



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**DESTILAÇÃO SOLAR PARA FINS DE DESSALINIZAÇÃO:
APLICAÇÃO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS E
TECNOLÓGICOS PARA A PRODUÇÃO MAIS EFICIENTE
DE ÁGUA POTÁVEL**

WILDSON URSULINO LEITE

Orientador: Prof. Dr. André Luis Lopes Moriyama

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Magna Angélica dos Santos Bezerra Sousa

Natal/RN

Fevereiro de 2019

WILDSON URSULINO LEITE

**DESTILAÇÃO SOLAR PARA FINS DE DESSALINIZAÇÃO:
APLICAÇÃO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS E
TECNOLÓGICOS PARA A PRODUÇÃO MAIS EFICIENTE
DE ÁGUA POTÁVEL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Química, sob a orientação do Prof. Dr. André Luis Lopes Moriyama e coorientação da Prof.^a Dr.^a Magna Angélica dos Santos Bezerra Sousa.

Natal/RN

Fevereiro de 2019

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Leite, Wildson Ursulino.

Destilação solar para fins de dessalinização: aplicação de materiais alternativos e tecnológicos para a produção mais eficiente de água potável / Wildson Ursulino Leite. - 2019. 115 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Natal, RN, 2019.

Orientador: Prof. Dr. André Luis Lopes Moriyama.

Coorientadora: Profa. Dra. Magna Angélica dos Santos Bezerra Sousa.

1. Dessalinizador solar - Dissertação. 2. Materiais fotoativos - Dissertação. 3. Água doce - Dissertação. 4. Semiárido brasileiro - Dissertação. I. Moriyama, André Luis Lopes. II. Sousa, Magna Angélica dos Santos Bezerra. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 628.3

LEITE, Wildson Ursulino - Destilação Solar para Fins de Dessalinização: Aplicação de Materiais Alternativos e Tecnológicos para a Produção mais Eficiente de Água Potável. 2019. 115 f. Dissertação de Mestrado, UFRN, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Natal/RN, Brasil.

Orientador: Prof. Dr. André Luis Lopes Moriyama.

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Magna Angélica dos Santos Bezerra Sousa

RESUMO: A crescente crise hídrica global e o fenômeno da seca que afeta o semiárido brasileiro, evidenciam a real necessidade de se investigar sistemas e processos de dessalinização mais eficientes e baratos. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é investigar a utilização de materiais alternativos e tecnológicos na absorção de radiação solar, com o propósito de aumentar a produtividade de destiladores solares de desenho simples. A aplicabilidade dos materiais selecionados, tais como: ferrite de cobalto, quitosana/Grafite, cinza residual, monazita/alanita e tinta comercial preta, passaram a ser investigadas pelo estudo da cinética de evaporação, conduzida em ambiente fotoassistido e sob irradiação solar real. Para isto, um evaporador fotoassistido foi projetado e construído, seguido pelo desenvolvimento de metodologias para a aquisição da cinética de evaporação nos dois ambientes investigados. Ensaio fotoassistido com ferritas de cobalto nanoestruturadas promoveram incrementos máximos de 14,8% na taxa de evaporação em comparação ao sistema de referência, com reprodutibilidade superior a 99%, evidenciando que tanto o evaporador quanto a metodologia para a aquisição dos dados cinéticos neste ambiente, são confiáveis. Estudos Fotoassistidos com cinza residual da indústria sucroalcooleira, resultou em aumento de 24,3% na taxa de evaporação, comparado ao sistema de referência. Experimentos de evaporação em ambiente real, fomentaram produtividade melhorada em até 60,7% com a utilização de tinta comercial preta de aspecto fosco, sugerindo acumulado de 4,0 kg/m² de destilado em apenas 3,5 h de exposição solar.

PALAVRAS-CHAVE: Dessalinizador solar; materiais fotoativos; água doce; semiárido brasileiro.

LEITE, Wildson Ursulino - Solar Distillation for Desalination Purposes: Application of Alternative and Technological Materials for the more Efficient Production of Drinking Water. 2019. 115 p. Dissertation, Post-graduation Program of Chemical Engineering, Federal University of Rio Grande do Norte. 2019, Natal/RN, Brazil.

Advisor: Prof. Dr. André Luis Lopes Moriyama.

Co-advisor: Prof.^a Dr.^a Magna Angélica dos Santos Bezerra Sousa

ABSTRACT: The growing global water crisis and the drought phenomenon that affects the Brazilian semi-arid region show the real need to investigate more efficient and low cost desalination systems and processes. In this context, the objective of this work is to investigate the use of alternative and technological materials in the absorption of solar radiation, with the purpose of increasing the productivity of simple design solar distillers. The applicability of selected materials such as: Cobalt Ferrite, Chitosan | Graphite, Residual ash; Monazite \ Alanita and Black Commercial Paint, were investigated by the study of evaporation kinetics, conducted in a photo-assisted environment and under real solar irradiation. For this, a photo-assisted evaporator was designed and built, followed by the development of methodologies for the acquisition of evaporation kinetics in the two environments investigated. Photoassisted assays with nanostructured cobalt ferrite promoted maximum increments of the 14.8% in the evaporation rate compared to the reference system, with reproducibility higher than 99%, evidencing that both the evaporator and the methodology for the acquisition of the kinetic data in this environment are reliable. Photo-based studies with residual ash from the sugar and alcohol industry resulted in a 24.3% increase in the evaporation rate compared to the reference system. Evaporation experiments in the real environment promoted improved productivity by up to 60.7% with the use of black commercial frosted paint, suggesting accumulated 4.0 kg / m² of distillate in only 3.5 hours of sun exposure.

KEYWORDS: Solar desalinators; photoactive materials; fresh water; Brazilian semi-arid.

DEDICATÓRIA

Ao Senhor Deus, autor e mantenedor da vida!

Aos meus primeiros professores, meu pai Wilson Ursulino Leite (*in memoriam*) e minha mãe Maria Cícera Marques da Silva.

AGRADECIMENTOS

Ao Senhor Deus, aquele que invariavelmente É! Seu amor e graça, ó Deus, enchem minha vida de inspiração e propósito, todos os dias!

A minha mãe, Maria Cícera, cuja coragem, compreensão e presença me trouxeram até aqui. Seu amor é inconfundível! À memória do meu pai, Wilson Leite, cujo amor e cumplicidade me inspiram a ser um pai como ele foi para mim!

Aos meus irmãos, Carlos Alberto Leite e Marcelo Leite, cuja confiança e grande apoio pavimentaram esta conquista. Por vocês, abraço meus sobrinhos e cunhadas.

A minha querida Tahyara Barbalho. Sua presença em todo o processo é para mim inexprimível! Sou imensamente agradecido a Deus por você em minha vida!

A dois casais que se tornaram minha família em Natal. Obrigado, Carlos Campos e Célia Regina, vocês são como pais para mim! Seu Cláudio Manoel e dona Kátia Barbalho, a companhia de vocês torna a saudade de casa suportável e deixa esta cidade habitável para mim; vocês me inspiram!

À igreja de Cristo, da qual faço parte. Obrigado pelas constantes orações e súplicas por mim. Vocês me sustentaram espiritualmente!

Aos amigos da Pós-graduação. Larissa Pinheiro, você tem parte nesta conquista. Obrigado pelas muitas vezes que você me motivou a prosseguir, me mostrando o caminho para chegar até aqui! Guilherme Mentges, meu amigo “na tora”. Obrigado pela amizade, muitas horas de trabalho juntos e por apresentar Caio Braga, imprescindível com tudo relacionado ao ARDUINO! Maitê Medeiros, minha amiga inteligente, estudiosa e curiosa. Obrigado pelas dicas, orientações e companhia! Angélica Vital, Indira Medeiro, Larissa Soares e Mayara Gomes, obrigado por fornecerem seus materiais para serem testados nesta pesquisa. Matheus Veríssimo e Yara Gomes, muito obrigado com a correção do inglês! Maria do Socorro, obrigado pela amizade e também pela indicação para a publicação do meu primeiro livro. Em nome de vocês, agradeço aos demais amigos do Laboratório de Materiais Nanoestruturados e Reatores Catalíticos (LAMNRC/UFRN). Todos vocês tornam o ambiente de trabalho prazeroso, saudável e muito produtivo!

Aos técnicos desta Universidade Federal do Rio Grande do Norte, em especial do DMP, da serraria, do almoxarifado e do laboratório de engenharia mecânica. Sem a liberalidade e disposição de vocês, este trabalho não seria possível.

À professora Magna Angélica, pelo contato inicial na IES e coorientação deste trabalho. Ao professor Carlson Pereira, pelo entusiasmo e motivação de sempre, além do profundo

conhecimento transmitido. Ao professor André Moriyama, pela orientação deste trabalho, paciência, pelo bom ânimo e por acreditar na proposta daquele, até então, desconhecido alagoano. Meus sinceros agradecimentos e admiração!

Ao programa de Pós-graduação em Engenharia Química, pela oportunidade de aperfeiçoar meus conhecimentos. Aos seus professores e todo o corpo técnico. À Universidade Federal do Rio Grande do Norte, por toda a estrutura. Por fim, ao Programa de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao povo potiguar. A solidariedade de vocês me inspira!

Certamente muita gente ficou de fora desta lista. Também pudera, julgo que não caberia em poucas páginas! A todos estes, saúdo, agradeço e peço perdão em nome de Cristo Jesus!

“Quem beber desta água terá sede outra vez, mas quem beber da água que eu lhe der nunca mais terá sede. Pelo contrário, a água que eu lhe der se tornará nele uma fonte de água a jorrar para a vida eterna”.

Jesus Cristo

SUMÁRIO

1	Introdução	10
1.1	Objetivos	11
1.1.1	Objetivos Gerais	11
1.1.2	Objetivos Específicos	11
2	Revisão Bibliográfica.....	14
2.1	Recursos Hídricos Globais	14
2.2	Dessalinização.....	17
2.3	Destilação Solar.....	20
2.3.1	Aspectos de Engenharia da Destilação Solar.....	27
2.3.1.1	Transferência de Calor	27
2.3.1.2	Transferência Simultânea de Calor e Massa – Evaporação	28
2.4	Energia Solar e Radiação Eletromagnética.....	31
2.5	Semiárido Brasileiro: Realidade de Sal e Sol	35
2.5.1	Programa Água Doce (PAD)	36
2.5.2	Potencial Energético Solar Brasileiro	37
3	Materiais e Métodos	40
3.1	Solução Salina	40
3.2	Placas Absorvedoras de Radiação.....	40
3.3	Materiais Absorvedores de Radiação	43
3.3.1	Ferrita de Cobalto (CoFe ₂ O ₄)	44
3.3.2	Quitosana/Grafite.....	44
3.3.3	Cinza Residual da Indústria Sucroalcooleira	45
3.3.4	Monazita/Alanita	45
3.3.5	Tinta Comercial Preta	46
3.4	Evaporação Fotoassistida.....	47
3.4.1	Construção do Aparato Experimental.....	47
3.4.2	Metodologia para Aquisição de Dados Cinéticos.....	55
3.5	Curva de Calibração: Salinidade em Função do Índice de Refração	57
3.6	Experimentos Solares	58
3.6.1	Evaporação.....	59
3.6.2	Aquecimento Superficial	59
4	Resultados e Discussões.....	62
4.1	Caracterização da Cinza Residual	62
4.2	Evaporação Fotoassistida.....	63
4.2.1	Ferrita de Cobalto	63
4.2.2	Placas Absorvedoras de Radiação	74
4.3	Experimentos Solares	83
4.3.1	Evaporação.....	83
4.3.2	Aquecimento Superficial	88
5	Conclusão.....	93
	REFERÊNCIAS	95
	ANEXO I – Delimitação do Semiárido	102
	ANEXO II – Delimitação do Semiárido potiguar	103

ANEXO III – Irradiação global Brasileira (médias mensais do acumulado diário) 104	
ANEXO IV – Irradiação Global Brasileira (médias anuais do acumulado diário) 105	
APÊNDICE I – Projeto do Evaporador Fotoassistido	106
APÊNDICE II – Código Arduíno para Leitura dos Parâmetros dos Sensores DHT22	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Distribuição da água no Planeta Terra.	15
Figura 2.2 – Média anual de conflitos pela água relatados no período 1930 – 2016. ..	16
Figura 2.3 – Mapa de conflitos pela água no período 2010 – 2018.....	16
Figura 2.4 – Esquema de um destilador solar convencional.	21
Figura 2.5 – Corte transversal de destilador solar convencional e seus principais componentes.	21
Figura 2.6 – Destiladores solares de desenhos já consolidados.....	22
Figura 2.7 – Primeira planta de destilação solar. Las Salinas, Chile.....	24
Figura 2.8 – Destiladores solares implantados pela COONAP e NERA em comunidades rurais do semiárido paraibano.....	24
Figura 2.9 – Principais fluxos de energia no processo de destilação solar.....	27
Figura 2.10 – Curva genérica para cinéticas de secagem.	29
Figura 2.11 – Formas de irradiação no sistema real Terra/Atmosfera.	33
Figura 2.12 – Espectro da radiação eletromagnética.	34
Figura 3.13 – Placas absorvedoras de radiação (a) apenas com resina epóxi, (b) cinza residual, (c) quitosana/grafite e (d) monazita/alanita.	43
Figura 3.14 – Composição percentual dos minerais monazita/alanita.	46
Figura 3.15 – Placas absorvedoras de radiação com a tinta comercial preta: (a) pintura interna e (b) pintura externa.....	47
Figura 3.16 – Arranjo com 16 lâmpadas igualmente espaçadas e distribuídas em 1m ² . (a) vista superior, (b) vista lateral.....	48
Figura 3.17 – Distribuição de radiação para 16 lâmpadas/m ² e para lâmpadas individuais.	48
Figura 3.18 – Esquema com os principais componentes do evaporador fotoassistido.	50
Figura 3.19 – Suporte de policarbonato.....	50
Figura 3.20 – Evaporador fotoassistido e seus periféricos. (a) sistema completo: luminária, estrutura de MDF e balança analítica. (b) circuito elétrico para ajuste de rotação das ventoinhas do sistema de arrefecimento. (c) placa ARDUINO e circuitos eletrônicos para a obtenção de parâmetros de umidade relativa e temperatura. (d) e (e) placas sobre o suporte de policarbonato no interior da câmara de evaporação, evidenciando-se a mangueira para a alimentação da salmoura e o termopar para leitura da temperatura da salmoura.....	53

Figura 3.21 – Esquema do circuito elétrico para a regulação de rotação da ventoinha.	54
.....	
Figura 3.22 – Salinidade em função do índice de refração, para salmpuras de NaCl. .	58
Figura 3.23 – Leitura da temperatura da superfície de uma placa absorvedora em um experimento solar na ausência de salmoura.	60
Figura 4.24 – Difratoograma da cinza lavada (CZL01).	62
Figura 4.25 – Cinética de evaporação (branco).	64
Figura 4.26 – Cinética de evaporação (amostra 1).	64
Figura 4.27 – Cinética de evaporação (amostra 2).	64
Figura 4.28 – Cinética de evaporação (amostra 3).	64
Figura 4.29 – Cinética de evaporação (amostra 4).	64
Figura 4.30 – Taxas médias de evaporação (branco e amostras 1, 2, 3 e 4).....	65
Figura 4.31 – Temperatura da salmoura (branco).....	68
Figura 4.32 – Temperatura da salmoura (amostra 1).....	68
Figura 4.33 – Temperatura da salmoura (amostra 2).....	69
Figura 4.34 – Temperatura da salmoura (amostra 3).....	69
Figura 4.35 – Temperatura da salmoura (amostra 4).....	69
Figura 4.36 – Umidade relativa da atmosfera interna (branco).	70
Figura 4.37 – Umidade relativa da atmosfera externa (branco).	70
Figura 4.38 – Umidade relativa da atmosfera interna (amostra 1).	71
Figura 4.39 – Umidade relativa da atmosfera externa (amostra 1).....	71
Figura 4.40 – Umidade relativa da atmosfera intrena (amostra 2).	71
Figura 4.41 – Umidade relativa da atmosfera externa (amostra 2).....	71
Figura 4.42 – Umidade relativa da atmosfera interna (amostra 3).	71
Figura 4.43 – Umidade relativa da atmosfera externa (amostra 3).....	71
Figura 4.44 – Umidade relativa da atmosfera interna (amostra 4).	72
Figura 4.45 – Umidade relativa da atmosfera externa (amostra 4).....	72
Figura 4.46 – Temperatura da atmosfera interna (branco).	72
Figura 4.47 – Temperatura da atmosfera externa (branco).....	72
Figura 4.48 – Temperatura da atmosfera interna (amostra 1).	73
Figura 4.49 – Temperatura da atmosfera externa (amostra 1).....	73
Figura 4.50 – Temperatura da atmosfera interna (amostra 2).	73
Figura 4.51 – Temperatura da atmosfera externa (amostra 2).....	73
Figura 4.52 – Temperatura da atmosfera interna (amostra 3).	73

Figura 4.53 – Temperatura da atmosfera externa (amostra 3).....	73
Figura 4.54 – Temperatura da atmosfera interna (amostra 4).	74
Figura 4.55 – Temperatura da atmosfera externa (amostra 4).....	74
Figura 4.56 – Cinética de evaporação fotoassistida (P001).....	75
Figura 4.57 – Cinética de evaporação fotoassistida (P002).....	75
Figura 4.58 – Cinética de evaporação fotoassistida (P003).....	75
Figura 4.59 – Cinética de evaporação fotoassistida (P004).....	75
Figura 4,60 – Cinética de evaporação fotoassistida (P005).....	75
Figura 4.61– Cinética de evaporação fotoassistida (P006).....	75
Figura 4.62 – Cinética de evaporação fotoassistida (P007).....	76
Figura 4.63 – Taxas de evaporação para as placas P001 a P007 nos testes fotoassistidos.	76
Figura 4.64 – Temperatura da salmoura durante evaporação (P001).....	78
Figura 4.65 – Temperatura da salmoura durante evaporação (P002).....	78
Figura 4.66 – Temperatura da salmoura durante evaporação (P003).....	78
Figura 4.67 – Temperatura da salmoura durante evaporação (P004).....	78
Figura 4.68 – Temperatura da salmoura durante evaporação (P005).....	78
Figura 4.69 – Temperatura da salmoura durante evaporação (P006).....	78
Figura 4.70 – Temperatura da salmoura durante evaporação (P007).....	79
Figura 4.71 – Umidade relativa (P001).	79
Figura 4.72 – Temperatura (P001).....	79
Figura 4.73 – Umidade relativa (P002).	80
Figura 4.74 – Temperatura (P002).....	80
Figura 4.75 – Umidade relativa (P003).	80
Figura 4.76 – Temperatura (P003).....	80
Figura 4.77 – Umidade relativa (P004).	80
Figura 4.78 – Temperatura (P004).....	80
Figura 4.79 – Umidade relativa (P005).	81
Figura 4.80 – Temperatura (P005).....	81
Figura 4.81 – Umidade relativa (P006).	81
Figura 4.82 – Temperatura (P006).....	81
Figura 4.83 – Umidade relativa (P007).	81
Figura 4.84 – Temperatura (P007).....	81
Figura 4 85 – Cinéticas de evaporação (P001).	83

Figura 4.86 – Cinéticas de evaporação (P002).	83
Figura 4.87 – Cinéticas de evaporação (P003).	84
Figura 4.88 – Cinéticas de evaporação (P004).	84
Figura 4.89 – Cinéticas de evaporação (P005).	84
Figura 4.90 – Cinéticas de evaporação (P006).	84
Figura 4.91 – Cinéticas de evaporação (P007).	84
Figura 4.92 – Taxas de evaporação.	84
Figura 4.93 – Irradiação entre 10h30min e 14h00min em 12 de novembro, para os anos de 2015 e 2016.....	87
Figura 4.94 – Irradiação entre 10h30min e 14h00min em 19 de novembro, para os anos de 2015 e 2016.....	87
Figura 4.95 – Temperatura superficial das placas coletoras na ausencia de salmoura. Experimento realizado em 08 de agosto de 2018.	89
Figura 4.96 – Temperatura superficial das placas coletoras na ausencia de salmoura. Experimento realizado em 28 de agosto de 2018.	89
Figura 4.97 – Temperatura superficial das placas coletoras na presença de salmoura. Experimento realizado em 13 de agosto de 2018.	90
Figura 4.98 – Temperatura superficial das placas coletoras na presença de salmoura. Experimento realizado em 29 de agosto de 2018.	91
Figura A.99 – Delimitação do semiárido brasileiro.....	102
Figura A.100 – Delimitação do semiárido do Estado do Rio Grande do Norte.	103
Figura A.101 – Médias mensais do total diário de irradiação global horizontal.	104
Figura A.102 – Média anual do total diário de irradiação global horizontal.....	105
Figura A.103 – Peças da estrutura do evaporador fotoassistido.	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação da água quanto à salinidade, de acordo com a legislação brasileira.	18
Tabela 2.2 – Composição para síntese de águas oceânicas.	18
Tabela 2.3 – Padrão organoléptico de potabilidade para parâmetros selecionados, segundo a legislação brasileira vigente.	19
Tabela 2.4 – Classificação climática e nível de susceptibilidade à desertificação como função do índice de aridez.....	36
Tabela 3.5 – Especificações das placas absorvedoras de radiação.	42
Tabela 3.6 – Características do CoFe_2O_4 obtido pelo método de complexação EDTA/Citrato, variando pH e temperatura de calcinação.	44
Tabela 3.7 – Detalhamento das peças de MDF para composição da estrutura do evaporador foto-assistido.....	49
Tabela 3.8 – Especificações das amostras de diferentes salinidades e índices de refração.	57
Tabela 3.9 – Composição química da cinza lavada (CZL01) obtida por FRX.....	63
Tabela 4.10 – Taxas de evaporação médias, desvios padrões populacionais e erros para todos os experimentos com ferrita de cobalto em ambiente fotoassistido.	66
Tabela 4.11 – Taxas de evaporação e incrementos de produtividade em relação às placas P001 e P004, alcançadas em ambiente fotoassistido.....	76
Tabela 4.12 – Temperaturas (T) e umidades relativas (UR) médias do ar de admissão e exaustão à partir do momento de injeção da salmoura no evaporador fotoassistido. Entre parêntesis destacam-se os desvios padrões populacionais de cada grandeza.	82
Tabela 4.13 – Taxa de evaporação fomentada pelas placas P001 a P007 em ambiente de exposição solar real nos dias 12 e 19 de novembro de 2018.....	85

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Definições das irradiações do sistema real Terra/Atmosfera, ilustrado na Figura 2.11.....	33
Quadro 3.2 – Algoritmo pré-experimental para operação e aquisição de dados cinéticos a partir do evaporador fotoassistido.	56
Quadro A.3 – Código de programação ARDUINO para dois sensores DHT22 de temperatura em umidade relativa. Leitura dos parâmetros de 1 em 1 minuto.....	107

CAPÍTULO 1

Introdução

1 Introdução

O planeta Terra é exuberantemente azul devido à grande quantidade de água presente em sua superfície. No entanto, apenas 2,5% da água é doce, com aproximadamente 68,9% aprisionada nas geleiras, glaciais e neve permanente e o restante se distribuindo entre águas subterrâneas, superficiais e outros tipos de reservatórios (SHIKLOMANOV, 1998). Do modo como a água doce se distribui no planeta, se qualifica como sendo muito poucas as reservas que realmente se encontram acessíveis nos rios, córregos, lagos e aquíferos de curto período de recarga (MIHELICIC; ZIMMERMAN, 2012).

