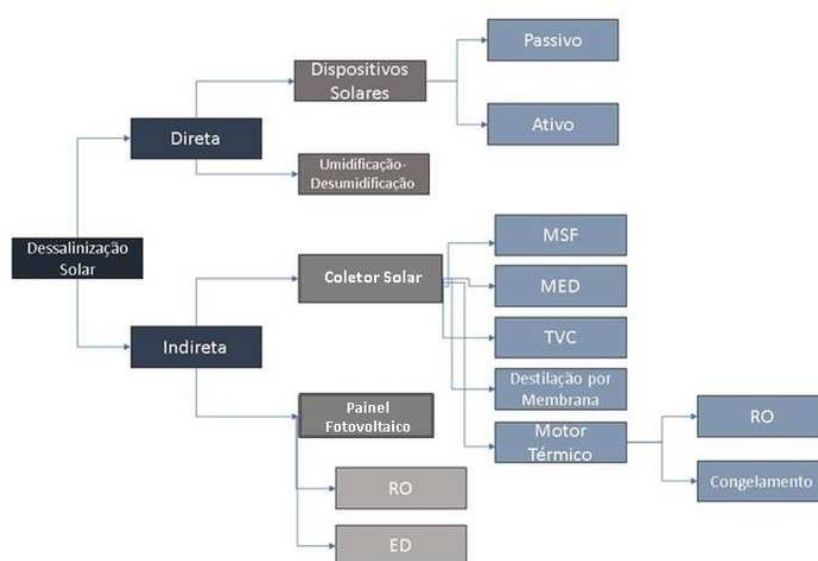
Fonte: Delyannis (2003b)

Esse exemplo histórico ressalta não apenas a eficácia da destilação solar como método de dessalinização, mas também sua capacidade de fornecer uma solução viável para o abastecimento de água potável em regiões remotas e com acesso limitado a fontes de água doce. Em vista disso, a destilação solar por meio de dispositivos solares tem sido aprimorada com o desenvolvimento de novos modelos e agregação de outras tecnologias, visando melhorar a eficiência e a escalabilidade do processo.

Atualmente, embora ainda seja pouco utilizada se comparada a outros processos, a destilação solar mostra-se uma solução viável para regiões do mundo com alta incidência solar e baixo índice pluviométrico. No Brasil, por exemplo, ela é comumente utilizada na Região Nordeste. Nessa região, essa técnica tem sido adotada em pequena escala para fornecer água potável a comunidades rurais e pequenas cidades. Essa abordagem aproveita a abundância de radiação solar na região para produzir água potável, oferecendo uma alternativa sustentável e acessível para atender às necessidades locais de abastecimento (LIMA, 2012).

De acordo com Tiwari, Singh e Tripathi (2003), existem vários tipos de dessalinizadores solares, que variam em termos de tecnologia e grau de complexidade. Isso faz com que a dessalinização por energia solar seja separada em duas categorias principais: direta e indireta. A categoria direta refere-se aos processos que utilizam a radiação solar para aquecer a água salgada diretamente. A categoria indireta refere-se aos processos em que a radiação solar é usada para transferir calor para os dessalinizadores por meio de coletores solares, além de ser utilizada para a geração da energia elétrica requerida pelos equipamentos por meio de painéis solares (Figura 17).

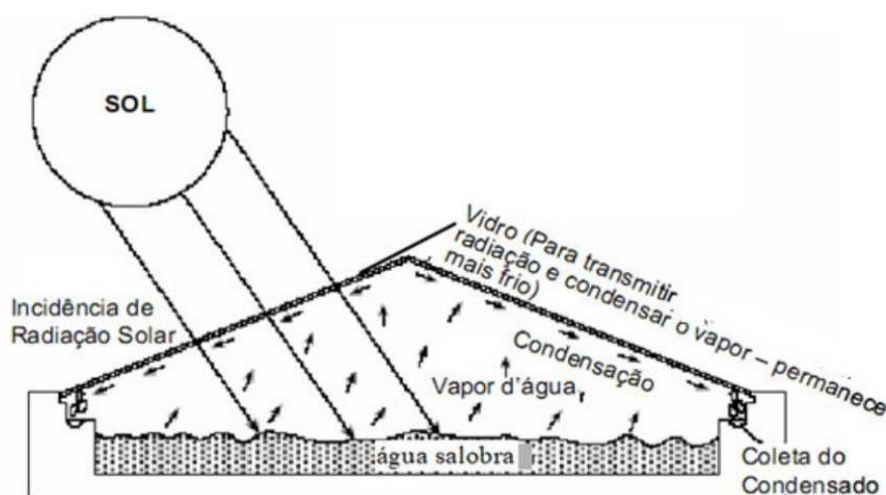
Figura 17 – Classificação dos processos de dessalinização solar.



Fonte: Adaptado de Tiwari, Singh e Tripathi (2003).

O dispositivo mais simples conhecido é o destilador solar passivo, apresentado na Figura 18. Esse tipo de dessalinizador utiliza a radiação solar como única fonte de energia para sua operação e possui uma estrutura simples, capaz de fornecer água com redução de pouco mais de 99% na salinidade. No entanto, ele tem uma produção limitada, afetado pelas condições climáticas, como a falta de sol e a temperatura ambiente .

Figura 18 – Unidade de destilação solar passiva.

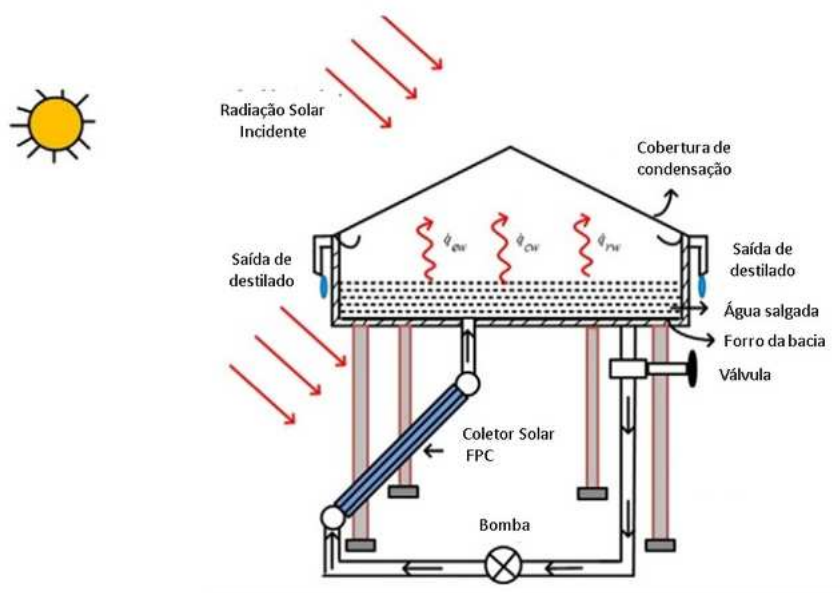


Fonte: Adaptado de Buross *et al.* (1981)

Outra tecnologia de dessalinização direta é o destilador solar ativo, que envolve o uso de componentes adicionais, como coletores solares, para aumentar a quantidade de calor recebido. Esses destiladores também podem empregar dispositivos elétricos, como bombas ou turbinas, que permitem o controle do fluxo de água, resultando em uma destilação mais eficiente, como o sistema ilustrado na Figura 19.

Existem diferentes modelos de destiladores solares ativos disponíveis, que oferecem maior capacidade de produção e eficiência em comparação com os destiladores solares passivos. No entanto, é importante observar que esses destiladores ativos requerem energia elétrica para o seu funcionamento e são mais complexos de construir e operar (AL-KARAGHOULI; RENNE; KAZMERSKI, 2009; TIWARI; SAHOTA, 2017a).

Figura 19 – Representação esquemática de um dessalinizador solar ativo com bomba de circulação e coletor solar FPC acoplados.

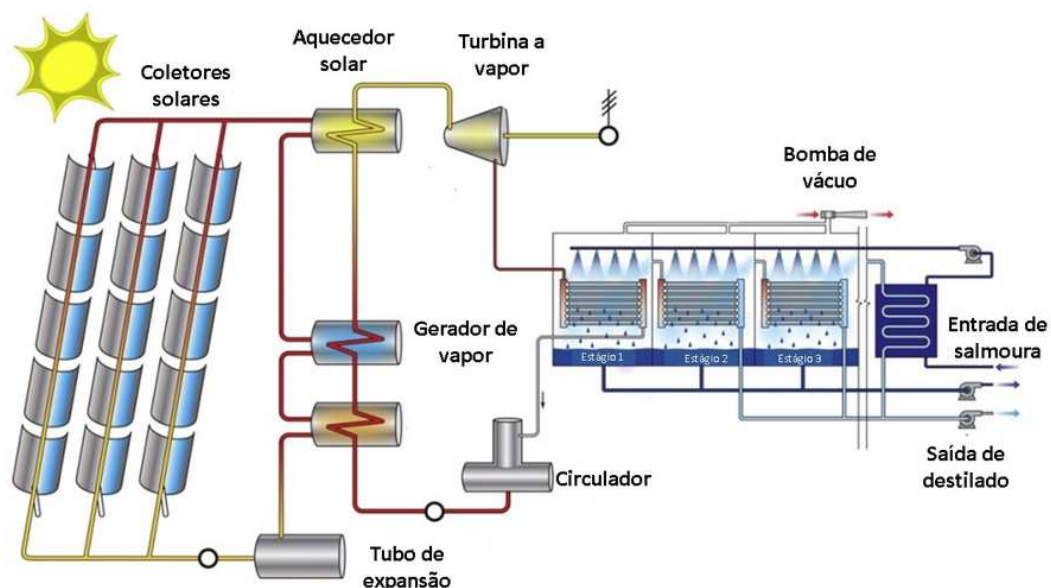


Fonte: Adaptado de Tiwari e Sahota (2017b).

No caso da dessalinização solar indireta, a energia solar pode ser utilizada como substituta das fontes de energia convencionais. Isso é possível em sistemas avançados de dessalinização, como a Destilação de Múltiplos Efeitos e a Osmose Reversa, conforme ilustrado nas Figuras 20 e 21, respectivamente (AL-KARAGHOULI; RENNE; KAZMERSKI, 2009).

A Destilação de Múltiplos Efeitos pode, por exemplo, utilizar a energia térmica do Sol para aquecer um fluido de alta temperatura para transferir calor para água salgada em diferentes estágios. Esse método possibilita um maior rendimento energético, tornando-o mais eficiente e econômico em comparação ao processo convencional.

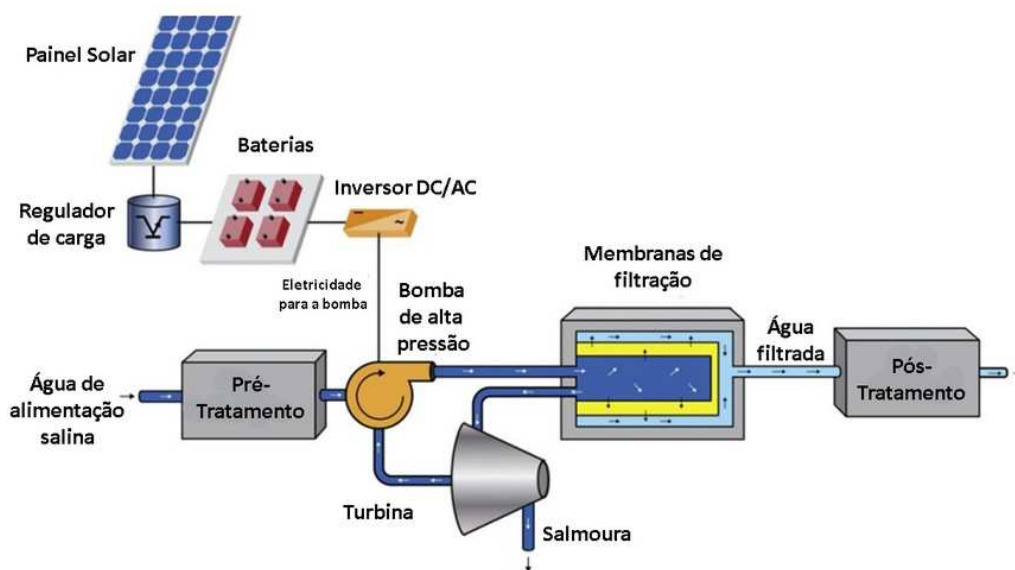
Figura 20 – Diagrama esquemático de um sistema de coletores solares acoplados a uma unidade de Destilação de Múltiplos Efeitos (MED).



Fonte: Adaptado de Al-Karaghoul e Kazmerski (2013).

Por outro lado, uma planta de Osmose Reversa pode se beneficiar da energia solar para gerar energia elétrica por meio de painéis fotovoltaicos. Essa energia seria direcionada para alimentar as bombas de alta pressão necessárias para impulsionar a água através das membranas, tornando o processo mais sustentável. Essa integração de tecnologias permite uma abordagem mais sustentável para a dessalinização, contribuindo para a conservação de recursos naturais e redução das emissões de carbono.

Figura 21 – Diagrama esquemático de um sistema de painéis solares acoplados a uma unidade de Osmose Reversa (RO).



Fonte: Adaptado de Al-Karaghoul e Kazmerski (2013).

2.3 Custos dos Processos de Dessalinização

Diversos elementos influenciam nos custos da dessalinização. Estes incluem a qualidade da água de entrada (água do mar ou salobra), o investimento inicial na planta, o consumo energético, os custos de mão de obra e manutenção, o tratamento e descarte do concentrado, além das taxas de juros do financiamento da construção.

A energia constitui o componente mais significativo nos custos de produção de água em todos os sistemas de dessalinização. Nos principais métodos de destilação (MSF, MED e TVC), utiliza-se calor de baixa temperatura para a vaporização e energia elétrica para a movimentação da água. Em estações de cogeração, onde o calor de baixa temperatura provém do resíduo de calor da exaustão da turbina, os custos de energia são consideravelmente reduzidos. No caso do processo de dessalinização por membrana (RO e ED), a dependência de energia elétrica é alta, representando aproximadamente 44% dos custos totais da água dessalinizada (BANCO MUNDIAL, 2019).

2.3.1 Processos de destilação

As grandes instalações de destilação são comumente empregadas na dessalinização da água do mar e costumam ter uma capacidade considerável. No caso das plantas MSF, cuja capacidade de produção varia entre 23.000 e 528.000 m³/dia, os custos de produção de água giravam entre 0,52 e 1,75 US\$/m³. Já para as plantas MED com capacidade de produção superior a 90.000 m³/dia, o custo variava entre 0,52 e 1,01 US\$/m³. No caso de capacidades médias de MED, oscilando entre 12.000 e 55.000 m³/dia, os custos variaram entre 0,95 e 1,95 US\$/m³. Por sua vez, o método VC que é geralmente aplicado em sistemas de menor capacidade (sistemas com aproximadamente 1000 m³/dia), o custo variava entre 2,0 e 2,60 US\$/m³ (BANCO MUNDIAL, 2019; AL-KARAGHOULI; KAZMERSKI, 2013).

2.3.2 Processos de Membrana

Devido aos avanços na tecnologia de membranas nos últimos anos, os custos de produção de água por Osmose Reversa (RO) foram reduzidos significativamente. Para grandes plantas de dessalinização que utilizam a água do mar e possuem capacidades entre 100.000 e 320.000 m³/dia, tinham um custo de produção entre 0,45 e 0,66 US\$/m³. Em plantas de médio porte com capacidades que variam entre 15.000 e 60.000 m³/dia, o custo de produção de água foi estimado entre 0,48 e 1,62 US\$/m³. Para unidades de menor capacidade, entre 1.000 a 4.800 m³/dia, o custo variou entre 0,7 e 1,72 US\$/m³.

Para água salobra, com uma concentração de sólidos dissolvidos de até 10.000 mg/L, a Osmose Reversa (RO) e a Eletrodialise (ED) se destacam como métodos econômicos

e eficaz. Entretanto, para concentrações de sólidos dissolvidos acima de 5.000 mg/L, o sistema RO se revela como a opção mais econômica. Em plantas de dessalinização por osmose reversa de grande capacidade, variando de 40.000 a 46.000 m³/dia, os custos de produção de água ficam na faixa de 0,26 a 0,54 US\$/m³, enquanto para as plantas de ED variam de 0,6 a 1,05 US\$/m³, sendo que esses custos estão sujeitos à influência da salinidade da água de alimentação (BANCO MUNDIAL, 2019; AL-KARAGHOULI; KAZMERSKI, 2013).

2.4 Destilador Solar Passivo

O dessalinizador solar passivo é um dispositivo que utiliza exclusivamente a energia solar para converter água salgada em água potável. Seu funcionamento se baseia em princípios simples, porém eficazes (MARIANO, 2019):

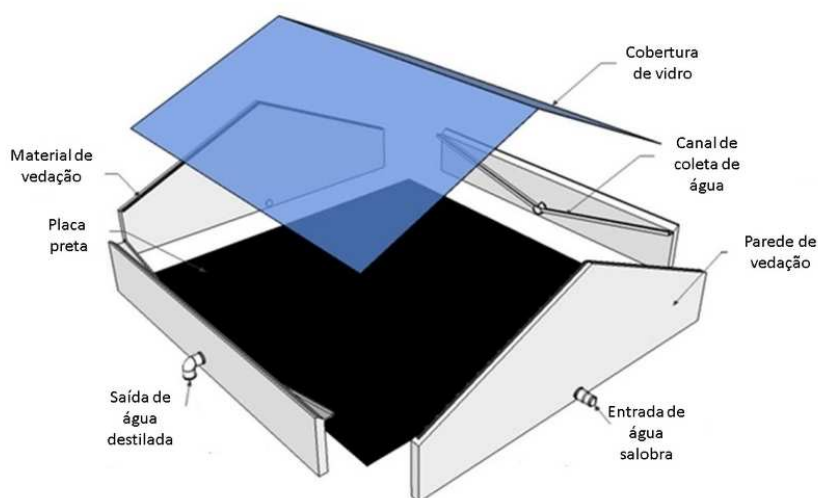
- Inicialmente, a água salgada é colocada em um recipiente de fundo preto no interior do dispositivo, o qual possui uma cobertura transparente que permite a passagem da luz solar.
- Sob a influência da radiação solar, a água salgada absorve calor e inicia o processo de evaporação. As moléculas de água transformam-se em vapor, deixando para trás os sais e outros contaminantes.
- O vapor ascende em direção a cobertura devido o fenômeno do empuxo gerado pelos gases atmosféricos. Esse efeito físico, também conhecido como flutuabilidade, faz com que o vapor se desloque em direção à superfície mais fria da cobertura onde a pressão sentida pelo vapor é menor.
- Ao atingir a superfície fria, o vapor perde seu calor latente e se condensa novamente em forma de gotículas de água doce. Essas gotas formam pequenas gotas escorrem em direção a um reservatório, onde são coletadas como água potável.
- Os sais e impurezas permanecem no recipiente original, podendo ser posteriormente descartados ou até mesmo reaproveitados em processos industriais.
- Além do fenômeno de empuxo, a difusão também desempenha um papel crucial no transporte de vapor dentro do dispositivo. Ela permite a dispersão das moléculas de água no interior do recipiente, promovendo uma evaporação homogênea e eficiente.

2.4.1 Construção

O dessalinizador solar passivo é um dispositivo composto por um evaporador, um condensador, um sistema de transporte de água e um sistema de vedação, que podem ser

construídos utilizando diferentes materiais. O evaporador consiste em uma bacia plana pintada de preto, responsável por absorver a energia solar. O condensador é composto por um telhado de vidro ou outro material transparente. Os tubos e calhas responsáveis por fornecer e coletar a água destilada, formam o sistema de transporte de água. As paredes que cercam o evaporador, o condensador e o sistema de transporte de água, compõem o sistema de vedação, responsável por isolar termicamente o dispositivo, minimizando as perdas de calor e evitando a entrada de ar externo indesejado (SARMENTO *et al.*, 2021).

Figura 22 – Estrutura de um destilador solar passivo de dupla inclinação.



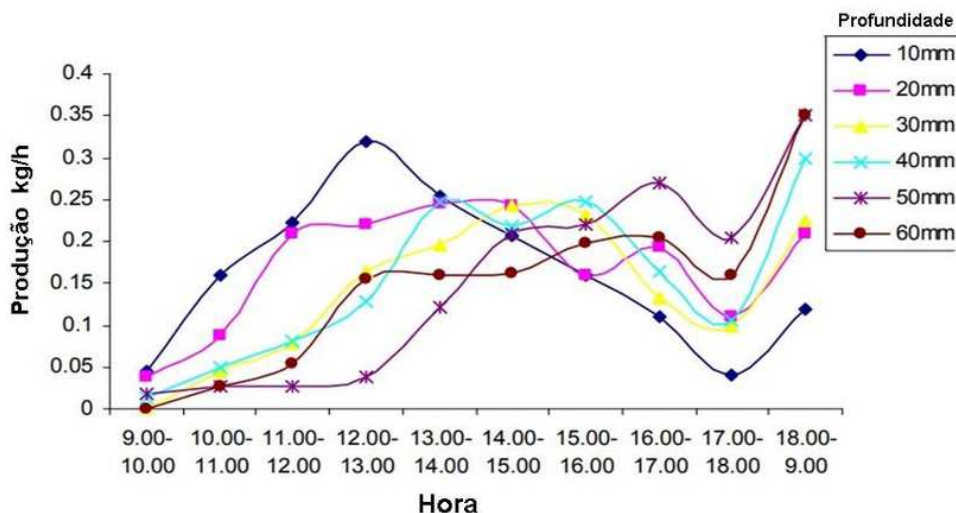
Fonte: Adaptado de Nascimento *et al.* (2018).

2.4.1.1 Bacia

A bacia é um dos componentes principais do dessalinizador solar passivo, responsável por absorver a radiação solar e aquecer a água salgada ou contaminada. Ele consiste em uma bacia plana de cor preta, que pode ser feita de concreto, metal ou plástico, conforme o material disponível e o custo do equipamento (SARMENTO *et al.*, 2021). A profundidade da bacia e a espessura da lâmina de água são fatores que influenciam a produtividade do dessalinizador, pois afetam a capacidade térmica e a taxa de evaporação da água.

Segundo estudos de Raj e Manokar (2017), que analisaram a influência da profundidade da água na produtividade desse tipo de dispositivo, verificou-se que o nível da água entre 10 mm e 20 mm apresentam uma maior produção de destilado próximo ao período do meio-dia. Para níveis entre 50 mm e 60 mm a produtividade aumenta gradativamente ao longo do dia e tem seu valor máximo próximo ao anoitecer, conforme é possível observar no Gráfico 7. Isso ocorre porque a bacia, após ter sido aquecida durante o dia pela radiação solar, continua liberando o calor armazenado e promovendo a evaporação da água mesmo após o pôr do sol, contribuindo para um aumento significativo na eficiência do dessalinizador durante essa fase do dia (DAMASCENO, 2016).

Gráfico 7 – Variação horária da produção de água destilada para diferentes níveis de água.



Fonte: Adaptado de Raj e Manokar (2017).

2.4.1.2 Cobertura

Segundo DAMASCENO (2016), o vidro é o material mais comum para a cobertura de dessalinizadores solares devido à sua boa molhabilidade (que permite a formação de uma lâmina de água) e alta transmitância solar. O vidro temperado seria o ideal, porém é um material mais caro. De acordo com a autora as coberturas mais finas têm melhor produção de água, por exemplo, uma placa com 3 mm de espessura apresenta uma produtividade 16,5% maior que uma cobertura de 6 mm do mesmo material. Em relação ao formato do telhado, a pesquisadora argumenta que destiladores com cobertura de duas águas são recomendados em latitudes inferiores a 20°, enquanto a de uma água é preferível em latitudes superiores a 20° já que um dos lados não receberia radiação solar diretamente.

Quanto à inclinação do telhado, Tiwari e Shyam (2016) defendem que o ideal seria que a inclinação tivesse o mesmo valor da latitude local, visto que os raios solares incidiriam perpendicularmente à superfície em grande parte do ano. Entretanto, a inclinação deve ser de tal modo que a possibilite uma drenagem eficiente do destilado. Para analisar a relação entre inclinação e produtividade, Dev e Tiwari (2009) desenvolveram um estudo experimental que investigou a influência da inclinação na eficiência de dispositivos de inclinação única.

Os pesquisadores construíram protótipos com inclinações de 15°, 30° e 45° que foram instalados na cidade de Nova Delhi (latitude 28°35'N, longitude 77°12' E, altitude 216 m do nível médio do mar). Os pesquisadores realizaram medições da produção de destilado em diversos períodos do dia e em diferentes meses do ano, com diferentes níveis de

água na bacia (0,01 m, 0,04 m, 0,12 m e 0,16 m). A análise dos dados coletados evidenciou que a produtividade média anual foi maior no dispositivo com inclinação de 15°.

2.4.1.3 Isolamento Térmico

O material isolante é colocado no fundo da bacia para reduzir as perdas de calor para o ambiente exterior. Além disso, as paredes laterais da bacia também devem ser isoladas. Para o isolamento térmico, é importante escolher um material que atenda a algumas características essenciais. Ele deve ser à prova de água, de fácil aplicação e remoção (se necessário), leve e resistente, além de possuir baixa condutibilidade térmica. Também é necessário que seja resistente a altas temperaturas, em torno de 90°C, sem sofrer deformações, e que possa se encaixar facilmente no fundo e nas paredes do destilador.

Os materiais mais comumente utilizados para o isolamento térmico incluem borracha butílica, polietileno preto, poliuretano, poliestireno e espuma. Apesar de o uso de isolamento térmico aumentar os custos de materiais em cerca de 16%, o aumento real no custo total da instalação é inferior a 10%. A justificativa econômica para o uso do isolamento está no fato de que, mesmo havendo um aumento no custo inicial, isso acaba sendo compensado pelo aumento da produtividade do destilador. Um estudo demonstrou uma produtividade 15% superior, em média, quando comparada a uma unidade idêntica sem isolamento (MARIANO, 2019).