Autoridades mundiais preveem um futuro incerto para a humanidade em razão do aumento da demanda por água potável e à escassez dos recursos hídricos, com os conflitos sendo intensificados pela poluição e pelas mudanças climáticas. Nesse instante, a Organização da Nações Unidas (ONU) estima que mais de 2 bilhões de pessoas vivem o iminente risco de reduzirem o acesso à água potável e, em 2050, a previsão é de que pelo menos 25% das pessoas estarão vivendo em algum país afetado pela escassez crônica ou recorrente de água doce (ONU, 2018).

Diante dessas projeções, muitos pesquisadores apontam para os reservatórios salinos como a solução para a agravante crise hídrica global. Nesse contexto, Austrália e Israel já atendem importantes parcelas de suas populações dessalinizando águas dos oceanos, enquanto Qatar e o Kuwait, segundo Ghaffour et al. (2013), se abastecem exclusivamente por esse meio. De acordo com Zamen et al. (2014), grandes e médias demandas de água doce são apropriadamente atendidas por sistemas convencionais de dessalinização como, por exemplo, a osmose reversa (RO, sigla em inglês). No entanto, para os pequenos volumes geralmente requeridos por comunidades longínquas, os pesquisadores recomendam sistemas de operação mais simples e barata. Bezerra (2001), Bouchekima (2002) apud Bezerra (2004) e Wang et al. (2011), afirmam que os destiladores solares são dessalinizadores que atendem adequadamente as pequenas demandas de água potável de regiões remotas e ensolaradas.

Comunidades difusas em região de seca, cujas águas subterrâneas precisam de dessalinização prévia, são a realidade do semiárido brasileiro. A região compreende os nove estados nordestinos e parte de Minas Gerais. Ela representa aproximadamente 12% do território nacional e abriga por volta de 12% da população do país (BRASIL, 2018a). O enfrentamento da seca na região levou o Governo Federal brasileiro, entre outras medidas, a lançar, em 2004, o Programa Água Doce (PAD). Desde então, o programa diagnosticou 3145 comunidades rurais

e tem como meta inicial implantar, recuperar e o gerenciar 1209 sistemas de dessalinização em todo o semiárido (BRASIL, 2018b).

O Brasil dispõe de privilegiada oferta de energia solar, sobretudo no semiárido, devido às condições climáticas que propiciam sol a maior parte do ano. Em qualquer parte da nação, a irradiação global supera a de muitos países da União Europeia (PEREIRA et al., 2006). Por exemplo, o local menos ensolarado do país tem incidência maior que o lugar mais iluminado da Alemanha (PEREIRA et al., 2017). No entanto, infelizmente todo esse potencial energético não é devidamente aproveitado. Em 2016, o recurso representou estarrecedores 0,0% da Oferta Interna de Energia (OIE) entre as fontes renováveis (BRASIL, 2017) e, em 2017, teve um tímido avanço, participando com 0,1% na OIE, entre as fontes renováveis (BRASIL, 2018c).

Pelo exposto, fica evidenciada a real necessidade do desenvolvimento de sistemas de dessalinização baratos, eficientes e seguros, como alternativas para mitigar os efeitos da crescente crise hídrica global, sobretudo no semiárido brasileiro.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos Gerais

Baseando-se nas características hídricas do semiárido e da abundante oferta de energia solar incidente, é objetivo deste trabalho investigar a utilização de materiais alternativos e tecnológicos na absorção de radiação solar, com o propósito de aumentar a produtividade de destiladores solares de desenho simples, tendo em vista as inalienáveis premissas de baixo custo de construção, operação e manutenção, boa produtividade e segurança para entrega de destilados ausentes de contaminantes. Espera-se com esta pesquisa, produzir conhecimento científico para fomentar a popularização dos destiladores solares em todo o semiárido brasileiro, como alternativa tecnológica e social no combate à seca.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para alcançar os objetivos gerais destacados anteriormente, são listados nessa seção os objetivos específicos.

- a) Empregar os materiais absorvedores de radiação: ferrita de cobalto, quitosana/grafite, cinza residual da indústria sucroalcooleira, monazita/alanita e tinta comercial preta de aspecto fosco, na promoção da evaporação de água salina;
- b) Fixar com resina epóxi os materiais absorvedores de natureza particulada na concepção de placas absorvedoras de radiação;
- c) Realizar a caracterização da cinza residual por meio de difração de raios-X e fluorescência de raios-X;
- d) Projetar, construir e operar aparato experimental de evaporação fotoassistida, desenvolvendo metodologia para a aquisição de dados cinéticos nesse ambiente;
- e) Realizar ensaios de evaporação solar, desenvolvendo a metodologia para a determinação das cinéticas de evaporação em ambiente de exposição real;
- f) Acompanhar o aquecimento superficial das placas absorvedoras de radiação na presença e ausência de salmoura, com a finalidade de entender a dinâmica de aquecimento e fomentar dados para o dimensionamento do isolamento térmico dos futuros destiladores solares.

CAPÍTULO 2
Revisão Bibliográfica

2 Revisão Bibliográfica

Os tópicos seguintes trazem o aprofundamento teórico-científico da problemática abordada nesta dissertação, a saber, a distribuição global dos recursos hídricos, a escassez de água doce e os conflitos gerados no Brasil e no mundo, corroborando com o apelo acadêmico para a pesquisa e o desenvolvimento de equipamentos e técnicas baratas, eficientes e seguras de dessalinização das águas com elevado teor de sais. Esta revisão também aborda os conceitos de dessalinização, a classificação das águas quanto à concentração de sais, os padrões de potabilidade de água para o consumo humano mediante observância da legislação brasileira vigente e as tecnologias industrialmente empregadas para a dessalinização de grandes volumes. Passando para a tecnologia objeto deste estudo, aborda-se a destilação solar discorrendo sobre o processo e os seus aspectos de engenharia, os principais componentes de um equipamento convencional, um pouco de sua história e sua importância para o fornecimento eficiente de água potável para dessedentação humana e animal, bem como os motivos pelos quais os destiladores solares ainda são pouco populares e os esforços científicos para reverter esse quadro. A revisão continua descortinando os aspectos do semiárido brasileiro, trazendo luz à realidade da seca e também do potencial energético solar que o país, sobretudo a região, dispõe.

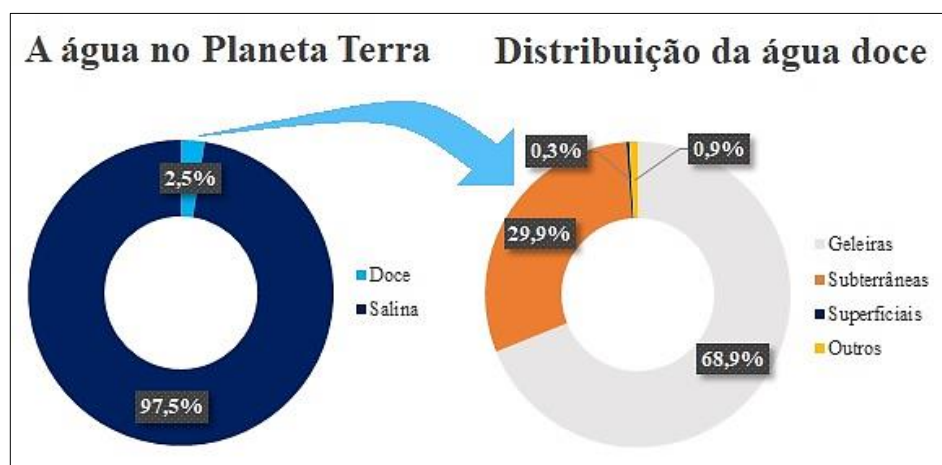
2.1 Recursos Hídricos Globais

De afirmações como “o planeta é azul”, feita pelo cosmonauta soviético e primeiro homem a viajar para o espaço, Yuri Gagarin (TUNDISI, 2009) e, “a Terra é um planeta aquático”, defendida pela Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (NASA, sigla em inglês) (NASA, 2018), podemos ser levados a concluir que a água é um recurso com o qual não devemos nos preocupar. No entanto, essa dedução é perigosamente enganosa e destoa da afirmação de Mihelcic e Zimmerman (2012), que destacam a pequena quantidade de recursos de água doce realmente acessíveis nos rios, lagos e aquíferos de curto período de recarga (inferiores a 1000 anos).

Aproximadamente 75% da superfície terrestre são cobertos por água (KABEEL, 2014; NASA, 2018), mas apenas uma pequena parcela dela é doce. A Figura 2.1 apresenta a distribuição percentual de água no planeta. Algo em torno de 97,5% dos recursos hídricos globais correspondendo à água salgada com ocorrência de 96,5% nos oceanos e 1% formando aquíferos e lagos salinos. Dos 2,5% das reservas de água doce, estima-se que 68,9% estejam

aprisionadas nas calotas polares, glaciais e sob a forma de neve permanente, 29,9% compõem o lençol freático, 0,3% são as águas superficiais que formam os rios, lagos e córregos e os 0,9% restantes, incluem as outras formas de reservatórios (GLEICK, 1996; SHIKLOMANOV, 1998; KABEEL, 2014).

Figura 2.1 – Distribuição da água no Planeta Terra.

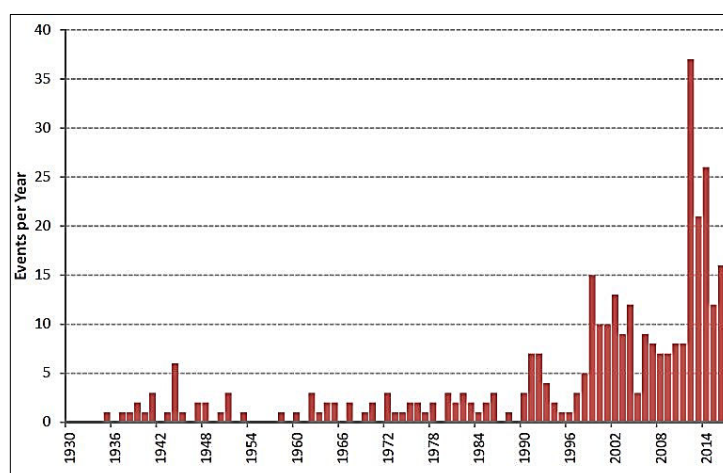


Fonte: Adaptado (GLEICK, 1996; SHIKLOMANOV, 1998; KABEEL, 2014).

Relatórios internacionais têm documentado os conflitos pela água doce em todo o mundo. Os levantamentos apontam para o aumento no número de registros nos últimos anos, mas evidenciam que o fenômeno não se deve apenas às tensões propriamente ditas, mas também a melhorias na comunicação, coleta de dados e informações, além da maior atenção e conscientização sobre a questão (GLEICK et al., 2014, 2018). Os pesquisadores reportam que os recursos hídricos têm sido alvo e ferramenta de guerra desde os tempos mais remotos, por isso categorizam os eventos como: gatilho, arma e vítima. No acontecimento classificado como gatilho, a água é a causa desencadeante ou a raiz do conflito. Na categoria arma, os recursos hídricos são literalmente as armas usadas nos entraves, enquanto que no conflito do tipo vítima, os sistemas hídricos são os alvos intencionais ou incidentais da violência (TWW, 2018a).

A Figura 2.2 mostra o número médio de conflitos pela água reportados por ano desde 1930 até 2016. Nela, é possível perceber a intensificação dos acontecimentos a partir da década de 1990, com médias mais pronunciadas ocorrendo entre os anos de 2012 e 2014.

Figura 2.2 – Média anual de conflitos pela água relatados no período 1930 – 2016.



Fonte: Gleick et al. (2018).

Já a Figura 2.3 apresenta o mapa de conflitos de 2010 a 2018. Nesse período, foram registrados 263 focos de tensão que vão de protestos, a mortes de pessoas. Notadamente os eventos se concentram no continente africano, Oriente Médio e Índia. Nesse intervalo foram reportados conflitos que passaram pela água de irrigação no Paquistão (2010) a dezenas de mortes no Irã (2018) decorrentes de protestos pela falta de água, má gestão e corrupção (TWW, 2018b).

Figura 2.3 – Mapa de conflitos pela água no período 2010 – 2018.



Fonte: TWW (2018b).

O mapa da Figura 2.3 também destaca três eventos violentos no Brasil, todos em 2012. No Norte do país, manifestantes incendiaram dependências da construção da barragem de Belo

Monte. No Nordeste, a seca severa levou ao aumento dos homicídios, naquilo que as autoridades classificaram como “guerra das águas”. No Centro-oeste, a polícia investigou a acusação de que latifundiários haviam envenenado as águas sagradas dos índios da tribo *Guarani-Kaiowa*. Entre 1962 e 1967, o país também se envolveu em questões diplomáticas com o Paraguai, quando as forças militares brasileiras reivindicaram o controle das Cataratas do Guaíra, paralisando negociações bilaterais para o desenvolvimento da região do rio Paraná (TWW, 2018b).

Nesse instante, a Organização das Nações Unidas (ONU) estima que mais de 2 bilhões de pessoas estão expostas ao risco iminente de reduzirem o acesso à água potável e, em 2050, prevê-se que 1/4 da população mundial viverá em algum país com escassez crônica ou recorrente de água doce (ONU, 2018). Até meados desse século, calcula-se que a demanda de água pode quadruplicar (CHEN et al., 2017), apontando para o agravamento das tensões pelos recursos hídricos.

Nesse contexto, é evidente e crescente a importância de processos e tecnologias para a dessalinização das águas dos mares, oceanos e outras fontes de águas com teores de sais acima dos padrões, a fim de garantir a segurança hídrica global e a manutenção da vida na Terra. Já foi mencionado que países como Austrália e Israel atendem importantes parcelas de suas populações com águas dessalinizadas dos oceanos, ambos com perspectivas de aumentarem a produção nos próximos anos. Ghaffour et al. (2013) reportam que Qatar e o Kuwait já se abastecem exclusivamente por esse meio. Não obstante, usar a abundante reserva dos oceanos para complementar a demanda de água potável, não pode soar como motivo para desleixo no combate a todas as formas de degradação ambiental, responsável por expressiva parcela dos problemas de abastecimento.

2.2 Dessalinização

O termo dessalinização é usado para descrever o processo de remoção de sais minerais dissolvidos, substâncias orgânicas, vírus, bactérias e sólidos de águas salinas ou salobras com a finalidade de obter água potável. O âmago do processo é a substancial redução dos Sólidos Totais Dissolvidos (TDS, sigla em inglês) presentes na amostra (WANG et al., 2011).

A legislação brasileira vigente classifica como água doce, aquela que possui salinidade igual ou inferior a 0,5‰. Água salobra, aquela com salinidade superior a 0,5‰ e inferior a 30‰. Salina, a água com salinidade igual ou superior a 30‰ (BRASIL, 2005), tal como resumido na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Classificação da água quanto à salinidade, de acordo com a legislação brasileira.

Salinidade	Classificação da água
Menor ou igual 0,5‰	Doce
Maior que 0,5‰ e menor que 30‰	Salobra
Maior ou igual a 30‰	Salina

Fonte: Brasil (2005).

Vale ressaltar que a salinidade tem unidade que exprime a massa de soluto pela massa de solução na razão de uma parte por mil (‰). Assim, o teor de 0,5‰, por exemplo, corresponde a 0,5 g de sal dissolvidos em 1000 g de solução. Não obstante, é possível exprimir a salinidade em termos de concentração (g/L ou mg/L) sem grandes prejuízos, uma vez que o erro absoluto das massas específicas de soluções com salinidade 0‰ e 30‰, nas condições ambientais de pressão e temperatura, corresponde a 0,0085 g/mL com 99,9% de precisão. Nessa abordagem, a legislação se aproximaria das concentrações de sal, segundo a classificação: água doce ≤ 500 mg/L; $500 \text{ mg/L} < \text{água salobra} < 30000 \text{ mg/L}$ e água salina $\geq 30000 \text{ mg/L}$.

É conveniente mencionar que o cloreto de sódio não é o único componente das águas marinhas. Embora este sal represente aproximadamente 68,1% dos inorgânicos dissolvidos, outras substâncias também compõem a solução, como convencionadas na Tabela 2.2, destinada à síntese de águas oceânicas.

Tabela 2.2 – Composição para síntese de águas oceânicas.

Componente	Concentração (g/L)
NaCl	24,53
MgCl ₂	5,20
Na ₂ SO ₄	4,09
CaCl ₂	1,16
KCl	0,695
NaHCO ₃	0,201
KBr	0,101
H ₃ BO ₃	0,027
SrCl ₂	0,025
NaF	0,003

Fonte: ASTM D 1141 – 98 (2003).

O Anexo XX da Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017 do Ministério da Saúde, versa do controle e da vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Entre outros, a norma brasileira preconiza os padrões microbiológicos, de turbidez para água pós-filtração ou pré-desinfecção, de potabilidade para substâncias

químicas que representam riscos à saúde, de cianotoxinas da água para consumo humano, de radioatividade da água para consumo humano e o padrão organoléptico de potabilidade. Para este último, são destacados na Tabela 2.3 apenas os Valores Máximos Permitidos (VMP) para sódio, cloreto, sulfato e TDS.

Tabela 2.3 – Padrão organoléptico de potabilidade para parâmetros selecionados, segundo a legislação brasileira vigente.

Parâmetro	VMP (mg/L)
Sódio	200
Cloreto	250
Sulfato	250
TDS	1000

Fonte: Brasil (2017).

As práticas modernas de dessalinização são amplamente categorizadas em processo de destilação ou por membrana (WANG et al., 2011). Aristóteles (384 – 322 a. C.) observou: a água salgada quando se transforma em vapor, torna-se doce, e o vapor não forma água salgada quando condensa novamente (DELYANNIS, 2003), enunciando o princípio da dessalinização por destilação.

A destilação é o processo térmico de separação mais amplamente utilizado na indústria química. É também o método mais utilizado para a purificação de água, responsável por aproximadamente 70% do volume global produzido. Esse processo se aproveita das diferentes volatilidades dos constituintes da mistura, havendo simultânea transferência de massa do estado líquido para o vapor, através da vaporização e, vice-versa, por meio da condensação (AYBAR, 2006; WANG et al., 2011; FOUST et al., 2013). Realizam essa operação unitária os dessalinizadores: Flash de Múltiplos Estágios (MSF, sigla em inglês), Multi Efeito (ME, sigla em inglês) e Compressão de Vapor (VC, sigla em inglês), amplamente utilizados e recomendados para atender grandes demandas de água potável (ZAMEN et al., 2014; BATAINEH, 2016).

Diferentemente da destilação, a separação por membrana não envolve mudanças de fase. Geralmente são empregadas membranas semipermeáveis em dessalinizadores de Osmose Reversa (RO, sigla em inglês) ou Eletrodialise (ED, sigla em inglês) (WANG et al., 2011; ZAMEN et al., 2014). Ambos equipamentos são comercialmente recomendados para atender médios e grandes volumes de água potável. Foust et al. (2013) explicam que a operação com membranas é uma questão de tamanho molecular. Segundo os pesquisadores, moléculas

pequenas passam mais facilmente pelos minúsculos poros de uma fina membrana. Por isso, se houver uma força motriz que as “empurre” através desses poros, as moléculas menores serão separadas das maiores. Na RO essa força motriz é a pressão, enquanto que na ED, é a eletricidade.

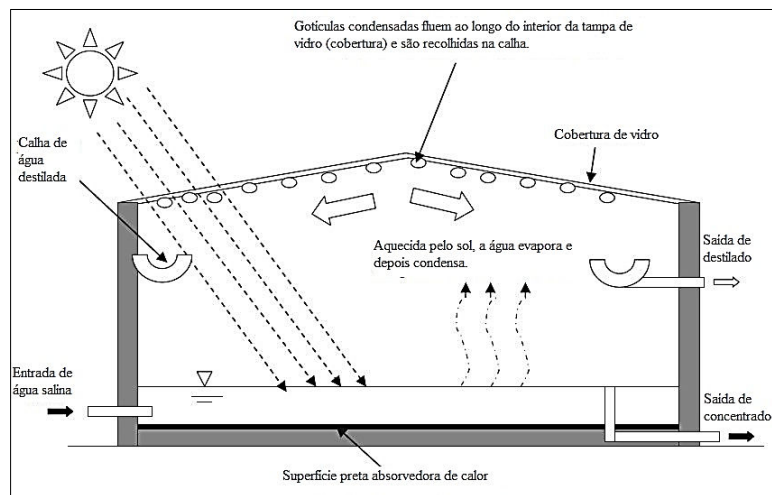
Embora eficientes, as tecnologias para a dessalinização de grandes volumes de água requerem, inevitavelmente, vultosos investimentos financeiros para a implantação, operação e manutenção das plantas industriais. Não obstante, em harmonia com a afirmação defendida por Bezerra (2001), Bouchekima (2002) apud Bezerra (2004), Wang et al. (2011) e Zamen et al. (2014), as pequenas demandas requeridas por populações de regiões remotas podem ser atendidas por equipamentos mais simples e de operação e manutenção mais baratas. Essas prerrogativas são reunidas pelos destiladores ou alambiques solares.

2.3 Destilação Solar

A destilação solar se encaixa no ramo térmico dos processos de dessalinização, com o sistema sendo autossuficiente do ponto de vista energético uma vez que o calor necessário para a vaporização da salmoura vem da radiação solar. Esse aspecto torna o processo promissor, pois usa uma fonte de energia limpa, renovável, gratuita e abundante em muitas regiões do planeta.

A Figura 2.4 representa esquematicamente o processo de destilação solar que, em menor escala, se assemelha ao ciclo hidrológico. A água salgada absorve parte da radiação solar, evapora e condensa na parte interna de uma cobertura de vidro inclinada, já livre dos sais. O destilado é, então, recolhido por uma calha e sai do sistema para pós-tratamento antes do consumo.

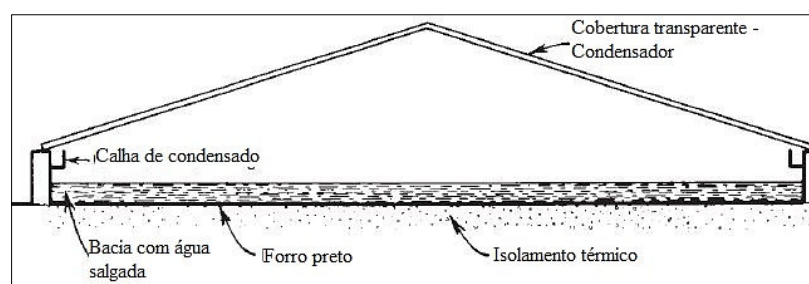
Figura 2.4 – Esquema de um destilador solar convencional.



Fonte: Adaptado (WANG et al., 2011)

A Figura 2.5 mostra a seção transversal de um destilador solar simples, expondo os componentes que constituem este modelo. A vantagem desse desenho é a sua simplicidade, fator que barateia a construção, operação e a manutenção do sistema. Basicamente, o destilador solar convencional é uma “casinha” com telhas de vidro, dotado de calhas internas e uma superfície coletora, também chamada de placa absorvedora de radiação, responsável pela conversão fototérmica.

Figura 2.5 – Corte transversal de destilador solar convencional e seus principais componentes.



Fonte: Adaptado (DUFFIE e BECKMAN, 2013).

A cobertura de vidro transparente tem a função quádrupla de permitir a passagem dos raios solares, impedir que o vapor escape do interior do sistema e flua para a vizinhança, condensar o vapor e, por último, conduzir as gotas de destilado para as calhas laterais.

As calhas laterais ficam posicionadas conforme mostradas na Figura 2.5 e são importantes por dois aspectos: recolher o condensado, promovendo a sua efetiva separação da salmoura e

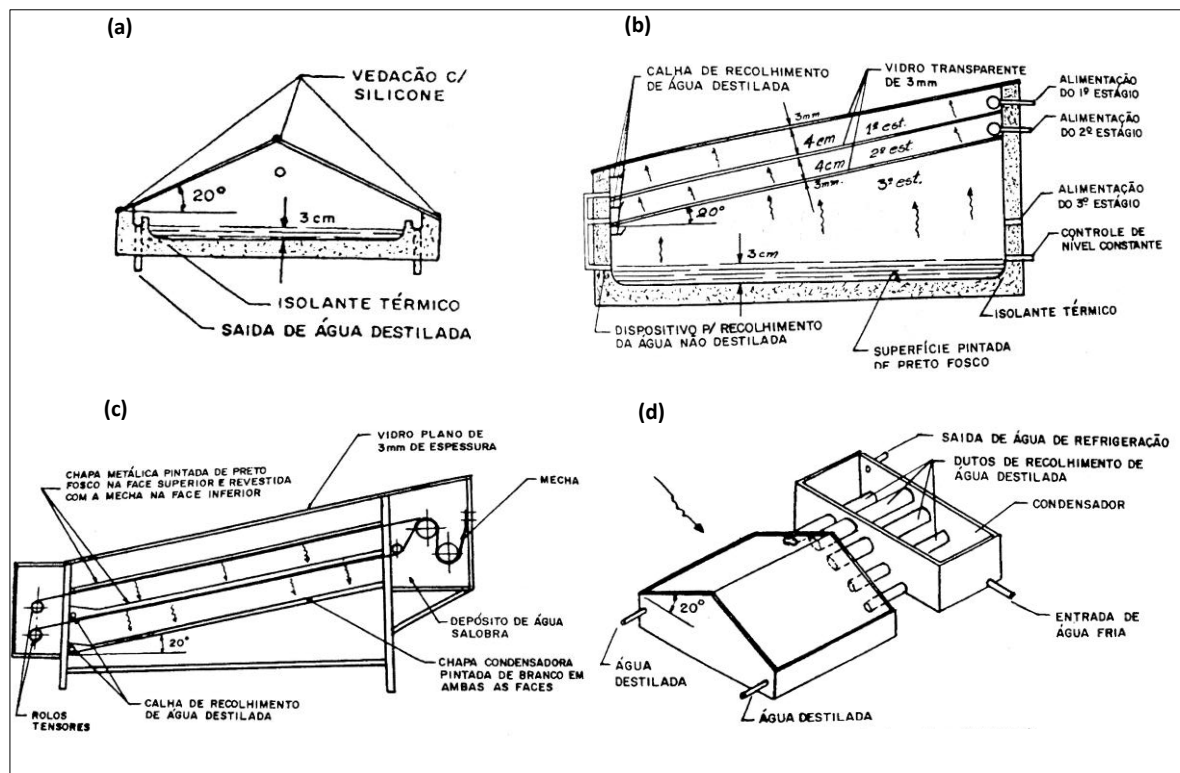
evitar que o destilado torne a evaporar, saturando o interior do equipamento com vapor, interrompendo a destilação.

Como apenas 13% da radiação incidente são absorvidas diretamente pela água (CHEN et. al., 2017), os destiladores solares são dotados de placas coletoras ou absorvedoras. Estas placas têm a função de absorver a radiação solar incidente e transferir o calor para a salmoura. Se os materiais constituintes dessas placas possuírem propriedades radiantes apropriadas, a coleta de energia se dará de forma mais eficiente, resultando no aumento da taxa de evaporação e, por conseguinte, da produção de destilado. Duffie e Beckman (2013) chamaram este imprescindível componente de forro preto, na Figura 2.5.

Para diminuir as perdas de energia térmicas para o ambiente, os destiladores solares recebem camadas de isolamento, indispensáveis para manter a eficiência do processo.

Bezerra (2001) discorre sobre alguns modelos de destiladores solares consolidados. A saber, o destilador convencional (Figura 2.6a), o mais simples dos alambiques solares e já discutido no parágrafo anterior; o destilador de múltiplos efeitos (Figura 2.6b); o de mecha (Figura 2.6c) e o de condensação separada (Figura 2.6d).

Figura 2.6 – Destiladores solares de desenhos já consolidados.



Fonte: Bezerra (2001).

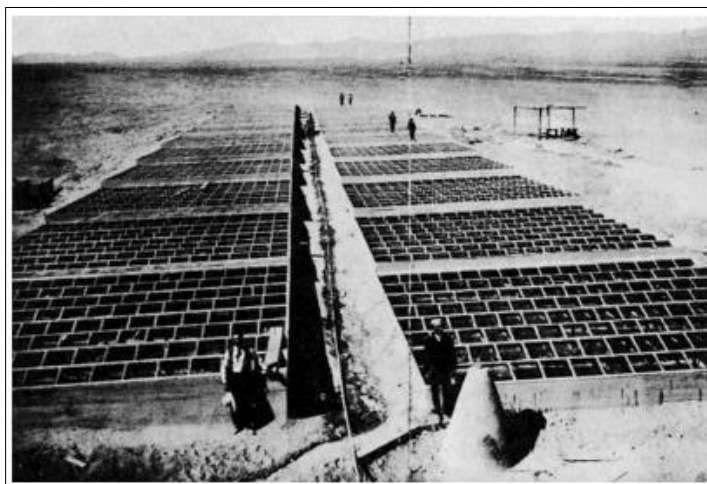
O destilador de múltiplo efeito (Figura 2.6b), diferentemente do equipamento convencional, tem apenas uma inclinação e cada divisão interna representa um estágio. O número de estágios nunca é superior a dez, sendo que cada um tem uma alimentação de água salobra, uma calha de recolhimento de condensado e uma calha de captação de água não destilada. Esta última é recolhida e destinada para a bandeja inferior, cujo fundo é pintado de preto fosco (BEZERRA, 2001). Um destilador com 10 estágios produzirá seis vezes mais que um destilador convencional de mesma área (Manual de Destilação Solar de Água Salina apud BEZERRA, 2001).

O destilador tipo mecha (Figura 2.6c) tem o aspecto interno, segundo Bezerra (2001), parecido com o de múltiplos efeitos, mas com a fundamental diferença se dando no transporte da água salina. No equipamento em questão, isso se dá num tecido poroso, denominado mecha. Há de se salientar que as descrições do mecanismo de destilação e do próprio equipamento sugerem que o modelo apresenta a maior complexidade de construção e operação entre aqueles apresentados pelo pesquisador.

Por outro lado, o destilador de condensação separada (Figura 2.6d) tem a simplicidade do destilador convencional, acrescido de uma unidade condensadora (BEZERRA, 2001).

Os alambiques ou destiladores solares são equipamentos conhecidos de longas datas. Até a idade média, a humanidade não tinha dimensão da importância da destilação solar. Foram os alquimistas árabes que utilizaram a técnica pela primeira vez para obtenção de água doce. Embora grandes contribuições tenham sido dadas por Giovanni Battista della Porta (1535 – 1615) durante o renascimento, foi apenas em 1872 que a primeira planta de destilação solar de grande escala foi inaugurada em Las Salinas, Chile (Figura 2.7). A unidade tinha o propósito de fornecer água potável para a dessedentação dos homens e animais que trabalhavam nas minas de nitrato. A planta operou por volta de quatro décadas, destilando águas de alta salinidade (140‰) oriundas das minas de salitre. Ela possuía 4450 m² de superfície de coleta solar, ocupava um espaço construído de 7896 m² e tinha uma produção média diária de 22,70 m³ de água doce (DELYANNIS, 2003; DUFFIE; BECKMAN, 2013), o que equivale a uma média de 5,10 L/m²/dia, aproximadamente.

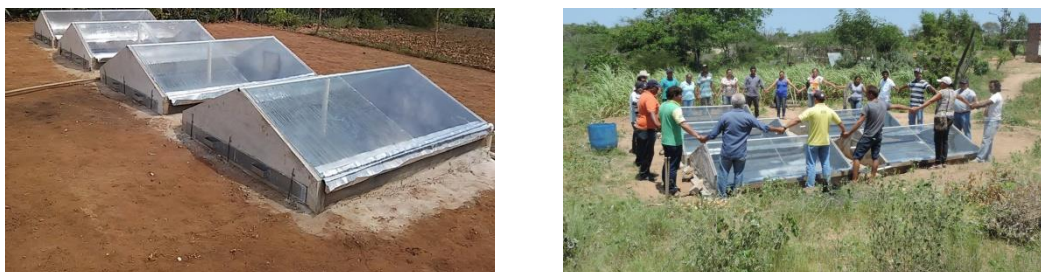
Figura 2.7 – Primeira planta de destilação solar. Las Salinas, Chile.



Fonte: Telkes *apud* Delyannis (2003).

No Brasil a tecnologia vem sendo empregada e disseminada pela Cooperativa de Trabalho Múltiplo de Apoio às Organizações de Autopromoção (COONAP) em parceria com o Núcleo de Extensão Rural Agroecológica (NERA) da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB). Em 2017 a iniciativa venceu o Prêmio Fundação Banco do Brasil de Tecnologia Social pela implantação de 28 destiladores solares em três comunidades rurais de municípios do semiárido paraibano, atendendo 150 pessoas distribuídas em 37 famílias. Os alambiques construídos têm 4 m² de absorção solar e produzem aproximadamente 10,7 L/dia (2,68 kg/m²/dia) a um custo unitário de R\$900,00 (BANCO DO BRASIL, 2019). A Figura 2.8 mostra as unidades de dessalinização acabadas e o envolvimento da população beneficiada.

Figura 2.8 – Destiladores solares implantados pela COONAP e NERA em comunidades rurais do semiárido paraibano.



Fonte: Banco do Brasil (2019).

Embora baratos, o emprego dos destiladores solares é pouco popular devido a sua baixa produtividade (SHARSHIR et al., 2017). Muitos esforços científicos têm sido feitos a fim de

melhorar a produtividade desses equipamentos e torna-los mais populares. Nesse âmbito, as linhas de pesquisa têm se dividido em buscar melhorias no desenho do destilador ou empregar materiais com propriedades radiantes mais adequadas na composição da placa absorvedora, ou ainda, melhorando as propriedades térmicas e ópticas da salmoura a partir do desenvolvimento de nanofluidos.

Aybar (2006) fez a modelagem matemática de um sistema contínuo de dessalinização, o qual chamou de Sistema Inclinado de Destilação Solar de Água (ISWD, sigla em inglês). Mesmo operando em elevadas latitudes, o sistema atingiu produção de água variando entre 3,5 kg/m² e 5,4 kg/m² durante o dia (de 7 h às 19 h). No entanto, mesmo atingindo boa produtividade para os padrões de incidência do norte do Chipre, a eficiência do equipamento é baixa (16,6%). Para uma incidência ótima de 700 W/m², alimentando continuamente o sistema com 3,6 kg/h de salmoura, são destilados 0,5972 kg/h. Considerando a elevada quantidade de concentrado que é descartado, o ISWD se torna inviável em lugares áridos e distantes do litoral, cuja disponibilidade de água, mesmo salgada, não é alta e o descarte do efluente concentrado representa um problema logístico e ambiental.

Silva et al. (2014) estudaram um destilador de cobertura piramidal nas cidades brasileiras de Florianópolis – SC e Natal – RN, entre os anos de 2003 e 2005. No Sul do país, obtiveram médias mensais que variavam de 3,1 a 3,7 kg/m²/dia, enquanto que no Nordeste as médias foram de 3,0 a 3,7 kg/m²/dia. Praticamente a mesma produção. Os pesquisadores também fizeram testes em ambiente simulado para investigar a melhor altura do filme da salmoura e a melhor inclinação da cobertura de vidro. Para tanto, concluíram que as taxas de evaporação eram melhores para filmes de 1,0 cm de altura e cobertura com inclinação de 25°. Ao estudar coberturas com inclinações de 45° e 20° na latitude de Natal – RN, Sousa (2010) verificou que a produtividade ótima do destilador solar de desenho convencional foi obtida com 20°.

Saettone e Valencia (2016) compararam destiladores na ausência de concentradores solares e na presença desse acessório, investigando três importantes aspectos: produção, desempenho e custo. Eles construíram três protótipos chamados de Destilador de Calha Parabólica (PTD, sigla em inglês), Destilador de Fresnel (FLD, sigla em inglês) e Destilador de Bacia Escalonada (SBD, sigla em inglês). Os dois primeiros usando concentradores de energia e o último sem o acessório. Sob as mesmas condições climáticas das adjacências de Lima, Peru, os pesquisadores obtiveram produção de água doce equivalente a 0,990 kg/m²/dia e eficiência de 45,8% para o PDT, 0,855 kg/m²/dia e eficiência de 38,0% para o FLD e 5,910 kg/m²/dia com eficiência de 4,4% para o SBD. O estudo também estimou o custo de produção do quilograma do destilado em €0,086, €0,130 e €0,034 para o PDT, FLD e o SBD, respectivamente.

Saettone et al. (2017) conseguiram aumentar a eficiência do destilador solar escalonado de paredes internas refletoras em 32,4%, incrementando um conjunto de tubos de vácuo de borossilicato. Para um dia ensolarado com acumulado de 19,93 MJ/m², o equipamento teve produção de 5,690 kg/m²/dia, ao passo que para um dia nublado com incidência de 12,63 MJ/m², a quantidade de destilado caiu para 3,648 kg/m²/dia.

Investigando melhorias nos materiais constituintes da placa absorvedora de radiação, Mandal et al. (2017) estudaram o efeito de nanopartículas plasmônicas na obtenção de placas de alto eficiência de conversão fototérmica. Se valendo de reações galvânicas, os pesquisadores depositaram nanopartículas de cobre em zinco pela técnica “mergulha e seca”, obtendo películas revestidas de nanopartículas plasmônicas (FNPs, sigla em inglês) com excelente absorção solar (0,96 com sol a 15°; 0,97 a 35° e 0,79 a 85°) e baixa emissividade hemisférica (0,10) sem o auxílio de revestimento antirreflexo. A técnica produziu FNPs de altíssima qualidade, superando absorvedores solares seletivos (SSAs, sigla em inglês) consolidados na literatura, com excelente estabilidade térmica e mecânica até 200 °C, a partir de uma técnica barata e não poluidora.

Sharshir et al. (2017) se debruçaram nos efeitos de nanopartículas de grafite em flocos (FGN, sigla em inglês), material de mudança de fase (PCM, sigla em inglês) e no resfriamento da cobertura de vidro (condensador) sobre o desempenho de destiladores solares de desenho convencional. O efeito sinérgico das propostas descritas aumentou a produtividade em 73,8%, em comparação ao destilador convencional, sem essas melhorias. Também foi investigada a altura do filme de salmoura, constatando um aumento de 13% na produção de destilado, quando a profundidade era diminuída de 2,0 para 0,5 cm. Contudo, do ponto de vista ambiental notamos que a elevada taxa de água necessária para resfriar a cobertura de vidro (108 L/h) do destilador, representa uma “melhoria” inviável.

Muitos outros pesquisadores se dedicaram a otimizar as taxas de produção dos destiladores solares a partir da melhoria das propriedades térmicas e ópticas da água a ser dessalinizada, como já foi comentado. Por exemplo, Wang et al. (2016) e Chen et al. (2017) obtiveram, respectivamente, taxas máximas próximas a 1000 g/h/m² e 1250 g/h/m² com incidência de 1 kW/m² em ambiente fotoassistido. O primeiro usou nanofluido de nanotubos de carbono, concentrando 19,04x10⁻⁴% (em volume). O segundo usou nanofluidos de nanotubos de carbono recuperáveis com 0,04% (em massa) em salmoura de baixa salinidade (1‰). Fu et al. (2017) atingiram a estonteante taxa de 19800 g/h/m² pelo efeito sinérgico das nanopertículas de ouro em nanofluidos de óxidos de grafeno (15,6% em massa), sob concentração solar de 16,77

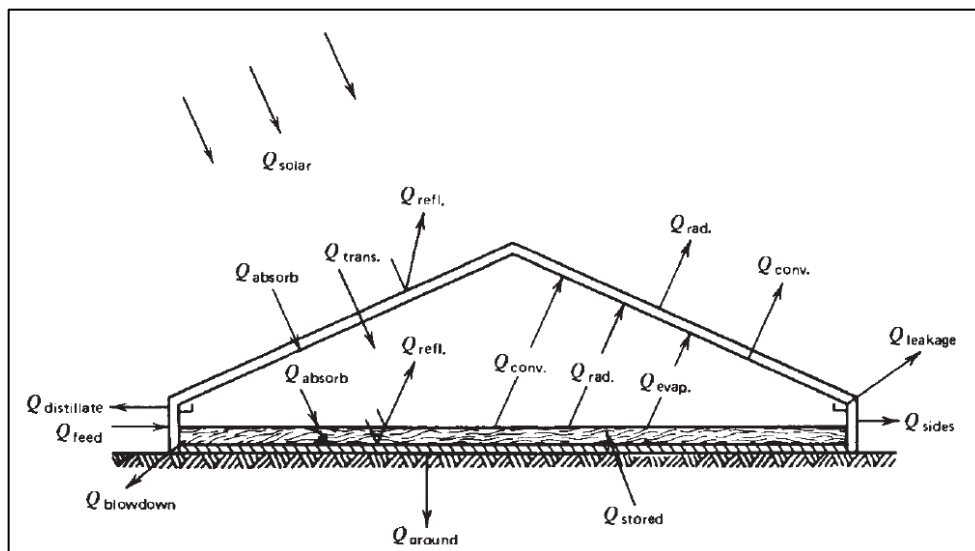
kW/m². Irradiação tão elevada que os materiais absorvedores foram degradados em 10 min de exposição.

2.3.1 Aspectos de Engenharia da Destilação Solar

2.3.1.1 Transferência de Calor

A Figura 2.9 mostra os principais fluxos de transferência de calor existentes no processo de destilação solar. Toda a energia fornecida ao sistema é de origem solar (Q_{solar}), importante dos pontos de vista econômico e ambiental.

Figura 2.9 – Principais fluxos de energia no processo de destilação solar.



Fonte: Talbert et al. (1970) apud Duffie e Beckman (2013).

A energia solar (Q_{solar}) da Figura 2.9 corresponde à irradiação global horizontal (G), definida mais adiante, no Quadro 2.1. Parte dessa energia é absorvida pela cobertura transparente do destilador (Q_{absorb}) e parte é refletida ($Q_{refl.}$), mas a maior fração é transmitida pelo vidro, chegando ao interior do sistema ($Q_{trans.}$). Da radiação que passa pela cobertura transparente, uma pequena parcela, omitida no esquema, é absorvida diretamente pela água, aproximadamente 13%, segundo Chen et al. (2017), uma fração é refletida nas superfícies da salmoura e da própria placa coletora ($Q_{refl.}$), sendo o restante absorvido pela placa coletora (Q_{absorb}). Em maior grau, é a radiação coletada na placa absorvedora (Q_{absorb}) e posteriormente

transferida para a salmoura, a responsável pelo seu aquecimento e consequente evaporação. Para tanto, é preferível que o material empregado para a coleta de radiação solar tenha alta absorvidade (α) e baixa emissividade (ε), segundo Mandal et al. (2017).

Duffie e Beckman (2013) afirmam que todos os esforços se concentram em aumentar o calor transferido pela evaporação ($Q_{evap.}$), que se traduz numa maior produção de água destilada. Parte desses esforços consiste no adequado dimensionamento do isolamento térmico do sistema, de modo a suprimir, ao máximo, as perdas de energia para o ambiente. Esse entendimento está em consonância com a abordagem de Foust et al. (2013), visto que o processo de evaporação se constitui numa operação simultânea de transferência de calor e de massa.

Os destiladores solares podem ser operados continuamente ou em batelada. Para o último caso, os fluxos Q_{feed} e $Q_{blowdown}$ podem ser suprimidos do esquema da Figura 2.9. Porém, a dita condução em batelada é, verdadeiramente, uma operação em semibatelada, uma vez que o destilado é constantemente drenado para fora do equipamento, independente se a salmoura é alimentada continuamente ou não.