2.4.2 Produtividade x Custos

Quanto ao seu desempenho, os destiladores solares possuem algumas limitações devido à sua dependência exclusiva da radiação solar. Em dias ensolarados, a produção de água destilada será maior, enquanto em dias nublados ou com baixa intensidade de radiação solar, a produção será reduzida. Além disso, a eficiência dos destiladores solares também pode ser influenciada por outros fatores, como a inclinação e orientação da cobertura, a limpeza de cobertura e bacia, a quantidade e qualidade da água de alimentação e o tamanho do sistema. Segundo Azevedo *et al.* (2020), o dessalinizador solar passivo pode produzir entre 2 e 10 litros de água destilada por metro quadrado de área instalada por dia.

O custo de dessalinização utilizando um dessalinizador solar passivo depende de vários fatores, como o tamanho, o material, a eficiência, a localização e a demanda de água. Pelo fato desse tipo de dispositivo não utilizar equipamentos descartáveis e fazer o uso exclusivo da energia solar, o custo maior torna-se a sua própria construção. Os materiais necessários para um dessalinizador solar passivo de telhado duplo de 4 m² de área construída tem um custo da ordem de R\$ 1.000,00 reais e esse dispositivo seria capaz de produzir cerca de 16 litros de água doce por dia em condições ideais. Outros modelos

de dessalinizadores solares passivos podem ter custos diferentes, dependendo do seu design e desempenho (AZEVEDO *et al.*, 2020).

2.4.3 Vantagens e Desvantagens da Dessalinização Solar

De acordo com Mariano (2019), o processo de dessalinização por destilação solar apresenta as seguintes vantagens:

- A purificação da água por meio de destiladores solares é uma tecnologia notavelmente simples, dispensando a necessidade de instrumentos complexos, componentes eletrônicos ou partes mecanicamente móveis.
- Esta tecnologia se revela a mais apropriada tanto do ponto de vista econômico quanto técnico para regiões carentes de infraestrutura elétrica, onde a disponibilidade de água doce é limitada, as chuvas são escassas, e há grande quantidade de água salobra ou marítima. Este é o cenário observado em áreas como o nordeste brasileiro e em regiões desfavorecidas do norte de Minas Gerais.
- A operação desses destiladores é surpreendentemente simples, não demandando custos elevados com manutenção, reparos ou a contratação de mão de obra altamente especializada.
- Utilizando materiais e mão de obra locais, há a geração de empregos e um engajamento social significativo, uma vez que a água é produzida no próprio local de consumo.
- O combustível utilizado é inteiramente gratuito, o processo é silencioso e não gera poluição. Geralmente, há pouca necessidade de eletricidade, a qual pode ser requerida no caso de bombeamento de água, mas não no processo de dessalinização em si.
- Com a operação adequada do destilador, a água produzida é isenta de sais e contaminação microbológica, elevando os padrões de saúde dos consumidores.
- Quando construído com um isolamento térmico eficiente, o destilador continua a produzir água destilada durante a noite, devido ao calor retido na massa de água.
- Destiladores pequenos e portáteis podem ser fabricados de maneira simples e utilizados em situações de desastres, como em tragédias naturais ou em cenários de guerra, nos quais o fornecimento de água potável representa um dos maiores desafios.

- Em áreas costeiras desérticas, onde a água do mar está disponível, a destilação solar pode reduzir a dependência da água da chuva.
- Comparada a outros métodos de destilação, a destilação solar geralmente requer menos energia para purificar a água.
- Além disso, pode ser aplicada em culturas específicas de alto valor, como a produção de verduras hidropônicas, quando uma fonte de água apropriada não está disponível.
- Em áreas costeiras desérticas, a pesca pode prosperar, mesmo em locais onde a água potável é escassa.
- A destilação solar possibilita o estabelecimento em áreas com baixa densidade populacional, contribuindo para aliviar a pressão sobre as áreas urbanas mais congestionadas.

E as seguintes desvantagens:

- A produção é relativamente baixa, com valores típicos variando entre três e cinco litros por metro quadrado por dia, o que torna essa tecnologia dispendiosa em termos de investimento financeiro por litro de água produzido. Quando a demanda por produção excede 25.000 litros por dia, outras formas de sistemas devem ser consideradas.
- Devido à baixa produção por unidade de área, essa modalidade tecnológica requer uma extensa área de instalação para gerar grandes volumes de água. Em locais onde tais espaços não estão disponíveis ou são onerosos, a preferência pode recair sobre tecnologias de destilação mais eficazes. Dessa forma, se um destilador solar for construído em uma área menos desenvolvida devido ao baixo custo da terra, à medida que a região prospera economicamente, o valor da terra aumenta e surge a necessidade de substituir o destilador solar por alternativas que ocupem uma área menor.
- O custo de capital para a construção é substancial, e é imperativo que esse tipo de destilador seja construído com grande precisão para operar de maneira eficaz.
- Deve existir um sistema para manter o nível da água constante, ou dentro dos parâmetros ideais, no caso de destiladores de maior porte.
- A produção de água está sujeita às condições meteorológicas.
- Pequenos vazamentos de calor podem ter um impacto significativo na produção do destilador.

- Considerando que a água destilada não é apropriada para consumo humano a longo prazo devido a características fisiológicas, é necessário adicionar quantidades precisas de sais à água antes que ela chegue ao consumidor. É essencial a presença de um mínimo de sais dissolvidos, mas não se deve ultrapassar o valor máximo de quinhentos miligramas por litro (conforme os padrões brasileiros). Uma forma de se fazer isso seria acrescentar pequenas quantidades da própria água salobra desde que não esteja contaminada por patógenos ou substâncias tóxicas e cuja salinidade deve ser conhecida.

2.4.4 Uso de Destiladores Solares no Semiárido Brasileiro

Uma parte significativa do nordeste brasileiro, correspondendo a cerca de 936.993 km², consiste em áreas semidesérticas denominadas semiáridas, com altas taxas de insolação, atingindo uma média de 5,8 kWh/m² por dia (PONTE; LOPES, 2017; REBOUÇAS, 1997). Dados pluviométricos demonstram que essas regiões, representadas no mapa da Figura 23, apresentam baixos índices de precipitação, entre 280 e 800 mm de médias anuais (ARAÚJO, 2011). Além disso, há uma predominância de solos cristalinos, responsáveis pela água subterrânea ser geralmente salobra, com salinidade média de 2.000 miligramas por litro (REBOUÇAS, 1997). Considerando essas características, o nordeste brasileiro apresenta condições propícias para a implementação de destiladores solares.

Figura 23 – Região semiárida do nordeste brasileiro.



Fonte: Brasil (2017).

Para avaliar o potencial desses dispositivos, Azevedo *et al.* (2020) realizaram uma pesquisa sobre destiladores solares passivos de duplo declive instalados nessa região. Nesse estudo, os autores avaliaram 30 destiladores solares de telhado duplo construídos a partir de placas pré-moldadas de concreto, vidro e lona em três comunidades rurais localizadas no município de Caraúbas no semiárido paraibano, destacadas nas Figuras 24, 25 e 26. O objetivo principal foi avaliar o potencial de produção de água potável por meio desses dessalinizadores solares, além de investigar os benefícios socioeconômicos e ambientais dessa tecnologia na região.

Figura 24 – Comunidade rural: Sítio Luiz Gomes, no município de Caraúbas-PB.



Figura 25 – Comunidade rural: Sítio Chagas, no município de Caraúbas-PB



Figura 26 – Comunidade rural: Sítio Barreiras, município de Caraúbas-PB



Fonte: Azevedo *et al.* (2020)

Durante o estudo, foram realizadas visitas de campo para medir a produção diária de água potável, coletar amostras de água de poços e dessalinizadores para análises laboratoriais. As medições realizadas para determinar a produção diária mostraram que cada dispositivo produziu entre 1,63 litros por metro quadrado (Sítio Barreiras) e 3,45 litros por metro quadrado (Sítio Luiz Gomes). No entanto, essa disparidade entre medições foi atribuída a problemas de vedação em alguns dispositivos. Ao todo foram produzidos 287,2 litros de água durante um dia nas três comunidades, uma média de 9,5 litros produzidos por cada dessalinizador.

Em relação à qualidade da água dos poços, verificou-se que valores médios de sólidos totais dissolvidos foram de 3.141 mg/Litro, ou seja, bem acima dos 1.000 mg/Litro estabelecidos pelo Ministério da Saúde como toleráveis para o consumo humano (BRASIL, 2006, 125). Após passar pelo processo de dessalinização, observou-se que a quantidade de sólidos totais foi reduzida para cerca de 22,2 mg/Litro, representando uma redução de aproximadamente 99,2% na salinidade.

Após a realização das análises microbiológicas das águas tratadas pelos dessalinizadores das três comunidades, constatou-se a ausência de Coliformes Fecais (*Escherichia coli*), o que indica que essas águas estão livres de patógenos responsáveis por doenças relacionadas à água. No entanto, em duas das três análises, foram encontradas pequenas quantidades de coliformes totais (CT). Contudo, é importante salientar que a presença de bactérias heterotróficas em pequenas quantidades nas análises de campo não comprometeram a qualidade das águas. De acordo com as diretrizes estabelecidas pelo Ministério da Saúde do Brasil, é aceitável a presença de até 5% de amostras com bactérias heterotróficas em águas tratadas em sistemas públicos (BRASIL, 2011).

Em relação aos benefícios socioeconômicos e ambientais, esses dessalinizadores solares oferecem benefícios sociais significativos ao fornecer água de qualidade para consumo humano, especialmente em regiões áridas como o semiárido nordestino. Essa tecnologia se mostrou viável e acessível para famílias de baixa renda, permitindo o acesso à água potável com investimentos reduzidos, em torno de R\$ 1.000,00 reais, valor inferior ao salário mínimo brasileiro daquele ano (R\$ 1045,00 reais) (AZEVEDO *et al.*, 2020).

Além disso, os dessalinizadores solares tiveram baixo impacto ambiental, pois utilizaram energia solar e não requereram eletricidade ou materiais descartáveis. Sua implementação nas comunidades citadas atendeu às necessidades diárias de água potável para as famílias presentes.

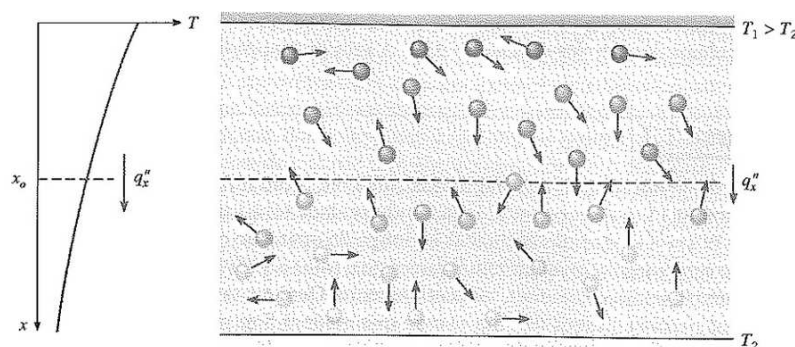
Segundo os autores, esses resultados demonstram que os dessalinizadores solares são, de fato, uma opção de baixo custo em comparação ao preço médio de outros sistemas. Além disso, eles são fáceis de construir, podendo ser instalados por mão de obra local, e apresentam uma eficiência satisfatória para fornecer água limpa às famílias locais, livre de sais e microorganismos patogênicos que representam riscos à saúde. Em relação ao consumo energético, por não exigirem eletricidade, esses dessalinizadores reduzem significativamente

os custos de operação e os impactos ambientais negativos (AZEVEDO *et al.*, 2020).

2.5 Transferência de Calor

O conceito de calor é definido como sendo a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura no espaço. Nesse sentido, sempre que existir um gradiente de temperatura em um meio, ou meios, haverá, necessariamente, transferência de calor do local com maior temperatura para o local com menor temperatura. Um exemplo de processo de transferência de calor é a condução, que do ponto de vista microscópico, pode ser compreendida como a transferência de energia que ocorre durante as interações entre partículas com maior energia e as partículas com menor energia conforme ilustrado na Figura 27 (INCROPERA *et al.*, 2008; ÇENGEL; J.GHAJAR, 2012; HOLMAN, 1998b; WYLEN; BORGNAKKE; SONNTAG, 2009).

Figura 27 – Associação da transferência de calor por condução à difusão de energia devido à atividade molecular.



Fonte: Incropera *et al.* (2008, Pg. 3)

Para quantificar a transferência de energia serão utilizados três conceitos fundamentais: a taxa de transferência de calor \dot{q} , o fluxo de calor \dot{Q} , e a quantidade total de calor Q .

A taxa de transferência de calor (\dot{q}) é uma medida da quantidade de energia térmica transferida através de um material por unidade de área e por unidade de tempo. Ela é um conceito essencial na análise de transferência de calor, pois descreve como o calor flui através de diferentes materiais. Além da diferença de temperatura entre regiões do material, a taxa de transferência de calor é influenciada também pelas propriedades do próprio material, como sua condutividade térmica.

A unidade usual para a taxa de transferência de calor é watts por metro quadrado (W/m^2). Ela pode ser expressa em termos do fluxo de calor e da área, como:

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A}, \quad (2.1)$$

onde A é a área transversal à direção da transferência de calor, medida em metros quadrados(m^2).

O fluxo de calor (\dot{Q}) é uma medida da taxa na qual a energia térmica está sendo transferida. Ele expressa a quantidade de calor que passa por uma determinada área em um intervalo de tempo. O fluxo de calor é medido em watts (W), onde 1 watt é igual a 1 joule por segundo. O fluxo de calor pode ser positivo quando o calor entra no sistema e negativo quando o calor sai do sistema. Ele pode ser calculado a partir da Equação (2.2):

$$\dot{Q} = \dot{q}A . \tag{2.2}$$

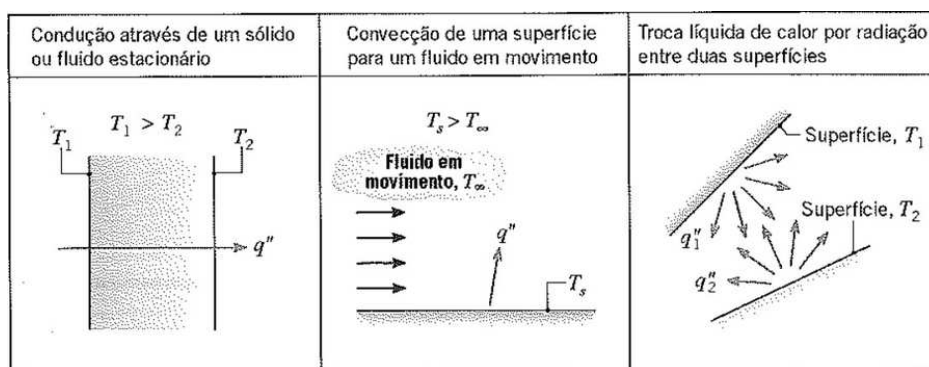
Já a quantidade de calor (Q) representa a energia térmica total, transferida entre um sistema e suas vizinhanças levando em conta um determinado intervalo de tempo. Desse modo, conhecendo a transferência de calor por unidade de tempo (\dot{Q}) de um sistema, é possível, então, determinar a quantidade total de calor transferido durante um intervalo de tempo Δt , medido em segundos (s), a partir da integral (ÇENGEL; J.GHAJAR, 2012):

$$Q = \int_0^{\Delta t} \dot{Q} dt , \tag{2.3}$$

sendo que a unidade usual para a quantidade de calor Q é o joule (J) no Sistema Internacional de Unidades (SI).

Incropera *et al.* (2008) definem os três processos de transferência de calor presentes na natureza: condução térmica, convecção e radiação térmica. Esses processos estão ilustrados na Figura 28.

Figura 28 – Modos de transferência de calor: condução convecção e radiação.



Fonte: Incropera *et al.* (2008)

No primeiro quadro da ilustração, temos uma situação de transferência de calor por condução através de um sólido ou fluido estacionário, devido à diferença de temperatura entre as faces externas. No segundo, é mostrado o processo de convecção, que ocorre entre uma superfície aquecida e um fluido mais frio em movimento. Já no terceiro quadro, é apresentada uma situação de troca de calor entre superfícies com temperaturas não nulas.

2.5.1 Transferência de Calor por Condução

Quando em um objeto ou um fluido existir um gradiente de temperatura, utiliza-se o termo condução para se referir a transferência de calor que ocorre através do meio. Experiências de condução térmica mostraram que a transferência de energia é realizada desde a região de maior temperatura para a região de menor temperatura e o fluxo de calor por unidade de área é proporcional a variação de temperatura do meio, isto é (INCROPERA *et al.*, 2008; HOLMAN, 1998b):

$$\frac{\dot{Q}}{A} \sim \frac{\partial T}{\partial n}, \quad (2.4)$$

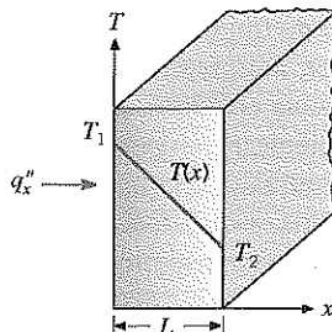
onde n representa a direção de propagação do calor.

Essa relação é descrita matematicamente pela *Lei de Fourier*, na qual é incorporada uma constante de proporcionalidade conhecida como condutividade térmica (k). Portanto, ao considerarmos uma distribuição unidimensional de temperatura $T(x)$, a equação que governa a taxa de transferência de calor pode ser representada da seguinte forma (YOUNG; FREEDMAN, 2008):

$$\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dx}, \quad (2.5)$$

onde a inclusão do sinal negativo sinaliza que o fluxo de calor ocorre no sentido oposto ao aumento da temperatura. Uma ilustração para o fenômeno de condução é apresentada na Figura 29, a qual retrata um cenário de estado estacionário com uma distribuição de temperatura linear $T(x)$.

Figura 29 – Transferência de calor unidimensional por condução.



Fonte: Incropera *et al.* (2008, Pg. 2)

Tomando em consideração a Equação (2.5) e o exemplo da Figura 29, é possível reformular o gradiente de temperatura da seguinte maneira:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} . \quad (2.6)$$

O fluxo térmico através da parede pode então ser expresso como:

$$\dot{Q} = \frac{kA}{L}(T_1 - T_2) , \quad (2.7)$$

onde T_1 e T_2 são as temperaturas das faces esquerda e direita, medidas em kelvin (K), o coeficiente k é a condutividade térmica, dada em (W/m.K) e L é a espessura da parede em metros (m).

2.5.1.1 Resistência Térmica para a Condução

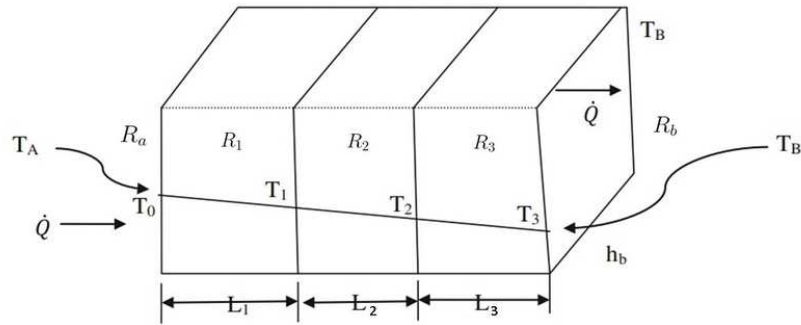
Para o caso de transferência de calor unidimensional citado na seção anterior, a resistência térmica para condução é obtida pela Equação (2.7), sendo a razão do potencial motriz, definido como a diferença de temperatura entre as superfícies opostas do objeto ($T_{s,1} - T_{s,2}$), e o fluxo de calor (\dot{Q}) (HOLMAN, 1998b; INCROPERA *et al.*, 2008):

$$R \equiv \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{\dot{Q}} = \frac{L}{kA} . \quad (2.8)$$

Essa relação é semelhante à lei de ohm de circuitos elétricos, na qual a resistência elétrica é obtida pela razão entre a diferença de potencial e corrente elétrica. Portanto, situações de paredes compostas em que pode haver associações em série e paralelo de resistências térmicas tornam-se matematicamente análogos às situações de associação de resistores em circuitos elétricos (HOLMAN, 1998a).

A transferência de calor também pode ocorrer entre um meio, frequentemente um fluido como ar ou água, com temperatura mais elevada, e outro meio, com um sólido ou outro fluido, com temperatura mais baixa. Esse processo pode englobar diversas camadas com propriedades termofísicas variadas e diferentes espessuras. Portanto, é possível que múltiplos modos de transferência de calor, tais como condução, convecção, radiação e evaporação, desempenhem papéis no processo de transferência (TIWARI; SHYAM, 2016).

Figura 30 – Fluxo de calor unidimensional através de placas paralelas.



Fonte: Tiwari e Shyam (2016)

A Figura 30 ilustra um exemplo de fluxo de calor unidimensional em um sistema composto por um fluido aquecido e uma estrutura de paredes interconectadas. Nesse contexto, os R 's representam as resistências térmicas, que estão inversamente relacionadas com os coeficientes de transferência de calor correspondentes as diversas paredes e camadas de fluido. Para esse exemplo as resistências térmicas são definidas por (TIWARI; SHYAM, 2016):

$$R_a = \frac{1}{h_a A} , R_1 = \frac{L_1}{k_1 A} , R_2 = \frac{L_2}{k_2 A} , R_3 = \frac{L_3}{k_3 A} , R_b = \frac{1}{h_b A} ,$$

nas quais h_a e h_b representam os coeficientes de transferência de calor por convecção referentes aos fluidos laterais; k_1 , k_2 e k_3 representam os coeficientes de transferência de calor por condução das paredes associadas; L_1 , L_2 e L_3 são as espessuras e A a área transversal da parede em relação ao fluxo de calor.

A soma das resistências mencionadas leva à seguinte igualdade:

$$R = R_a + R_1 + R_2 + R_3 + R_b = \frac{T_a - T_b}{\dot{Q}} = \frac{1}{UA} , \quad (2.9)$$

dessas relações obtém-se que o fluxo de calor que atravessa o sistema é determinado pela equação:

$$\dot{Q} = \frac{T_a - T_b}{R} = UA(T_a - T_b) , \quad (2.10)$$

onde, U é o coeficiente geral de transferência de calor, que é inversamente proporcional a resistência total R , dada em (W/m^2K) , e área A , dada em metros quadrados(m^2).

Pela relação em (2.9), o coeficiente U pode ser determinado por:

$$U = \frac{1}{RA} = \frac{1}{[(1 \setminus h_a) + (L_1 \setminus k_1) + (L_2 \setminus k_2) + (L_3 \setminus k_3) + (1 \setminus h_b)]}, \quad (2.11)$$

ou de modo mais geral:

$$U = \left[\frac{1}{h_a} + \sum_1^i \frac{L_i}{k_i} + \frac{1}{h_b} \right]^{-1}, \quad (2.12)$$

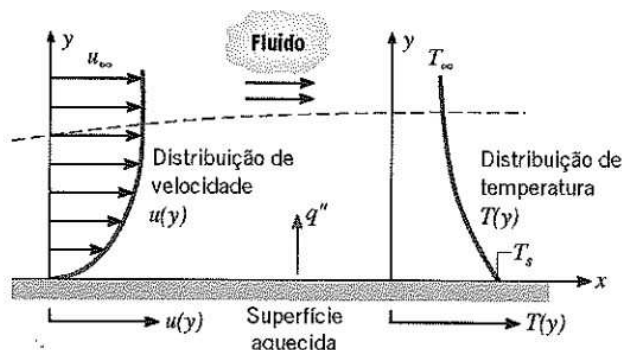
na qual $\sum_1^i L_i/k_i$ representa a soma das resistências térmicas das paredes individuais (L_i sendo a espessura e k_i sendo a condutividade térmica da i -ésima parede).

2.5.2 Transferência de Calor por Convecção

A convecção é definida como o modo de transferência de calor entre uma superfície sólida e um líquido ou gás adjacente em movimento, combinando os efeitos da condução térmica e movimentos de fluidos. Nesse modo de transferência, o escoamento de um fluido sobre a superfície aquecida irá formar regiões no fluido onde a velocidade varia entre zero ($y=0$) e um valor finito u_∞ que identificará a camada limite de velocidade (ÇENGEL; J.GHAJAR, 2012, pg. 25).

No caso das temperaturas da superfície e do fluido diferirem, existirá uma região no fluido em que a temperatura irá variar entre a temperatura da superfície T_s em $y=0$ até uma região de escoamento a uma temperatura T_∞ afastada da superfície e denominada camada limite térmica. Para os casos em que $T_s > T_\infty$ acontecerá a transferência de calor por convecção da superfície para o fluido (INCROPERA *et al.*, 2008).

Figura 31 – Desenvolvimento das camadas limites de velocidade e temperatura na transferência de calor por convecção.

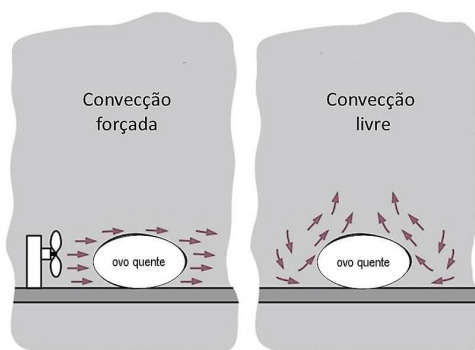


Fonte: Incropera *et al.* (2008)

De acordo com Çengel e J.Ghajar (2012) existem dois tipos de convecção: a forçada e a livre. A convecção forçada ocorre quando o escoamento do fluido é impulsionado pela ação de um ventilador ou bomba, enquanto a convecção livre ou natural é caracterizada

pelo escoamento devido a uma diferença de densidade provocado pela expansão térmica do fluido.