2.3.1.2 Transferência Simultânea de Calor e Massa – Evaporação

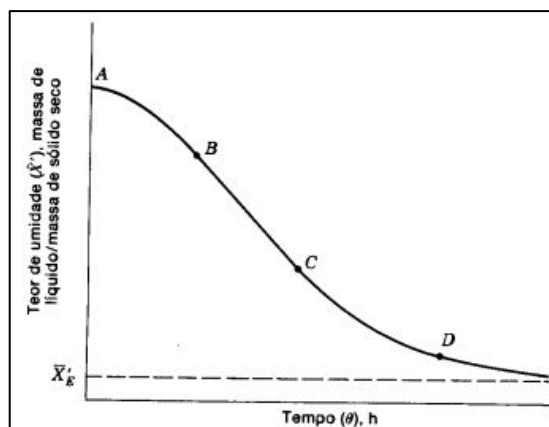
Os processos de evaporação são operações unitárias que visam a concentração de uma solução a partir da vaporização do solvente. Usualmente a solução concentrada é o produto de interesse, mas ocasionalmente pode-se ter interesse no solvente evaporado, como é o caso da evaporação de águas com elevados teores de sais para fins de dessalinização. Os processos de concentração podem ser conduzidos até que a solução fique saturada ou mesmo além, onde o soluto precipita sob a forma de sólidos cristalinos, configurando, neste caso, uma operação de cristalização (FOUST et al., 2013). Os pesquisadores afirmam, ainda, que nesses processos a separação dos constituintes é tão nítida que as composições de equilíbrio são desprezadas sem prejuízos, tornando-se importantes apenas quando o vapor é o produto de interesse, como no caso dos destiladores solares.

Os processos de evaporação podem ser classificados como (a) separação do soluto da solução, (b) vaporização do soluto, (c) operação de transferência de massa entre a fase líquida e o vapor, (d) transferência de massa entre a fase líquida e sólida e (e) operação de transferência de calor para a solução (GOMIDE, 1983). Segundo o pesquisador, a transferência de calor controla a operação. Foust et al. (2013) abordam a evaporação como operações simultâneas de transferência de calor e de massa, da mesma maneira que o faz para a cristalização e a secagem.

Corroborando com a similaridade dos processos, Gauto e Rosa (2011) referem que a secagem, em geral, é a remoção de um líquido de um sólido por evaporação. Não obstante, é razoável esperar que da abordagem das operações de secagem, chegue-se à equação da taxa ou da velocidade de evaporação (r_c), imprescindível para mensurar a produtividade do destilador solar e determinar a escolha dos materiais constituintes das placas absorvedoras de radiação solar, mesmo desconhecendo as suas propriedades radiantes.

A Figura 2.10 apresenta a curva do teor de umidade em função do tempo, típica dos processos de secagem. O segmento AB representa a operação quando o regime estacionário não está estabelecido. No intervalo de tempo entre os pontos B e C, a taxa de secagem é constante e, nesse caso, como afirmam Foust et al. (2013), a secagem é nitidamente um processo de evaporação, uma vez que a superfície do sólido está saturada de líquido. O Ponto C é o ponto que marca o teor de umidade crítico do processo, e a partir desse ponto a secagem sofrerá diretamente a influência do sólido por dois mecanismos distintos de transferência de massa. A saber, por capilaridade ou difusão. Esses dois fenômenos não serão abordados por fugirem ao escopo da proposta deste trabalho.

Figura 2.10 – Curva genérica para cinéticas de secagem.



Fonte: Foust et al. (2013).

As taxas ou velocidades de secagem (r) são determinadas pelo modelo, mostrada na Equação 1. Em que r é a taxa de secagem ($\text{g}/\text{min}/\text{cm}^2$), m_s é a massa de sólido seco (g), A é a área da interface líquido-gás (cm^2) e \bar{X}' é o teor de umidade no sólido ($\text{g}_{\text{líquido}}/\text{g}_{\text{sólido seco}}$) registrada no tempo t .

$$r = -\frac{m_s}{A} \frac{d\bar{X}'}{dt} \quad (1)$$

Como é descrito na ordenada do gráfico da Figura 2.10 e no parágrafo anterior, o teor de umidade (\bar{X}') é a razão entre a massa de líquido (m_L) e a massa de sólido seco (m_s). Portanto, como nos processos de secagem a massa de sólido seco não varia em função do tempo, a Equação 1 pode ser reescrita como mostrada na Equação 2.

$$r = -\frac{1}{A} \frac{dm_L}{dt} \quad (2)$$

No entanto, sabendo que a massa da solução (m) é a soma das massas do solvente líquido (m_L) e do soluto (m_s) e tendo em vista a já citada afirmação de que a massa de sólido não sofre alterações no processo de interesse, tem-se, pela regra da soma das derivadas, a expressão seguinte:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{dm_L}{dt} + \frac{dm_s}{dt} \Rightarrow \frac{dm}{dt} = \frac{dm_L}{dt}$$

Desse modo, a Equação 2 pode ser reescrita como mostrada na Equação 3. Esta última é uma expressão razoável, visto que nos procedimentos experimentais de evaporação de soluções salinas, a massa da solução é registrada em função do tempo com o auxílio de uma balança.

$$r = -\frac{1}{A} \frac{dm}{dt} \quad (3)$$

Relembrando que os processos de secagem têm um período de taxa constante, caracterizada originalmente pela evaporação com eventuais, mas não firmemente estabelecidas, interferências da superfície do sólido sobre a transferência de massa e calor (FOUST et al., 2013), a taxa ou a velocidade de evaporação (r_c) pode ser obtida pelo modelo descrito na Equação 3, acima, considerando-se exclusivamente o período caracterizado por uma reta na curva cinética de perda de massa em função do tempo.

A literatura especializada nas operações de evaporação é unânime ao afirmar que a umidade da atmosfera secante é fundamental para o sucesso ou não do processo. Inclusive, já foi comentada que uma das funções das calhas em um destilador solar é drenar o condensado para fora do sistema, garantindo que a umidade relativa da atmosfera interna do equipamento não atinja a saturação (100%), inviabilizando a produção de destilado.

A umidade relativa (UR) expressa, em termos percentuais, a pressão parcial de vapor da água (p_i) pela pressão de vapor da água na temperatura do sistema ($p_i^*(T)$) (FELDER; ROUSSEAU, 2014), sendo modelada pela Equação 4.

$$UR = \frac{p_i}{p_i^*(T)} \times 100\% \quad (4)$$

A Pressão de vapor da água em função da temperatura do sistema é muito bem correlacionada pela Equação de Antoine (Equação 5) com valores de $A = 8,10765$, $B = 1750,286$ e $C = 235,000$ para a água entre 0 e 60 °C e com p e T dados em mmHg e °C, respectivamente (DEAN, 1998; FELDER; ROUSSEAU, 2014).

$$\log p^* = A - \frac{B}{T + C} \quad (5)$$

Vale adiantar que devido às condições de temperatura e pressão em que operam os alambiques solares e também os experimentos de evaporação descritos futuramente nesta pesquisa, o emprego da lei dos gases ideais é uma hipótese aceitável. Para tanto, a pressão parcial (p_i) pode ser expressa pela Equação 6. Sendo C_i a concentração parcial da espécie de interesse, R a constante dos gases ideais e T a sua temperatura.

$$p_i = C_i RT \quad (6)$$

Da reunião das Equações 4, 5 e 6, com a leitura da umidade relativa (UR), da temperatura da atmosfera (T) e tendo lembrado R , é possível calcular a concentração de vapor de água (C_i) na atmosfera experimental.

2.4 Energia Solar e Radiação Eletromagnética

O Sol é o grande gerador que propicia a vida na Terra. Indiretamente ele é o responsável pela energia hidrelétrica, uma vez que o seu calor é o responsável pelo ciclo hidrológico que abastece os rios, lagos, aquíferos e enche as represas das modernas usinas. Há séculos os homens se valem dos processos convectivos fomentados pelo Sol. A força dos ventos impulsionou embarcações a vela, movimentou moinhos e, mais recentemente, gera trabalho nas tecnológicas turbinas eólicas para a produção de eletricidade. Os processos convectivos

promovidos pela estrela também são os responsáveis pelas correntes marítimas que explodem de vida os mares e oceanos. A luz solar é imprescindível na composição da biomassa através da fotossíntese e, conseqüentemente, dos biocombustíveis. A fotossíntese realizada pelos seres autotróficos também é o responsável pelo ciclo de oxigênio na atmosfera terrestre.

A energia solar é a força motriz direta para muitos processos químicos, térmicos e elétricos. A radiação solar pode ser direcionada à condução de reações químicas de interesse por meio de materiais semicondutores nos processos fotocatalíticos, pode ser aplicada diretamente para o aquecimento de água em instalações residenciais e industriais a partir da conversão fototérmica e pode ser usada para a geração de eletricidade nos painéis fotovoltaicos. Assim sendo, o Sol se constitui numa fonte de energia praticamente inesgotável, versátil, limpa, barata e abundante em muitas regiões do mundo.

Emitindo uma taxa energética praticamente constante há bilhões de anos, o Sol é uma estrela de tamanho médio que libera atualmente uma quantidade de energia da ordem de $3,86 \times 10^{26}$ W (PEREIRA et al., 2017). Lopez (2012) comenta que a cada dia, a radiação solar incidente sobre a Terra é equivalente a toda energia consumida no mundo por 27 anos. Bezerra (2001) reporta que em um ano a radiação que incide em nosso planeta corresponde de cinco a dez vezes todas as reservas conhecidas de combustíveis, inclusive o urânio.

Bird, Stewart e Lightfoot (2004) abordaram os aspectos qualitativos que originam a radiação eletromagnética, exemplificando que quando um sólido recebe energia, aquecendo-se, algumas de suas moléculas e átomos atingem um estado de mais elevada “excitação”. Após a interrupção do fornecimento de energia, há a espontânea tendência de que esses átomos e moléculas retornem ao seu estado de excitação original. Quando isso ocorre, o corpo libera a energia excedente sob a forma de radiação eletromagnética.

A radiação se propaga por meio de ondas eletromagnéticas mais eficientemente no vácuo. Para fins conceituais, designa-se poder emissivo (E) como sendo a taxa de radiação emitida por unidade de área e irradiação (G) como sendo a taxa de radiação incidente por unidade de área, independentemente da fonte (BERGMAN et al., 2014).

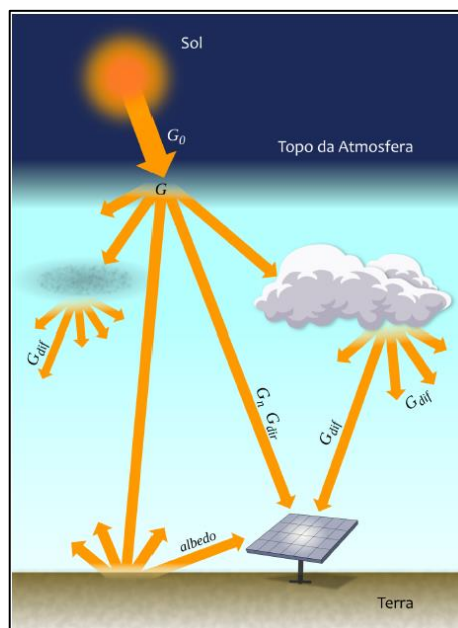
No sistema real Terra/Atmosfera, a radiação solar pode interagir com os vários elementos da atmosfera ou ser influenciada pela inclinação do Sol, fazendo-se necessária a designação de cada tipo de irradiação ou irradiância presentes neste sistema. Em seus trabalhos, Pereira et al. (2006) e Pereira et al. (2017), detalharam cada tipo de irradiação do sistema Terra/Atmosfera, as quais são apresentadas no Quadro 2.1 e ilustradas na Figura 2.11.

Quadro 2.1 – Definições das irradiações do sistema real Terra/Atmosfera, ilustrado na Figura 2.11.

Tipo de Irradiação	Definição
Irradiação extraterrestre (G_0)	É a taxa de radiação incidente por unidade de área em um plano horizontal imaginário no topo da atmosfera. É também conhecida como irradiância no topo da atmosfera ou G_{TOA} .
Irradiação direta normal (G_n)	É a taxa de energia por unidade de área oriunda diretamente do Sol que incide perpendicularmente à superfície. É também conhecida como pela sigla DNI.
Irradiação difusa horizontal (G_{dif})	É a taxa de radiação incidente por unidade de área decorrente do espalhamento do feixe solar direto pelos constituintes da atmosfera (moléculas, material particulado, nuvens, etc.).
Irradiação direta horizontal (G_{dir})	É a taxa de energia por unidade de área do feixe solar direto numa superfície horizontal. Pode ser obtida pelo produto da irradiação direta normal (DNI) e o cosseno do ângulo zenital solar: $G_{dir} = G_n \cos(\theta_z)$, sendo θ_z o ângulo zenital.
Irradiação global horizontal (G)	É a taxa de energia total por unidade de área incidente numa superfície horizontal. A irradiância global é definida pela soma: $G = G_{dif} + G_{dir}$.
Irradiação no plano inclinado (G_i)	É a taxa de energia total por unidade de área incidente sobre um plano inclinado na latitude do local em relação à superfície da Terra.

Fonte: Pereira et al. (2017).

Figura 2.11 – Formas de irradiação no sistema real Terra/Atmosfera.

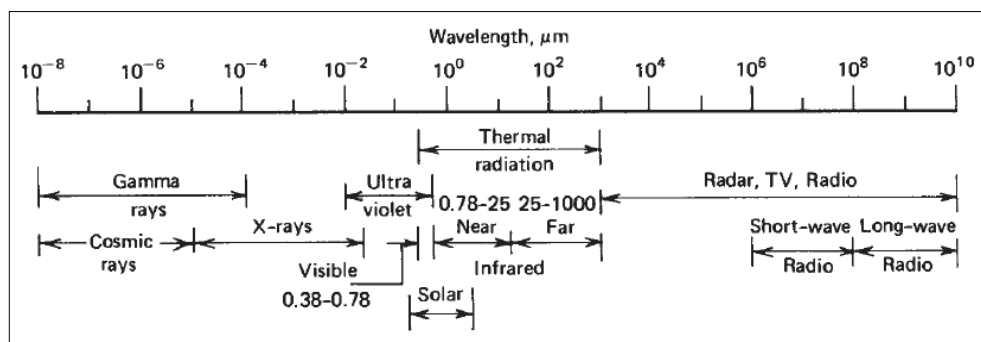


Fonte: Pereira et al. (2017).

Como a radiação resulta de alterações eletrônicas, vibracionais e rotacionais da matéria, ela se distribui numa faixa de comprimento de onda, originando as diversas regiões do espectro ou bandas (BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2004).

É apresentado na Figura 2.12 o espectro da radiação eletromagnética. Nela percebe-se que a radiação térmica representa apenas uma parcela de todo o espectro e é composta pelas radiações infravermelha, luz visível e uma fração da ultravioleta. Segundo Duffie e Beckman (2013), não existe uma delimitação de comprimento de onda bem definida para estabelecer as diversas bandas do espectro, chegando-se até a se superpor. Por exemplo, as ondas de comprimento de 10^{-10} m são raios X quando tem origem atômica e raios gama, quando a origem é nuclear (TIPLER, 1978). Este fato também é constatado nas referências bibliográficas especializadas, com cada autor sempre se reservando a expressar as regiões do espectro em valores aproximados. Por exemplo, Bergman et al. (2014) defendem que a banda da radiação térmica compreende os comprimentos de onda que vão de 0,1 a 100 μm , destoando ligeiramente dos limites propostos por Duffie e Beckman (2013).

Figura 2.12 – Espectro da radiação eletromagnética.



Fonte: Duffie e Beckman (2013).

Ainda é mostrada na Figura 2.12 que a radiação solar é quase toda de natureza térmica. Pereira et al. (2017) calculam que aproximadamente 81% da radiação incidente no sistema Terra/Atmosfera é composta pela faixa espectral que vai do visível ao infravermelho próximo, com Duffie e Beckman (2013) reportando que a faixa de importância para a energia solar vai aproximadamente de 0,29 μm a 25 μm .

Fontes artificiais de luz também podem simular o espectro solar. Tawfik, Tonnellier e Sansom (2018) mencionam em seu trabalho, aquilo que classificam como os quatro principais tipos de lâmpadas para este fim. Ou seja, a lâmpada de arco de argônio, a de haleto metálico, a de haleto de tungstênio e a de arco de xenônio. Os pesquisadores também reportam que a

escolha da fonte deve ser orientada por critérios de intensidade luminosa, custo, durabilidade e quaisquer perigos associados a sua utilização.

Já foi comentado que a luz se propaga mais eficientemente no vácuo. Nesse meio, sua velocidade é da ordem de $2,998 \times 10^8$ m/s, de acordo com Bird, Stewart e Lightfoot (2004). Existe uma expressão que define uma grandeza adimensional denominada índice de refração (n), obtida pela razão entre a velocidade da luz no vácuo (c), e a velocidade da luz no meio de propagação de interesse (v), conforme Equação 7.

$$n = \frac{c}{v} \quad (7)$$

As diferentes velocidades de propagação da luz nos diversos meios fazem com que a radiação eletromagnética sofra um desvio, o qual pode ser aferido por um equipamento óptico chamado refratômetro. Desse modo, cabe adiantar que é possível obter com boa precisão, as salinidades desconhecidas de amostras de água, por meio de uma curva de calibração de salinidade em função do índice de refração, como será apresentado mais oportunamente adiante.

2.5 Semiárido Brasileiro: Realidade de Sal e Sol

O Semiárido brasileiro é uma região caracterizada pela baixa ocorrência de chuvas ao longo do ano e elevada evapotranspiração. Ela possui área de aproximadamente 1,13 milhões de km², correspondendo a 12% do território nacional e sendo formada por 1262 municípios de dez estados da Federação. A região abriga mais de 27,8 milhões de habitantes, segundo estimativas de 2017, algo em torno de 12% da população brasileira (BRASIL, 2018a; BRASIL, 2018d).

A Figura A.99 do Anexo I mostra o mapa da delimitação do semiárido brasileiro, evidenciando a sua grande extensão territorial. A região envolve municípios dos nove estados nordestinos e de Minas Gerais. Os critérios para a sua demarcação geográfica seguem os critérios de precipitação pluviométrica igual ou inferior a 800 mm anuais, índice de aridez igual ou inferior a 0,50 e risco de seca igual ou superior a 60% para todos os dias do ano (BRASIL, 2018e).

Lopes e Leal (2015) reportam que o Índice de Aridez (IA) foi desenvolvido por Thornthwaite (1948) e complementado por Penman (1953). Sendo usado para a classificação climática, o índice é a razão entre a precipitação pluviométrica e a Evapotranspiração Potencial (ETP). Esta última, por sua vez, obtida diretamente das temperaturas médias ambientais e de

dados de precipitação. Os pesquisadores comentam que pelo IA, pode-se obter o nível de susceptibilidade à desertificação, como proposto por Matallo Júnior e Schenkel (2003). A Tabela 2.4 traz a classificação climática e o nível de susceptibilidade à desertificação, ambos em função do Índice de Aridez (IA), apontando que o semiárido tem alta susceptibilidade à desertificação.

Tabela 2.4 – Classificação climática e nível de susceptibilidade à desertificação como função do índice de aridez.

Índice de Aridez	Classes Climáticas	Nível de Susceptibilidade à desertificação
$IA \geq 1,00$	Úmido	Abaixo de moderada
$0,65 < IA < 1,00$	Subúmido Úmido	Moderada
$0,50 < IA \leq 0,65$	Subúmido Seco	Alta
$0,20 < IA \leq 0,50$	Semiárido	Muito alta
$0,05 < IA \leq 0,20$	Árido	Superior a muito alta
$IA \leq 0,05$	Hiperárido	

Fonte: Adaptado (LOPES; LEAL, 2015; ARAÚJO; SOUZA, 2017).

A Figura A.100 do Anexo II mostra o semiárido potiguar. O Estado do Rio Grande do Norte tem 147 cidades na região, com mais de 1,9 milhões de pessoas vivendo nela, segundo levantamento de 2017. Isso representa aproximadamente 88% dos municípios, 93% da área e 57% dos seus habitantes lotados nessa região (BRASIL, 2018d; RIO GRANDE DO NORTE, 2018). No contexto de desertificação, o Rio Grande do Norte tem uma área importante sob o efeito desse fenômeno, denominada núcleo de desertificação do Seridó, compreendendo seis municípios do interior do estado (ARAÚJO; SOUZA, 2017).

2.5.1 Programa Água Doce (PAD)

Como reflexo das condições climáticas dominantes no semiárido brasileiro, a hidrografia da região é pobre em amplos aspectos. As condições hídricas são insuficientes para manter rios e reservatórios superficiais perenes nos longos períodos de estiagem (IBGE, 2017). Acentuando a realidade de seca, aproximadamente 90% do território nordestino é composto por rochas cristalinas (fendas/fissuras), formando reservatórios subterrâneos de qualidade de acumulação e hidrodinâmica inferiores, frente àqueles constituídos por rochas sedimentares (porosas). A qualidade da água e a vazão dos poços em aquíferos porosos são superiores, mas estas bacias representam apenas 10% da região Nordeste (MMA, 2010).

A realidade de seca e da qualidade das águas subterrâneas do semiárido fez o Governo Federal Brasileiro lançar, em 2004, o Programa Água Doce (PAD). No período de 2011 a 2018 o programa investiu em torno de 258 milhões de reais, com meta inicial de beneficiar aproximadamente 500 mil pessoas residentes em comunidades rurais a partir da recuperação, implantação e gerenciamento de 1209 sistemas de dessalinização por osmose reversa (BRASIL, 2018b). Deste número, 575 obras foram finalizadas e têm o sistema em pleno funcionamento, 81 estão em execução, 69 foram finalizadas, mas não estão em operação e 485 obras ainda não foram iniciadas (BRASIL, 2018h). Isso representa apenas 47,6% dos dessalinizadores em plena operacionalidade após sete anos do lançamento da meta inicial.

Dos 103 dessalinizadores destinados ao Rio Grande do Norte, o estado tem atualmente 68 (66%) equipamentos em funcionamento e 35 (34%) obras ainda por iniciar. Na classificação entre os estados abrangidos pelo PAD, o Rio Grande do Norte está na 3ª posição, com 66% dos sistemas previstos já em funcionamento, ficando atrás de Sergipe (100%) e Ceará (92,8%). A Bahia ocupa a 4ª colocação com 49,1%, seguida por Paraíba com 47,3%, Alagoas com 44,3% e Piauí com 14,9%. Com nenhum dessalinizador fomentado pelo PAD em funcionamento, encontram-se os estados do Maranhão, Minas Gerais e Pernambuco (BRASIL, 2018h).

As interpretações dos dados oficiais do Governo Federal brasileiro sugerem, sobretudo, o emprego de tecnologias mais acessíveis, uma vez que após quase uma década do lançamento da meta, apenas um estado da Federação conseguiu atingi-la completamente. Não obstante, é valioso comentar que o PAD não se limita a implantar sistemas de dessalinização por osmose reversa em comunidades rurais, mas também recuperar e gerenciar esses sistemas, garantindo o seu funcionamento.

2.5.2 Potencial Energético Solar Brasileiro

O Brasil dispõe de privilegiada oferta de energia solar devido, sobretudo, ao fato da maior parte do seu território se localizar em região intertropical, viabilizando a coleta da irradiação durante todo o ano (PEREIRA et al., 2006). Lopez (2012) classifica a condição brasileira como sendo ótima, sobretudo para o Nordeste, região com o qual o autor compara ao deserto do Saara, cuja irradiação solar se aproxima de 2600 kWh/m²/ano. Pereira et al. (2006) comentam que mesmo com a grande diversidade de climas, o Brasil apresenta boa uniformidade na oferta de luz solar, registrando máximas de 6,50 kWh/m²/dia no semiárido baiano e mínimas de 4,25 kWh/m²/dia no litoral Norte de Santa Catarina.

A Figura A.101 do Anexo III retrata as médias mensais do total diário de irradiação global horizontal (soma das irradiações direta e difusa) com os valores máximos e mínimos obtidos para o mês. Percebe-se que no período de agosto a março, a irradiação máxima supera os 6,0 kWh/m²/dia, sobretudo no semiárido. Nota-se ainda, que os menores acumulados diários ocorrem no período de maio a setembro, fora da porção intertropical do território nacional, em que o acumulado fica abaixo dos 3,0 kWh/m²/dia.

Não obstante, a Figura A.102 do Anexo IV mostra o mapa de irradiação brasileira, ilustrando a média anual do total diário de irradiação global horizontal, corroborando com as afirmações de Pereira et al. (2006) e Lopez (2012), sobre a boa uniformidade da energia solar incidente em todo o território nacional e acerca da privilegiada oferta disponível na região Nordeste, respectivamente.

No entanto, infelizmente todo o potencial energético solar brasileiro não é devidamente aproveitado. Em 2016, o recurso representou estardalcedores 0,0% da Oferta Interna de Energia (OIE) entre as fontes renováveis (BRASIL, 2017) e, em 2017, teve um tímido avanço participando com 0,1%, entre as renováveis, na OIE (BRASIL, 2018c). Pereira et al. (2006) reportam que o acumulado anual brasileiro varia entre 1500 e 2500 kWh/m², sendo maior que o de países europeus que investem mais fortemente no aproveitamento do recurso, como Alemanha (900 – 1250 kWh/m²/ano), França (900 – 1650 kWh/m²/ano) e Espanha (1200 – 1850 kWh/m²/ano).

CAPÍTULO 3

Materiais e Métodos

3 Materiais e Métodos

As seções que seguem tratam dos materiais e métodos empregados nesta pesquisa. A começar pela síntese e composição da solução salina empregada para evaporação em todos os ambientes e cenários investigados. Posteriormente é feita uma abordagem genérica dos principais constituintes daquilo que chamamos de placas absorvedoras de radiação, passando pela metodologia de fixação dos materiais absorvedores na placa de Petri. Depois desse tópico, são esclarecidos os materiais absorvedores de radiação empregados, expondo, quando pertinente, as caracterizações já realizadas pelos pesquisadores fornecedores desses materiais, ou ainda, detalhando as técnicas de caracterização empregadas naqueles de propriedades ainda desconhecidas. Por fim, é detalhada a construção e operação do evaporador fotoassistido, bem como as metodologias desenvolvidas para a aquisição dos dados cinéticos de evaporação nesse equipamento e também no ambiente de irradiação solar real, não excluindo a metodologia desenvolvida para a leitura das temperaturas superficiais das placas.

3.1 Solução Salina

As soluções salinas usadas nos ensaios de evaporação desta pesquisa, foram sintetizadas apenas com cloreto de sódio (NaCl PA – ACS) da marca SYNTH e água destilada. Especificando-se a massa de solução salina (m) desejada e sua salinidade (τ), obtêm-se as massas de sal (m_1) e de água destilada (m_2) necessárias, a partir das Equações 8 e 9. Por exemplo, para 10,0 g de salmoura com salinidade 30‰ (0,03), são medidos 0,3 g de sal, completando-se com 9,7 g de água destilada. Após a pesagem, a solução é submetida à agitação manual até que todo o sal esteja visualmente dissolvido.

$$m_1 = \tau m \quad (8)$$

$$m_2 = m - m_1 \quad (9)$$

3.2 Placas Absorvedoras de Radiação

As placas absorvedoras de radiação descritas neste trabalho são constituídas basicamente de dois componentes: a bacia e o material absorvedor de radiação. A bacia consiste numa placa

de Petri de vidro e os materiais absorvedores são aqueles cujas propriedades radiantes se tem interesse em investigar, os quais serão apropriadamente abordados mais adiante, na seção 3.3.

Exceto para os ensaios com a ferrita de cobalto, todos os outros materiais absorvedores foram fixados à bacia. A tinta comercial de cor preta foi aplicada conforme relato na seção 3.3.5, ao passo que os materiais de natureza particulada foram aderidos à bacia pela aplicação de resina epóxi comercial da marca REDELEASE. Não obstante, é importante evidenciar que o emprego dessa resina não configura o intuito da sua aplicação real nos destiladores solares, mas tão somente numa metodologia genérica para a deposição dos diversos materiais particulados investigados neste trabalho.

A resina epóxi utilizada é derivada de 4,4-isopropilidendifenol (CAS 000080-05-7) e 1-cloro-2,3-epoxipropano (CAS 000106-89-8), também conhecidos por bisfenol A e epicloridrina, respectivamente. A legislação brasileira vigente prevê o emprego desses componentes químicos na elaboração de embalagens e equipamentos plásticos em contato com alimentos. No entanto, o uso de bisfenol A é proibido em mamadeiras e artigos similares destinados à alimentação de crianças menores de 12 meses de idade, ao passo que as restrições ou especificações para o uso de epicloridrina devem atender ao Limite de Composição (LC = 1 mg/kg de material ou objeto terminado (PT)) ou ao Limite de Migração Específica (LME) igual a não detectável (ND) ou, ainda, ao limite de detecção do método de análise (LD = 0,01 mg/kg) (BRASIL, 2012).

Para a fixação dos materiais de natureza particulada, foram utilizados 1,0 g de epicloridrina e 2,0 g de bisfenol A, conforme a proporção 1:2 recomendada pelo fabricante. Após as partes serem devidamente homogeneizadas, a mistura foi transferida para a placa de Petri, previamente limpa. O espalhamento da resina epóxi na superfície vítrea da bacia foi realizado mais eficientemente pela utilização do ar quente oriundo de um secador de cabelos comercial. Após isso, o material particulado de interesse foi “pulverizado” sobre a resina, até que o fundo transparente da bacia ganhasse aspecto completamente opaco e áspero. A aspereza da superfície coletora de radiação sugere que parte das faces individuais do sólido particulado ficara incrustado na resina epóxi e a outra face ficara exposta ao contato direto com a solução salina a ser evaporada.

O tempo de trabalho da resina é de 15 min, estando completamente solidificada em 1 h, mas totalmente curada em 5 dias. Os fabricantes especificam a cura nas condições ambientais, acima de 18 °C. Por isso, as placas coletoras foram curadas nas mesmas condições e pelo tempo especificado para garantia das propriedades de resistência mecânica e de inércia química, dadas pela REDELEASE.

A Tabela 3.5 especifica as placas absorvedoras de radiação utilizadas neste trabalho, bem como os seus diâmetros internos, a área de exposição à radiação e de interface líquido-gás e a massa da placa absorvedora (bacia, resina epóxi – quando pertinente – e material absorvedor de radiação). A placa denominada P008 foi utilizada apenas nos experimentos com a ferrita de cobalto e é igualmente transparente à placa P001. A placa P004 contém apenas resina epóxi, ausente de pigmentação.

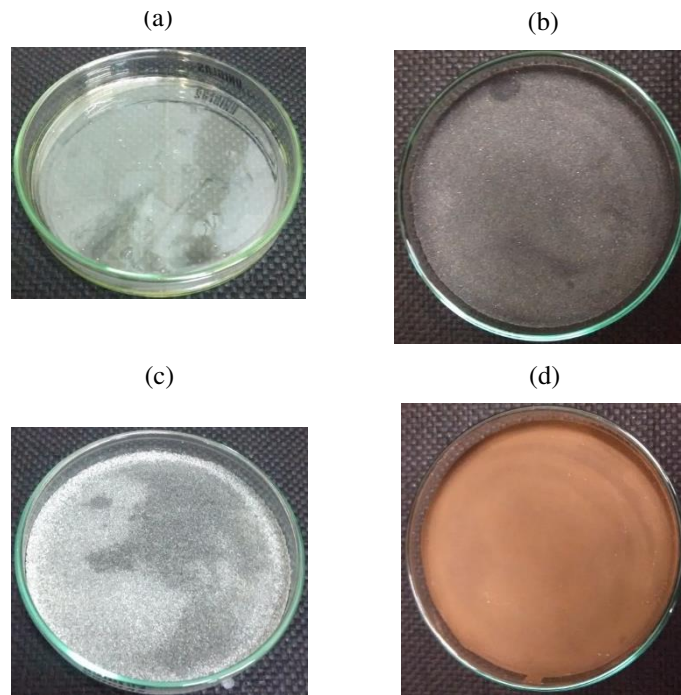
Tabela 3.5 – Especificações das placas absorvedoras de radiação.

Placa	Material	Diâmetro int. (cm)	Área int. (cm ²)	Massa placa (g)
P001	Vidro transparente	9,00	63,62	36,72
P002	Tinta preta (pintura interna)	8,94	62,77	38,96
P003	Tinta preta (pintura externa)	9,00	63,62	37,96
P004	Resina Epóxi (transparente)	8,95	62,91	41,60
P005	Cinza Residual	8,96	63,05	48,88
P006	Quitosana/Grafite	8,98	63,33	39,51
P007	Mineral Monazita/Alanita	8,92	62,49	45,77
P008	Experimentos com a Ferrita de Cobalto	4,81	18,17	20,83

Fonte: Autor (2019).

A Figura 3.13 mostra o aspecto dos diversos materiais absorvedores de radiação fixados à bacia com a utilização da resina epóxi. A Figura 3.13a apresenta a placa P004 contendo apenas resina epóxi, a Figura 3.13b mostra a placa P005 com a cinza residual da indústria sucroalcooleira, a Figura 3.13c apresenta a placa P006 com a quitosana/grafite e a Figura 3.13d mostra a placa P007 contendo o mineral monazita/alanita.

Figura 3.13 – Placas absorvedoras de radiação (a) apenas com resina epóxi, (b) cinza residual, (c) quitosana/grafite e (d) monazita/alanita.



Fonte: Autor (2019).

3.3 Materiais Absorvedores de Radiação

Os materiais coletores ou absorvedores são os principais responsáveis por absorver a radiação solar que posteriormente é transferida para a água salina a ser evaporada. Como já abordado, os materiais mais apropriados para este fim devem ter elevada absorvidade (α) e baixa emissividade (ϵ) (MANDAL et al., 2017). Não obstante é possível determinar a eficiência desses materiais não somente mensurando as suas propriedades radiantes, mas também pelo efeito da sua utilização na composição das placas absorvedoras, sobre a taxa de evaporação. Desse modo, foram investigados os materiais tecnológicos e alternativos descritos a seguir. Para fins conceituais, foram denominados de materiais tecnológicos, aqueles sintetizados em laboratório e ainda não disponíveis comercialmente, como são os casos da ferrita de cobalto (CoFe_2O_4) e da quitosana/grafite. Os demais materiais estudados foram tidos como alternativos visto que, ou são comercializados (tinta preta aerossol e resina epóxi), ou é um resíduo industrial (cinza) ou, ainda, é um material natural que não sofreu processamento químico (monazita/alanita).

3.3.1 Ferrita de Cobalto (CoFe₂O₄)

A ferrita de cobalto (CoFe₂O₄) empregada, foi sintetizada e caracterizada por Medeiros et al. (2017) a partir do método de complexação EDTA/Citrato. Variando as condições de síntese entre 600 °C e 1000 °C por 2 h em pH 8 e pH 10, os pesquisadores obtiveram cristallitos cujas características são mostradas na Tabela 3.6. Eles reportaram que o aumento da temperatura provocou redução da superfície devido ao aumento do tamanho dos cristallitos.

Tabela 3.6 – Características do CoFe₂O₄ obtido pelo método de complexação EDTA/Citrato, variando pH e temperatura de calcinação.

Amostra	Condições experimentais	Tamanho (nm)	a (Å)	%Co	%Fe
1	pH 8, 600 °C	26	8,39	66	34
2	pH 10, 600 °C	22	8,39	66	34
3	pH 8, 1000 °C	346	8,39	66	34
4	pH 10, 1000 °C	247	8,39	67	33

Fonte: Medeiros et al. (2017).

Para os ensaios de evaporação fotoassistido, foram empregados aproximadamente 10 g de salmoura de salinidade 30%, utilizando 1% em massa de CoFe₂O₄ como material absorvedor na placa denominada P008, detalhada na Tabela 3.5. A aquisição dos dados cinéticos seguiu o procedimento descrito mais adiante, no Quadro 3.2, sendo o efeito da ferrita de cobalto comparado com o desempenho da placa sem material absorvedor (branco) ou sistema de referência. Todos os testes foram realizados em duplicata, resultando em dez corridas experimentais.

3.3.2 Quitosana/Grafite

A quitosana/grafite usada foi sintetizada e caracterizada por Gomes et al. (2019), segundo metodologia de carbonização hidrotermal, utilizando como precursores os biopolímeros quitina e quitosana e o mineral grafite. O catalisador quitosana/grafite apresenta estrutura cristalina e hexagonal, confirmando que o grafite está incorporado na estrutura da quitosana. O material apresenta área superficial 26,7 m²/g e tamanho médio das partículas 2,25x10⁻⁴ Å, com estabilidade térmica na faixa de 0 °C a 300 °C.

3.3.3 Cinza Residual da Indústria Sucroalcooleira

Um dos materiais alternativos investigados foi o produto residual do processo de queima do bagaço de cana-de-açúcar nas fornalhas da indústria sucroalcooleira, doravante denominado cinza. Sua coloração escura, combinado com a abundante oferta local, que sugere baixo custo de aquisição, aliado com o apelo ambiental para se dar nova utilidade a materiais residuais, motivaram a investigação com a cinza.

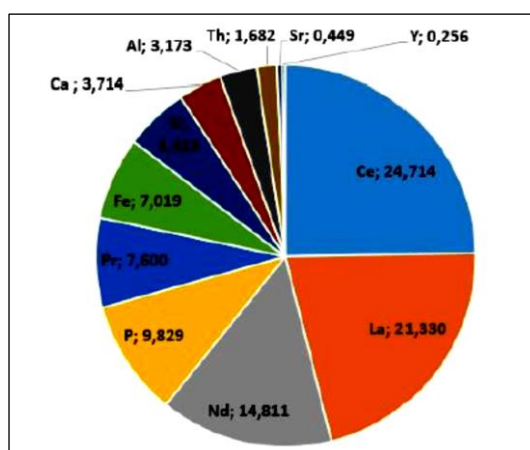
Para isso, a cinza foi submetida a peneiramento para a utilização de grânulos de tamanhos uniformizados, a saber, passante em 100 *mesh* e retida em 200 *mesh*. O pó foi lavado com água destilada à temperatura ambiente, vertendo a água da lavagem à medida que ela se tornava turva. Esse processo foi repetido inúmeras vezes até que a água não apresentasse sujidades visivelmente dispersas. Em seguida, a cinza lavada (identificada pela sigla CZL01) foi submetida à secagem e à caracterização por difração de raios-X (DRX) e fluorescência de raios-X (FRX).

O DRX foi realizado em um difratômetro SHIMADZU DRX-7000, com radiação $\text{CuK}\alpha$ (comprimento de onda de 1,5406 Å) e 2θ variando de 20° a 80°, passo de 0,02°, tempo de passo de 1,2 s, velocidade de 1°/min, corrente de 30 mA e 40 kV. A análise dos dados foi realizada através do software X'PERT HIGHSCORE PLUS 2.0. O FRX foi conduzido em um equipamento SHIMADZU EDX-720.

3.3.4 Monazita/Alanita

A monazita/alanita empregada como material absorvedor de radiação foi fornecida por Ramalho et al. (2016) com granulometria retida em 80 *mesh*. Os pesquisadores realizaram a caracterização química e mineralógica dos minerais extraídos de reservas brasileiras do estado de Goiás e reportaram a elevada concentração de elementos terras raras, os quais conferem propriedades elétricas, magnéticas e catalíticas interessantes. A fluorescência de raios-X revelou a presença de cério (24,7%), lantânio (21,3%), neodímio (14,8%) e praseodímio (7,6%), cuja composição mais detalhada é apresentada no gráfico da Figura 3.14.

Figura 3.14 – Composição percentual dos minerais monazita/alanita.



Fonte: Ramalho et al. (2016).

3.3.5 Tinta Comercial Preta

Foi utilizada uma tinta aerossol comercial da marca COLORGIN de cor preta e aspecto fosco. Bezerra (2001), Duffie e Beckman (2013), literaturas especializadas no aproveitamento térmico da energia solar, recomendam a utilização desse tipo de pigmentação na concepção de placas absorvedoras de radiação.

Porém, ressaltamos que em função do projeto do destilador solar, pode haver o contato direto da tinta com a salmoura, ocasionando possíveis riscos de contaminação do destilado com os compostos voláteis que podem ser despreendidos pela ação do calor ou pela degradação decorrente da constante exposição da tinta à radiação solar. Desse modo, o pigmento preto foi aplicado em duas placas distintas. Em uma delas, na parte interna e na outra na parte externa da bacia. Naturalmente, a pintura interna promove o contato direto do pigmento preto com a solução salina, enquanto que na pintura externa, a salmoura fica protegida desse contato pelo corpo vítreo da bacia. A Figura 3.15 mostra as placas coletoras, donde é nítida a diferença entre elas, sendo o aspecto de pouco brilho perdido pela pintura externa (Figura 3.15b).

Figura 3.15 – Placas absorvedoras de radiação com a tinta comercial preta: (a) pintura interna e (b) pintura externa.



Fonte: Autor (2019).

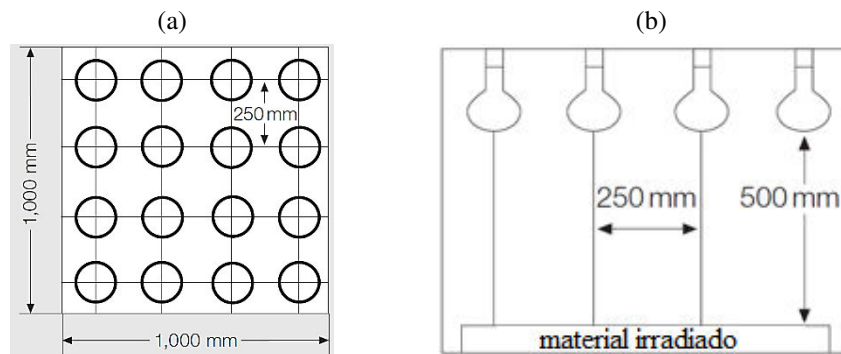
3.4 Evaporação Fotoassistida

3.4.1 Construção do Aparato Experimental

A concepção de todo aparato para simulação de irradiação solar se principia pela escolha da fonte artificial de radiação. Aliando as premissas de facilidade de manuseio, instalação e aquisição, o evaporador fotoassistido, objeto desta seção, foi equipado com uma lâmpada OSRAM ULTRA-VITALUX 300 W, cujo filamento de tungstênio gera uma radiação similar ao espectro solar (OSRAM, 2018).

Os esquemas mostrados na Figura 3.16 representam (a) a vista superior de um arranjo com 16 lâmpadas igualmente espaçadas entre si, com distância de 0,25 m e (b) a vista lateral desse arranjo, revelando uma altura de 0,50 m entre os bulbos das lâmpadas e a superfície irradiada. Essa é a configuração especificada pelo fabricante com a finalidade de produzir uma incidência luminosa de aproximadamente 1000 W/m² (OSRAM, 2018), equivalente a taxa de irradiação solar na posição zenital (WANG et al. (2016); CHEN et al. (2017)).

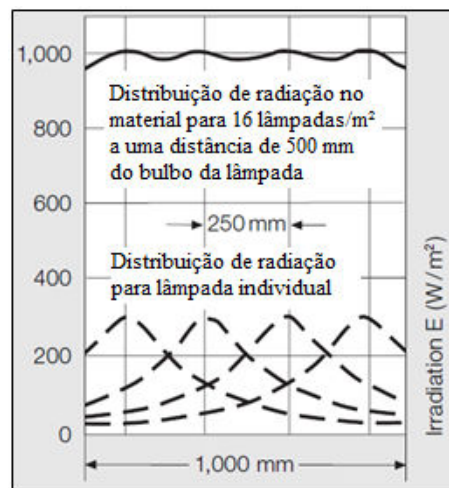
Figura 3.16 – Arranjo com 16 lâmpadas igualmente espaçadas e distribuídas em 1m². (a) vista superior, (b) vista lateral.



Fonte: OSRAM (2018).

A Figura 3.17 mostra a distribuição de radiação para 16 lâmpadas/m², posicionadas a 0,50 m de altura da superfície irradiada e, como é informado, essa distribuição concentra 1000 W/m². Desse modo, é razoável deduzir que a mesma irradiação será reproduzida por uma lâmpada iluminando 0,0625 m².

Figura 3.17 – Distribuição de radiação para 16 lâmpadas/m² e para lâmpadas individuais.



Fonte: Adaptado (OSRAM, 2018).

Em posse das especificações técnicas da fonte luminosa, foi projetada uma câmara com base quadrada de 0,0625 m² e altura de 0,50 m, referentes às dimensões internas. Para tanto, foram adquiridas junto à Diretoria de Material e Patrimônio (DMP/UFRN), três placas de fibra de média densidade (MDF, sigla em inglês) com 15 mm de espessura, reaproveitadas de móveis

destinados a processo de alienação pela instituição de ensino, barateando os custos com materiais e dando nova utilização a eles.

O corte preciso das peças e a montagem da estrutura de MDF foi realizada por técnicos da universidade, nas dependências da marcenaria INFRA/UFRN, mediante projeto detalhado na Figura A.103 do Apêndice I. Este desenho prevê a utilização de 6 peças conforme a descrição de uso, as quantidades e as dimensões, detalhadas na Tabela 3.7.