Figura 32 – Esfriamento de um ovo cozido por convecção forçada e livre.



Fonte: Adaptado de (ÇENGEL; J.GHAJAR, 2012)

Usando como modelo o exemplo da Figura 32, na ausência do ventilador, o calor transferido será por convecção natural, porque qualquer deslocamento de ar exige que o ar quente e menos denso próximo da superfície do ovo suba e o ar frio e mais denso ocupe o seu lugar. Por outro lado, a transferência de calor da superfície do ovo para o ar a sua volta será por condução caso a diferença de temperatura entre eles não for suficiente para superar a resistência do ar ao movimento, impedindo a formação das correntes de convecção livre.

Çengel e J.Ghajar (2012) destacam ainda que a transferência de calor que envolve a mudança de fase de um fluido também é considerado como convecção, devido ao movimento induzido durante o processo, como, por exemplo, a elevação de bolhas de um líquido em ebulição ou gotas de líquido caindo durante a condensação.

Apesar de toda a complexidade desse processo, é possível verificar que a transferência de calor por convecção está diretamente relacionada com a diferença de temperatura entre a superfície e o fluido. Dessa forma, a equação da taxa de calor por unidade de área associada a esse processo é conhecida como a *Lei de Newton do Resfriamento*:

$$\dot{q}_{cv} = h_{cv}(T_s - T_\infty), (2.13)$$

onde h é coeficiente de transferência de calor por convecção, dado em $(W/m^2.K)$, T_s é a temperatura superficial do objeto e T_∞ a temperatura da camada limite de temperatura.

Levando em conta a área superficial de um objeto, a taxa de calor transferida por convecção por unidade de tempo será dado pela seguinte expressão:

$$\dot{Q}_{cv} = h_{cv}A(T_s - T_\infty). (2.14)$$

Na convecção, o termo que dificulta o cálculo do calor transferido é o próprio coeficiente de transferência de calor por convecção h_{cv} , devido a sua dependência de diversos fatores. Zemansky (1978) em sua análise sobre o fenômeno convectivo menciona que esse coeficiente depende dos seguintes fatores:

- 1) Se a superfície é plana ou curva.
- 2) Se a superfície é horizontal ou vertical.
- 3) Se o fluido em contato com a superfície é um gás ou um líquido.
- 4) Da densidade, viscosidade, calor específico e condutividade térmica do fluido.
- 5) Se a velocidade do fluido é pequena bastante para que o fluxo seja laminar, ou grande o suficiente para dar lugar a um fluxo turbulento.
- 6) Se ocorre evaporação, condensação ou formação de película (ZEMANSKY, 1978, pg. 91).

O autor enfatiza que as características físicas de um fluido estão sujeitas a variações conforme a pressão e a temperatura. Por essa razão, o cálculo do coeficiente h_{cv} se torna complexo, demandando a aplicação da análise dimensional¹. Essa abordagem é essencial para derivar uma equação que englobe propriedades físicas, velocidade do fluido, constantes e expoentes cujos valores são determinados por meio da experimentação.

2.5.3 Transferência de Calor por Radiação

Nos processos de condução e convecção, a transferência de energia ocorre através de meios materiais. Por outro lado, o calor também pode ser transferido em regiões de vácuo. O mecanismo responsável por esse tipo de transferência de calor é a radiação eletromagnética, que se propaga no espaço como resultado de uma diferença de temperaturas sendo conhecida como radiação térmica (HOLMAN, 1998b).

A radiação térmica provém de objetos sólidos, gases e líquidos com temperatura não-nula. Essa taxa de radiação emitida é proporcional a área A da superfície dos objetos, aumentando a depender da temperatura e da natureza da superfície. Portanto, trata-se de uma radiação emitida delimitada pelo tamanho da superfície dos objetos, na qual a taxa em que a energia é liberada por unidade de área é conhecida como *Poder Emissivo* (E), dado em (W/m^2). Se a superfície é considerada um radiador ideal (corpo negro), então seu poder emissivo é determinado pela *Lei de Stefan-Boltzmann* (INCROPERA *et al.*, 2008; YOUNG; FREEDMAN, 2008; ZEMANSKY, 1978):

$$E_n = \sigma T_s^4, \quad (2.15)$$

onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W/(m^2.K^4)$), e T_s é a temperatura absoluta em kelvin (K) da superfície.

¹ É uma ferramenta usada para determinar como uma grandeza física dependerá de outras presentes em um problema. (TRANCANELLI, 2016)

Para superfícies reais, a emissão térmica é menor que aquela emitida por um corpo negro, necessitando adicionar à equação um termo de ajuste conhecido como *emissividade* (ε) (INCROPERA *et al.*, 2008):

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 , \quad (2.16)$$

sendo ε um número adimensional que representa a eficiência que a superfície emite energia em relação a um corpo negro, assumindo valores entre $0 \leq \varepsilon \leq 1$.

A Equação (2.16) é utilizada para determinar a taxa de energia emitida por uma superfície aquecida. Por outro lado, a radiação proveniente de outras fontes pode incidir sobre essa superfície e uma parte dela pode ser absorvida, assim como ilustrado na Figura 33. A taxa na qual a radiação incide sobre uma superfície é conhecida como *irradiância* (G), a qual é estimada fazendo uma aproximação da emissividade das superfícies vizinhas com aquela de um corpo negro ($\varepsilon = 1$), expressa em watts por metro quadrado (W/m^2):

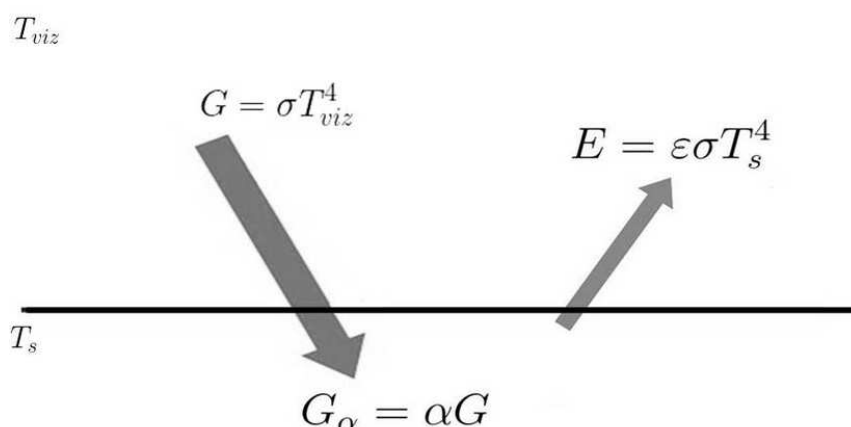
$$G = \sigma T_{viz}^4 . \quad (2.17)$$

No entanto, a taxa na qual a radiação é absorvida G_α , depende de uma propriedade radiante da matéria denominada *absortividade* (α), que mede a capacidade de uma substância de absorver radiação eletromagnética. Ela está intrinsecamente ligada à natureza da radiação, pois cada tipo de radiação tem uma energia diferente e interage de forma diferente com os elétrons, vibrações e rotações das moléculas (INCROPERA *et al.*, 2008). Portanto, a taxa de calor absorvida pela superfície de um corpo pode ser calculada como:

$$G_\alpha = \alpha G , \quad (2.18)$$

em que o coeficiente α varia entre os valores 0 e 1. Quanto mais próximo de 1 mais o corpo absorve radiação, e quanto mais próximo de 0 menos o corpo absorve. A Figura 33 ilustra os fenômenos de absorção e emissão de radiação por uma superfície com temperatura superficial T_s .

Figura 33 – Absorção e emissão de radiação de uma superfície opaca de absorvidade α e emissividade ε .



Fonte: Adaptado de Çengel e J.Ghajar (2012).

Nessa situação a taxa em que a radiação é absorvida pode ser aproximada à taxa de emissão de radiação por um corpo, quando houver uma diferença de temperatura entre a superfície e seu entorno. Essa igualdade pode ser obtida através da *Lei de Kirchhoff* da radiação, a qual afirma que a emissividade e absorvidade de uma superfície a uma determinada temperatura e comprimento de onda são iguais (ÇENGEL; J.GHAJAR, 2012):

$$\alpha(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) . \quad (2.19)$$

Com base nessa igualdade, a taxa líquida de calor emitida por unidade de área pela superfície pode ser expressa como:

$$\dot{q}_r = \frac{\dot{Q}}{A} = \varepsilon E_n - \alpha . G = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{viz}^4) , \quad (2.20)$$

e o fluxo de calor total pode ser determinado ao levar em conta a área superficial (A), o que nos permite calcular a taxa líquida de calor emitido por um objeto por:

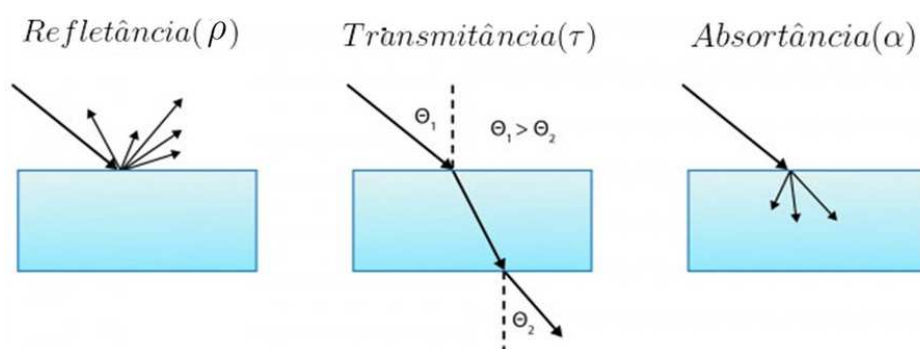
$$\dot{Q}_r = h_r A (T_s - T_{viz}) , \quad (2.21)$$

nessa forma a equação para o fluxo de calor por radiação torna-se análoga à convecção e o termo h_r seria o coeficiente de transferência de calor por radiação, obtida por meio da Equação (2.20) sendo definido como:

$$h_r = \varepsilon\sigma(T_s + T_{viz})(T_s^2 + T_{viz}^2) \quad (2.22)$$

Outros fenômenos podem se manifestar quando a radiação incide sobre uma superfície, como a transmissão através do meio e/ou a reflexão. Assim, quando a energia eletromagnética atinge uma superfície, ela se divide em três partes: a fração absorvida, referida como absorvidade (α), a fração transmitida, denominada transmitância (τ), e a fração refletida, conhecida como refletância (ρ) (ASHRAE, 1997). Esses três fenômenos são exemplificados na Figura a seguir.

Figura 34 – Representação esquemática dos processos de reflexão, transmissão e absorção da radiação eletromagnética.



Fonte: Adaptado de Alves (2022)

A refletância (ρ) é a fração da energia radiante incidente que é refletida por um material quando a radiação incide sobre ele. É a parte da energia que é devolvida pela superfície. A refletância depende das propriedades ópticas e da textura da superfície do material, sendo definida como a razão entre a taxa de radiação refletida (G_ρ) e a taxa de radiação incidente (G):

$$\rho = \frac{G_\rho}{G}, \quad (2.23)$$

com valores no intervalo entre 0 e 1.

A transmitância (τ) é a fração da energia radiante incidente que passa através de um material e emerge do outro lado. Ou seja, é a parte da energia que atravessa a superfície e continua propagando-se. Ela é afetada pelas características ópticas do material, como sua espessura e índice de refração e pode ser calculada pela relação:

$$\tau = \frac{G_\tau}{G} , \quad (2.24)$$

onde G_τ é a taxa energia transmitida pela superfície, dada em (W/m^2) e τ apresenta valores no intervalo de 0 a 1.

De maneira geral, a soma das frações de absorção, transmissão e reflexão totaliza 1. Isso significa que a soma de todas as frações de energia deve equivaler à energia que atingiu a superfície (ASHRAE, 1997):

$$\alpha + \tau + \rho = 1 . \quad (2.25)$$

2.6 Transferência de Massa

No capítulo anterior, como vimos, a diferença de temperatura impulsionou o processo de transferência de energia por diferentes mecanismos. Da mesma forma, quando há uma diferença de concentração, isso leva ao transporte de um componente da mistura de uma área com alta concentração para outra com baixa concentração. Esse processo é conhecido como transferência de massa, a qual ocorrem devido aos processos de difusão e convecção.

A diferença entre difusão e convecção é que a difusão é um processo de transferência de massa que ocorre devido ao movimento aleatório das moléculas de um componente no sentido da diminuição da sua concentração, enquanto a convecção é um processo de transferência de massa que ocorre devido ao movimento macroscópico do fluido que transporta esse componente. A difusão depende apenas da diferença de potenciais químicos ou de concentrações entre duas regiões, enquanto a convecção depende também das condições de escoamento e da geometria do sistema. A difusão pode ocorrer em gases, líquidos ou sólidos, enquanto a convecção só pode ocorrer em gases ou líquidos (INCROPERA *et al.*, 2008).

2.6.1 Composição de Misturas

Para analisar a transferência de massa por difusão e convecção é necessário definir alguns conceitos termodinâmicos. Inicialmente defini-se o próprio conceito de mistura, caracterizada pela junção de duas ou mais substâncias químicas. Nessa mistura cada componente i pode ser quantificado em termos de sua concentração mássica ρ_i (ou densidade) ou pela sua concentração molar C_i (INCROPERA *et al.*, 2008). Esses conceitos termodinâmicos dão origem a duas formas de análise matemática de problemas de difusão mássica, são elas: a base mássica e a base molar (ÇENGEL; J.GHAJAR, 2012).

Na base mássica, a concentração de uma substância em uma mistura é expressa em termos da concentração mássica ou densidade, medida em massa por unidade de volume (kg/m^3). Nessa base, a densidade parcial de um componente é calculada por:

$$\rho_i = m_i/V , \quad (2.26)$$

e a densidade total de uma mistura corresponde ao somatório das densidades parciais de todas as substâncias envolvidas:

$$\rho = \sum m_i/V = \sum \rho_i$$

onde ρ_i é a densidade parcial da i -ésima substância, ρ é a densidade total e V é o volume total da mistura.

Na base molar a concentração de uma substância presente em uma mistura é expressa em termos da concentração molar C , que se refere a quantidade de matéria por unidade de volume. Nesse caso a concentração molar parcial de uma substância que compõe a mistura é dado pela seguinte equação:

$$C_i = n_i/V , \quad (2.27)$$

e a concentração molar de toda a mistura é calculada como o somatório das concentrações de cada substância:

$$C = \sum n_i/V = \sum C_i , \quad (2.28)$$

onde C_i é a concentração molar, em (kmol/m^3); e n_i é a quantidade de matéria do componente i .

Em casos especiais como os tratados nas próximas seções, em baixas pressões uma mistura de gases pode se comportar como um gás ideal com um erro desprezível. Nessas situações, a concentração mássica e a concentração molar dos componentes podem ser definidas através da lei dos gases ideais pelas seguintes equações:

$$\rho_i = \frac{n_i M_i}{V} = \frac{p_i M_i}{RT} \quad (2.29)$$

e,

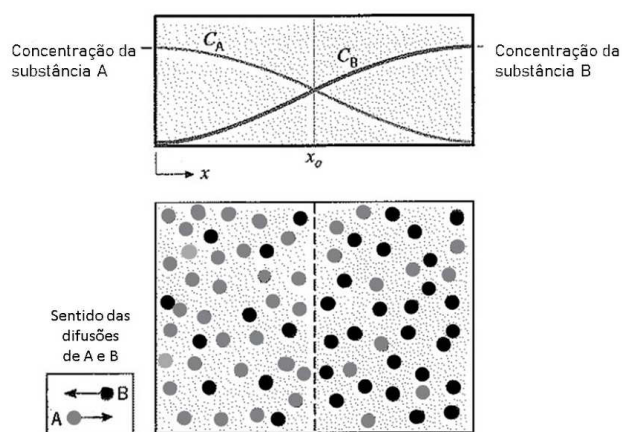
$$C_i = \frac{n_i}{V} = \frac{p_i}{RT} \quad (2.30)$$

nas quais p_i e M_i representam a pressão parcial e a massa molar da substância i , respectivamente; R é constante universal dos gases e T é a temperatura absoluta da mistura (INCROPERA *et al.*, 2008).

2.6.2 Transferência de Massa por Difusão

O transporte de massa por difusão ocorre em misturas de gases, líquidos e sólidos a nível molecular, devido ao gradiente de concentração das substâncias que as compõem, no sentido da diminuição de sua concentração. A difusão caracteriza-se por ser um processo de movimentação lenta em comparação com a convecção. Um exemplo de difusão é retratado na Figura 35, em que uma mistura binária apresenta variação de concentração das substâncias A e B ao longo da mistura. Devido a essa diferença de concentração, ocorre a transferência de massa por difusão dos componentes desde as regiões de alta concentração para as regiões de baixa concentração até atingir o equilíbrio (HOLMAN, 1998b).

Figura 35 – Transferência de massa por difusão em uma mistura gasosa binária.



Fonte: Adaptado de Incropera *et al.* (2008, 560).

Para a difusão de uma substância A em uma mistura binária A e B existirá uma taxa de difusão mássica associada a A, de modo que a equação da taxa é conhecida como *Lei de Fick*, proposta por Fick em 1855. Essa lei afirma que a razão da difusão de uma substância em uma mistura é proporcional ao seu gradiente de concentração no meio (ÇENGEL; J.GHAJAR, 2012).

Na base mássica, a Lei de Fick para o fluxo difusivo de massa, medido em (kg/s.m²), é dada por:

$$J_{dif,A} = \frac{\dot{m}_{dif,A}}{A} = -D_{AB} \frac{d\rho_A}{dx} \quad (2.31)$$

onde $J_{dif,A}$ está em (kg/s.m²), $\dot{m}_{dif,A}$ é o fluxo mássico na direção x dado em (kg/s), A é área transversal ao fluxo difusivo, medido em (m²); D_{AB} é o coeficiente de difusividade

mássica de A na mistura binária de A e B medido em (m²/s); $d\rho_A$ é a diferença de concentração do componente A em relação à posição que ocupa no sistema em (kg/m³) e dx é a distância de um ponto a outro no fluido em metros (m).

Na base molar, a Lei de Fick descreve o fluxo molar, expresso em (kmol/s.m²) e calculado como:

$$J_{dif,A}^* = \frac{\dot{N}_{dif,A}}{A} = -D_{AB} \frac{dC_A}{dx} \quad (2.32)$$

onde $J_{dif,A}^*$ está em (mol/s.m²), $\dot{N}_{dif,A}$ é a taxa de difusão molar, dado em (mol/s.m²), dC_A é o diferença de concentração da substância A em (mol/m³).

O coeficiente de difusidade mássica é uma constante de proporcionalidade que pode ser determinado pela teoria cinética dos gases se a mistura de A e B tiver o comportamento de um gás ideal. Com base nessa teoria, é possível demonstrar que em baixas pressões o coeficiente de difusidade é independente das composições da mistura, crescendo com a temperatura e diminuindo seu valor com o aumento da pressão (INCROPERA *et al.*, 2008):

$$D_{AB} \sim \frac{T^{3/2}}{P} . \quad (2.33)$$

Com base nessa relação Holman (1998a) propõe uma fórmula geral para o cálculo do coeficiente difusidade mássica para sistemas binários desenvolvida de forma semiempírica, baseada nos volumes moleculares dos componentes. Ela é expressa da seguinte forma:

$$D_{AB} = 435,7 \times 10^{-4} \frac{T^{3/2}}{P(V_A^{1/3} + V_B^{1/3})^2} \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}} , \quad (2.34)$$

onde D_{AB} está em metros quadrados por segundo (m²/s), T é a temperatura em Kelvin (K), p é a pressão total do sistema em pascal (Pa), V_A e V_B são os volumes molares dos componentes A e B, medidos em decímetros cúbicos (dm³), M_A e M_B são as massas molares dos componentes A e B, dadas em (kg/mol).

A Tabela 2 mostra como exemplos valores para os coeficientes de difusão mássica de algumas misturas binárias de gases diluídos à 1 atm de pressão e uma temperatura ambiente de 298 K.

Tabela 2 – Coeficientes de difusão binária para misturas gasosas diluídas a 1 atm.

Substância A	Substância B	T(K)	D_{AB} ou D_{BA} (m^2/s)
Ar (atmosférico)	Éter etílico	298	$0,93 \times 10^{-5}$
Ar (atmosférico)	Dióxido de Carbono, CO_2	298	$1,6 \times 10^{-5}$
Vapor de água	Ar (atmosférico)	298	$2,5 \times 10^{-5}$
Vapor de água	Oxigênio, O_2	298	$2,5 \times 10^{-5}$
Vapor de água	Argônio, Ar	298	$2,4 \times 10^{-5}$
Vapor de água	Hélio, He	298	$9,2 \times 10^{-5}$

Fonte: Çengel e J.Ghajar (2012).

2.7 Composição e Propriedades Termodinâmicas do Ar Úmido

2.7.1 Composição do Ar Atmosférico

O ar atmosférico é composto principalmente de nitrogênio (78%), oxigênio (21%), e pequenas quantidades de argônio, gás carbônico, entre outros gases. Também contém vapor de água, além de partículas sólidas e líquidas. A maioria dos gases na atmosfera é encontrada na forma monoatômica, exceto para o oxigênio e o nitrogênio que estão presentes na forma diatômica. A maioria dos gases na atmosfera é produzida naturalmente pela terra, mas alguns são adicionados pela atividade humana, como o dióxido de carbono e os clorofluorcarbonos (MARTINELLI JÚNIOR, 2014).

O ar úmido é caracterizado pela mistura entre o ar seco e o vapor de água. O seu estudo tem uma importância fundamental para o entendimento de vários sistemas termodinâmicos. O estudo detalhado das propriedades físicas do ar úmido se constitui em um campo da física chamado de psicometria, o qual lida com a determinação das condições do ar atmosférico. Mais especificamente, das propriedades termodinâmicas da mistura de ar e vapor de água, usando essas propriedades para analisar processos que envolvem o ar úmido.

A umidade presente no ar seco é quantificada a partir da quantidade de vapor d'água presente, que pode variar entre zero (ar seco) e uma porcentagem máxima que vai depender da temperatura e pressão. Essas condições de pressão e temperatura referem-se à saturação, um estado de equilíbrio entre a água líquida ou sólida e o vapor (SILVA, 2008)(ASHRAE, 1997).

O ar seco é o composto de gases que constituem o ar atmosférico (nitrogênio, oxigênio, argônio, dióxido de carbono, entre outros) com exceção do vapor de água. A

sua composição é praticamente constante, mas pode ter pequenas variações conforme a localização geográfica e altitude. A composição percentual do ar seco é dada na tabela abaixo (ASHRAE, 1997).

Tabela 3 – Composição do ar seco ao nível do mar.

Componente	Fórmula	% em volume	Massa molecular (kg/k.mol)
Nitrogênio	N ₂	78,084	28,016
Oxigênio	O ₂	20,9476	32,000
Argônio	Ar	0,934	39,948
Dióxido de carbono	CO ₂	0,0314	44,010
Neônio	Ne	0,001818	20,183
Hélio	He	0,000524	4,0026
Metano	CH ₄	0,00015	16,03188
Dióxido de Enxofre	SO ₂	0 a 0,0001	64,064
Hidrogênio	H ₂	0,00005	2,01594
Criptônio	Kr	0,0002	93,80
Ozônio	O ₃	0,0002	48,000
Xenônio	Xe	0,0002	131,3

Fonte: ASHRAE (1997).

Considerando os valores as massas molares dos gases e suas respectivas porcentagens na formação do ar atmosférico seco e do vapor de água, obtêm-se as massas molares médias como sendo $M_a = 28,9645$ kg/kmol e $M_w = 18,01528$ kg/kmol, respectivamente, ambas as medidas baseadas na escala do carbono-12 (ASHRAE, 1997).

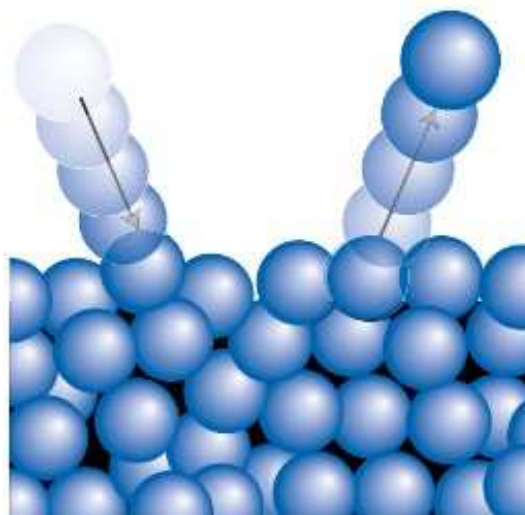
2.7.2 Saturação e Pressão de Vapor

A saturação é um parâmetro importante para o comportamento termodinâmico do ar úmido, sua compreensão exige a análise dos processos de evaporação e condensação. Quando um líquido é exposto ao ambiente, sua camada superficial é submetida a forças opostas, originárias do próprio líquido e do ambiente ao seu redor. Essa camada será impulsionada para cima pelo líquido abaixo, levando à evaporação, e, ao mesmo tempo, empurrada para baixo pela atmosfera gasosa, favorecendo a condensação. Dependendo da predominância de uma dessas forças, podemos observar macroscopicamente o fenômeno de evaporação ou condensação (FOÁ, 1943).