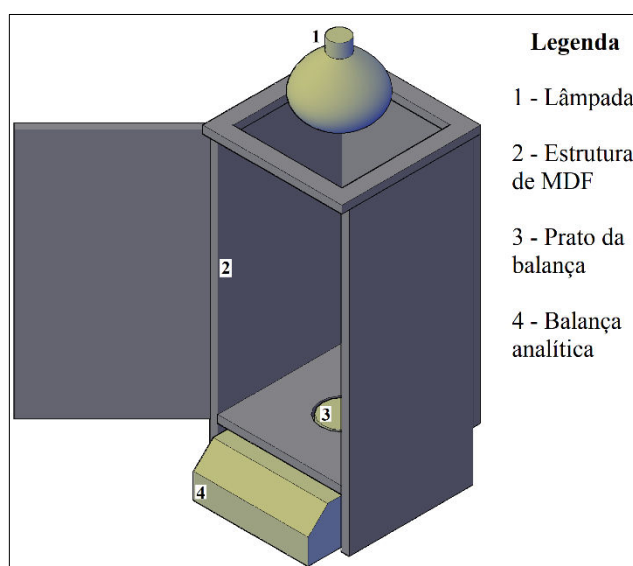
Tabela 3.7 – Detalhamento das peças de MDF para composição da estrutura do evaporador foto-assistido.

Peças	Quantidade	Dimensões	Observação
Laterais	2	0,60 m por 0,25 m	-
Porta e Fundo	2	0,50 m por 0,28 m	-
Tampa	1	0,28 m por 0,28 m	-
Base	1	0,25 m por 0,25 m	Furo central de 0,09 m de diâmetro

Fonte: Autor (2019).

No esquema da Figura 3.18, são mostrados apenas os três principais componentes do evaporador fotoassistido. São eles, a fonte artificial de radiação, a estrutura de MDF que dá origem à câmara e a uma balança analítica da marca BIOSCALE/FA-2204CI. A lâmpada foi disposta na parte superior do aparato e sua radiação ilumina o interior da câmara por uma abertura quadrada feita na tampa. A luminária (omitida no esquema) foi confeccionada a partir do reaproveitamento de um recipiente de aço inoxidável, também oriundo da DMP/UFRN. Além da contribuição ambiental e para a redução de custos, a luminária adaptada possuía dimensões adequadas para atender às exigências de projeto, mantendo distantes a base iluminada do evaporador e o bulbo da lâmpada, aproximadamente 0,50 m. Sob a estrutura de MDF foi posicionada a balança, cuja bandeja tem acesso ao interior iluminado do aparato por meio do orifício central disposto na base, fazendo da câmara uma capela para a balança.

Figura 3.18 – Esquema com os principais componentes do evaporador fotoassistido.



Fonte: Autor (2019).

Como a estrutura de MDF foi projetada e montada antes da balança realmente estar disponível para compor o aparato experimental, foi necessário ajustar a altura do compartimento da balança em mais 15 mm. Para isso, foram adicionados calços ao pé da estrutura de MDF. Esse ajuste resultou em dois problemas: na exposição do prato da balança às interferências da atmosfera externa, anulando o efeito de capela, e na criação de uma cota negativa entre o prato da balança e a superfície interna da base da câmara iluminada, impedindo que as placas coletoras fossem diretamente dispostas sobre a bandeja. Para a correção desses problemas utilizou-se, no primeiro caso, um preenchimento de espuma flexível de poliuretano e, no segundo caso, o desnível foi corrigido pela fabricação de um suporte de policarbonato, desenhado e torneado mecanicamente para este fim (Figura 3.19).

Figura 3.19 – Suporte de policarbonato.



Fonte: Autor (2019).

O torneamento do suporte de policarbonato foi realizado nas dependências do Laboratório de Energia NTI/UFRN, pelo técnico responsável. A peça foi concebida sob duas premissas: máxima estabilidade para evitar tombamentos e máxima leveza. No entanto, o incremento desse suporte trouxe prejuízo nas investigações experimentais do efeito do volume da salmoura, ou da altura do filme de água salina, sobre as taxas de evaporação. Uma vez que a capacidade máxima da balança é de 220,0000 g e que as massas do suporte da Figura 3.19 e da placa absorvedora de radiação mais pesada, correspondem a 146,83 g e 48,88 g (Tabela 3.5), respectivamente, a quantidade máxima de salmoura suportada deve ser de 24,29 g. Trabalhando com razoável margem de segurança, preferiu-se não ultrapassar os 20,0 g de solução salina nos experimentos de evaporação fotoassistida.

Com todo o sistema em funcionamento e os primeiros defeitos detectados e corrigidos, foram procedidos testes preliminares a fim de conhecer a dinâmica operacional do equipamento. Para tanto, o sensor de um termômetro digital foi fixado à altura de aproximadamente 1 cm da base do referido suporte de policarbonato. No instante zero, a balança marcava esperados 0,0000 g e a temperatura interna da câmara era de 26,2 °C, igual a do ambiente refrigerado do laboratório. Cinco minutos após o acionamento da lâmpada, as leituras da balança e do termômetro eram de -0,0073 g e 39,8 °C, respectivamente. Passadas exatas 2 h, a balança registrava -0,0472 g e o termômetro 69,9 °C.

Desse ensaio exploratório, concluiu-se que a temperatura no interior do equipamento estava exageradamente acima da temperatura ambiente para a condição de sol no zênite e que a elevação da temperatura causava movimentos convectivos na atmosfera interna da câmara, gerando o empuxo registrado pelas massas negativas na balança, mesmo sem nenhuma massa líquida estar sendo evaporada. Esse efeito é reportado por (SKOOG et al., 2005), como erros recorrentes e significativos em medições de massas de materiais cuja temperatura difere da temperatura do ambiente.

A constatação dos fenômenos de aquecimento relatados anteriormente, levou à proposta da criação de uma abertura de 6 cm de diâmetro na parte superior dos fundos da câmara do evaporador. Essa abertura foi feita com duas funções importantes: arrefecer a atmosfera interna e dar vazão ao vapor gerado durante a evaporação fotoassistida, impedido a saturação do ar interior, permitindo a continuidade do processo. No entanto, essa modificação não surtiu o efeito esperado.

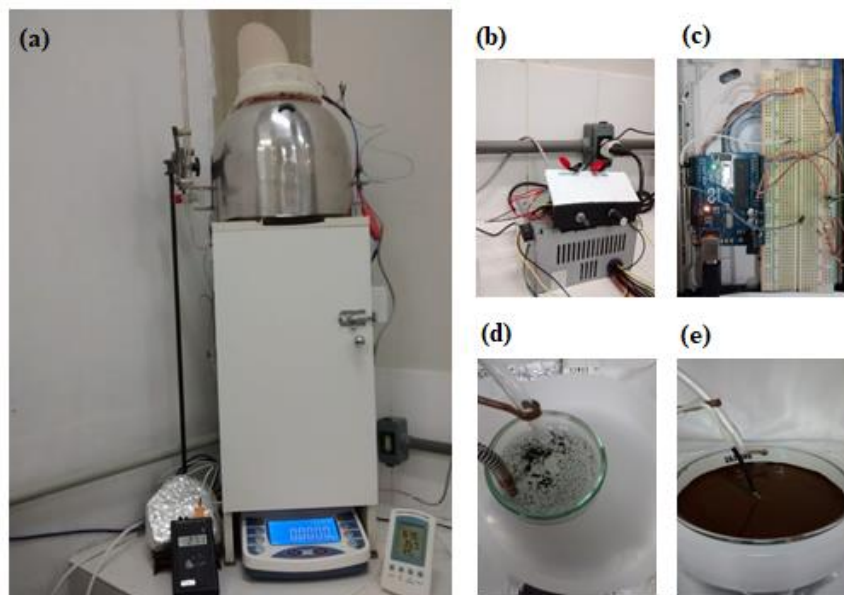
Ainda no contexto de arrefecimento, uma ventoinha foi instalada na recente abertura com a função de aspirar a atmosfera interna da câmara. Essa tentativa também não foi bem-sucedida, causando severa desestabilização da balança.

Persistindo nas tentativas de arrefecimento, exaustão de vapores e, mais recentemente, de estabilização da balança analítica, o sistema de circulação de ar foi reformulado. Para isso, a ventoinha traseira que antes retirava a atmosfera interna da câmara, passou a admitir o ar oriundo do ambiente. Para a saída do ar admitido, foram feitas perfurações na parte superior da luminária que, após testes, resultaram em 56 furos de 6 mm de diâmetro. Uma segunda ventoinha foi acoplada a um *cap* de PVC de 150 mm de diâmetro, com este conjunto sendo posicionado acima da luminária, em conexão com as perfurações mencionadas. As perfurações na luminária de aço inox também foram realizadas pelo corpo técnico da UFRN, nas dependências do Laboratório de Energia NTI/UFRN.

A admissão de ar entra na parte superior da câmara de evaporação pela ação da ventoinha traseira, sendo o fluxo direcionado para o sentido ascendente pela ação da ventoinha de exaustão, que aspira o ar para fora do sistema, arrefecendo a lâmpada e evitando o superaquecimento e a saturação da câmara de evaporação, além de minimizar as interferências na balança.

A Figura 3.20 mostra o aparato de evaporação fotoassistida e seus periféricos. Na Figura 3.20a o aparato experimental é mostrado integralmente. Na parte superior da imagem está posicionado o *cap* que compõe o sistema de arrefecimento da lâmpada e imediatamente abaixo, está a luminária que abriga a lâmpada, apoiando-se sobre a estrutura de MDF que constitui a câmara de evaporação. Abaixo da câmara, fica posicionada a balança analítica, sendo mostrado, ainda, o suporte de bureta para injeção de salmoura (canto esquerdo), o termômetro e o cronômetro.

Figura 3.20 – Evaporador fotoassistido e seus periféricos. (a) sistema completo: luminária, estrutura de MDF e balança analítica. (b) circuito elétrico para ajuste de rotação das ventoinhas do sistema de arrefecimento. (c) placa ARDUINO e circuitos eletrônicos para a obtenção de parâmetros de umidade relativa e temperatura. (d) e (e) placas sobre o suporte de policarbonato no interior da câmara de evaporação, evidenciando-se a mangueira para a alimentação da salmoura e o termopar para leitura da temperatura da salmoura.



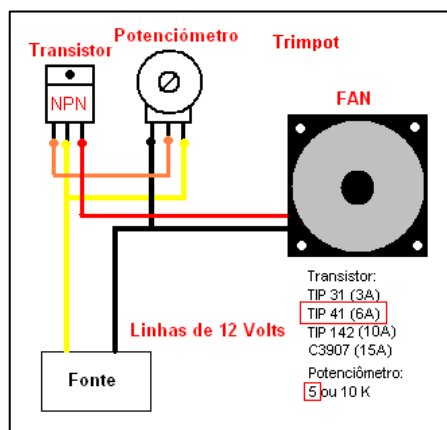
Fonte: Autor (2019).

Nas Figuras 3.20b e 3.20c são mostrados dois importantes periféricos do aparato experimental. O primeiro é o circuito elétrico por onde se ajusta a rotação das ventoinhas do arrefecimento da lâmpada, sendo o segundo, o circuito com a placa ARDUINO para aquisição de dados de temperatura e umidade relativa. As Figuras 3.20d e 3.20e apresentam, respectivamente, as placas coletoras P008 e P007, sobre o suporte de policarbonato posicionado no interior da câmara de evaporação. Nessas imagens é possível perceber os sensores do termopar para a leitura das temperaturas da salmoura e a mangueira para injeção de solução salina.

É apresentado na Figura 3.21 o esquema do circuito elétrico montado para cada uma das ventoinhas, objetivando determinar a sua rotação e proporcionar maior controle sobre os fluxos de ar admitido e retirado do sistema. O intuito é igualar estes fluxos de modo a minimizar as interferências na balança, além de atender às necessidades de exaustão dos vapores e arrefecimento. O esquema mostra uma fonte elétrica, um transistor do tipo TIP 41, um potenciômetro 5K, fios condutores e uma ventoinha (*fan*, em inglês). Em virtude das duas ventoinhas usadas no sistema, cada componente foi usado em duplicata, excetuando a fonte de 12 V. Dos componentes do sistema, apenas os transistores e os potenciômetros foram

adquiridos novos, em lojas especializadas em eletrônicas, sendo os demais reaproveitados de sucatas de microcomputadores, barateando o projeto e dando nova utilização aos materiais obsoletos.

Figura 3.21 – Esquema do circuito elétrico para a regulação de rotação da ventoinha.



Fonte: Potenciômetro para *cooler* do PC (2019).

A realização de novos testes exploratórios revelou que os problemas de superaquecimento e desestabilização aguda da balança haviam sido minimizados a níveis aceitáveis. Operando com a ventoinha de exaustão na rotação máxima, a ventoinha de admissão foi regulada de modo a desestabilizar apenas as duas últimas casas decimais da balança analítica. Foi impossível manter o efeito de capela, no entanto as leituras da balança variaram lentamente entre valores positivos e negativos, sugerindo que os fluxos de admissão e exaustão estavam próximos. Dessa modificação, o interior do sistema se estabilizou aproximadamente em 47 °C, muito abaixo dos 69,9 °C alcançados nos testes preliminares sem arrefecimento.

Investigada a dinâmica de aquecimento e as limitações do equipamento, ficou clara a inviabilidade de executar os experimentos de evaporação fotoassistida antes de o aparato alcançar a sua estabilidade térmica. Mesmo executando meticulosamente os procedimentos de iniciação experimental, a abertura da porta para a colocação da salmoura na placa coletora levava o sistema a um novo período para estabilização. Prevendo isso, foi instalada uma mangueira alimentadora, por onde a massa de solução salina era injetada (Figuras 3.20d e 3.20e). Obviamente um novo patamar de equilíbrio é alcançado após a injeção da salmoura, porém atingido em tempo muito pequeno, como poderá ser visto nos resultados e discussões.

Uma das extremidades da mangueira aponta para o centro da placa coletora enquanto a outra é conectada numa bureta de 25,00 mL, posicionada num suporte localizado na periferia do

aparato. No tempo determinado, a abertura da bureta faz o volume definido de salmoura ser injetada na placa coletora pela ação da gravidade. Isso configura um processo semibatelada, uma vez que a alimentação da salmoura ocorre toda de uma vez, mas a evaporação da água ocorre continuamente.

Testes preliminares foram realizados para o desenvolvimento e a consolidação do algoritmo pré-experimental detalhado no Quadro 3.2. Nesse contexto constatou-se que a reprodutibilidade dos experimentos ainda não era garantida. Cogitando os efeitos de transferência de massa decorrentes da admissão do ar refrigerado com baixa umidade relativa pelo sistema de arrefecimento, foram instalados dois sensores ARDUINO DHT22 de temperatura e umidade relativa. Um dos sensores foi disposto à entrada da ventoinha de admissão, acompanhando os parâmetros de ar ambiente, ao passo que o outro sensor foi posicionado à altura da placa absorvedora, na base da câmara, acompanhando os parâmetros da atmosfera da câmara de evaporação. Os dois sensores DHT22 foram programados para fazer a leitura dos parâmetros de temperatura e umidade relativa com intervalos de 1 min, conforme código de programação, detalhado no Quadro A.3 do Apêndice II. Essas informações foram transmitidas para o circuito mostrado na Figura 3.20c e registradas num microcomputador, sendo acompanhadas e analisadas no transcorrer do experimento.

O sistema também foi dotado de um sensor termopar tipo K, acoplado a um multímetro MINIPA/ET-2907, com a intenção de acompanhar a temperatura da salmoura durante as corridas experimentais, porém, o sistema foi substituído por outro termopar tipo K e um termômetro Th-1200C, nos experimentos fotoassistidos para as placas P001 a P007.

3.4.2 Metodologia para Aquisição de Dados Cinéticos

Os ensaios de evaporação fotoassistidos seguem uma sequência lógica de procedimentos com a finalidade de uniformizar as condições experimentais e diminuir os erros operacionais, garantindo a obtenção de todas as informações relevantes para a obtenção da cinética de evaporação e a sua compreensão. Para isso, a obtenção dos resultados foi procedida a partir do algoritmo detalhado no Quadro 3.2. Vale comentar que a sequência de procedimentos é muito importante, mas as sequências identificadas com asteriscos (*) representam tarefas preponderantes para a segura obtenção de resultados reprodutíveis.

Quadro 3.2 – Algoritmo pré-experimental para operação e aquisição de dados cinéticos a partir do evaporador fotoassistido.

Sequência	Procedimento
1	Acionar todos os condicionadores de ar;
2	Sintetizar a salmoura conforme metodologia descrita no subtópico 3.1;
3	Transferir para a bureta o volume de solução salina sintetizada;
4	Proceder com a leitura do volume de salmoura, se certificando que toda a extensão bureta está preenchida de líquido;
5	Organizar a bureta no suporte e conectá-la à mangueira alimentadora;
6	Colocar a placa coletora no suporte de policarbonato, centralizando, posteriormente, o conjunto na bandeja da balança; *** Pesar 0,1 g de CoFe_2O_4 exclusivamente nos ensaios com ferrita;
7	Organizar o sensor do termopar destinado à solução salina (tendo o cuidado de ele não esteja em contato com a superfície coletora) e organizar a mangueira alimentadora;
8	Fechar a câmara de evaporação foto-assistida e tarar a balança;
9	Conectar a alimentação elétrica da lâmpada à rede de energia;
10	Abrir a planilha eletrônica para a referida corrida experimental;
11	Abrir o programa ARDUINO para aquisição de dados de temperatura e umidade relativa;
12	Sincronizar o acionamento dos sensores ARDUINO com o cronômetro do experimento. Anotar o horário dessa ação;
13	Acionar a lâmpada. Isso ocorre 1 minuto após a ação nº 12, quando a primeira leitura dos sensores ARDUINO acontece. Anotar o horário;
14*	Acompanhar o aquecimento do sistema até 45 °C. Acionar o arrefecimento e anotar o horário dessa ação. O acionamento do sistema de arrefecimento deve ser orientado pelas medidas que seguem: <ul style="list-style-type: none"> a) Ligar a chave do arrefecimento; b) Dar potência máxima à ventoinha de exaustão; c) Regular a potência da ventoinha de admissão ar de modo a permitir, apenas, a lenta variação das duas últimas casas decimais da balança. A balança deve oscilar sua leitura entre valores positivos e negativos, lentamente. OBS.: Geralmente a estabilização do sistema ocorre no 15min após o arrefecimento ser ligado. OBS.: O sistema é considerado em equilíbrio quando a temperatura não varia mais que 1 °C e a balança oscila como descrito no item (c) por, no mínimo, 10min.
15	Percebido o equilíbrio do sistema, aguardar o tempo apropriado para a injeção da salmoura;
16*	Abrir a bureta para a injeção da salmoura entre 15 e 30 s antes do horário determinado para a leitura do ponto experimental zero. Esse tempo é fundamental para a transferência do volume da salmoura para a placa e a estabilização da balança;
17	Fazer a leitura dos primeiros dados (ponto zero) após a balança analítica sinalizar sua estabilização;
18	Proceder com a leitura dos dados no intervalo de tempo determinado, até o ponto de interesse.

Fonte: Autor (2019).

3.5 Curva de Calibração: Salinidade em Função do Índice de Refração

Com um refratômetro analógico ATAGO/NAR – 1T, foram aferidos dez índices de refração (n) para águas com diferentes concentrações de cloreto de sódio (NaCl). Partindo da água destilada até a salinidade de 243,53‰, as soluções salinas foram sintetizadas conforme metodologia descrita na seção 3.1, acrescida de agitação ultrassônica a 30 °C por 15 min, com o intuito de garantir a total dissolução do NaCl. Após resfriamento à temperatura ambiente, os índices de refração foram medidos, bem como a temperatura da solução durante a leitura. A Tabela 3.8 registra as composições de cada amostra, sendo atribuída salinidade 0,00‰ para a água destilada. Dos índices de refração aferidos para as diferentes salinidades, foi construída a curva de calibração da Figura 3.22.

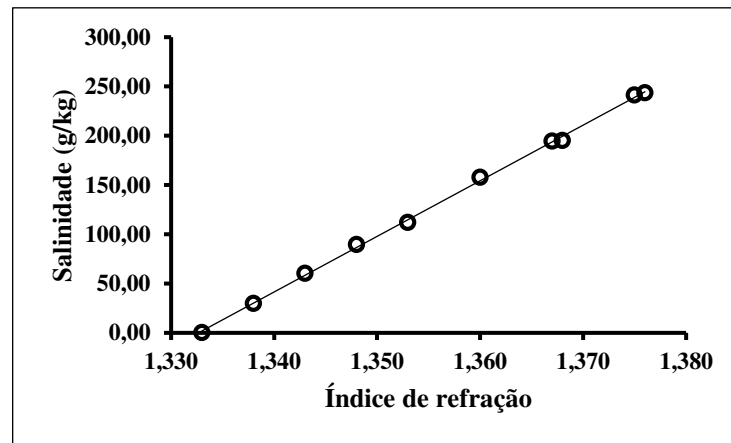
Tabela 3.8 – Especificações das amostras de diferentes salinidades e índices de refração.

Massa sal (g)	Massa água (g)	Massa solução (g)	τ (g/kg)	n	T (°C)
X	X	X	0,00	1,333	23,0
0,3013	9,8078	10,1091	29,80	1,338	22,7
0,6031	9,4177	10,0208	60,18	1,343	22,3
0,9031	9,1857	10,0888	89,52	1,348	22,5
1,2012	9,5444	10,7456	111,79	1,353	22,1
1,5861	8,4643	10,0504	157,81	1,360	22,6
1,9544	8,0954	10,0498	194,47	1,367	21,8
2,1073	8,7001	10,8074	194,99	1,368	22,4
2,4435	7,5902	10,0337	243,53	1,376	22,1
2,7121	8,5402	11,2523	241,03	1,375	22,0

Fonte: Autor (2019).

A Figura 3.22 mostra a salinidade (τ) como função do índice de refração (n). Ela tem bom ajuste, com $R^2 > 0,9990$ para n variando no intervalo entre 1,333 e 1,376 e é modelada pela reta descrita na Equação 10.

Figura 3.22 – Salinidade em função do índice de refração, para salmpuras de NaCl.



Fonte: Autor (2019).

Do modelo expresso pela Equação 10, podem ser estimadas as salinidades de soluções desconhecidas, com precisão superior a 99,9% para o intervalo $1,333 \leq n \leq 1,376$ e temperatura média de 22,4 °C.

$$\tau = 5642,61n - 7519,63 \quad (10)$$

3.6 Experimentos Solares

Os experimentos solares de evaporação e de aquecimento superficial das placas absorvedoras de radiação foram realizados em ambiente sem nenhum controle sobre as condições climáticas, entre as quais, citam-se: irradiação global horizontal (G), umidade relativa do ar (UR), velocidade do vento e temperatura ambiente. Os ensaios foram conduzidos no *campus* da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), latitude 5°50'32" Sul e longitude 35°11'46" Oeste. Os experimentos de evaporação foram conduzidos nos dias 12 e 19 de novembro de 2018, das 10h30min às 14h00min, enquanto as investigações de aquecimento superficial foram conduzidas nos dias 08, 13, 28 e 29 de agosto de 2018, também em horários com taxas de irradiação global horizontal (G) superando, historicamente, picos de 1000 W/m² (INPE, 2019a, 2019b, 2019c, 2019d, 2019e).