Segundo Atkins, Jones e Laverman (2018), o vapor é gerado à medida que as moléculas de água deixam a superfície líquida. Por outro lado, quando aumenta o número de moléculas na fase gasosa, há mais moléculas disponíveis para condensação. Nessa situação, a condensação ocorre quando as moléculas colidem com a superfície líquida, aderindo a ela e voltando a fazer parte do líquido, essa situação é ilustrada na Figura 36. A temperatura desempenha um papel fundamental nesse processo, pois quando ela aumenta, a energia cinética das moléculas do líquido aumenta, o que, por sua vez, também aumenta a tendência de evaporação. Portanto, é possível perceber que a evaporação é mais acentuada em temperaturas mais altas e em atmosferas gasosas com pressão mais baixa.

Foá (1943) classifica a evaporação como um processo dinâmico, implicando que mesmo em temperaturas baixas ou altas pressões, algumas moléculas ainda podem escapar do líquido. O autor argumenta que esse fenômeno persiste até que eventualmente se alcance a condição de equilíbrio dinâmico, momento em que a probabilidade de evaporação se iguala à de condensação. A partir desse equilíbrio, surge o conceito de saturação, que se refere a essa situação de equilíbrio dinâmico, em que o número de moléculas que retornam ao líquido é igual ao número que escapa, ou seja, o vapor condensa à mesma velocidade em que o líquido evapora. Nesse ponto de equilíbrio, a pressão exercida sobre o líquido pelo seu próprio vapor é denominada pressão máxima de vapor saturado.

Figura 36 – Quando um líquido e seu vapor estão em equilíbrio dinâmico dentro de um recipiente fechado, a velocidade com que as moléculas deixam o líquido é igual à velocidade com que elas retornam.



Fonte: Atkins, Jones e Laverman (2018).

Nesse sentido, a velocidade em que uma determinada substância atinge o estado de saturação mencionado anteriormente irá depender da sua volatilidade. Essa propriedade indica maior ou menor facilidade de uma substância mudar da fase líquida para a gasosa.

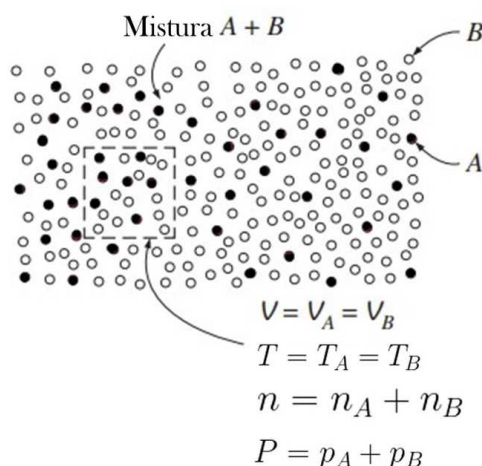
2.7.3 Lei das Pressões Parciais de Dalton

A Lei de Dalton, também conhecida como *Lei das Pressões Parciais*, foi desenvolvida pelo químico e físico britânico John Dalton no final do século XVIII. Essa lei descreve como os gases se comportam quando são misturados. De acordo com a Lei de Dalton, a pressão total de uma mistura de gases é igual à soma das pressões parciais dos gases individuais. A pressão parcial de um gás refere-se àquela pressão que esse gás exerceria se ocupasse sozinho o mesmo volume da mistura. Em outras palavras, a pressão parcial é a contribuição de um gás específico para a pressão total da mistura (FOÁ, 1943).

Segundo Lima (2015) essa lei é válida somente para misturas de gases ideais, onde as partículas não se atraem nem se repelem e nas quais as colisões de cada partícula não são afetadas pela presença das demais.

Para ilustrar esse fenômeno a Figura 37 exemplifica uma situação em que há uma mistura binária de gases, os quais se comportam de acordo com a lei dos gases ideais.

Figura 37 – Ilustração da Lei de Dalton para uma mistura binária de gases.



Fonte: Adaptado de Çengel e J.Ghajar (2012).

Nesse exemplo o volume total V é igual aos volumes individuais das substâncias V_A e V_B . De forma análoga, a Temperatura Total (T) é numericamente igual às temperaturas individuais T_A e T_B . Por outro lado, a quantidade total de matéria representada pelo número de mols n é igual a soma das quantidades de matéria de cada componente da mistura n_A e n_B , assim como a pressão total é igual a soma das pressões individuais das substâncias p_A e p_B . De modo geral, a lei dos gases ideais para uma mistura de vários gases pode ser escrita como (FOÁ, 1943):

$$PV = nRT \quad (2.35)$$

$$(p_1 + p_2 + \dots + p_i)V = (n_1 + n_2 \dots + n_i)RT \quad (2.36)$$

$$p_1v_1 + p_2v_2 + \dots p_iv_i = n_1RT_1 + n_2RT_2 + \dots + n_iRT_i \quad (2.37)$$

Conforme a igualdade entre as Equações (2.36) e (2.37):

$$V = v_1 = v_2 = \dots = v_i , \quad (2.38)$$

e,

$$T = T_1 = T_2 = \dots = T_i , \quad (2.39)$$

E a pressão total é igual a soma das pressões parciais,

$$P = p_1 + p_2 + \dots + p_i , \quad (2.40)$$

sendo essa última expressão a interpretação feita por Dalton (FOÁ, 1943).

2.7.4 Equações de Gases Ideais para o Ar Úmido

Em um gás ideal as relações entre volume, temperatura, pressão e quantidade de gás pode ser descritas pela lei dos gases ideais. Como já discutido, o gás ideal é uma idealização de um gás real no limite da rarefação extrema. As outras condições importantes referem-se à pressão e temperatura, quanto menor a pressão e quanto mais distante a temperatura de um gás está do ponto de liquefação, mais o seu comportamento tem uma boa aproximação do comportamento de um gás ideal (NUSSENZVEIG, 2014).

Observando esses limites, é possível considerar o ar úmido como uma mistura de dois gases perfeitos, vapor de água e ar seco. Desse modo, cada gás deve então obedecer à sua equação de estado de gás perfeito (ASHRAE, 1997).

Para o ar seco a equação de gás perfeito pode ser escrita da seguinte forma:

$$p_aV = n_aRT , \quad (2.41)$$

em que p_a e n_a são a pressão parcial e o número de mols do ar seco, respectivamente.

De forma análoga, a equação de gás perfeito para o vapor de água é expressa como:

$$p_w V = n_w RT , \quad (2.42)$$

onde p_w e n_w são a pressão parcial e o número de mols do vapor de água, respectivamente. O subscrito w vem da palavra inglesa *water* que significa água, ela será empregada ao longo do trabalho sempre que se fizer menção ao vapor de água.

Dessa forma, se cada componente da mistura obedece à lei dos gases ideais então a mistura de ambos também deve obedecer, de modo que a equação que descreve o comportamento dessa situação pode ser escrita como:

$$(p_a + p_w)V = (n_a + n_w)RT \quad (2.43)$$

onde $p_a + p_w$ é a pressão total da mistura e $n_a + n_w$ é o número total de mols da mistura (ASHRAE, 1997).

2.7.5 Densidade Parcial

Como resultado da Lei de Dalton, também podemos derivar as densidades parciais do ar seco e do vapor de água a partir da lei dos gases (USBERCO; SALVADOR, 2013). A densidade parcial do ar seco (ρ_a) pode ser expressa a partir da lei dos gases pela seguinte equação:

$$\rho_a = \frac{p_a M_a}{RT} , \quad (2.44)$$

e a densidade parcial do vapor de água (ρ_w) é dada por:

$$\rho_w = \frac{p_w M_w}{RT} , \quad (2.45)$$

onde p_a é a pressão exercida pelo vapor de água e M_a é a massa molar do vapor de água.

2.7.6 Taxa de Umidade e Pressão de Vapor

A taxa de umidade do ar é a razão entre a massa de vapor de água e a massa de ar seco em um volume de ar (ASHRAE, 1997). Ela pode ser calculada pela seguinte fórmula:

$$x = \frac{m_w}{m_a}, \quad (2.46)$$

ou, em termos das densidades parciais:

$$x = \frac{\rho_w}{\rho_a}. \quad (2.47)$$

Substituindo as Equações (2.44) e (2.45) na Equação (2.47), a taxa de umidade do ar torna-se:

$$x = \frac{M_w p_w}{M_a p_a}. \quad (2.48)$$

Como as massas molares do vapor de água e do ar seco são conhecidas ($M_w = 18,01528$ kg/kmol e $M_a = 28,9645$ kg/kmol), a taxa de umidade irá depender somente das pressões parciais dos compostos da mistura, ou seja:

$$x = 0,62198 \frac{p_w}{p_a}, \quad (2.49)$$

onde a pressão parcial do ar (p_a), conforme a lei de Dalton, é a diferença entre a pressão atmosférica e a pressão parcial de vapor, isto é, $p_a = p - p_w$, e, portanto:

$$x = 0,62198 \frac{p_w}{p - p_w}. \quad (2.50)$$

Com base nessa expressão, a pressão de vapor é determinada por:

$$p_w = \frac{x}{0,62198 + x} p. \quad (2.51)$$

A Equação 2.51 indica que, quanto maior for a taxa de umidade do ar atmosférico maior será a pressão de vapor exercida pelo vapor de água. Nota-se também que a pressão de vapor apresenta um limite referente à situação de saturação que reflete a taxa máxima de umidade de um sistema para uma dada temperatura, e que, portanto, a pressão máxima possível é a pressão de vapor saturado (ASHRAE, 1997).

2.8 Modelos Ambientais para o Cálculo da Radiação

Os modelos ambientais desenvolvidos por Tiwari e Shyam (2016) e Duffie e Beckman (2013) são métodos matemáticos para estimar a radiação solar incidente em superfícies

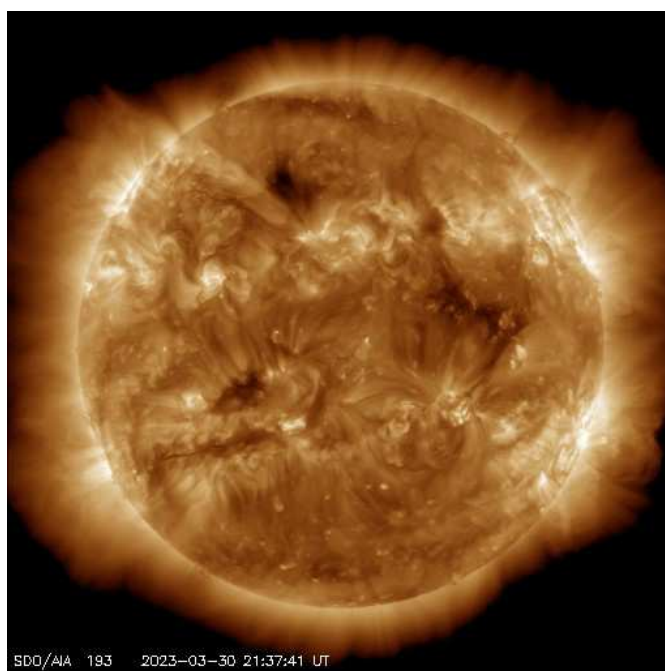
posicionadas na superfície terrestre, considerando os efeitos da atmosfera, da latitude, da declinação solar, do ângulo horário, da inclinação e da orientação da superfície. Esses modelos são baseados na decomposição da radiação solar em componentes direta, difusa e refletida, e na aplicação de fatores de correção para cada componente. Eles são amplamente utilizados em estudos de aproveitamento da energia solar, especialmente em sistemas de aquecimento de água e destilação solar, e que por isso serão usados nas seções seguintes desse trabalho para descrever as radiações incidentes sobre o dessalinizador.

2.8.1 Energia Solar e Radiação

A utilização da energia solar é uma alternativa cada vez mais presente na produção de energia elétrica e térmica em diversos setores, incluindo a dessalinização de água. Para otimizar a eficiência na utilização da energia solar nesses processos, é fundamental analisar os mecanismos de transferência de calor por radiação eletromagnética, bem como os métodos de captação dessa radiação (TIGRE, 2020; TIWARI; SHYAM, 2016).

É importante destacar que o Sol, representado na Figura 38, é a principal fonte de energia para a vida na Terra, sendo uma esfera quase perfeita de gás ionizado, conhecido como plasma, com temperatura superficial de cerca de 5.770 K e massa cerca de 333.000 vezes a da Terra, localizada a cerca de $1,495 \times 10^8$ km de distância do nosso planeta (NASA, 2023; TIWARI; SHYAM, 2016; TAVARES, 2000).

Figura 38 – Fotografia do Sol em 30 de março de 2023 .



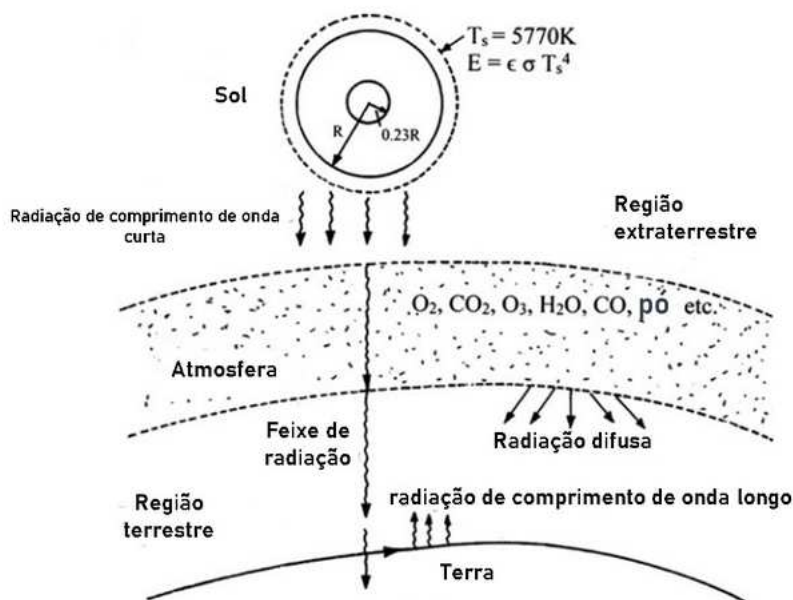
Fonte: SOLAR DYNAMICS OBSERVATORY (2023).

A energia solar é gerada por fusão nuclear no núcleo do Sol, onde temperaturas extremamente altas e pressões fortes permitem que os núcleos de hidrogênio se fundam para formar hélio, liberando cerca de $4,0 \times 10^{23}$ quilowatts por segundo de energia na forma de luz e calor. Essa energia na forma de radiação viaja pelo espaço na velocidade da luz em todas as direções e chega à Terra por volta de 8,3 minutos após sua emissão pelo Sol (TAVARES, 2000).

Tiwari e Shyam (2016) explicam que, ao penetrar na atmosfera terrestre, a radiação solar passa pelo fenômeno conhecido como *Dispersão de Rayleigh* devido à presença de gases atmosféricos. Esse fenômeno é responsável pela separação dos diferentes comprimentos de onda que compõem a luz solar branca e ocorre quando a luz atravessa partículas com dimensões menores do que o comprimento de onda da luz.

A dispersão de Rayleigh é responsável pelo céu diurno ser predominantemente azul, pois as partículas atmosféricas dispersam mais eficientemente a luz azul do que as outras cores do espectro visível. Por outro lado, durante o nascer e o pôr do sol, a luz solar percorre uma distância maior na atmosfera, o que causa um aumento na dispersão. Isso resulta em tons mais quentes de cores, como o laranja e o vermelho, dominando o céu.

Figura 39 – Propagação da radiação solar para a Terra através da atmosfera.



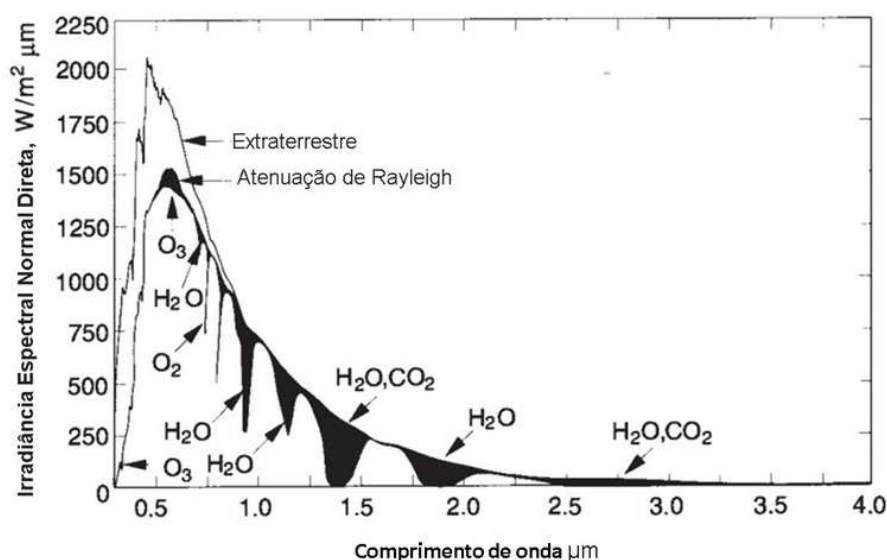
Fonte: Adaptado de Tiwari e Shyam (2016).

A Figura 39 ilustra esse processo de dispersão, o qual faz com que a radiação que chega à Terra se divida em duas componentes: a radiação direta e a radiação difusa. A radiação direta é a radiação solar que chega à superfície em uma linha reta, sem sofrer

dispersão significativa. É a parte da radiação que segue uma trajetória direta do Sol para a superfície. Enquanto a radiação difusa é a radiação solar recebida do Sol após ter sua direção alterada pela dispersão pela atmosfera.

Durante esse processo, certos comprimentos de onda da radiação solar estão sendo absorvidos ao atravessarem a atmosfera gasosa da Terra. Por exemplo, grande parte da radiação ultravioleta é absorvida pelo ozônio (O_3), um gás estratosférico que forma uma camada protetora na atmosfera. A radiação infravermelha, por sua vez, é absorvida pelo vapor de água (H_2O) e dióxido de carbono (CO_2) presentes na atmosfera. Essa absorção ocorre devido às propriedades específicas dessas moléculas, que interagem com a radiação em diferentes faixas do espectro eletromagnético causando uma atenuação na intensidade da radiação que chega a Terra, conforme ilustrado no gráfico da Figura 8 (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

Gráfico 8 – Exemplo dos efeitos do dispersão de Rayleigh e da absorção atmosférica na distribuição espectral da irradiância direta.



Fonte: Adaptado de Duffie e Beckman (2013).

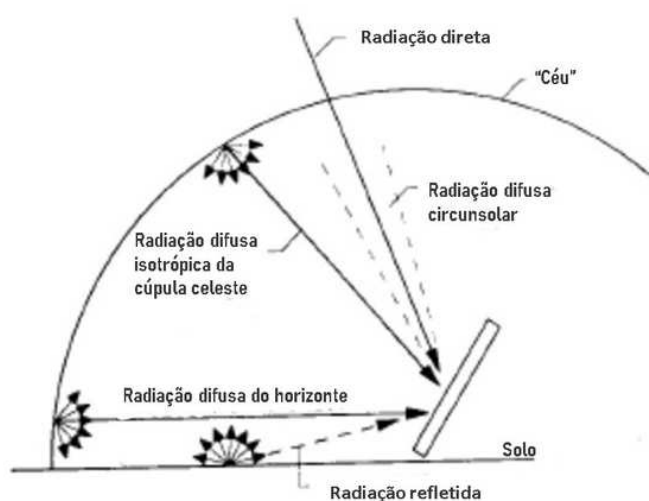
Quando o conjunto de radiações que consegue atravessar a atmosfera atinge a Terra, parte da energia é absorvida pela matéria que compõe o solo, como superfícies terrestres, oceanos e vegetação. A outra parte é refletida de volta para a atmosfera sem sofrer alterações significativas em sua faixa de comprimento de onda, que varia aproximadamente de 0,23 a 2,26 μm . Após ser refletida, parte dessa radiação é novamente absorvida pela atmosfera. Portanto, comprimentos de onda abaixo de 0,29 μm e acima de 2,5 μm do espectro solar são quase completamente absorvidos após interagirem com essas moléculas. Além disso, o vapor de água e outras partículas são responsáveis por dispersar novamente parte da radiação solar refletida (DUFFIE; BECKMAN, 2013; TIWARI; SHYAM, 2016).

Dessa forma, a radiação solar que atinge a superfície terrestre é composta por diferentes comprimentos de onda, que são afetados pela absorção e dispersão atmosférica. No entanto, para estimar a quantidade e a qualidade da radiação solar disponível em uma determinada localidade e superfície, é necessário considerar vários fatores, como a posição do Sol, as condições climáticas, a inclinação e a orientação da superfície. Nesse sentido, a radiação que incide sobre uma superfície terrestre pode ser dividida em radiação direta, que vem diretamente do Sol, a radiação difusa espalhada pela atmosfera e radiação refletida, refletida por outras superfícies. Para explicar como essas radiações variam de acordo com as condições atmosféricas e a inclinação da superfície, foi desenvolvido um modelo de radiação conhecido como modelo HDKR (Hay, Davies, Klucher e Reindl).

Esse modelo leva em conta as características complexas da radiação solar, considerando a distribuição não uniforme da radiação difusa em diferentes direções. Isso permite uma melhor representação da variação espacial da radiação em uma superfície. Nele a radiação difusa é composta por três componentes distintos. A primeira componente é a radiação difusa isotrópica, recebida de forma uniforme de toda a cúpula celeste. A segunda componente é a radiação difusa circumsolar, resultante da dispersão frontal da radiação solar, concentrada na região do céu ao redor do sol. A terceira componente é conhecida como clareamento do horizonte, que se concentra próximo ao horizonte e é mais pronunciada em dias de céu claro (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

A Figura 40 apresenta um esquema ilustrativo dessas três componentes juntamente com as representações das radiações direta e refletida a incidir sobre uma superfície inclinada no solo.

Figura 40 – Componentes da radiação difusa sobre uma superfície inclinada.



Fonte: Adaptado de Jorge (2011).

2.8.2 Geometria Solar

Segundo Rodríguez Gómez *et al.* (2018), a intensidade da radiação solar emitida pelo Sol é aproximadamente 1.367 W/m^2 para uma distância média entre a Terra e o Sol. Essa intensidade é conhecida como a constante solar efetiva, que representa a quantidade total de energia proveniente do Sol que incide sobre uma unidade de área a uma distância de 1 UA (Unidade Astronômica, correspondente à distância média entre a Terra e o Sol). Essa constante é utilizada como referência para o cálculo da radiação solar incidente em diferentes locais da Terra, obtida pela *Lei de Stefan-Boltzmann*.

Essa lei estabelece uma relação entre a temperatura de um objeto e a potência irradiada por ele. Ela afirma que a potência irradiada é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta do objeto. Essa correlação expressa pela fórmula:

$$P = \sigma T^4 A, \quad (2.52)$$

onde P representa a potência irradiada, $T = 5.770 \text{ K}$ é a temperatura aproximada do Sol estimada pela *Lei de deslocamento de Wien*², $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ é a constante de Stefan-Boltzmann e $A = 4\pi R^2$ seria a área da superfície do Sol.

No entanto, para calcular a irradiação que chega à Terra, é essencial utilizar a relação entre a área da superfície solar, de raio $R_{\odot} = 6,957 \times 10^8 \text{ m}$, e a área de uma esfera de raio $R_1 = 1 \text{ UA} = 1,496 \times 10^{11} \text{ m}$. Essa relação pode ser escrita da seguinte equação:

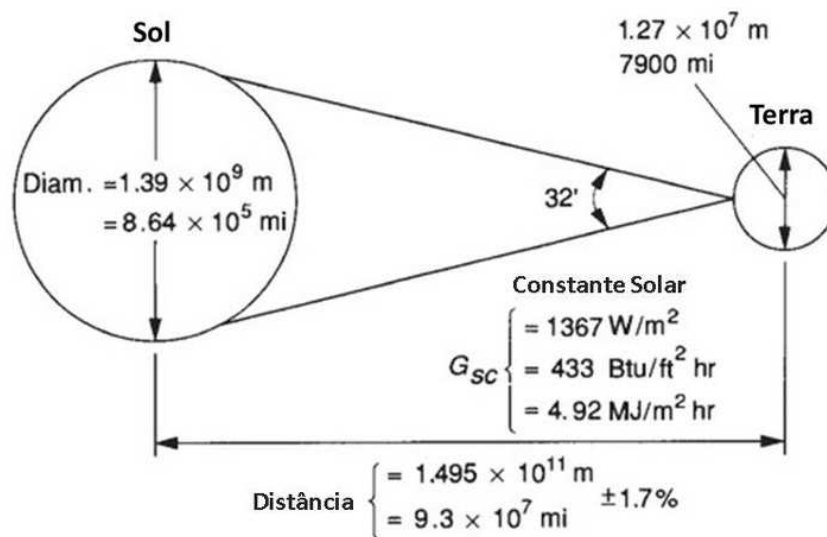
$$P = \sigma T^4 \left(\frac{R_{\odot}}{R_1} \right)^2. \quad (2.53)$$

Assim, obtém-se o valor de aproximadamente $P = 1.367 \text{ W/m}^2$, conhecido como a constante solar efetiva G_{sc} .

2

A Lei de Deslocamento de Wien relaciona a temperatura de um objeto com o comprimento de onda em que ocorre a emissão máxima de radiação. De acordo com essa lei, o comprimento de onda máximo ($\lambda_{\text{máx}}$) está inversamente relacionado com a temperatura absoluta (T) do objeto. Essa lei é expressa pela fórmula $\lambda_{\text{máx}} = b/T$, onde $b = 2,8978 \times 10^{-3} \text{ m.K}$ é a constante de Wien.

Figura 41 – Relação Terra-Sol.



Fonte: Adaptado de Duffie e Beckman (2013).

Entretanto, de acordo com Tiwari e Sahota (2017a) apesar de a intensidade da radiação solar extraterrestre ter uma intensidade quase fixa calculada pela Equação (2.53), porém ela sofre uma variação de cerca de 1,7 % devido à trajetória elíptica do movimento orbital da Terra em torno do Sol. Essa variação na intensidade da radiação extraterrestre pode ser calculado em termos da constante solar efetiva e do número de dias do ano para um plano normal aos raios solares, como:

$$G_{on} = G_{sc} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right], \quad (2.54)$$

em que n representa o dia do ano. Assim, $1 \leq n \leq 365$.

Duffie e Beckman (2013) também apresentam uma função para G_{on} , desenvolvida por Spencer (1971), que segundo eles apresentam uma precisão satisfatória de $\pm 0,01\%$. Essa equação é definida como:

$$G_{on} = G_{sc}(1,000110 + 0,034221 \cos B + 0,001280 \sin B + 0,000719 \cos 2B + 0,000077 \sin 2B), \quad (2.55)$$

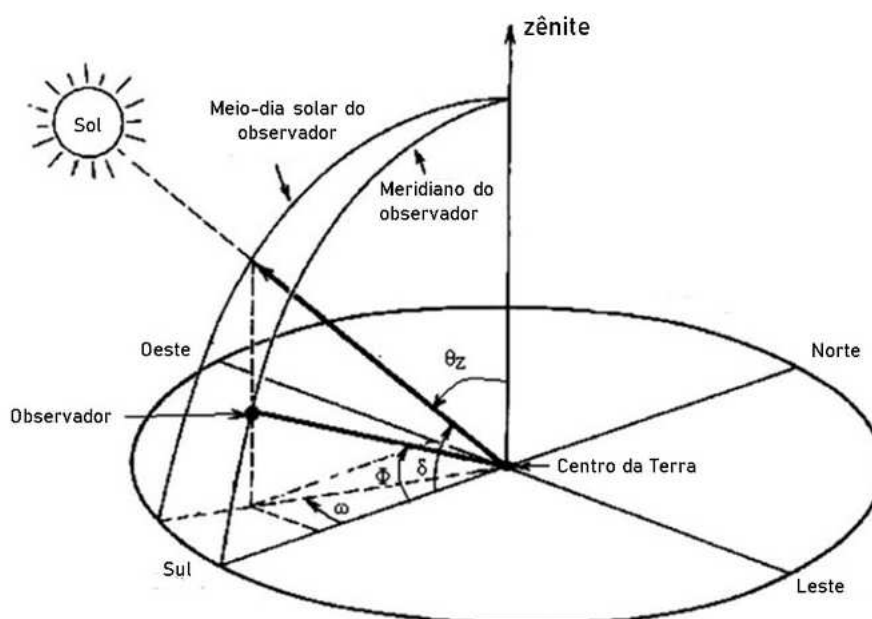
onde B é dado pela equação :

$$B = (n - 1) \frac{360}{265}, \quad (2.56)$$

onde n também representa o dia do ano.

Na superfície terrestre, além do movimento orbital, a quantidade de energia solar varia de acordo com a latitude, estação do ano, condições atmosféricas e horário do dia. Também é necessário levar em conta outros fatores, como o ângulo de inclinação dessa superfície em relação ao plano horizontal, a inclinação do eixo terrestre, o seu posicionamento em relação à linha norte-sul e a altitude do Sol (TIWARI; SAHOTA, 2017a; TIWARI; SHYAM, 2016).

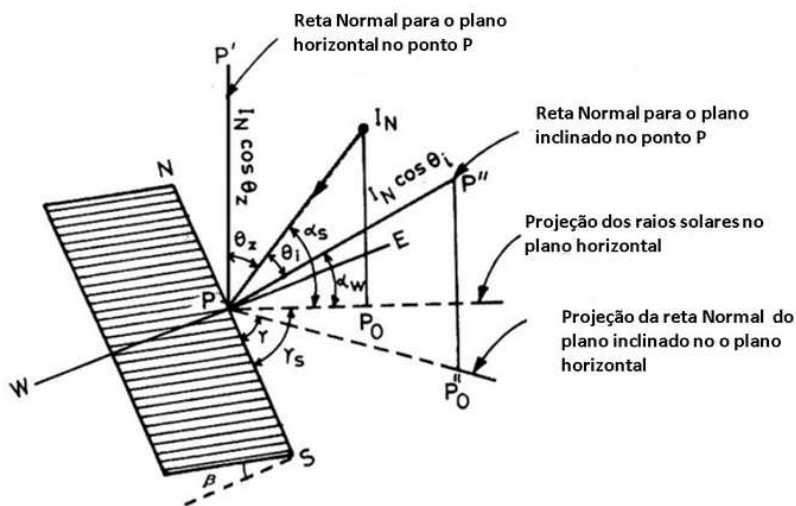
Figura 42 – Representação do ângulo de Zênite, ângulo de inclinação do eixo terrestre, ângulo de latitude e ângulo horário solar.



Fonte: Adaptado de Tiwari e Shyam (2016).

Nesse contexto, Tiwari e Shyam (2016) e Duffie e Beckman (2013) definem uma série de ângulos e termos empregados na estimativa da captação de radiação solar por uma superfície terrestre ou extraterrestre. Esses ângulos estão ilustrados nas Figuras 42 e 43.

Figura 43 – Representação dos ângulos de Zênite, Azimutes, ângulo de altitude solar, ângulo de incidência e ângulo de inclinação de uma superfície inclinada.



Fonte: Adaptado de Tiwari e Shyam (2016).

Ângulo de zênite solar (θ_z): É o ângulo formado pelos raios solares (supondo que eles venham do centro do Sol) em relação ao plano vertical.

Ângulo de inclinação do eixo terrestre (δ): O ângulo de inclinação do eixo terrestre é o ângulo formado entre o eixo de rotação da Terra e o plano orbital ao redor do Sol. Esse ângulo é responsável pela existência das estações do ano e pela variação da duração dos dias ao longo do ano. Durante esse período, o ângulo δ sofre variações em sua inclinação, tendo um valor máximo de 23,45 graus e um valor mínimo de -23,45 graus. A equação geral para o ângulo δ é definido da seguinte forma:

$$\delta = 23,45 \text{ sen} \left[\frac{360}{365} (284 + n) \right] \quad (2.57)$$

onde n representa o número correspondente ao dia do ano.

Tabela 4 – Dia do mês e valores de “n” recomendados.

Mês	n para i-ésimo dia do mês	Data	n	δ (graus)
Janeiro	i	17	17	-20,9
Fevereiro	31+i	16	47	-13,0
Março	59+i	16	75	-2,4
Abril	90+i	15	105	9,4
Mai	120+i	15	135	18,8
Junho	151+i	11	162	23,1
Julho	181+i	17	198	21,2
Agosto	212+i	16	228	13,5
Setembro	243+i	15	258	2,2
Outubro	273+i	15	288	-9,6
Novembro	304+i	14	318	-18,9
Dezembro	334+i	10	344	-23,0

Fonte: Adaptado de Duffie e Beckman (2013, 14).

Ângulo de azimute solar (γ_s): É o ângulo medido entre a projeção horizontal dos raios solares e a direção Norte-Sul no plano horizontal. Esse ângulo é positivo quando o Sol está a oeste da direção Sul e negativo quando está a leste da direção Sul.

Ângulo de azimute de superfície (γ): É o ângulo medido entre a projeção da reta normal do plano inclinado na superfície horizontal e a direção Norte-Sul no plano horizontal.

Hora Solar (ST): A hora solar é baseada no movimento angular aparente do Sol no céu em relação ao meio-dia solar, que é o momento em que o Sol cruza o meridiano do observador.

De acordo com Jorge (2011), a hora solar difere do horário padrão medido nos relógios. Em vista disso, para converter o horário padrão para o horário solar, são necessárias duas correções.

A primeira correção é uma correção constante para levar em conta a diferença de longitude entre o meridiano do observador (L_{loc}) e o meridiano em que o horário padrão local é baseado (L_{st}). Essa correção é necessária porque a hora solar varia de acordo com a localização geográfica. Cada grau de longitude corresponde a aproximadamente 4 minutos de diferença no tempo solar.

A segunda correção é feita por meio da equação do tempo, que leva em consideração as variações na taxa de rotação da Terra ao redor do Sol. Essas variações afetam o momento

em que o Sol cruza o meridiano do observador. A equação do tempo fornece a diferença em minutos entre o tempo solar e o horário padrão local.

Portanto, a diferença entre a Hora Solar (*Solar Time* - ST) e a Hora Padrão (*Standard Time* - STD) é determinada pela combinação dessas duas correções:

$$ST - STD = 4(L_{st} - L_{loc}) + E , \quad (2.58)$$

onde L_{st} representa o meridiano padrão para o fuso horário local, L_{loc} é a longitude da localização em questão. O parâmetro E é um fator de correção em minutos, conhecida como *Equação do Tempo*, definida pela expressão:

$$E = 229,2(0,000075 + 0,001868 \cos(B) - 0,032077 \sin(B) - 0,014615 \cos(2B) - 0,04089 \sin(2B)) , \quad (2.59)$$

onde B é calculado pela Equação (2.56).

Ângulo horário solar (ω): O ângulo horário é determinado pelo deslocamento angular do Sol em relação ao meridiano local devido à rotação da Terra em torno de seu próprio eixo. Ele é medido como o ângulo entre as projeções dos raios solares (meridiano solar) e a linha que vai do Sul para o Norte através do centro, também conhecida como linha meridiana. Em outras palavras, a cada hora, o Sol se desloca 15° em relação ao meridiano local. A expressão para o cálculo do ângulo horário é :

$$\omega = (ST - 12) \times 15^\circ , \quad (2.60)$$

onde ST representa a hora solar local, calculada pela Equação 2.58.

Horas de sol (N): É a duração total em horas do movimento do Sol desde o nascer até o pôr do Sol. Ela pode ser definida em termos do ângulo horário pela seguinte relação:

$$N = \frac{2\omega_s}{15} , \quad (2.61)$$

onde $2\omega_s$ representa o intervalo entre o nascer e o pôr do Sol medido em relação à localização do observador na Terra através da Equação (2.72) e o número 15 é a diferença em graus entre cada longitude.

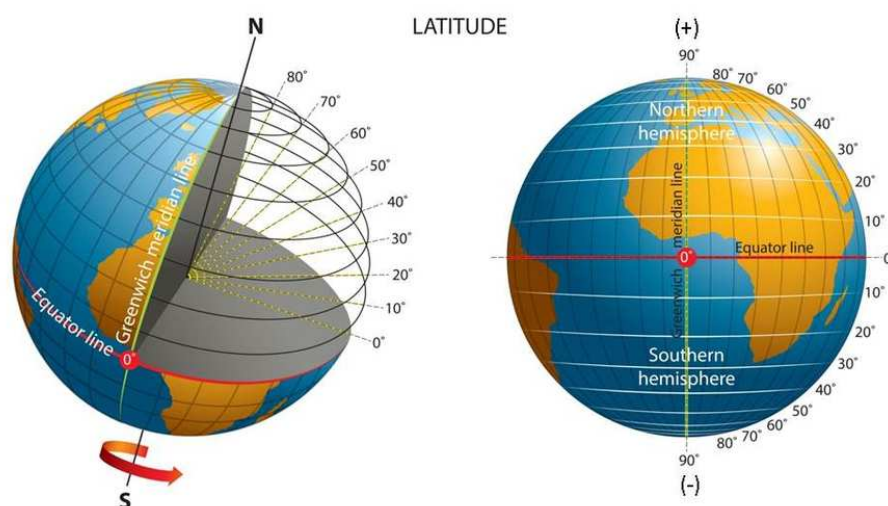
Altitude ou ângulo de altitude solar (α_s): É o ângulo formado entre o plano horizontal e os raios do Sol, sendo importante para determinar a trajetória da radiação solar através da atmosfera até chegar à Terra. Este ângulo é definido como:

$$\alpha_s = 90^\circ - \theta_z \quad (2.62)$$

Inclinação (β): É definida como o ângulo entre a superfície inclinada em questão e a superfície horizontal, como mostrado na Figura 43. Se a superfície plana estiver inclinada para o sul, o valor numérico da inclinação é considerado positivo, enquanto que, se estiver inclinada para o norte, o valor é considerado negativo. Se a superfície está posicionada na horizontal, então $\beta = 0$.

Latitude (ϕ): A latitude de um lugar é definida como o ângulo formado entre a linha imaginária que liga o lugar em questão ao centro da Terra e sua projeção no plano equatorial. No Hemisfério Norte, a latitude é indicada por um valor positivo, enquanto no Hemisfério Sul, é indicada por um valor negativo, ou seja, $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$.

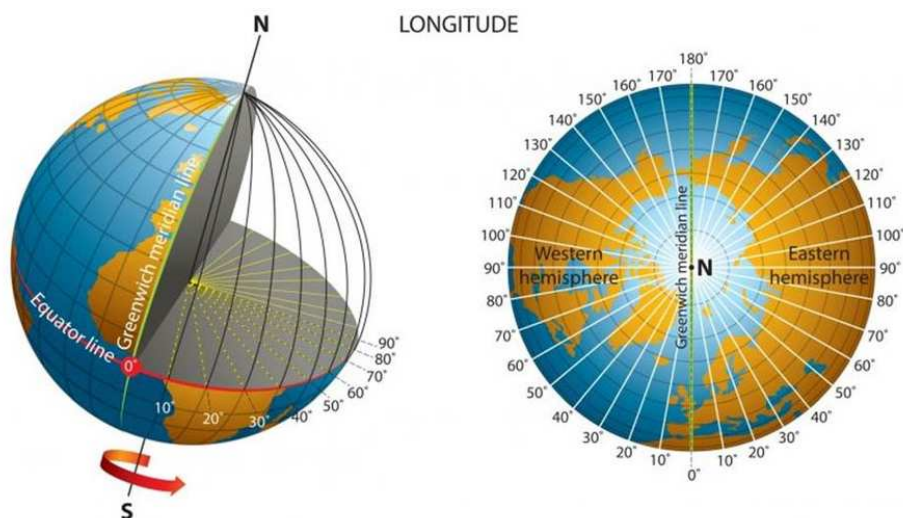
Figura 44 – As latitudes são medidas em graus, iniciando em 0° na Linha do Equador, até 90° nos polos.



Fonte: Gomes (2023).

Longitude (λ): A longitude é uma medida angular que indica a posição de um ponto na superfície da Terra em relação ao meridiano de referência, geralmente o Meridiano de Greenwich. A longitude varia de 0° a 180° , tanto para leste quanto para oeste do Meridiano de Greenwich. Além de determinar as coordenadas geográficas de um lugar, a longitude também está relacionada com os fusos horários, pois cada fuso corresponde a uma faixa de 15° de longitude.

Figura 45 – A longitude é medida em graus, iniciando (0º) e terminando (180º) no Meridiano de Greenwich.



Fonte: Gomes (2023).

Ângulo de incidência (θ_i): É o ângulo formado entre a reta normal da superfície inclinada e os raios solares incidentes. Esse ângulo pode ser calculado pela seguinte equação:

$$\begin{aligned} \cos \theta_i &= (\cos \phi \cos \beta + \text{sen } \phi \text{sen } \beta \cos \gamma) \cos \delta \cos \omega \\ &+ \cos \delta \text{sen } \omega \text{sen } \beta \text{sen } \gamma \\ &+ \text{sen } \delta (\text{sen } \phi \cos \beta - \cos \phi \text{sen } \beta \cos \gamma) \end{aligned} \quad (2.63)$$

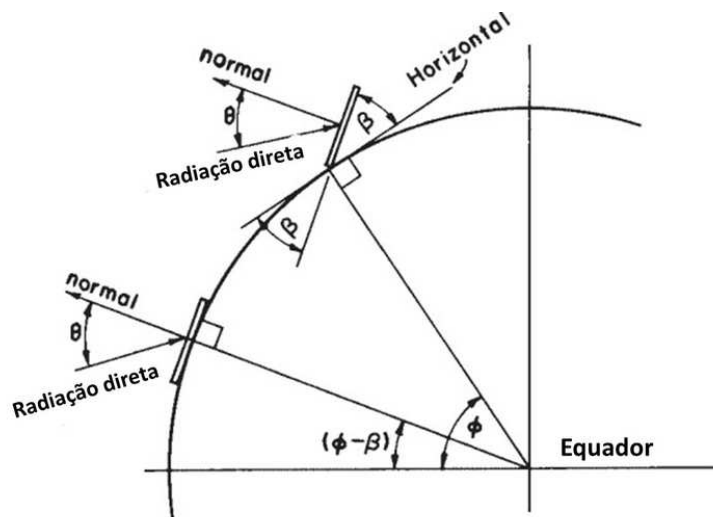
Considerando uma situação em que o plano definido pela superfície do dessalinizador está na horizontal ($\beta = 0$), voltada para o sul ($\gamma = 0$), com a reta normal do plano horizontal definido pelo solo (P') coincidindo, portanto, com a reta normal da superfície do plano inclinado (P'') fazendo um ângulo qualquer com o feixe de raios solares incidentes ($\theta_i = \theta_z$), então a Equação (5.14) torna-se:

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \text{sen } \phi \text{sen } \delta \quad (2.64)$$

As relações úteis para o ângulo de incidência de superfícies inclinadas (θ_i) para o Norte ou Sul podem ser derivadas do fato de que essas superfícies, com um declive β em relação ao plano horizontal, têm a mesma relação angular com o feixe de radiação solar com uma superfície horizontal em uma latitude fictícia de $\phi - \beta$. Essa relação é ilustrada na Figura 46 para o Hemisfério Norte do planeta. Portanto, ao substituir ϕ por $\phi - \beta$ na Equação (2.64), obtém-se:

$$\cos \theta_i = \cos (\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \operatorname{sen} (\phi - \beta) \operatorname{sen} \delta \quad (2.65)$$

Figura 46 – Seção da Terra mostrando β , θ , ϕ e $\phi - \beta$ para uma superfície voltada para o sul.



Fonte: Adaptado de Duffie e Beckman (2013, 16).

Para uma superfície inclinada posicionada no Hemisfério Sul o ângulo de inclinação β é negativo, ou seja, $\beta < 0$. Desse modo, o termo ϕ deve ser substituído por $\phi + \beta$, dando origem a Equação (2.66):

$$\cos \theta_i = \cos (\phi + \beta) \cos \delta \cos \omega + \operatorname{sen} (\phi + \beta) \operatorname{sen} \delta . \quad (2.66)$$

2.8.3 Medições de Radiação Solar

A quantificação da energia solar que atinge uma superfície, tanto na região terrestre quanto na extraterrestre, é de extrema importância para a modelagem matemática do destilador solar. Para isso, são utilizados os termos, irradiância e irradiação, que se distinguem pelo tempo de exposição considerado .

A irradiância, representa o fluxo de energia na qual a energia radiante incide em uma superfície por segundo por unidade de área, medida em W/m^2 . O símbolo G será usado nas equações para se referir a fluxo de energia incidente sobre um plano real ou imaginário, com subscritos apropriados para radiação direta e difusa.

A irradiação, representa a quantidade de energia incidente por unidade de área, obtida pela integração da irradiância ao longo de um tempo especificado, geralmente uma hora ou um dia, medida em (J/m^2) . O símbolo H será usado para radiação diária,

ou seja, a quantidade de radiação incidente no período de um dia. O símbolo I será usado para a irradiação horária (ou outro período, se especificado). Os símbolos H e I representarão as radiações direta, difusa ou total, cada qual especificadas pelos seus subscritos correspondentes

Para distinguir um termo do outro, serão usados subscritos em G , H e I , tais como o , b , d , n e T . O termo o se refere à radiação acima da atmosfera terrestre, chamada de radiação extraterrestre, b refere-se à radiação direta, enquanto d se refere à radiação difusa, T e n se referem à radiação em um plano inclinado e em um plano normal à direção de propagação, respectivamente. Se nem T , nem n aparecerem, a radiação está em um plano horizontal (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

2.8.3.1 Radiação solar no plano horizontal extraterrestre

2.8.3.1.1 Componente da Irradiância Solar Direta Extraterrestre

A irradiância solar (G_0), incidente em um plano horizontal na região extraterrestre, equivale à radiação que incide sobre uma superfície no topo da atmosfera. Conforme Duffie e Beckman (2013), G_0 é uma das componentes da radiação extraterrestre no plano normal aos raios solares (G_{on}), sendo calculada pela seguinte equação:

$$G_o = G_{on} \times \cos \theta_z , \quad (2.67)$$

em que G_{on} é dado pela Equação (2.54). Desse modo:

$$G_o = G_{sc} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \times \cos \theta_z . \quad (2.68)$$

Fazendo a substituição de $\cos \theta_z$, de acordo com a Equação (2.64), obtêm-se:

$$G_o = G_{sc} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] (\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \text{sen} \delta \text{sen} \phi) \quad (2.69)$$

na qual G_{sc} é a constante solar efetiva.

2.8.3.1.2 Irradiação Solar Horária Extraterrestre

A partir da integração da Equação 2.69, é possível obter uma expressão para a radiação extraterrestre que atinge uma superfície horizontal entre os ângulos horários ω_1 e ω_2 , que definem o intervalo de tempo de uma hora ($\omega_1 < \omega_2$). Essa expressão é dada da seguinte forma (TIWARI; SHYAM, 2016):

$$I_o = \frac{12 \times 3600}{\pi} G_{sc} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \times \left[\cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \phi \sin \delta \right] \quad (2.70)$$

onde I_o é medida em (J/m^2).

2.8.3.1.3 Irradiação Solar Diária Extraterrestre

Em muitos casos, torna-se necessário calcular a radiação solar diária em um plano horizontal. Para isso, basta integrar a equação 2.69 considerando o período do nascer do sol em $-\omega_s$ até o pôr do sol em $+\omega_s$. Dessa forma, obtemos a seguinte expressão:

$$H_o = \frac{24 \times 3600}{\pi} G_{sc} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \left[\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \cdot \sin \delta \right] \quad (2.71)$$

Onde, H_o é medido em (J/m^2) e ω_s é calculada pela Equação (2.64), considerando que ao amanhecer e ao por do Sol o ângulo zênite é $\theta_z = 90^\circ$. Desse modo:

$$0 = \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega_s + \sin \delta \cdot \sin \phi$$

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \cdot \tan \delta) \quad (2.72)$$

onde o subscrito s é a sigla para *sunset* (pôr do Sol).

Com base nessa expressão, pode-se obter o ângulo horário total do nascer ao pôr do sol como sendo a medida do deslocamento angular do sol em relação a um observador posicionado na superfície terrestre, o que equivale ao dobro do período entre o meio-dia solar, em $\theta_z = 0^\circ$, e o por do sol, em $\theta_z = 90^\circ$, isto é:

$$2\omega_s = 2\cos^{-1}(-\tan \phi \cdot \tan \delta) . \quad (2.73)$$

2.8.3.2 Radiação Solar no Plano Horizontal Terrestre

2.8.3.2.1 Irradiância Direta e Difusa

Como já discutido, ao adentrar na atmosfera terrestre a radiação se divide em duas componentes: a radiação direta e a difusa. Para uma superfície horizontal na Terra, o cálculo da radiação total incidente pode ser compreendido como a soma das radiações direta e difusa como definido por Duffie e Beckman (2013). Segundo os autores, para um dia de céu limpo, a taxa de radiação global (G) nessa superfície é dada da seguinte forma:

$$G = G_b + G_d ,$$

onde G_d é a componente de radiação difusa no plano horizontal terrestre, calculada por:

$$G_d = G_o \cdot \tau_d , \quad (2.74)$$

e G_b é a componente horizontal na radiação direta que pode ser obtida pela expressão:

$$G_b = G_o \cdot \tau_b \quad (2.75)$$

nas equações (2.74) e (2.75) G_o é obtida pela Equação (2.69), τ_d transmitância atmosférica difusa e τ_b é a transmitância atmosférica direta.

A transmitância direta e difusa da atmosfera afeta a quantidade e a qualidade da radiação solar que chega à superfície terrestre. Por isso, é importante medir e modelar esses parâmetros com precisão e confiabilidade. Uma expressão para a transmitância atmosférica difusa foi determinada empiricamente por Liu e Jordan (1960). Estes pesquisadores definiram que, em dias de céu limpo, a transmitância difusa é calculada pela relação entre a irradiância difusa e a irradiância direta extraterrestre no plano horizontal. Dessa forma a transmitância difusa é dada por:

$$\tau_d = \frac{G_d}{G_o} = 0,271 - 0,294 \cdot \tau_b . \quad (2.76)$$

Para determinar a transmitância atmosférica direta (τ_b) é comum utilizar-se o modelo proposto por Hottel (1976). Esse autor propôs um método para calcular a radiação direta transmitida em atmosferas limpas, levando em conta o ângulo zenital e a altitude, considerando uma atmosfera padrão e quatro tipos de climas distintos com um erro máximo de 0,4%. Essa relação é dada da seguinte forma:

$$\tau_b = a_0 + a_1 \cdot e^{-\frac{k}{\cos \theta_z}} , \quad (2.77)$$

os termos a_0 , a_1 e k são definidos como funções da visibilidade atmosférica e da altitude local:

$$a_0 = r_o \cdot (0,4237 - 0,00821 \cdot (6 - A)^2) , \quad (2.78)$$

$$a_1 = r_1 \cdot (0,5055 + 0,005995 \cdot (6,5 - A)^2) , \quad (2.79)$$

$$k = r_k \cdot (0,2711 + 0,01858 \cdot (2,5 - A)^2). \quad (2.80)$$

onde r_0 , r_1 e r_k são fatores de correção relacionados a cada tipo de clima, sejam eles: tropical, verão de meia latitude, verão subártico e inverno de meia latitude. Seus valores são dados conforme a Tabela 5, enquanto A representa a altitude do local em relação ao nível do mar, medida em quilômetros (km). De acordo com Hottel (1976), para que essas expressões sejam válidas, a altitude deve ser menor que 2,5 km.