3.6.1 Evaporação

A obtenção da taxa de evaporação (r_c), modelada pela Equação 3, requer a análise do gráfico cinético constituído pela curva de perda de massa (m) em função do tempo (t). Diferentemente dos ensaios de evaporação fotoassistida, nos ensaios solares os dados são obtidos de forma indireta, seguindo a metodologia desenvolvida para a realidade laboratorial disponível, sendo descrita a seguir.

Foram transferidos para cada uma das placas absorvedoras de radiação (P001 a P007), outrora detalhadas na Tabela 3.5, 30,0 mL de solução salina com salinidade 30%. Às 10h30min (0 min), os sistemas foram expostos à radiação solar até às 14h00min (210 min). Com intervalos de 30 min, foram recolhidos 200 μ L da salmoura contida nas placas, com o auxílio de uma micropipeta MDI/VIP – 700. Cada alíquota foi analisada em um refratômetro analógico ATAGO/NAR – 1T, obtendo-se os índices de refração de casa amostra em função do tempo de exposição solar. Em posse dos dados refratométricos e da Equação 10, os índices de refração (n) foram convertidos em salinidade (τ). Para a aquisição da referida perda de massa (m) em função do tempo (t), foi utilizada a Equação 8. Não obstante, para o conhecimento da massa de sal (m_1), de modo a zerar o grau de liberdade no uso desta última equação, cada placa absorvedora fora submetida à secagem em estufa a 45 °C por 15 h. Essa etapa tem por objetivo garantir que após às 14h00min (210 min), toda a massa de água ainda presente na placa absorvedora seja evaporada, restando apenas sal. Depois da secagem e do resfriamento em condições ambiente, as placas absorvedoras de radiação foram pesados, obtendo-se a massa final de cada uma (m_{final}). A massa final (m_{final}) corresponde à soma das massas da placa (m_{placa}), dada na Tabela 3.5, e a massa de sal (m_1), conforme modelado na Equação 11. Desse modo, foram obtidas as curvas cinéticas no ambiente de radiação solar real.

$$m_{final} = m_{placa} + m_1 \quad (11)$$

3.6.2 Aquecimento Superficial

Foram procedidos quatro experimentos em que a temperatura da superfície da placa absorvedora de radiação foi o parâmetro investigado. Dois dos experimentos foram conduzidos na ausência de salmoura, enquanto nos outros dois foram utilizados 25,0 mL de salmoura de salinidade 30‰. É apresentada na Figura 3.23 a leitura da temperatura superficial em uma das

placas sem salmoura, detalhando a adaptação de um funil de vidro para apoiar o sensor do termopar tipo K (ISTRUTHERM TH-075), padronizando-o numa mesma altura e protegendo-o das interferências do vento.

Figura 3.23 – Leitura da temperatura da superfície de uma placa absorvedora em um experimento solar na ausência de salmoura.



Fonte: Autor (2019).

CAPÍTULO 4

Resultados e Discussão

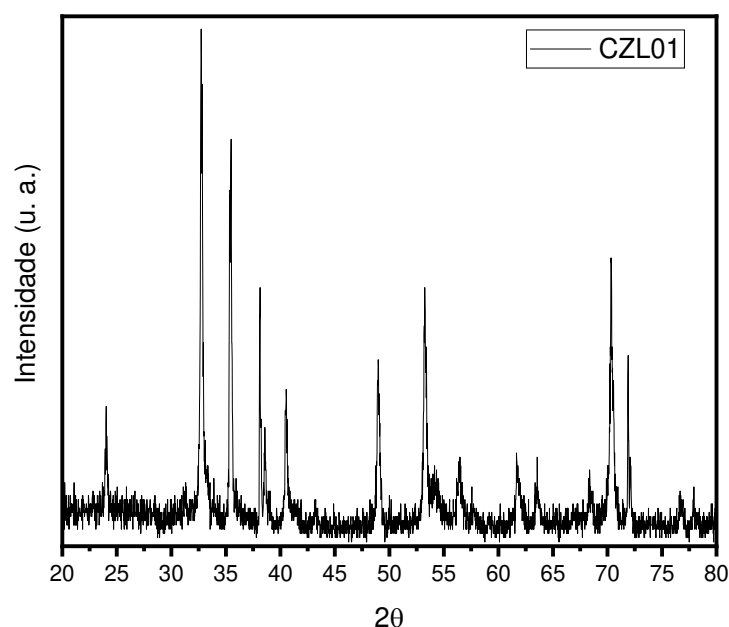
4 Resultados e Discussões

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados da caracterização da cinza residual da indústria sucroalcooleira, bem como as cinéticas de evaporação em ambiente fotoassistido e de exposição à irradiação solar real, alcançadas pelos diversos materiais absorvedores de radiação estudados, sendo apresentado e discutindo, por fim, o resultados do aquecimento superficial de tais placas.

4.1 Caracterização da Cinza Residual

O difratograma da cinza lavada (CZL01), resíduo da indústria sucroalcooleira, é mostrado na Figura 4.24. O pó se apresenta como um material cristalino, onde seus picos foram indexados com a carta *JCPDS* (*Joint Committeeon Powder Diffraction Standards*) nº 01-075-1210 do FeTiO_3 de estrutura romboédrica e grupo espacial R3-148.

Figura 4.24 – Difratograma da cinza lavada (CZL01).



Fonte: Autor (2019).

O resultado da identificação do material apresentado no difratograma da CZL01 pode ser comparado com os dados obtidos através da análise da fluorescência de raios-X mostrados na Tabela 3.9. Observa-se que os elementos ferro e titânio são os principais elementos constituintes

da estrutura desse material, sendo estas técnicas complementares e usadas para identificar a estrutura do material bem como sua composição química.

Tabela 3.9 – Composição química da cinza lavada (CZL01) obtida por FRX.

Elemento químico	% (mássica)
Fe	51,566
Ti	41,207
Mn	2,167
Si	1,855
Al	1,783
Zr	0,961
Nb	0,225
Ca	0,166
Zn	0,071

Fonte: Autor (2019).

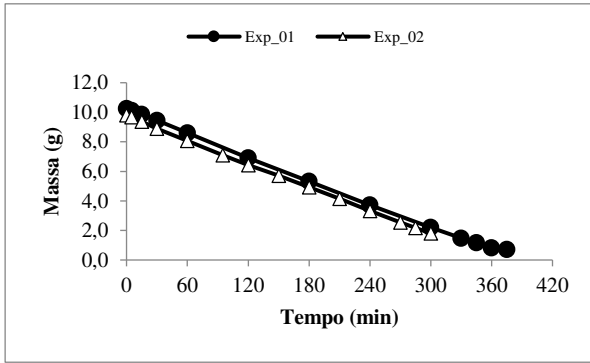
Estão presentes em grades quantidades na cinza residual, elementos que compõem substâncias com propriedades fotoativas reconhecidas, principalmente ferro e titânio. Muitos materiais a base de titânio foram desenvolvidos para a redução fotocatalítica de CO₂ em combustíveis químicos como CO, CH₃ e CH₃OH (TRUONG et al., 2012), por exemplo. Bem como para atividade antibacteriana e geração de radical hidroxila (MOLINA-REYES et al., 2018). No caso do ferro, o elemento se apresenta como uma das substâncias menos onerosas e de menor toxicidade com atividade fotocatalítica no espectro da luz visível, usado para a purificação de água, por exemplo (JACK et al., 2015).

4.2 Evaporação Fotoassistida

4.2.1 Ferrita de Cobalto

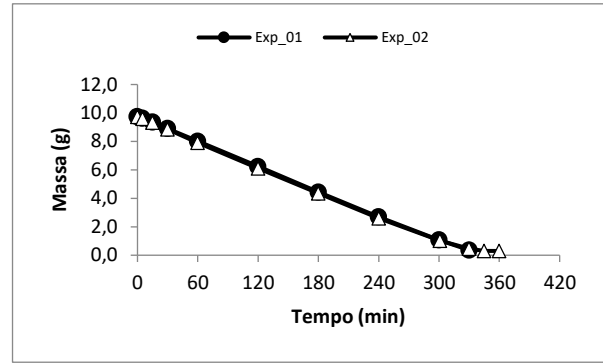
Os gráficos mostrados nas Figuras 4.25 a 4.29 representam as cinéticas de evaporação da placa de referência, sem material coletor (branco), e dos sistemas com as amostras de ferrita de cobalto detalhadas nas Tabelas 3.6 e 4.10.

Figura 4.25 – Cinética de evaporação (branco).



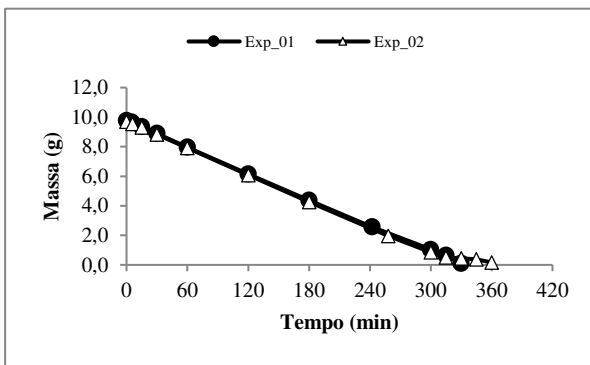
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.26 – Cinética de evaporação (amostra 1).



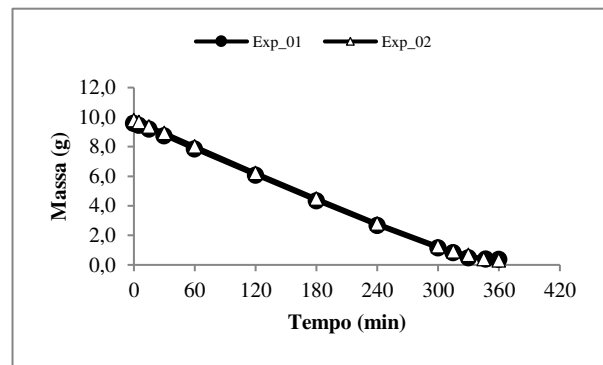
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.27 – Cinética de evaporação (amostra 2).



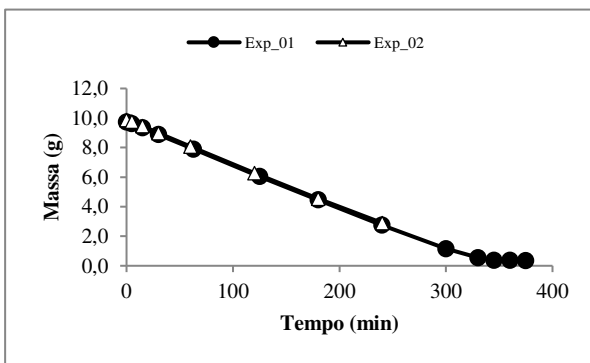
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.28 – Cinética de evaporação (amostra 3).



Fonte: Autor (2019).

Figura 4.29 – Cinética de evaporação (amostra 4).



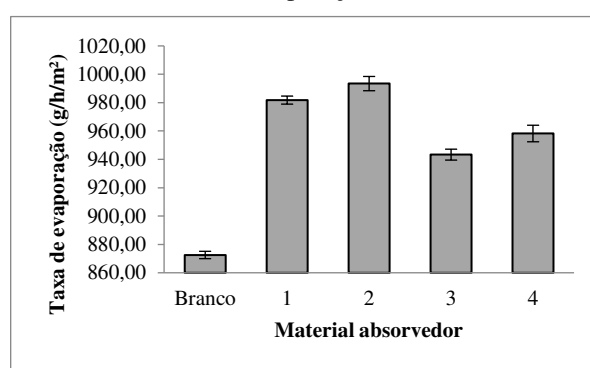
Fonte: Autor (2019).

Como já abordado, o processo de evaporação ocorre à taxa constante, sendo esse fenômeno percebido pela linearidade das curvas cinéticas durante a operação. Os períodos de taxas constantes apresentaram boa linearidade, com todos os coeficientes de determinação alcançando $R^2 \geq 0,9994$. Isso se deu entre 15 min e 300 min para o sistema branco (Figura 4.25),

amostra 3 (Figura 4.28) e para o experimento 01 da amostra 4 (Figura 4.29), entre 15 min e 240 min para as amostras 1 e 2 (Figuras 4.26 e 4.27, respectivamente) e para o experimento 02 da amostra 4 (Figura 4.29).

Da Inclinação da reta que configura o período de evaporação constante, da Equação 3 e da área de coleta de radiação da placa P008 (Tabela 3.5), que também corresponde à área de interface gás-líquido, chegam-se às velocidades de evaporação para cada situação investigada. Estão representadas na Figura 4.30 as taxas médias de evaporação dos cenários investigados bem como a projeção dos respectivos desvios padrão.

Figura 4.30 – Taxas médias de evaporação (branco e amostras 1, 2, 3 e 4)



Fonte: Autor (2019).

A Tabela 4.10 detalha as taxas de evaporação obtidas em cada corrida experimental, suas respectivas médias, desvios padrões populacionais e o erro percentual que o desvio representa em relação à taxa média. Os erros calculados estão compreendidos entre 0,29% e 0,61%, evidenciando que a confiabilidade dos resultados, do ponto de vista estatístico, é superior a 99,0%. Isso sugere que tanto o evaporador fotoassistido quanto o procedimento experimental desenvolvido para a aquisição dos dados cinéticos geraram resultados reproduzíveis.

Tabela 4.10 – Taxas de evaporação médias, desvios padrões populacionais e erros para todos os experimentos com ferrita de cobalto em ambiente fotoassistido.

Amostra	Tamanho (nm)	Taxa de evaporação (g/h/m ²)				Erro (%)
		Exp_01	Exp_02	Média	Desvio padrão	
Branco	Ausente	875,15	869,95	872,55	2,60	0,30
1	26	978,97	984,65	981,81	2,84	0,29
2	22	988,39	998,46	993,42	5,04	0,51
3	346	939,50	947,18	943,34	3,84	0,41
4	274	952,39	964,07	958,23	5,84	0,61

Fonte: Autor (2019).

Ficam evidenciadas na Figura 4.30 e na Tabela 4.10 que a maior taxa de evaporação foi promovida pela associação da salmoura com a amostra de ferrita de cobalto 2, seguida pelas associações com as amostras 1, 4 e 3, respectivamente. A menor velocidade de evaporação foi, naturalmente, alcançada pelo sistema de referência, sem material absorvedor de radiação (branco). A Tabela 4.10, apresenta, ainda, que a amostra de ferrita 2 possui tamanho de cristalito correspondente a 22 nm, a amostra 1 tem 26 nm, a amostra 4 mede 247 nm e a amostra 3 possui 346 nm, sugerindo que o efeito das menores dimensões de cristalito favorece a evaporação. Esse comportamento pode ser explicado pelo melhoramento das propriedades de condutividade térmica, decorrente das dimensões nanométricas do material (BERGMAN et al., 2014). De acordo com Bergman et al. (2014), os materiais nanoestruturados, mesmo que quimicamente idênticos, possuem suas propriedades de transferência de calor alteradas pelo aumento do espalhamento e da reflexão dos transportadores de energia nas fronteiras dos grãos.

A associação da salmoura com a amostra de ferrita 2 promoveu um aumento de 14,8% na taxa de evaporação em relação à referência (branco). A mesma análise para a utilização das ferritas 1, 4 e 3, revelaram incrementos na produtividade de 13,2%, 10,8% e 8,9%, respectivamente.

Em comparação com as velocidades de evaporação obtidas por outros pesquisadores, a média de 993,42 g/h/m² alcançada com a amostra de ferrita 2, apresentou resultados competitivos para as condições de salinidade (30‰) e baixa irradiação (1 kW/m²), as quais foram submetidas. Wang et al. (2016) e Chen et al. (2017) obtiveram, respectivamente, velocidades próximas a 1000 g/h/m² e 1250 g/h/m², também sob incidência de 1 kW/m². Wang et al. (2016) obtiveram esse resultado investigando o efeito do nanofluido de nanotubos de carbono com 19,04x10⁻⁴% (em volume), ao passo que Chen et al. (2017) estudaram o emprego do nanofluidos de nanotubos de carbono recuperáveis com 0,04% (em massa) em salmouras com baixa salinidade (1‰).

Sendo a qualidade da dispersão dos cristalitos no líquido-base um parâmetro importante sobre as propriedades de condutividade térmica, sobretudo pelo papel chave do movimento Browniano estudado por Jang e Choi (2004), comenta-se que os resultados com a ferrita de cobalto poderiam ter sido melhores caso a metodologia de injeção de salmoura no evaporador fotoassistido permitisse ter o controle sobre a mistura da solução salina com o material absorvedor de radiação. Outro fator que poderia contribuir para a mais efetiva dispersão dos pós de ferrita e o consequente aumento da taxa de evaporação, seria a prévia maceração das amostras a fim minimizar os efeitos da aglomeração dos cristalitos, fomentada pelas características magnéticas do CoFe_2O_4 .

Uma vez que o seguimento AB mostrado na Figura 2.10 é pouco pronunciado nas cinéticas de evaporação das Figuras 4.25 a 4.29, deduz-se que os sistemas rapidamente atingem o regime estacionário após a injeção da solução salina. Por isso, a linearidade ficou tão bem ajustada já a partir de 15 min. Também fica evidente que a taxa de evaporação se manteve constante durante a maior parte do experimento, mesmo com o gradativo aumento da salinidade da salmoura por efeito da água que evapora, parecendo, numa primeira análise, ignorar o fato de que o aumento da concentração do soluto não-volátil (NaCl) na solução salina faz diminuir a sua pressão de vapor. Nesse contexto, percebe-se que até ser atingindo o limite da solubilidade do NaCl (aproximadamente 268‰), o processo transcorreu de forma linear com o R^2 já discutido, sendo o ponto experimental imediatamente anterior ao limite da solubilidade, o critério para o cálculo dos coeficientes de determinação. Por esse motivo, algumas taxas de evaporação foram calculadas com inclinações de retas formadas entre os instantes 15 min e 240 min e outras entre 15 min e 300 min.

Nota-se também que após 240 min (Figuras 4.26 e 4.27) e após 300 min (Figuras 4.25, 4.28 e 4.29), existe um período de indução cuja linearidade é gradativamente perdida até que o registro de perda de massa cesse abruptamente, evidenciando o fim do processo de evaporação. Nesse instante, restam na bacia apenas cristais de sal, ferrita de cobalto e umidade residual.

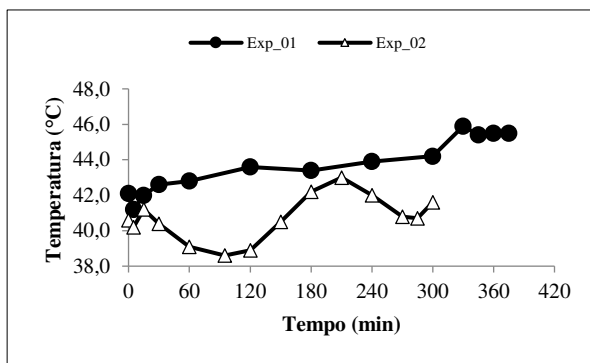
Desprezando o volume deslocado pela massa de ferrita de cobalto, assumindo a hipótese de que as massas específicas (ρ) das salmouras sejam constantes e correspondam a $1,0 \text{ g/cm}^3$ e tendo em vista a área interna da Placa P008 ($18,17 \text{ cm}^2$), os sistemas investigados nesta seção tinham, inicialmente, altura média de filme líquido calculado em 5,36 mm com desvio padrão populacional de 0,05 mm. Os gráficos cinéticos mostrados nas Figuras 4.25 a 4.29 também evidenciam que as taxas de evaporação permaneceram constantes mesmo após as massas e, conseqüentemente, as alturas dos filmes, reduzirem-se sensivelmente. Por exemplo, aos 240 min o experimento 02 do sistema de referência (Figura 4.25) tinha a altura calculada em

aproximadamente 1,8 mm, enquanto que no experimento 02 da amostra de ferrita 2 (Figura 4.27), a altura era estimada em 1,4 mm, representando reduções nos filmes equivalentes a 66,4% e 73,9%, respectivamente.

É fato reconhecido que o aumento da concentração de cloreto de sódio (soluto não-volátil) na salmoura (solução) diminui sua pressão de vapor, o que reflete no aumento da temperatura de ebulição. No entanto, como os processos de evaporação são conduzidos abaixo dessa temperatura, é plausível que o gradativo aumento da salinidade da salmoura não interfira na linearidade da cinética, como constatado, até o limite da solubilidade do sal. Não obstante, fica passível de estudos futuros, investigar se o aparente efeito negativo da propriedade coligativa sobre a velocidade de evaporação, é compensado pelo efeito acelerador promovido pela diminuição da altura do filme da salmoura, uma vez que Omara et al. (2015) e Sharshir et al. (2017) reportam que a redução da profundidade do filme ocasiona incrementos na produtividade de destiladores solares. De qualquer forma, porém, é possível inferir, nos níveis estudados, que a operação em batelada de destiladores solares não deve representar diminuição em sua produtividade.

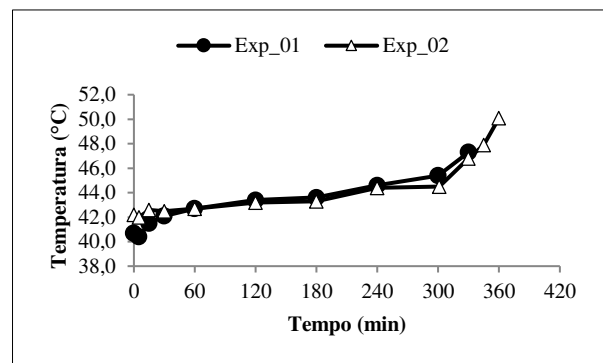
As Figuras 4.31 a 4.35 mostram as temperaturas das salmouras durante o processo de evaporação. Pode-se constatar que durante os experimentos, as soluções salinas não atingem 53,0 °C, temperatura muito abaixo dos 100 °C para a ebulição da água pura nas condições de pressão do ensaio, por exemplo.

Figura 4.31 – Temperatura da salmoura (branco).