Tabela 5 – Fatores de correção para cada tipo de clima

Tipo de clima	r_0	r_1	r_k
Tropical	0,95	0,98	1,02
Verão de meia latitude	0,97	0,99	1,02
Verão sub-ártico	0,99	0,99	1,01
Inverno de meia latitude	1,03	1,01	1,00

Fonte: Adaptado de Duffie e Beckman (2013)

2.8.3.2.2 Irradiação horária Direta, Difusa e Total

Uma das formas de calcular a irradiação horária direta e difusa sobre um plano horizontal, leva em conta que o céu está totalmente limpo de nuvens, restando apenas os gases atmosféricos. Considerando essa situação, a equação para irradiação horária direta pode ser definida da seguinte forma (DAMASCENO, 2016):

$$I_b = I_o \cdot \tau_b \quad (2.81)$$

onde I_o é a irradiação horária extraterrestre no plano horizontal calculada pela Equação (2.70) e τ_b é a transmitância atmosférica direta definida pela Equação (2.77).

De forma semelhante, a irradiação horária difusa para o plano horizontal seria dada por:

$$I_d = I_o \cdot \tau_d, \quad (2.82)$$

onde τ_d é a transmitância atmosférica difusa definida pela Equação (2.76).

Assim, a irradiação horária total sobre uma superfície horizontal terrestre pode ser obtida a partir da soma das equações 2.81 e 2.82:

$$I = I_b + I_d . \quad (2.83)$$

Por outro lado, em horas de céu nublado com claridade reduzida, as radiações horárias direta e difusa sofrem com atenuações em suas intensidades. De acordo com os trabalhos de Tiwari e Shyam (2016), esse problema pode ser corrigido utilizando um termo conhecido como índice horário de claridade horário k_T , determinado pela razão entre a radiação direta em uma superfície horizontal terrestre em relação a uma superfície extraterrestre:

$$k_T = \frac{I}{I_o} , \quad (2.84)$$

Para um valor conhecido de k_T , a irradiação horária total pode ser obtida a partir da Equação (2.84). Em relação ao cálculo da radiação horária difusa, esta pode ser estimada a partir de correlações desenvolvidas empiricamente por Orgill e Hollands (1977) para diferentes intervalos de claridade, escritas como:

$$I_d = (1,0 - 0,248k_T)I \quad \text{para } k_T < 0,35 , \quad (2.85)$$

$$I_d = (1,557 - 1,84k_T)I \quad 0,35 < k_T < 0,75 , \quad (2.86)$$

e,

$$I_d = 0,177.I \quad \text{para } k_T > 0,75 , \quad (2.87)$$

nas quais I é a irradiação horária total.

2.8.3.2.3 Irradiação Diária Direta e Difusa

Para determinar a quantidade de irradiação direta e difusa que atinge uma superfície na Terra, é utilizado um termo conhecido como índice de claridade diária, K_T . Esse índice é definido por Tiwari e Shyam (2016), como a razão entre a radiação solar diária direta em um plano horizontal terrestre de um determinado dia e a radiação solar diária extraterrestre correspondente para esse dia. Essa relação pode ser expressa pela seguinte equação:

$$K_T = \frac{H}{H_o} , \quad (2.88)$$

onde H é a irradiação solar diária em um plano horizontal terrestre e H_o é irradiação solar diária extraterrestre calculada pela Equação (2.71).

Assim, com um valor conhecido de K_T em um determinado dia do ano, é possível estimar o valor de H por:

$$H = K_T.H_o , \quad (2.89)$$

e a estimativa para a radiação diária difusa H_d é feita por uma correlação entre a radiação solar diária difusa e direta, proposta em termos do índice de claridade diário K_T .

Para um dia com índice de claridade no intervalo $0 \leq K_T \leq 0,17$, a radiação diária difusa é estimada por:

$$H_d = 0,99H , \quad (2.90)$$

indicando que em um dia de claridade reduzida a radiação difusa tem um valor elevado.

No intervalo entre $0,17 < K_T < 0,75$:

$$H_d = (1,188 - 2,72K_T + 9,473K_T^2 - 21,865K_T^3 + 14,685K_T^4)H . \quad (2.91)$$

Para $0,75 < K_T < 0,80$:

$$H_d = (-0,5K_T + 0,632)H . \quad (2.92)$$

E no intervalo $0,80 \leq K_T$:

$$H_d = 0,2H , \quad (2.93)$$

sendo que nesse intervalo a claridade será alta e a radiação difusa tem seu valor reduzido.

Essas relações permitem estimar a quantidade de radiação difusa com base na radiação direta observada, facilitando a separação dos componentes direto e difuso da radiação solar que atingem uma superfície horizontal terrestre (COLLARES-PEREIRA; RABL, 1979).

2.8.3.3 Radiação Solar no Plano Inclinado Terrestre

Para estimar a quantidade de radiação que atinge um plano inclinado na superfície terrestre, utilizamos fatores de conversão que permitem calcular a quantidade de radiação nesse plano com base na radiação incidente em um plano horizontal no mesmo local. Esses fatores de conversão são usados para determinar a irradiação solar direta, difusa e refletida sobre o plano inclinado. Para cada tipo de radiação, são aplicados fatores de conversão específicos, que nos fornecem os valores correspondentes. Abaixo estão os fatores de conversão utilizados para cada tipo de radiação (TIWARI; SAHOTA, 2017a; TIWARI; SHYAM, 2016):

- Fator R_b : Para a radiação direta, o fator de conversão R_b é utilizado para calcular a irradiação direta em planos inclinados. Ele é definido como a razão entre a irradiação horária total incidente em uma superfície inclinada I_T e a irradiação horária total em uma superfície horizontal I . Portanto, é possível obter essa razão da seguinte forma:

$$R_b = \frac{I_T}{I} = \frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_z}, \quad (2.94)$$

onde $\cos \theta_z$ é obtido pela Equação (2.64) e $\cos \theta_i$ pode ser determinado por meio das Equações (2.64), (2.65) ou (2.66), as quais dependem da posição da superfície em relação ao solo e da localização geográfica (Hemisférios Sul ou Norte).

- Fator R_d : Esse fator de conversão representa a proporção entre a taxa de radiação difusa que incide na superfície inclinada em relação àquela que incide na superfície horizontal. Para determinar essa proporção, considera-se que a radiação difusa origina-se de um céu isotrópico, uma vez que não há modelos específicos de distribuição para a radiação difusa, conforme explicado por Tiwari e Sahota (2017a). Portanto, o fator de conversão R_d é definido da seguinte forma:

$$R_d = \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (2.95)$$

- Fator R_r : O fator de conversão R_r é utilizado para calcular a radiação solar refletida e leva em consideração as radiações solares refletidas pelo solo e por outros objetos próximos à superfície de interesse. Essas radiações refletidas são tratadas como difusas e isotrópicas e o fator de conversão R_r pode ser expresso da seguinte forma:

$$R_r = \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (2.96)$$

2.8.3.3.1 Irradiação Solar Total em Superfície Inclinada

Como alternativa aos modelos de irradiação que consideram o céu como isotrópico, existem modelos aprimorados que consideram os componentes difusos circunsolares e de brilho no horizonte sobre uma superfície inclinada, como mostrado esquematicamente na Figura 40. Hay e Davies (1980) estabeleceram um modelo de radiação no qual explicitaram nos cálculos a fração da radiação difusa circunsolar e consideraram que toda a radiação circunsolar vinha da mesma direção da radiação direta. No entanto, eles não incluíram o brilho no horizonte em suas equações. Para preencher essa lacuna, Reindl et al. (1990) adicionaram um termo de brilho no horizonte ao modelo de Hay e Davies, proposto por Klucher (1979), resultando em um modelo chamado modelo HDKR (Hay, Davies, Klucher e Reindl) (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

Conforme descrito por Duffie e Beckman (2013), o modelo HDKR define que a irradiação horária solar total em uma superfície inclinada que forma um ângulo β em relação à horizontal, é dada por:

$$I_T = (I_b + I_d A_i) R_b + I_d (1 - A_i) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left[1 + f \cdot \text{sen}^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] + I \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (2.97)$$

onde I_b , I_d e I são as radiações horárias direta, difusa e total no plano horizontal, ρ_g representa a refletância da superfície de vidro, f é um fator de modulação e A_i é um índice de anisotropia que representa a transmitância atmosférica para radiação direta. O índice de anisotropia pode ser calculado como a razão da radiação horária direta e a radiação horária extraterrestre no plano horizontal:

$$A_i = \frac{I_b}{I_o} \quad (2.98)$$

O índice A_i é utilizado para caracterizar o grau de dispersão direta da radiação difusa. Em condições claras, onde a transmitância da atmosfera para a radiação direta é alta, o índice de anisotropia será próximo de 1, indicando que a maior parte da radiação difusa é dispersa na mesma direção da radiação direta. Isso ocorre porque a atmosfera possui poucas partículas ou nuvens para espalhar a radiação de forma aleatória. Por outro lado, quando há pouca radiação direta (como em dias nublados), o índice será próximo de zero, o que significa que toda a radiação difusa é espalhada de forma isotrópica, reduzindo a Equação (2.97) a:

$$I_T = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (2.99)$$

Já o fator de modulação é um termo de correção introduzido ao modelo HDRK por Reindl et al. (1990), para levar em conta os efeitos da nebulosidade do céu é definido como a raiz quadrada da razão entre a radiação horária direta e total no plano horizontal, I_b e I . Essa relação é dada por:

$$f = \sqrt{\frac{I_b}{I}} = \sqrt{\frac{I_b}{I_b + I_d}} . \quad (2.100)$$

Quando a quantidade de radiação direta é menor, o fator de correção f será mais próximo de 0, indicando que a radiação difusa é a principal contribuinte. Por outro lado, em dias ensolarados, onde a radiação direta é mais significativa, o fator f será próximo de 1, indicando uma maior influência da radiação direta (DUFFIE; BECKMAN, 2013; BOYD, 2013).

3 METODOLOGIA

3.1 Modelos Ambientais para a Radiação e Modelo do Balanço de Energia para o Destilador

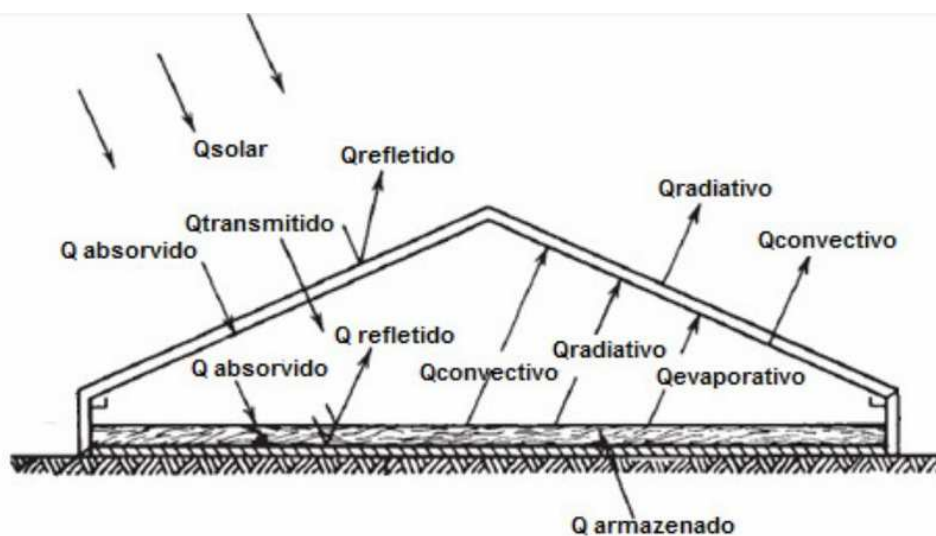
A modelagem matemática dos processos térmicos de um destilador solar passivo é um campo de pesquisa em constante desenvolvimento. A fim de estudar um destilador solar, é importante ter um modelo matemático que possa descrever com precisão o seu comportamento. Neste capítulo, serão definidas as principais equações de transferência de calor a serem consideradas, baseadas no modelo térmico de Dunkle (1961) e nos modelos ambientais de Duffie e Beckman (2013) e Tiwari e Shyam (2016) apresentados na Seção 2.8.

3.1.1 Modelo Térmico

3.1.1.1 Balanço de Energia

O primeiro ponto discutido é o balanço de energia macroscópico dos principais componentes do destilador. Os resultados apresentados a seguir compreendem as soluções das equações de balanço de energia para a tampa de vidro (g), bacia (b), água (w), paredes ($wall$) e o ar interno (a). Lisboa, Segurado e Mendes (2022) trazem as equações de balanço de energia para conforme o modelo proposto por Dunkle (1961), o qual é ilustrado na Figura 47.

Figura 47 – Modos de transferência de calor interna e externa



Fonte: Adaptado de Duffie e Beckman (2013).

Para a cobertura de vidro, o balanço de energia é composto pela entrada de energia por radiação solar, $Q_{sun,g}$, o calor recebido por convecção do ar no interior do destilador, $Q_{c,a-g}$, o calor latente recebido pelo processo de condensação da água na parte interna do vidro, Q_{cond}^1 , o calor recebido por radiação da água e paredes, $Q_{r,g}$, o calor perdido por radiação para o ambiente, $Q_{r,g-sky}$, e o calor transferido por convecção causada pelo fluxo de ar externo, $Q_{c,g-out}$:

$$(m.c_p)_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = Q_{sun,g} + Q_{c,a-g} + Q_{cond} + Q_{r,g} - Q_{r,g-sky} - Q_{c,g-out} , \quad (3.1)$$

onde m e c_p são a massa e o calor específico a pressão constante da cobertura de vidro, $\frac{\partial T_g}{\partial t}$ representa a variação de temperatura da cobertura de vidro ao longo do tempo. Os subscritos *sun*, *sky*, *out* (*outside*) e *g* (*glass*) significam *Sol*, *céu*, *fora* e *vidro*, respectivamente. Nesse balanço energético, o termo $Q_{r,g}$ é definido pela expressão:

$$Q_{r,g} = Q_{r,w-g} + \sum h_{r,wall-g} A_g (T_g - T_{wall}) F_{wall-g} , \quad (3.2)$$

onde o primeiro termo $Q_{r,w-g}$ seria a quantidade de calor por radiação transferida da água para o vidro, e o segundo termo somatório da radiação recebida por cada parede, no qual F_{wall-g} é fator de forma, definido como a fração de radiação emitida por uma superfície interceptada por outra superfície, sendo, portanto, a proporção da radiação trocada entre o telhado de vidro e as paredes do destilador, $h_{r,wall-g}$ é o coeficiente de transferência de calor por radiação entre o vidro e as paredes, A_g é a área da cobertura de vidro, T_g e T_{wall} são as temperaturas do vidro e das paredes, respectivamente.

O balanço de energia para a bacia que armazena a água é composto pelo calor absorvido por meio da radiação solar incidente, $Q_{sun,b}$, o calor perdido por convecção para a água logo acima, $Q_{c,b-w}$, e o calor perdido para o exterior através da condução de calor da bacia para as paredes e das paredes para o exterior por meio da convecção, $Q_{lost,b}$:

$$(m.c_p)_b \frac{\partial T_b}{\partial t} = Q_{sun,b} - Q_{c,b-w} - Q_{lost,b} . \quad (3.3)$$

O volume de água na bacia possui um balanço de energia composto pelo calor absorvido através da absorção da radiação solar $Q_{sun,w}$, pelo ganho de calor por convecção da bacia para a água $Q_{c,b-w}$, pela perda de calor por convecção para o ar logo acima $Q_{c,w-a}$, também perde calor ao ceder energia para a evaporação, Q_e , e perde calor também na forma de radiação para as paredes e cobertura do destilador, $Q_{r,w}$:

$$(m.c_p)_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = Q_{sun,w} - Q_e - Q_{r,w} - Q_{c,w-a} + Q_{c,b-w} , \quad (3.4)$$

¹ subscrito cond = condensação

onde Q_e pode ser calculado como produto do fluxo mássico de água na forma de vapor, \dot{m}_w , seu calor específico, $c_{p,w}$, e a diferença entre as temperaturas da superfície da água e a superfície interna da cobertura de vidro, T_w e $T_{g,in}$.

$$Q_e = \dot{m}_w \cdot c_{p,w} (T_w - T_{g,in}) . \quad (3.5)$$

No caso das paredes do destilador, o balanço de energia e composto pelos ganhos de calor por radiação provenientes da radiação solar e da emissão de radiação do volume de água, $Q_{sun,wall}$ e $Q_{r,w-wall}$, respectivamente. Além disso, as paredes perdem calor na forma de radiação para a cobertura de vidro, $Q_{r,wall-g}$, para o ar confinado no gabinete, $Q_{c,wall-a}$, e para a atmosfera em volta por convecção e radiação, $Q_{c,wall-out}$ e $Q_{r,wall-out}$.

$$(m \cdot c_p)_{wall} \frac{\partial T_{wall}}{\partial t} = Q_{sun,wall} + Q_{r,w-wall} - Q_{r,wall-g} - Q_{c,wall-a} - Q_{c,wall-at} - Q_{r,wall-at} . \quad (3.6)$$

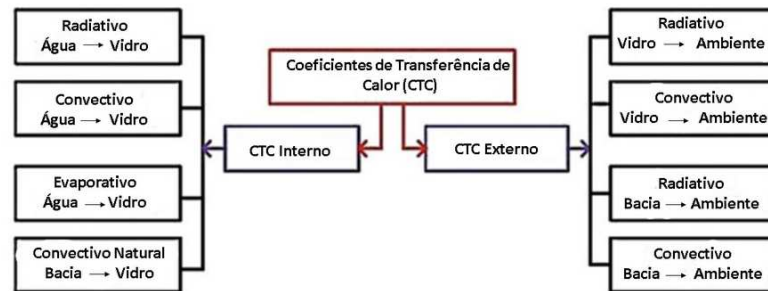
Por fim, o balanço de energia para o ar confinado no interior do gabinete do destilador é composto pelo ganho de calor por convecção devido às interações dele com a água, $Q_{c,w-a}$, paredes, $Q_{c,wall-a}$, e cobertura de vidro $Q_{c,a-g}$.

$$(m \cdot c_p)_a \frac{\partial T_a}{\partial t} = Q_{c,w-a} + Q_{c,wall-a} - Q_{c,a-g} . \quad (3.7)$$

3.1.2 Equações de Taxas

No contexto de um sistema de destilação solar, a transferência de calor pode ser classificada amplamente em duas categorias: (i) transferência de calor interna e (ii) transferência de calor externa, como mostrado no fluxograma da Figura 48. Tais transferências de calor são de extrema importância para o entendimento de um sistema de destilação solar. Para cada categoria, existem os coeficientes de transferência calor associados, sendo determinados a partir das propriedades físicas de cada componente e das condições termodinâmicas (TIWARI; SAHOTA, 2017a).

Figura 48 – Coeficientes de transferência de calor associado ao destilador solar passivo.



Fonte: Adaptado de Tiwari e Sahota (2017a).

3.1.2.1 Taxas de Transferência de Calor Externo

3.1.2.1.1 Cobertura

A perda de calor da cobertura de vidro para o exterior, por meio dos processos de radiação e convecção, pode ser descrita utilizando as leis de Stefan-Boltzmann e a Lei de resfriamento de Newton. A taxa de perda de calor para os processos de radiação e convecção é expressa pela seguinte equação (INCROPERA *et al.*, 2008):

$$\dot{q}_g = \dot{q}_{r,g} + \dot{q}_{cv,g} \quad (3.8)$$

onde \dot{q}_g representa a taxa de calor perdido por segundo por unidade de área, medida em (W/m^2).

Individualmente, a taxa de calor perdido por radiação $\dot{q}_{r,g}$ é obtido a partir Lei de Stefan-Boltzmann, Equação 2.16. Por meio dessa lei é possível calcular a taxa de energia radiativa emitida pela face externa do vidro a partir da expressão (DUFFIE; BECKMAN, 2013):

$$\dot{q}_{r,g} = \varepsilon_g \cdot \sigma (T_{g,out} + 273)^4, \quad (3.9)$$

onde ε_g é a emissividade total do vidro, σ é constante de Stefan-Boltzmann e $T_{g,out}$ é a temperatura da face externa do vidro em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$). Entretanto, a superfície de vidro pode não estar em equilíbrio térmico com o ambiente externo, o que significa que a temperatura aparente do céu difere da temperatura da face externa do vidro, resultando

em troca de calor radiativo entre esses dois elementos. Nesse caso, a taxa que determina a troca líquida de radiação é dada por:

$$\dot{q}_{r,g} = \varepsilon_g \cdot \sigma [(T_{g,out} + 273)^4 - (T_{sky} + 273)^4] , (3.10)$$

onde T_{sky} representa a temperatura aparente do céu ($^{\circ}C$).

A Equação (3.10) pode ser simplificada em termos das temperaturas do vidro e do ambiente como:

$$\dot{q}_{r,g} = h_{r,g}(T_{g,out} - T) , (3.11)$$

na qual T é a temperatura do ambiente e $h_{r,g}$ é o coeficiente de transferência de calor por radiação, que pode ser determinado em função das temperaturas envolvidas:

$$h_{r,g} = \frac{\varepsilon_g \cdot \sigma [(T_{g,out} + 273)^4 - (T_{sky} + 273)^4]}{(T_{g,out} - T)} . (3.12)$$

A Equação (3.12) mostra que o coeficiente de calor transferido por radiação depende diretamente das temperaturas da superfície externa do vidro, do ambiente e do céu. Isso implica que quanto maior for a temperatura do vidro, mais calor é perdido para o ambiente. Por outro lado, quanto maiores forem a temperatura aparente do céu e a temperatura ambiente, menor a taxa de calor perdido.

Segundo Tiwari e Shyam (2016), a estimativa da temperatura do céu depende de fatores como a umidade relativa, a cobertura de nuvens, a latitude e a altitude do local. Os autores propuseram uma fórmula empírica para estimar a temperatura do céu em função da temperatura do ar ambiente, baseada em dados experimentais. A fórmula é:

$$T_{sky} = 0.0552T^{1.5} , (3.13)$$

em que T_{sky} e T são medidas em Kelvin (K). Além dessa, os autores mencionam outras fórmulas empíricas que permitem estimar a temperatura do céu em graus Celsius ($^{\circ}C$) com base em dados experimentais coletados em diferentes locais. Essas fórmulas são:

$$T_{sky} = T - 6^{\circ}C , (3.14)$$

e,

$$T_{sky} = T - 12^{\circ}C . (3.15)$$

Além do calor radiativo, o destilador perde calor por convecção para o ar que circula ao redor da sua superfície externa. Essa corrente de ar é movida por forças naturais, que criam uma corrente forçada sobre o destilador (INCROPERA *et al.*, 2008). Portanto, a quantidade de calor transferido por convecção é influenciada pelas condições do ar, como temperatura e umidade, além das características da superfície, como seu posicionamento e formato. Desse modo a taxa de transferência de calor por convecção pode ser escrita como (SAXENA *et al.*, 2022):

$$\dot{q}_{cv,g} = h_{cv,g}(T_{g,out} - T) , \quad (3.16)$$

onde $h_{cv,glass}$ é coeficiente de transferência de calor por convecção entre a cobertura de vidro e o ambiente, em (W/m².K); $T_{g,out}$ é a temperatura da superfície externa do telhado de vidro e T é a temperatura ambiente, ambas temperaturas medidas em Kelvin (K).

De acordo com Tiwari e Shyam (2016), vários pesquisadores se empenharam em encontrar experimentalmente o coeficiente de transferência de calor para placas planas expostas ao ambiente. Com base na análise de dados experimentais, as correlações nesse caso mostraram uma dependência significativa da velocidade do vento. Portanto, o coeficiente de transferência de calor por convecção foi definido da seguinte maneira:

$$h_{cv,g} = 2.8 + 3.0v , \quad (3.17)$$

a qual é válida para velocidades de vento menores ou iguais que 5 m/s, ou seja, $0 \leq v \leq 5\text{m/s}$. Para uma velocidade do vento igual a zero, obtemos o coeficiente de calor correspondente à convecção natural.

De modo geral as correlações para $h_{cv,g}$ podem variar devido à sensibilidade dos parâmetros dos experimentos e é geralmente determinada a partir da fórmula geral:

$$h_{cv,g} = a + bv^n , \quad (3.18)$$

em que as constantes são: $a = 2.8$, $b = 3$ e $n = 1$ para $v \leq 5\text{m/s}$, ou $a = 0$, $b = 6.15$ e $n = 0.8$ para $v > 5\text{m/s}$.

3.1.2.1.2 Base e Laterais

A energia térmica captada pela bacia do dispositivo é dissipada de várias maneiras. Inicialmente, parte dela é perdida por condução de calor da bacia para a base inferior e também por convecção de calor, conforme o vapor de água formado se desloca em direção

às paredes laterais onde cede calor para as paredes. Em seguida, por convecção e radiação a partir de todas as superfícies verticais o calor se transfere para o ambiente circundante. Além disso, a base inferior também conduz parte do calor para o solo. Para descrever esse processo, Tiwari e Sahota (2017a) definem a Equação (3.19), que representa a taxa de transferência de calor da bacia para o ambiente:

$$\dot{q}_{bl} = h_{bl}(T_{bl} - T) \quad (3.19)$$

em que T_{bl} é a temperatura da bacia, subscrito bl é a sigla para *basin liner*, que em português significa *revestimento de bacia*. T é a temperatura ambiente em volta do dispositivo. Ambas as temperaturas são medidas em Kelvin (K). O termo h_{bl} é coeficiente total de transferência de calor por condução, radiação e convecção, medida em (W/m².K). Esse termo pode ser escrito como:

$$h_{bl} = \left[\frac{L_i}{k_i} + \frac{1}{h_{cv,bl} + h_{r,bl}} \right]^{-1} \quad (3.20)$$

na qual L_i representa o somatório das espessuras e k_i o somatório dos coeficientes de resistência térmica à condução dos materiais que compõem as paredes, bacia e isolamento da base.

3.1.3 Taxas de Transferência de Calor Interno

Na transferência de calor interna, a transferência de calor da água para o telhado de vidro é direcionado completamente por radiação, convecção e evaporação (TIWARI; SAHOTA, 2017a; TIWARI; SHYAM, 2016).

3.1.3.1 Taxa de Transferência de Calor por Radiação

Para calcular a troca de calor por radiação entre a superfície da água e a superfície interna da cobertura de vidro, é assumido que ambas as superfícies se aproximam de planos paralelos infinitos. Nesse caso, a taxa de transferência de calor é dada por :

$$\dot{q}_{r,w} = \varepsilon_{eff} \cdot \sigma [(T_w + 273)^4 - (T_{g,in} + 273)^4], \quad (3.21)$$

onde ε_{eff} é a emissividade efetiva que considera as propriedades emissivas desses dois componentes do dispositivo, T_w é a temperatura da superfície da água e $T_{g,in}$ é a temperatura da face interna do vidro, ambas temperaturas medidas em graus Celsius (SAXENA *et al.*, 2022).

A Equação (3.10) pode ainda ser reescrita em termos do gradiente de temperatura entre a água e o vidro da seguinte forma:

$$\dot{q}_{r,w} = h_{r,w}(T_w - T_{g,in}) . \quad (3.22)$$

Essa forma permite evidenciar o coeficiente de perda de calor por radiação como:

$$h_{rad,w} = \epsilon_{eff}\sigma[(T_w + 273)^2 + (T_{g,in} + 273)^2](T_w - T_{g,in} + 546) , \quad (3.23)$$

com a emissividade efetiva sendo calculada pela Equação (3.24):

$$\frac{1}{\epsilon_{eff}} = \frac{1}{\epsilon_w} + \frac{1}{\epsilon_{g,in}} - 1 , \quad (3.24)$$

onde ϵ_w é a emissividade da água e $\epsilon_{g,in}$ é a emissividade da face interna da cobertura.

3.1.3.2 Taxa de Transferência de Calor por Convecção

No interior do destilador, um dos processos de transferência de calor é a convecção, que ocorre através do ar úmido devido ao efeito de empuxo, provocado pelo gradiente de temperatura entre a água e o telhado de vidro. Esse gradiente de temperatura gera uma diferença de densidade entre as camadas superiores e inferiores do fluido interno, resultando no movimento convectivo. Portanto, a taxa de transferência de calor convectivo é proporcional a essa diferença de temperatura interna:

$$\dot{q}_{cv} = h_{cv}(T_w - T_{g,in}) . \quad (3.25)$$

Para definir o coeficiente de transferência de calor por convecção, são utilizados como recursos matemáticos os seguintes números adimensionais: o Número de Grashof (Gr), o Número de Nusselt (Nu) e o Número de Prandtl (Pr) (INCROPERA *et al.*, 2008).

O Número de Nusselt caracteriza a taxa de transferência de calor por convecção em relação ao calor transferido por condução. Quanto maior o número de Nusselt, maior é a transferência de calor por convecção. Por outro lado, quanto menor o número de Nusselt, maior é a transferência de calor por condução. Para o ar úmido no interior do dessalinizador ele é definido como:

$$Nu = \frac{h_{cv} \cdot d_m}{k} \quad (3.26)$$

onde h_{cv} é o coeficiente de transferência de calor por convecção, em (W/m².K); d_m é conhecido como comprimento característico, que pode ser o comprimento ou largura da bacia interna, ou também o espaçamento médio entre a água e a cobertura (m), e k é a condutividade térmica do ar úmido em (W/m.K).

O Número de Prandtl indica a relação entre a difusividade de momento e a difusividade térmica do fluido. Quando o número de Prandtl é muito grande, significa que a difusividade do momento domina o comportamento do fluido e ele estará mais propenso a se movimentar por convecção. Por outro lado, se o Número de Prandtl for pequeno, significa a difusividade térmica domina o comportamento do fluido e ocorre a transferência direta de calor entre as moléculas do fluido. Ele é definido como:

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{k} \quad (3.27)$$

onde μ é a viscosidade cinética, dada em (N.s/m²), c_p é o calor específico a pressão constante (J/kg.K), e k é a condutividade térmica do ar úmido em (W/m.K).

O Número de Grashof, descreve o efeito do empuxo gravitacional em relação à força viscosa no fluido. Quanto maior for o Número de Grashof mais significativa é força de empuxo é em comparação com a força viscosa. Essa relação implica que o fluido tenderá a se movimentar de forma mais acelerada, resultando em correntes de convecção mais intensas. Ele é definido como:

$$Gr = \frac{g\beta\rho^2(d_m)^3(\Delta T')}{\mu^2}, \quad (3.28)$$

onde g é aceleração da gravidade (m/s²), β é coeficiente de expansão térmica volumétrica (1/K) e ρ é densidade total do ar úmido (kg/m³). O termo $\Delta T'$ é a variação de temperatura para o número de Grashof, o qual depende, além da diferença de temperatura entre as superfícies da água e do vidro, também depende das pressões parciais de vapor correspondentes:

$$\Delta T' = (T_w - T_g) + \left[\frac{(p_{w1} - p_{w2})(T_w + 273)}{268.9 \times 10^3 - p_{w1}} \right]. \quad (3.29)$$

Utilizando esses números, KUMAR e TIWARI (1996) estabelecem uma correlação entre eles, a qual é empregada para expressar uma equação para o coeficiente h_{cv} . Esse coeficiente é derivado da seguinte relação entre os números adimensionais de Nusselt, Grashof e Prandtl:

$$Nu = \frac{h_{cv} \cdot d_m}{k} = C(Gr.Pr)^n, \quad (3.30)$$

onde os termos C e n são constantes que dependem das condições específicas do ambiente e seus valores são dados em função do Número de Grashof conforme a Tabela 6.

Tabela 6 – Os valores de C e n para diferentes intervalos de números de Grashof.

C	n	Numero de Grashof
1,0	0	$Gr < 10^3$
0,21	1/4	$10^4 < Gr < 3,25 \times 10^5$
0,075	1/3	$3,2 \times 10^5 < Gr < 10^7$
0,07477	0,36	$2,5 \times 10^3 < Gr < 6 \times 10^4$

Fonte: Tiwari e Shyam (2016, 528).

Utilizando um espaçamento médio de $d_m=0,25\text{m}$; $C=0,075$ e $n=1/3$, Dunkle (1961) determinou uma expressão para h_{cv} , a qual, segundo ele, apresentou a melhor aproximação dos resultados ao descrever o processo de convecção livre no interior de um destilador solar passivo. Esse coeficiente, por sua vez, passou a ser amplamente utilizada por diferentes autores ao descreverem o processo (TIWARI; SHYAM, 2016). Ele foi definido como:

$$h_{cv} = 0.884 \left[T_w - T_{g,in} + \frac{(p_{w1} - p_{w2}) \cdot (T_w + 273)}{(268.9 \times 10^3 - p_{w1})} \right]^{1/3}, \quad (3.31)$$

sendo p_{w1} a pressão parcial de vapor de água em função da temperatura da superfície da água (T_w) e p_{w2} a pressão parcial de vapor de água em função da temperatura da superfície interna da cobertura de vidro ($T_{g,in}$).

3.1.3.3 Transferência de Calor Evaporativo

Alinhada com o processo de convecção, a evaporação representa outro elemento desejado na transferência interna de calor. Por meio da evaporação, o calor migra da superfície da água em direção para a face interna da tampa de condensação na forma de calor latente, ocorrendo simultaneamente à transferência convectiva.

A diferença de temperatura entre a superfície evaporativa e a face interna da cobertura de condensação desempenha o papel de força motriz. O aumento dessa diferença térmica promove um aumento proporcional na taxa de transferência de calor evaporativo, o que, por sua vez, reflete diretamente na produtividade global do sistema (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

A equação de taxa de transferência de calor evaporativo pode ser calculada pela seguinte equação:

$$\dot{q}_e = h_e(T_w - T_{g,in}), \quad (3.32)$$

com h_e sendo o coeficiente de transferência de calor por evaporação, medido em (W/m²K), e $T_w - T_{g,in}$ a diferença de temperatura entre a superfície da água e a superfície interna da cobertura.

A determinação do coeficiente h_e é particularmente complexa, devido à sua intrínseca relação com o coeficiente convectivo. Nesse sentido, diversas abordagens são empregadas para sua obtenção. Uma das estratégias mais práticas para calcular h_e é iniciar a dedução a partir da Equação (3.33), na qual a taxa de calor evaporativo é calculada como o produto do fluxo mássico de vapor \dot{m} , dado em (kg/m².s), pelo calor latente da água L , em (J/kg) (TIWARI; SHYAM, 2016):

$$\dot{q}_e = \dot{m}_w L, \quad (3.33)$$

na qual, por sua vez, o valor \dot{m}_w pode ser calculado em função do gradiente de concentração de vapor de água na interface entre a água e o ar interno pela Equação (3.34).

Para estimar o fluxo mássico de vapor através de um dessalinizador solar passivo, Tiwari e Shyam (2016) definiram uma expressão para o cálculo de \dot{m}_w como o produto de um coeficiente de transferência de massa pela diferença de densidade parcial do vapor de água na interface entre a água e o ar interno. Ela é definida como:

$$\dot{m}_w = h_D(\rho_{w1} - \rho_{w2}), \quad (3.34)$$

onde h_D é o coeficiente de transferência de massa por evaporação, medida em [(kg/s.m²)(m³/kg)], ρ_{w1} é a densidade parcial da massa do vapor imediatamente acima da água e ρ_{w2} é densidade parcial do vapor de água próxima à cobertura, ambas medidas em (kg/m³).

A determinação de \dot{m}_w pode ser realizada por meio do cálculo do calor transferido por evaporação \dot{q}_e , no entanto, depende de diversas propriedades do fluido e, além disso, tem uma dependência com a transferência de calor por convecção. Uma das formas de calcular o fluxo mássico nesse caso é expressar o coeficiente h_D é por meio dos números adimensionais. Incropera *et al.* (2008) fazem a relação da mistura de ar e vapor de água através do Número de Lewis (Le) definido como a razão entre a difusividade térmica do ar úmido e a difusividade mássica do vapor de água no ar. A partir desse número, (TIWARI; SHYAM, 2016), estabelece as seguintes expressões:

$$Le = \frac{\alpha}{D_{w,a}} = \frac{h_{cv}}{h_D} = \rho_a c_{pa}, \quad (3.35)$$

com α e $D_{w,a}$ representando a difusidade térmica e a difusidade mássica, respectivamente, ambas dadas em (m²/s); os termos ρ_a e c_{pa} são a densidade parcial e o calor específico do ar seco.

Manipulando a Equação (3.35), é possível evidenciar o coeficiente de transferência de massa por evaporação como:

$$h_D = \frac{h_{cv}}{\rho_a c_{pa}} . \quad (3.36)$$

Considerando que as temperaturas da água e do ar são aproximadamente iguais na interface entre eles, isto é, $T_w \approx T_a \approx T$, e utilizando a Lei dos Gases Ideais para explicitar as densidades parciais do vapor de água:

$$\rho_{w1} = \frac{p_{w1} \cdot M_w}{RT} , \quad (3.37)$$

e,

$$\rho_{w2} = \frac{p_{w2} \cdot M_w}{RT} , \quad (3.38)$$

Utilizando essas duas expressões na Equação (??), o fluxo mássico pode ser reescrito como:

$$\dot{m}_w = \frac{h_{cv}}{\rho_a c_{pa}} \frac{M_w}{RT} (p_{w1} - p_{w2}) . \quad (3.39)$$

Fazendo com que a Equação (3.33) possa ser expressa da seguinte forma:

$$\dot{q}_e = \frac{L h_{cv}}{\rho_a c_{pa}} \frac{M_w}{RT} (p_{w1} - p_{w2}) , \quad (3.40)$$

com os termos em evidência $\frac{L h_{cv}}{\rho_a c_{pa}} \frac{M_w}{RT}$ representando o coeficiente de transferência de calor evaporativo. Assim, ao condensar esses termos em apenas um, representado por H_0 , a taxa de calor evaporativo reduz-se a:

$$\dot{q}_e = H_0 (p_{w1} - p_{w2}) . \quad (3.41)$$

O coeficiente H_0 é calculado igualando as Equações (3.40) e (3.41) e substituindo a densidade parcial do ar ρ_a por $\frac{p_a M_a}{RT}$. Isso nos leva a seguinte relação:

$$\frac{H_0}{h_{cv}} = \frac{L}{c_{pa}} \frac{M_w}{M_a} \frac{1}{p_a} . \quad (3.42)$$

Dado que a pressão de vapor da água P_w é significativamente menor em comparação com a pressão do ar, ela pode ser aproximada como igual à pressão total da mistura de ar-vapor no interior do destilador $p_a \approx P_T$. Com base nisso, é possível concluir que:

$$\frac{H_0}{h_{cv}} = \frac{L}{c_{pa}} \frac{M_w}{M_a} \frac{1}{P_T} . \quad (3.43)$$

Tiwari e Shyam (2016) adotaram os seguintes valores para os termos expressos nessa relação: $L = 2200 \text{ kJ/kg}$, $c_{pa} = 1,005 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$, $M_w = 18 \text{ kg/kmol}$, $M_a = 28,96 \text{ kg/kmol}$, $P_T = 1 \text{ atm} = 101.325 \text{ N/m}^2$. Com isso, os autores obtiveram o seguinte resultado:

$$\frac{H_0}{h_{cv}} = 0,013 . \quad (3.44)$$

Porém, segundo Cooper (1973 *apud* DUNKLE, 1961), o valor para H_0/h_{cv} que melhor representa a transferência de massa por evaporação é 0,016276 ao invés de 0,013. Portanto, a taxa de calor transferida por evaporação poderia ser calculada pela seguinte equação:

$$\dot{q}_e = 16,276 \times 10^{-3} h_{cv} (p_{w1} - p_{w2}) . \quad (3.45)$$

Comparando as Equações (3.32) e (3.45), é possível definir o coeficiente de transferência de calor por evaporação h_e , como sendo (TIWARI; SHYAM, 2016):

$$h_e = 16.276 \times 10^{-3} h_{cv} \frac{(p_{w1} - p_{w2})}{(T_w - T_{g,in})} , \quad (3.46)$$

evidenciando mais uma vez a relação de dependência entre os coeficientes convectivo e evaporativo.

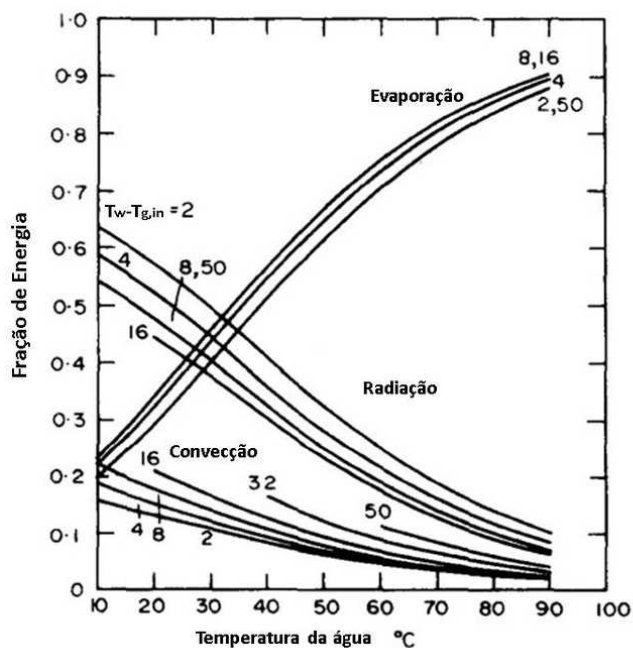
Dessa forma, com A sendo a área da bacia, o fluxo de massa de água por unidade de tempo pode ser obtido pela equação:

$$\dot{M}_w = \dot{m}_w \cdot A . \quad (3.47)$$

3.1.3.4 Fracções de Energia

De acordo com Cooper (1973), a energia térmica liberada pela água nos processos de radiação, convecção e evaporação variam de acordo com a temperatura da água e o gradiente térmico entre a água e o vidro. O gráfico da Figura 9 exemplifica essa subdivisão para diferentes níveis de temperaturas.

Gráfico 9 – Frações de energia convectiva, evaporativa e radiativa.



Fonte: Cooper (1973)

Com base na análise desses gráficos, pode-se observar que a evaporação desempenha um papel predominante no processo de transporte de calor para temperaturas suficientemente altas. Isso se deve principalmente ao alto calor específico da água responsável por reter a maior parte do calor no processo. A influência da transferência de calor por convecção e radiação, por outro lado, tende a diminuir à medida que a temperatura da água se eleva. Esses resultados ressaltam a importância de compreender e otimizar o processo de evaporação em sistemas desse tipo, a fim de aprimorar sua eficiência e desempenho no aproveitamento da energia solar para dessalinização da água.

3.1.4 Eficiência Térmica

A abordagem para determinar a eficiência de um destilador solar passivo envolve a análise da relação entre a quantidade de água destilada produzida e a energia solar incidente no sistema. Seguindo Tiwari, Singh e Tripathi (2003), a eficiência instantânea

é dada pela razão entre o fluxo de calor usado na evaporação ($\dot{Q}_e = \dot{m}_w \times L \times A_s$) e a irradiância solar total incidente sobre o sistema ($G(t) \times A_s$). Dessa forma:

$$\eta_i = \frac{\dot{Q}_e}{G(t)A_s} \times 100\% = \frac{\dot{m}_w \times A_s \times L}{G(t)A_s} \times 100\% = \frac{\dot{m}_w \times L}{G(t)} \times 100\% \quad (3.48)$$

ou,

$$\eta_i = \frac{h_e(T_w - T_{g,in})}{G(t)} \times 100\% \quad (3.49)$$

A eficiência geral é tipicamente calculada ao longo de um período de tempo, levando em conta a quantidade total de água destilada produzida em relação à energia solar total incidente durante esse período. Isso inclui a eficiência da evaporação, mas também leva em consideração a eficiência da condensação e a perda de calor para o ambiente. A eficiência térmica geral para o destilador solar passivo pode ser calculado por:

$$\eta = \frac{M_w \cdot L}{I \cdot A} \times 100\% \quad (3.50)$$

onde M_w é a produção total de água em quilogramas (kg), L é o calor latente de vaporização da água em joule por quilograma (J/kg), I é a irradiação solar total em joules por metro quadrado (J/m²), e A é a área de captação solar da bacia em metros quadrados (m²).

Em um destilador solar passivo, como o apresentado neste trabalho, estarão sempre presentes os mecanismos de transferência de calor, incluindo convecção e radiação para o interior, assim como perdas por reflexão, radiação e convecção para o exterior. Como resultado, o calor utilizável atinge, no máximo, teoricamente, entre 33% e 56% da radiação solar total em condições ideais, enquanto o restante é perdido (FREIRE; ONES; RODRÍGUEZ-MUÑOZ, 2019).

4 Considerações finais

Neste trabalho, buscamos realizar uma revisão abrangente da literatura sobre os processos de dessalinização, com destaque para a destilação solar como uma técnica que utiliza a energia solar para purificar água. Através desta revisão, observamos que a destilação solar se destaca como uma alternativa eficiente e de baixo custo para o tratamento de água, capaz de atender demandas de pequena escala, especialmente em regiões com escassez de água doce e alta incidência de luz solar como as regiões do nordeste brasileiro. O destilador solar passivo, além de ser econômico, é de fácil operação e manutenção, sendo capaz de produzir água potável com até 99% menos salinidade e livre de patógenos que causam doenças.

Para estudar o comportamento termodinâmico, revisamos os conceitos teóricos que explicam o funcionamento da destilação solar, utilizando modelos ambientais para calcular a radiação incidente no dispositivo, baseados nos trabalhos de Tiwari e Shyam (2016) e Duffie e Beckman (2013) e no modelo térmico de troca de calor para o destilador solar, baseado no trabalho de Dunkle (1961). Isso incluiu equações e coeficientes de transferência de calor por condução, convecção e radiação para cada componente do dispositivo, permitindo formular equações teóricas para calcular a eficiência energética e a produção diária de água.

O comportamento termodinâmico do vapor de água e do ar atmosférico pode ser explicado através da lei dos gases ideais, assumindo que em baixas pressões e temperaturas suficientemente altas, o comportamento de ambas as substâncias e sua mistura se aproxima de um gás ideal. Além disso, utilizou-se dos números adimensionais como os números de Nusselt, Lewis, Grashof e Prandtl, que relacionaram as propriedades físicas dos fluidos e superfícies com as condições de fluxo para determinar o fluxo de calor e massa no interior do dispositivo.

A partir dessa revisão, foi possível compreender os mecanismos de funcionamento desse dispositivo e constatar que a destilação solar se apresenta como uma alternativa sustentável e viável para a produção de água potável em pequena escala. Embora apresente uma produção mais baixa em comparação a outros processos, contribui significativamente para a melhoria da qualidade de vida das populações que sofrem com a falta de água potável. Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de experimentos práticos com diferentes tipos e configurações de destiladores solares, bem como a análise dos fatores que influenciam na produtividade e na eficiência do processo. Além disso, sugere-se a comparação da destilação solar com outras técnicas de tratamento de água, considerando os aspectos técnicos, econômicos, ambientais e sociais envolvidos.

Referências

- AL-AMSHAWEE, S. *et al.* Electrodialysis desalination for water and wastewater: A review. **Chemical Engineering Journal**, Elsevier, v. 380, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894719316250>. Acesso em: 25/01/2023.
- AL-KARAGHOULI, A.; KAZMERSKI, L. L. Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 24, p. 343 – 356, Março 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113000208>. Acesso em: 30/01/2023.
- AL-KARAGHOULI, A.; RENNE, D.; KAZMERSKI, L. L. Solar and wind opportunities for water desalination in the Arab regions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, p. 2397 – 2407, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032108001780>. Acesso em: 01/01/2023.
- AL-SAHALI, M.; ETTOUNEY, H. Developments in thermal desalination processes: Design, energy, and costing aspects. **Desalination**, Elsevier, p. 227 – 240, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916407003657>. Acesso em: 25/01/2023.
- ALSADAIE, S. M. *et al.* **Desalination: Model-based techniques in desalination processes: A review**. 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/352091896_Desalination_Model-based_techniques_in_desalination_processes_A_review/citations. Acesso em: 29/01/2023.
- ALVES, G. A. **USO DE ELETRODIÁLISE PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E/OU DESSANILIZAÇÃO**. 2017. 113 p. Monografia (Engenharia Ambiental) — Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10020955.pdf#:~:text=O%20processo%20eletroqu%C3%ADmico%20chamado%20eletrodi%C3%A1lise%20nos%20permite%20extrair,est%C3%A1%20contida%20na%20pr%C3%B3pria%20composi%C3%A7%C3%A3o%20i%C3%B4nica%20da%20%C3%A1gua>. Acesso em: 06/02/2023.
- ALVES, R. **Reflectância, transmitância e absortância**. 2022. Disponível em: <https://canal.cecierj.edu.br/recurso/17618>. Acesso em: 29/04/2023.
- AMORIM, L. V. *et al.* Uso da eletrodiálise na eliminação de Ca²⁺ e Mg²⁺ e sua influência na reologia de dispersões de argilas bentoníticas da Paraíba. **Cerâmica**, v. 51, p. 197 – 204, Setembro 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/genBnQkrXWtHTq6TjHsMfRt/>. Acesso em: 06/02/2023.
- ANGELAKIS, A. N. *et al.* Desalination: From Ancient to Present and Future. **Water**, Agosto 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/16/2222>. Acesso em: 28/08/2022.
- ARAÚJO, S. M. S. de. **A REGIÃO SEMIÁRIDA DO NORDESTE DO BRASIL**: Questões Ambientais e Possibilidades de uso Sustentável dos Recursos. Revista

Científica da FASETE, 2011. Disponível em: https://www.unirios.edu.br/revistarios/media/revistas/2011/5/a_regiao_semiarida_do_nordeste_do_brasil.pdf. Acesso em: 06/02/2023.

ASHRAE. **1997 ASHRAE Handbook: Fundamentals**. Atlanta, 1997.

ATKINS, P.; JONES, L.; LAVERMAN, L. Princípios de Química. In: ATKINS, P.; JONES, L.; LAVERMAN, L. (Ed.). **Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2018. cap. 3, p. 171 – 172.

AUGUSTO, L. G. da S. *et al.* O contexto global e nacional frente aos desafios do acesso adequado à água para consumo humano. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 17, Junho 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/csc/a/BLQQZStGK3KMFZdj9zwQKL/>. Acesso em: 14/06/2023.

AZEVEDO, P. S.; PEREIRA, F. W. L.; PAIVA, S. A. R. de. Água, Hidratação e Saúde. **Sociedade Brasileira de Alimentação e Nutrição**, Novembro 2016. Disponível em: <http://www.sban.org.br/arquivos/agua-hidracao-saude.pdf>. Acesso em: 11/06/2023.

AZEVEDO, P. V. de *et al.* POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE ÁGUA POTÁVEL E BENEFÍCIOS SOCIOECONÔMICOS ADVINDOS DO USO DE DESSALINIZADORES SOLAR NO SEMIÁRIDO PARAIBANO. **Revista Geográfica Acadêmica**, RGA, v. 14, n. 2, p. 73 – 83, 2020. Disponível em: <https://revista.ufrr.br/rga/article/view/6787>. Acesso em: 04/04/2023.

BANCO MUNDIAL. **Water Global Practice: The Role of Desalination in an Increasingly Water-Scarce World**. [S.l.], 2019. Disponível em: <https://idadesal.org/wp-content/uploads/2019/04/World-Bank-Report-2019.pdf>. Acesso em: 22/10/2022.

BELTON, P. **O grande salto tecnológico que pode acabar com a sede no mundo**. 2015. Disponível em: https://www.bbc.com/portuguese/noticias/2015/10/151018_tecnologia_dessalinizacao_agua_rm. Acesso em: 10/03/2023.

BIRKETT, J. D. A brief illustrated history of desalination: From the bible to 1940. **Desalination**, v. 50, p. 17 – 52, 1984. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0011916484850146>. Acesso em: 06/02/2023.

BOUCHEKIMA, B. A solar desalination plant for domestic water needs in arid areas of South Algeria. **Desalination**, Elsevier, v. 153, p. 65 – 69, 2002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916402010949>. Acesso em: 22/10/2022.

BOYD, M. Analytical model for solar irradiance near a planar vertical diffuse reflector – Formulation, validation, and simulations. **Solar Energy**, Elsevier, v. 91, p. 79 – 92, Março 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X13000303>. Acesso em: 09/04/2023.

BRASIL. **Delimitação do semiárido**. 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/sudene/pt-br/assuntos/projetos-e-iniciativas/delimitacao-do-semiarido>. Acesso em: 06/02/2023.

BRASIL. **Manual Prático de Análise de Água**. 2. ed. Brasília: Funasa, 2006. 147 p. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/manual_analise_agua_2ed.pdf. Acesso em: 09/06/2023.

BRASIL. Portaria Nº 2.914, de 12 de Dezembro de 2011. **Dispõe sobre procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade**, Diário Oficial da União, Brasília, 2011. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html. Acesso em: 14/06/2023.

BRASIL. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS. **Panorama do saneamento básico no Brasil 2021**, Secretaria Nacional de Saneamento do Ministério do Desenvolvimento Regional, Brasília, p. 39 – 69, 2021.

BRITANNICA. **Osmose**. 2022. Disponível em: <https://www.britannica.com/science/osmosis>. Acesso em: 10/03/2023.

BUROS, O. K. *et al.* **The USAID desalination manual**. Washington, 1981. Disponível em: <https://www.ircwash.org/sites/default/files/215.1-81US-351.pdf>. Acesso em: 09/04/2023.

BUSINESS, R. for. **Ionics**. 2023. Disponível em: <https://www.referenceforbusiness.com/history2/33/Ionics-Incorporated.html#ixzz7vk5DKfLB>. Acesso em: 28/07/2022.

ÇENGEL, Y. A.; J.GHAJAR, A. **Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática**. 4. ed. Porto Alegre: McGrawHill, 2012. 905 p.

CHEN, J. P. *et al.* **Desalination of Seawater by Thermal Distillation and Electrodialysis Technologies**. 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/251133877_Desalination_of_Seawater_by_Thermal_Distillation_and_Electrodialysis_Technologies. Acesso em: 16/03/2023.

COLLARES-PEREIRA, M.; RABL, A. The average distribution of solar radiation-correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. **Solar Energy**, Elsevier, v. 22, p. 155 – 164, 1979. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X79901002>. Acesso em: 21/05/2023.

COOPER, P. I. THE MAXIMUM EFFICIENCY OF SINGLE-EFFECT SOLAR STILL. **Solar Energy**, Pergamon Press, v. 15, p. 205 – 217, 1973.

CURTO, D.; FRANZITTA, V.; GUERCIO, A. A Review of the Water Desalination Technologies. **Applied Sciences**, v. 11, n. 670, Janeiro 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/2/670>. Acesso em: 29/01/2023.

DAMASCENO, C. T. **SIMULAÇÃO DE UMA UNIDADE PILOTO DE DESTILAÇÃO DE ÁGUA EMPREGANDO ENERGIA SOLAR**. 2016. 70 p. Dissertação (Engenharia Química) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS INSTITUTO DE QUÍMICA. Disponível em: <https://repositorio.bc.ufg.br/tede/bitstream/tede/6770/5/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20-%20Camila%20Teles%20Damasceno%20-%202016.pdf>. Acesso em: 25/04/2023.

DANFOSS. **A brief history of the energy intensity of desalination**. 2023. Disponível em: <https://www.danfoss.com/en/about-danfoss/articles/dhs/a-brief-history-of-the-energy-intensity-of-desalination/>. Acesso em: 06/02/2023.

DELYANNIS, E. Historic background of desalination and renewable energies. **Solar Energy**, v. 75, n. 5, p. 357 – 366, 2003a. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X03002779>. Acesso em: 21/04/2023.

DELYANNIS, E. Historic background of desalination and renewable energies. **Solar Energy**, Elsevier, v. 75, p. 357 – 366, 2003b. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X03002779>. Acesso em: 17/03/2023.

DELYANNIS, E.; BELESSIOTIS, D. The recent development path. **Desalination**, Elsevier, v. 264, p. 206 – 213, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916410003607>. Acesso em: 28/07/2022.

DEV, R.; TIWARI, G. Characteristic equation of a passive solar still. **Desalination**, Elsevier, p. 246 – 265, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916409003415>. Acesso em: 14/06/2023.

DUFFIE, J.; BECKMAN, W. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 4. ed. Nova York: John Wiley and Sons, 2013. 910 p. Disponível em: [https://www.sku.ac.ir/Datafiles/BookLibrary/45/John%20A.%20Duffie,%20William%20A.%20Beckman\(auth.\)-Solar%20Engineering%20of%20Thermal%20Processes,%20Fourth%20Edition%20\(2013\).pdf](https://www.sku.ac.ir/Datafiles/BookLibrary/45/John%20A.%20Duffie,%20William%20A.%20Beckman(auth.)-Solar%20Engineering%20of%20Thermal%20Processes,%20Fourth%20Edition%20(2013).pdf). Acesso em: 06/04/2023.

DUNKLE, R. V. **Solar water distillation : the roof type still and a multiple effect diffusion still**. 1961. Disponível em: <https://nla.gov.au/nla.obj-41433492/view?partId=nla.obj-41433856#page/n3/mode/1up>. Acesso em: 20/07/2022.

EL-NASHAR, A. M. HISTORY AND CURRENT STATUS OF MEMBRANE DESALINATION PROCESSES. **MEMBRANE PROCESSES**, v. 1, 2018. Disponível em: <https://www.eolss.net/Sample-Chapters/C07/E6-144-31.pdf>. Acesso em: 10/04/2023.

EL-SAIE, M. The MSF desalination process and its prospects for the future, **Desalination**. **Desalination**, Elsevier, v. 93, p. 43 – 54, 1993. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0011916493800955>. Acesso em: 06/02/2023.

EMBRAPA. **Água para produção de alimento**. 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/42157533/artigo-agua-para-producao-de-alimento>. Acesso em: 11/06/2023.

FOÁ, A. Considerações sobre a lei de Dalton referente às misturas gasosas. **Bragantia**, Instituto Agrônomo de Campinas, São Paulo, v. 3, p. 166 – 177, julho 1943. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/brag/a/ffXGhkrBZL4qHjzdBHctfj/?lang=pt#>. Acesso em: 28/07/2022.

FREIRE, H. A. S.; ONES, O. P.; RODRÍGUEZ-MUÑOZ, S. Límites termodinámicos a la productividad de los destiladores solares pasivos. *Revista Ion*, v. 32, n. 1, 2019. Disponível

em: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaion/article/view/9900/10582>. Acesso em: 19/03/2023.

GAIO, S. S. M. **Produção de água potável por dessalinização**: tecnologias, mercado e análise de viabilidade econômica. 2016. 90 p. Dissertação (Mestrado) — UNIVERSIDADE DE LISBOA. Disponível em: https://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/26066/1/ulfc120740_tm_Susana_Gaio.pdf. Acesso em: 03/01/2023.

GOMES, R. R. F. **Latitude e Longitude**. 2023. Disponível em: <https://www.infoescola.com/geografia/latitude-e-longitude/>. Acesso em: 06/02/2023.

GRASSI, M. T. **As águas do planeta Terra**. 2001. Cadernos Temáticos de Química. Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/cadernos/01/aguas.pdf>. Acesso em: 25/01/2023.

GURRERI, L. *et al.* Electrodialysis Applications in Wastewater Treatment for Environmental Protection and Resources Recovery: A Systematic Review on Progress and Perspectives. **Membranes**, v. 10, n. 7, Julho 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0375/10/7/146#>. Acesso em: 12/03/2023.

HOLMAN, J. P. **TRANSFERENCIA DE CALOR**. 1. ed. Cidade Fernández: Concepción Fernández Madrid, 1998a. 495 p.

HOLMAN, J. P. **Tranferência de calor**. 8. ed. Cidade Fernández: Concepción Fernández Madrid, 1998b. 495 p.

HOTTEL, H. C. A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres. **Solar Energy**, Elsevier, v. 18, n. 2, p. 129 – 134, 1976. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X76900451?via%3Dihub>. Acesso em: 09/04/2023.

INCROPERA *et al.* **Fundamentos de Transferencia de Calor e Massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTL, 2008. 645 p.

JONES, E. *et al.* The state of desalination and brine production: A global outlook. **Science of The Total Environment**, Elsevier, v. 657, p. 1343 – 1356, Março 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969718349167>. Acesso em: 10/05/2023.

JORGE, B. M. J. **Simulação de processos de destilação solar de água salgada**. 2011. 118 p. Dissertação (Engenharia Mecânica) — UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA. Disponível em: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/cursos/memec/dissertacao/2353642372441>. Acesso em: 15/02/2023.

KHAWAJI, A. D.; KUTUBKHANAH, I. K.; WIE, J. Advances in seawater desalination technologies. **Desalination**, Elsevier, v. 221, p. 47 – 69, 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916407006789>. Acesso em: 22/10/2022.

KONCAGÜL, E.; TRAN, M.; CONNOR, R. **Relatório mundial das Nações Unidas sobre desenvolvimento dos recursos hídricos 2021: o valor da água; fatos e dados**. 2021. Disponível em: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375751_por. Acesso em: 13/06/2023.

KUMAR, S. J.; TIWARI, G. N. ESTIMATION OF CONVECTIVE MASS TRANSFER IN SOLAR DISTILLATION SYSTEMS. **Solar Energy**, Pergamon, v. 57, n. 6, 1996. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X96001223>. Acesso em: 20/07/2022.

LIM, Y. J. *et al.* Seawater desalination by reverse osmosis: Current development and future challenges in membrane fabrication – A review. **Journal of Membrane Science**, Elsevier, v. 629, Julho 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376738821002416>. Acesso em: 10/03/2023.

LIMA, L. *et al.* USO DE DESTILADORES SOLARES PASSIVOS PARA OBTENÇÃO DE PRECIPITADOS DE INTERESS E E DE DESTILADO, VISANDO A MINIMIZAÇÃO DE PROBLEMAS DA ENGENHARIA E SOCIOAMBIENTAIS. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**. Natal: [s.n.], 2016. Disponível em: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/50/003/50003382.pdf. Acesso em: 20/07/2022.

LIMA, L. S. Lei de Dalton. **REVISTA DE CIÊNCIA ELEMENTAR**, Casa das Ciências, Porto, v. 3, n. 093, março 2015. Disponível em: <https://rce.casadasciencias.org/rceapp/art/2015/093/#:~:text=Resumo%20A%20lei%20de%20Dalton%2C%20tamb%C3%A9m%20conhecida%20como,cada%20um%20dos%20gases%20que%20comp%C3%B5em%20a%20mistura>. Acesso em: 28/07/2022.

LIMA, R. de S. **SISTEMA DE DESTILAÇÃO SOLAR COM PRÉ-AQUECIMENTO EM CONCENTRADOR CILINDRICO PARABÓLICO**. 2012. 71 p. Dissertação (Engenharia Mecânica) — UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/15689/1/RudsonSL_DISSERT.pdf. Acesso em: 05/04/2023.

LISBOA, A. A.; SEGURADO, R.; MENDES, M. A. A. Solar still performance for small-scale and low-cost seawater desalination: Model-based analysis and water yield enhancement techniques. **Solar Energy**, Elsevier, v. 238, p. 341 – 362, Maio 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X22002559#b8>. Acesso em: 30/03/2023.

LIU, B. Y.; JORDAN, R. C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. **Solar Energy**, Elsevier, v. 4, n. 3, p. 1 – 19, 1960. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X60900621>. Acesso em: 06/02/2023.

MARIANO, H. Q. S. **ESTUDO DE SISTEMA DE PRODUÇÃO DE ÁGUA POTÁVEL ATRAVÉS DO PROCESSO DE DESTILAÇÃO SOLAR: CABO VERDE**. 2019. 116 p. Dissertação (Engenharia Mecânica) — Instituto Superior de Engenharia do Porto. Disponível em: https://recipp.ipp.pt/bitstream/10400.22/14992/1/DM_HelderMariano_2019_MEM.pdf. Acesso em: 06/10/2023.

MARTINELLI JÚNIOR, L. C. **Refrigeração e Ar-Condicionado, Psicrometria**. 2014. Disponível em: <https://docplayer.com.br/8876266-Refrigeracao-e-ar-condicionado-parte-iv-psicrometria.html>. Acesso em: 28/07/2022.

MILLER, J. E. **Review of Water Resources and Desalination Technologies**. Novo México, 2003. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/>

255654844_Review_of_Water_Resources_and_Desalination_Technologies. Acesso em: 10/03/2023.

MORRIS, R. M. The development of the multi-stage flash distillation process: A designer's viewpoint. **Desalination**, Elsevier, v. 93, p. 57 – 68, 1993. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0011916493800966v>. Acesso em: 28/07/2022.

MOTTA, D. **Ciclo do carbono nos ecossistemas aquáticos**. 2008. Disponível em: <https://siteantigo.faperj.br/?id=1300.2.0#:~:text=O%20carbono%20entra%20constantemente%20na%20atmosfera%20sob%20a,ambientes%20aqu%C3%A1ticos%2C%20por%20meio%20do%20processo%20de%20fotos%C3%ADntese>. Acesso em: 14/06/2022.

NASA. **Sun In-Depth**. 2023. Disponível em: <https://solarsystem.nasa.gov/solar-system/sun/in-depth/>. Acesso em: 20/02/2023.

NASCIMENTO, F. T. do *et al.* Efficacy of a solar still in destroying virus and indicator bacteria in water for human consumption. **Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, Rev. Ambient. Água, Junho 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ambiagua/a/bVPy96xVcGFPTy3J6Kkw8sD/?lang=en>. Acesso em: 19/03/2023.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica 2: Fluidos Oscilações e ondas Calor**. 5. ed. São Paulo: Blucher, 2014. 375 p.

ONU. **População mundial deve chegar a 9,7 bilhões de pessoas em 2050, diz relatório da ONU**. 2019. Online. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/83427-populacao-mundial-deve-chegar-97-bilhoes-de-pessoas-em-2050-diz-relatorio-da-onu>. Acesso em: 03/01/2023.

ORGILL, J. F.; HOLLANDS, K. G. T. Correlation Equation For Hourly Diffuse Radiation On a Horizontal Surface. **Solar Energy**, Pergamon Press, v. 19, p. 357 – 359, 1977. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X77900068>. Acesso em: 21/05/2023.

PETROCHEM. **O que faz e como funciona uma osmose inversa**. 2023. Disponível em: <https://www.petrochem.pt/pt/area-de-negocio/tratamento-de-aguas/equipamentos/filtracao/o-que-faz-e-como-funciona-uma-osmose-inversa.html>. Acesso em: 10/03/2023.

PONTE, B. M.; LOPES, R. M. B. P. CRESCIMENTO DA ENERGIA SOLAR NO NORDESTE BRASILEIRO. In: **Anais do Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade** -. Congestas, 2017. v. 5, p. 1077 – 1080. Disponível em: <http://eventos.ecogestaobrasil.net/congestas2017/trabalhos/pdf/congestas2017-et-06-012.pdf>. Acesso em: 06/06/2023.

PRADO, R. B. *et al.* Conservação de ecossistemas e provisão de água. In: SILVA, M. S. L. da *et al.* (Ed.). **Água e saneamento: contribuições da embrapa**. [s.n.], 2018. cap. 6, p. 88 – 118. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/323960535_Conservacao_de_ecossistemas_e_provisao_de_agua/citation/download. Acesso em: 11/06/2023.

- RAJ, S. V.; MANOKAR, A. M. DESIGN AND ANALYSIS OF SOLAR STILL. **Materials Today: Proceedings**, Elsevier, v. 4, n. 8, p. 9179 – 9185, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785317315730>. Acesso em: 06/02/2023.
- REBOUÇAS, A. da C. **Água na região Nordeste: desperdício e escassez**. 1997. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/VfYsXjpmCS9KsT4HWnsMJgy/>. Acesso em: 06/02/2023.
- RODRÍGUEZ GÓMEZ, J. *et al.* A irradiância solar: conceitos básicos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São José dos Campos, v. 40, n. 3, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/DfZGpdWH53yHvvj9kwjMqqt/>. Acesso em: 02/04/2023.
- SARMENTO, K. K. F. *et al.* Aplicação da destilação solar na potabilização de água contaminada. **RESEARCH, SOCIETY AND DEVELOPMENT**, v. 10, n. 11, 2021. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/19644>. Acesso em: 30/01/2023.
- SAXENA, A. *et al.* A thermodynamic review on solar stills. **Solar Energy**, Elsevier, v. 237, p. 377 – 413, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X22002481>. Acesso em: 30/12/2022.
- SCHMITZ, A. P.; BITTENCOURT, M. V. L. Crescimento econômico e pressão sobre recursos hídricos. **Estudos econômicos**, Economia, São Paulo, v. 47, p. 329 – 363, Junho 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ee/a/cwvpqnYYQcJnJcFjMBK9b3d/?lang=pt>. Acesso em: 30/01/2023.
- SCHULER, A. E.; LIMA, J. E. F. W.; CRUZ, M. A. S. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. In: SCHULER, A. E.; LIMA, J. E. F. W.; CRUZ, M. A. S. (Ed.). **Água e Saneamento**. Embrapa, 2018. cap. Gestão integrada de recursos hídricos, p. 51 – 60. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1090729/gestao-integrada-de-recursos-hidricos>. Acesso em: 14/06/2023.
- SILVA, F. P. D.; QUIRINO, J. M. DESSALINIZAÇÃO POR OSMOSE REVERSA. **Revista Tecnológica da Universidade Santa Úrsula**, Sistema Eletrônico de Editoração de Periódicos, v. 3, n. 2, p. 16 – 32, JUL/DEZ 2020. Disponível em: <http://revistas.icesp.br/index.php/TEC-USU/article/viewFile/1453/1068>. Acesso em: 10/03/2023.
- SILVA, J. de Sousa e. **Secagem e armazenamento de produtos agrícolas**: Capítulo 3 Principios básicos de Psicrometria. 2. ed. Viçosa -MG: Editora Aprenda fácil, 2008. v. 1. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/264467407_Principios_basicos_de_psicrometria#:~:text=A%20psicrometria%20ou%20higrometria%20%C3%A9,em%20suspens%C3%A3o%20e%20outros%20gases. Acesso em: 28/07/2022.
- SILVA, L. F. D. **MODIFICAÇÃO QUÍMICA DE MEMBRANA COMERCIAL DE OSMOSE INVERSA PARA AUMENTO DA RESISTÊNCIA A AGENTES OXIDANTES**. 2013. 135 p. Tese (PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS, EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE POLÍMEROS) — UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/141717249.pdf>. Acesso em: 10/03/2023.

SIQUEIRA, A. M. de O.; LANNA, P. P.; CAMPOS, J. C. C. Modelagem matemática e simulação numérica de uma planta de dessalinização - MSF. **Revista ION**, v. 34, n. 2, junho 2021. Disponível em: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaion/article/view/10905>. Acesso em: 25/01/2023.

SIQUEIRA, A. M. de O.; MARTINS, A. L. S.; VIANA, E. E. D. Princípios de funcionamento de diferentes métodos de dessalinização de água do mar e análise paramétrica de um dessalinizador de múltiplo efeito (MED). **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 8, n. 1, 2022. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/9d99/dc699914cc69fc93add94cf1caa02eafc126.pdf>. Acesso em: 19/03/2023.

SODRÉ, F. F. Fontes Difusas de Poluição da Água: Características e métodos de controle. **Aqua**, Setembro 2012. Disponível em: <https://www.aqua.unb.br/images/Artigos/Tematicos/difusa.pdf>. Acesso em: 14/06/2023.

SOLAR DYNAMICS OBSERVATORY. **The Sun Now**. 2023. Disponível em: <https://sdo.gsfc.nasa.gov/>. Acesso em: 30/01/2023.

TAVARES, M. Aprendendo sobre o sol. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, SBF, Niterói, v. 22, n. 1, Março 2000. Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22a10.pdf>. Acesso em: 06/02/2023.

THIMMARAJU, M. *et al.* Desalination of Water. In: EYVAZ, M.; YÜKSEL, E. (Ed.). **Desalination and Water Treatment**. 1. ed. Rijeka: Intechopen, 2018. cap. 16. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/329656746_Passive_solar_high-yield_seawater_desalination_by_modular_and_low-cost_distillation. Acesso em: 20/07/2022.

TIGRE, A. A. S. **Introdução à Energia Solar: Heliotérmica e Fotovoltaica**. 2020. 39 p. Monografia (Engenharia Elétrica e Eletrônica) — CENTRO UNIVERSITÁRIO ESTÁCIO DE SÃO PAULO. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/343097240_Introducao_a_Energia_Solar_Heliotermica_e_Fotovoltaica. Acesso em: 06/02/2023.

TIWARI, G.; SAHOTA, L. **Advanced Solar-Distillation Systems: Basic Principles, Thermal Modeling, and Its Application**. 1. ed. Springer, 2017a. v. 1. 482 p. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-10-4672-8>. Acesso em: 30/01/2023.

TIWARI, G.; SAHOTA, L. Review on the energy and economic efficiencies of passive and active solar distillation systems. **Desalination**, Elsevier, v. 401, p. 151 – 179, Janeiro 2017b. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916416311821?via%3Dihub>. Acesso em: 25/01/2023.

TIWARI, G.; SHYAM, A. T. **Handbook of Solar Energy: Theory, Analysis and Applications**. Pensacola: Springer, 2016. 774 p. Disponível em: <https://sci-hub.se/10.1007/978-981-10-0807-8>. Acesso em: 20/07/2022.

TIWARI, G.; SINGH, H.; TRIPATHI, R. Present status of solar distillation. **Solar Energy**, Elsevier, v. 75, p. 367 – 373, 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X0300255X>. Acesso em: 01/12/2022.

TORRI, J. B. **Dessalinização de água salobra e/ou salgada: métodos, custos e aplicações**. 2015. 51 p. Monografia (ENGENHARIA QUÍMICA) — UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL ESCOLA DE ENGENHARIA. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/127799/000970356.pdf?sequence=1#:~:text=Dentro%20deste%20contexto%2C%20o%20presente%20trabalho%20tem%20como,dessaliniza%C3%A7%C3%A3o%2C%20visando%20aumentar%20a%20oferta%20de%20%C3%A1gua%20pot%C3%A1vel>. Acesso em: 30/05/23.

TOTH, A. J. Modelling and Optimisation of Multi-Stage Flash Distillation and Reverse Osmosis for Desalination of Saline Process Wastewater Sources. **Membranes**, MDPI, v. 10, n. 10, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0375/10/10/265>. Acesso em: 25/01/2023.

TRANCANELLI, D. **Grandezas físicas e análise dimensional: da mecânica à gravidade quântica**. 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/z8ZCRv75nd3Q7jCc9VfL5NK/?lang=pt#>. Acesso em: 03/01/2023.

TUNDISI, J. G. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. **Estudos Avançados**, São Paulo, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/7gyMPtTzfkYfWWsMHqVLTqm/?lang=pt>. Acesso em: 19/03/2023.

UNICEF. **Água e a crise climática global: dez coisas que você deve saber**. 2022. Disponível em: <https://www.unicef.org/brazil/agua-e-crise-climatica-global-dez-coisas-que-voce-deve-saber#:~:text=A%20mudan%C3%A7a%20clim%C3%A1tica%20est%C3%A1%20interrompendo%20os%20padr%C3%B5es%20clim%C3%A1ticos%2C,as%20crian%C3%A7as%20e%20os%20adolescentes%20precisam%20para%20sobreviver>. Acesso em: 14/06/2023.

USBERCO, J.; SALVADOR, E. **Química**: Volume único. 9. ed. São Paulo: Saraiva, 2013. 796 p.

WWF. **AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**. 2022. Blog. Disponível em: https://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/reducao_de_impactos2/clima/mudancas_climaticas2/. Acesso em: 20/07/2022.

WYLEN, G. V.; BORGNACKE, C.; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da Termodinâmica**. 7. ed. São Paulo: Blucher, 2009. 678 p.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física II**: Termodinâmica e Ondas. 12. ed. São Paulo: Addison Wesley, 2008. 329 p.

ZEMANSKY, M. W. **Calor e Termodinâmica**. 5. ed. Rio de Janeiro - RJ: Editora Guanabara Dois S.A., 1978. v. 1. 611 p.

ZOTALIS, K. *et al.* Desalination Technologies: Hellenic Experience. **Water**, v. 6, p. 1134 – 1150, Maio 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/272756219_Desalination_Technologies_Hellenic_Experience/references. Acesso em: 22/10/2022.