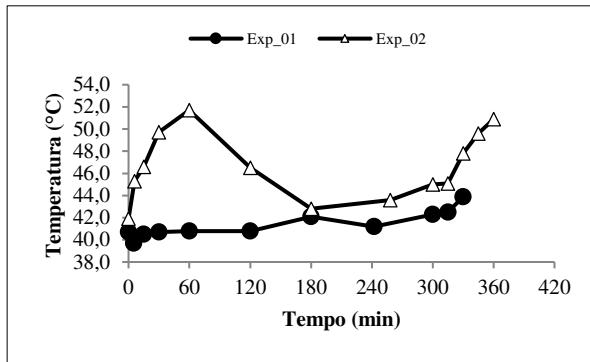
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.32 – Temperatura da salmoura (amostra 1).



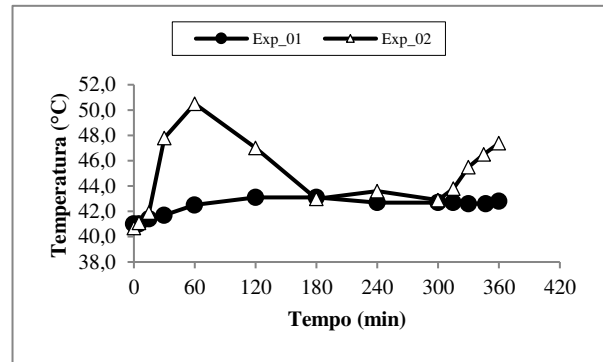
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.33 – Temperatura da salmoura (amostra 2).



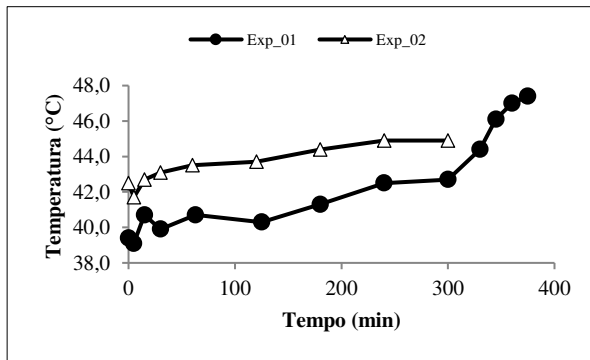
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.34 – Temperatura da salmoura (amostra 3).



Fonte: Autor (2019).

Figura 4.35 – Temperatura da salmoura (amostra 4).



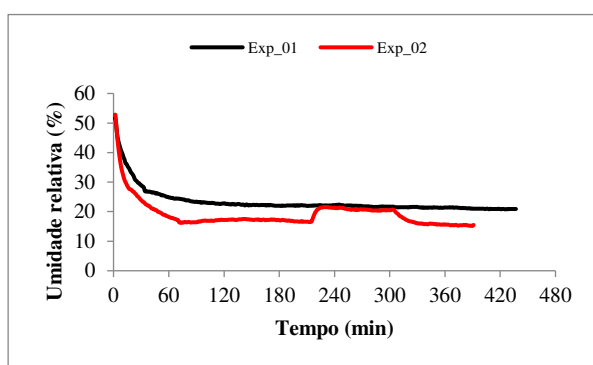
Fonte: Autor (2019).

Esses gráficos também sugerem não existir um comportamento típico de temperatura, exceto para a amostra de ferrita 1 (Figura 4.32). Tais comportamentos são razoáveis para sistemas com propriedades distintas, devido à utilização de diferentes ferritas, mas inesperado para as duplicatas entre o mesmo material, uma vez constatado o bom nível de reprodutibilidade dos experimentos. Uma hipótese seria o efeito da suspensão das partículas de ferrita de cobalto na salmoura, gerando gradientes de temperatura imprevisíveis e, portanto, sem padrão repetitivo. No entanto, essa hipótese é refutada pela análise da temperatura da salmoura na investigação em ausência de ferrita (Figura 4.31), também sem comportamento padrão. Isso levou à substituição do termopar para os experimentos descritos na seção 4.2.2.

Vale salientar que os gráficos que se seguem nesta seção, compreendem todo o tempo de ensaio fotoassistido, desde o acionamento da lâmpada, ativação do sistema de arrefecimento e estabilização da temperatura interna da câmara de evaporação, passando pela injeção da salmoura, até a coleta do último ponto experimental.

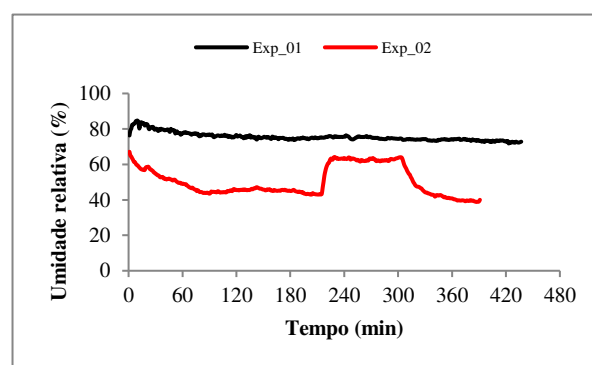
A umidade relativa da atmosfera interna ($UR_{interno}$) do evaporador fotoassistido e a umidade relativa do ambiente externo ($UR_{externo}$) obtidas pelos sensores DHT22, são mostradas nas Figuras 4.36 a 4.45 para as diferentes corridas experimentais. Comparando o parâmetro da atmosfera interna entre as duplicatas, $UR_{interno}$ se estabilizou em torno de 22%, exceto para o experimento 2 do sistema de referência (branco) (Figura 4.36). Nesse caso, enquanto a corrida era conduzida com $UR_{interno}$ de aproximadamente 16%, o acionamento da capela do laboratório, por volta dos 205 min de experimento, elevou $UR_{interno}$ para aproximadamente 21% durante 95min. No entanto, a sensível alteração de $UR_{interno}$ e também de $UR_{externo}$ (Figura 4.37), não interferiram na linearidade da cinética de evaporação, como pode ser constatada na curva do experimento 02, entre os instantes 112 min e 207 min (Figura 4.25). Diferentemente das umidades relativas internas, as umidades relativas da atmosfera do laboratório ($UR_{externo}$) não apresentaram níveis próximos entre as duplicatas. Não obstante, essas constatações, nos níveis averiguados (distantes da saturação), demonstraram não ser importantes para surtir efeito na qualidade da reprodutibilidade dos experimentos de evaporação fotoassistido.

Figura 4.36 – Umidade relativa da atmosfera interna (branco).



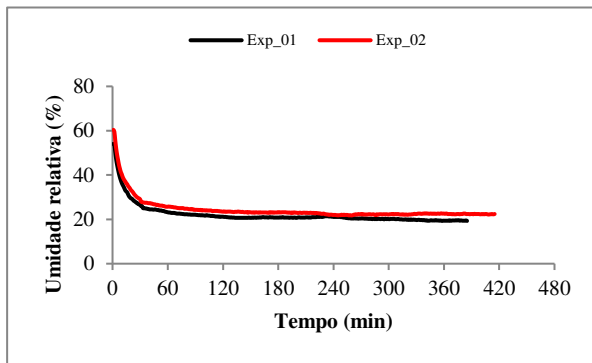
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.37 – Umidade relativa da atmosfera externa (branco).



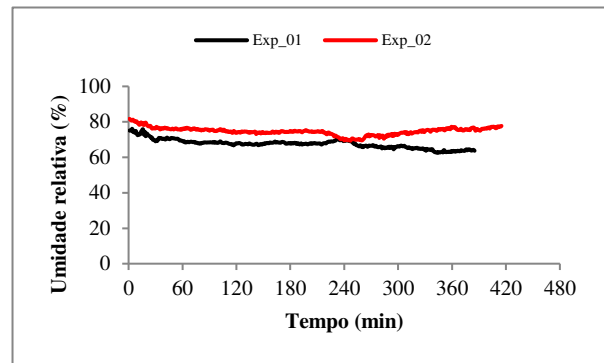
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.38 – Umidade relativa da atmosfera interna (amostra 1).



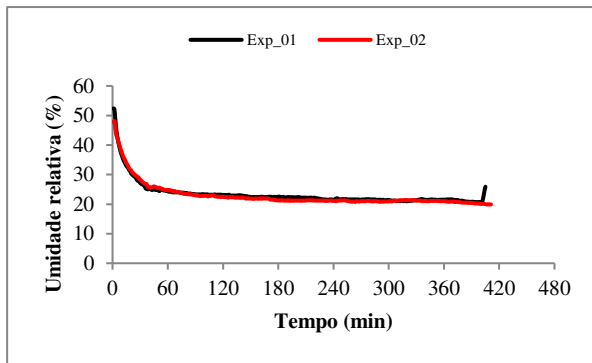
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.39 – Umidade relativa da atmosfera externa (amostra 1).



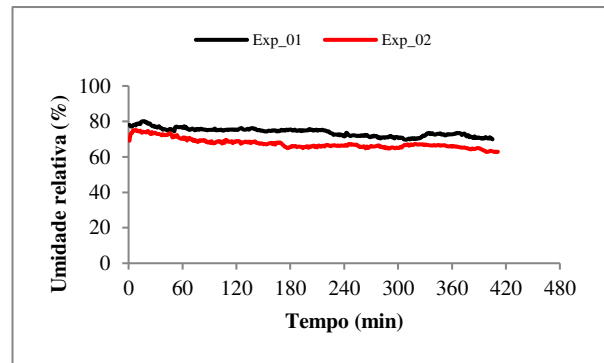
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.40 – Umidade relativa da atmosfera interna (amostra 2).



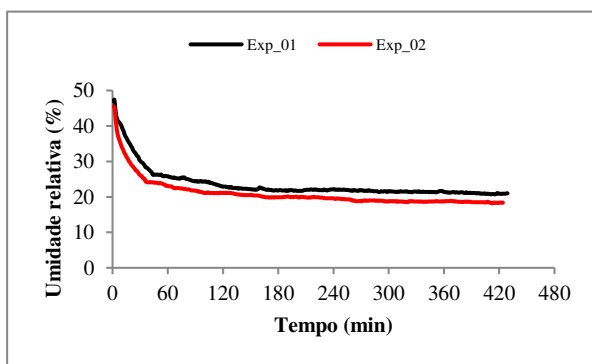
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.41 – Umidade relativa da atmosfera externa (amostra 2).



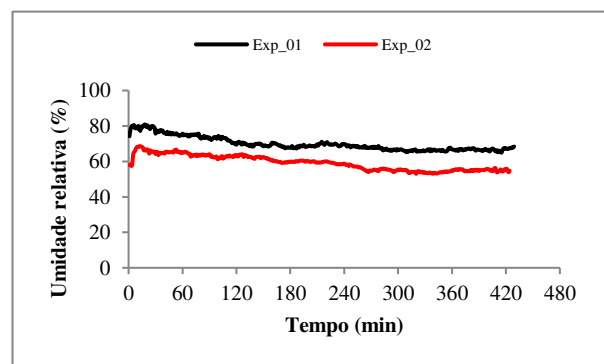
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.42 – Umidade relativa da atmosfera interna (amostra 3).



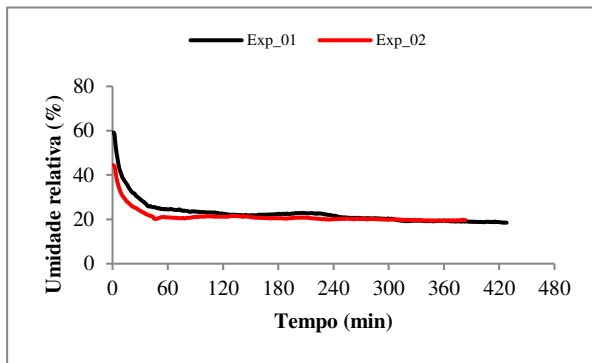
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.43 – Umidade relativa da atmosfera externa (amostra 3).



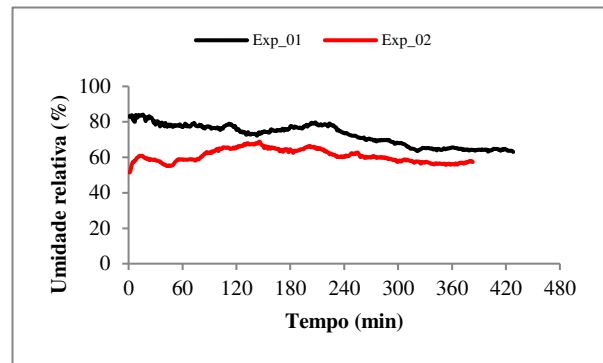
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.44 – Umidade relativa da atmosfera interna (amostra 4).



Fonte: Autor (2019).

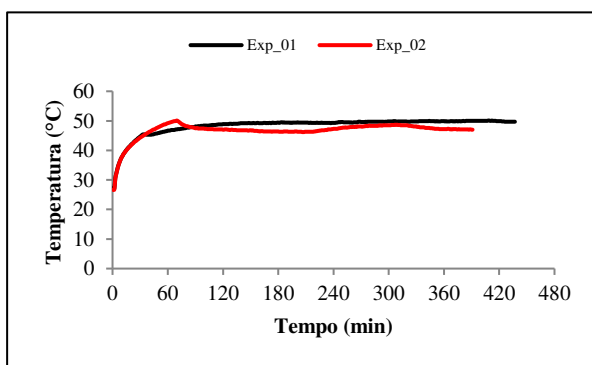
Figura 4.45 – Umidade relativa da atmosfera externa (amostra 4).



Fonte: Autor (2019).

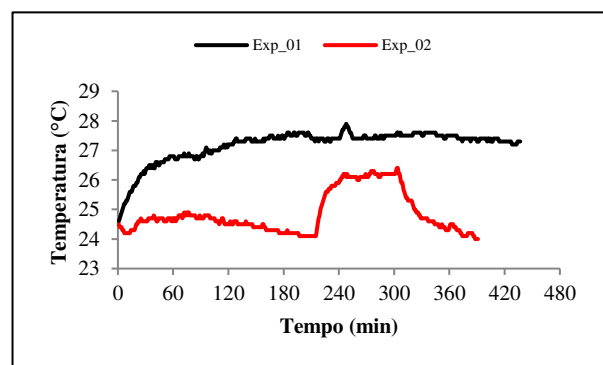
Os gráficos das Figuras 4.46 a 4.55 retratam o comportamento da temperatura da atmosfera no interior da câmara iluminada do evaporador fotoassistido ($T_{interna}$) e do ambiente laboratorial ($T_{externo}$) durante as corridas experimentais. Internamente, as temperaturas se estabilizaram entre 46 °C e 48 °C durante o período de evaporação constante, aproximadamente. Não obstante, as condições externas não apresentaram nenhum padrão, porém, sem prejuízos, nos níveis investigados, para a já comentada reprodutibilidade dos experimentos.

Figura 4.46 – Temperatura da atmosfera interna (branco).



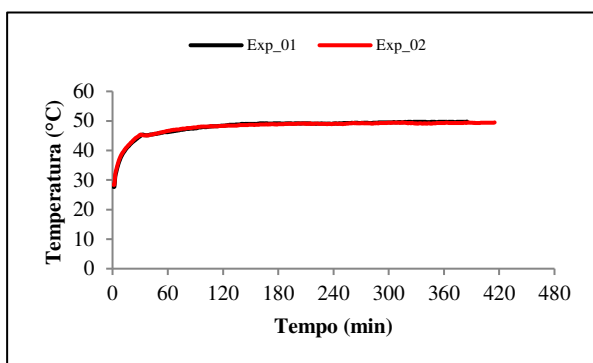
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.47 – Temperatura da atmosfera externa (branco).



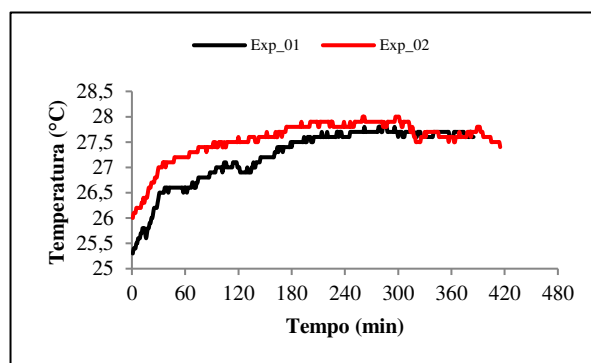
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.48 – Temperatura da atmosfera interna (amostra 1).



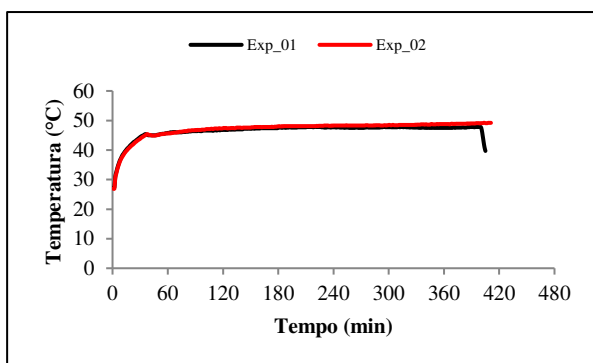
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.49 – Temperatura da atmosfera externa (amostra 1).



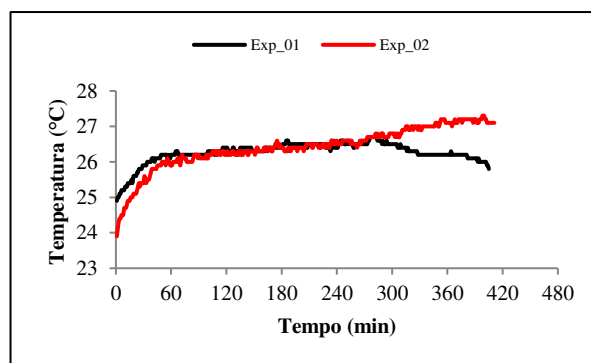
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.50 – Temperatura da atmosfera interna (amostra 2).



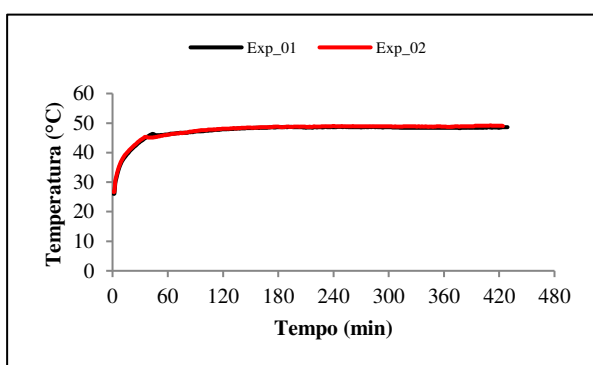
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.51 – Temperatura da atmosfera externa (amostra 2).



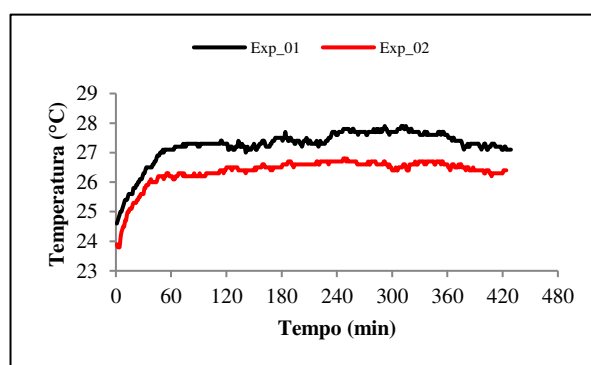
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.52 – Temperatura da atmosfera interna (amostra 3).



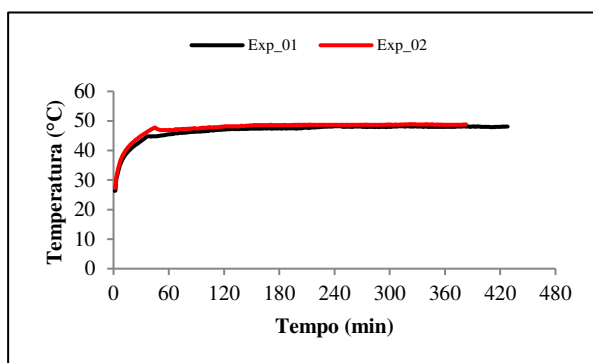
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.53 – Temperatura da atmosfera externa (amostra 3).



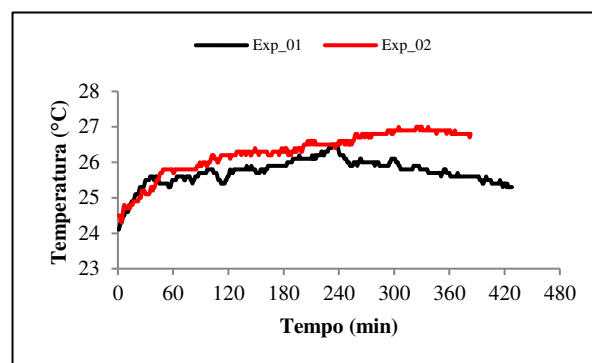
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.54 – Temperatura da atmosfera interna (amostra 4).



Fonte: Autor (2019).

Figura 4.55 – Temperatura da atmosfera externa (amostra 4).

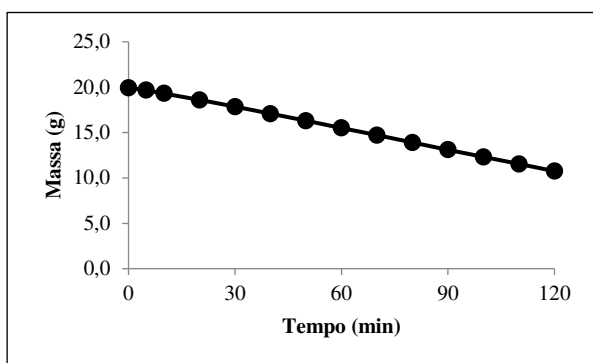


Fonte: Autor (2019).

4.2.2 Placas Absorvedoras de Radiação

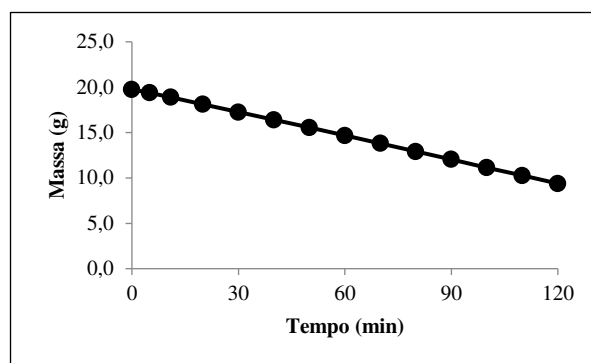
As cinéticas de evaporação para os experimentos fotoassistidos com as placas absorvedoras de radiação P001 a P007 (Tabelas 3.5 e 4.11) são mostradas nas Figuras 4.56 a 4.62. O seguimento AB abordado na Figura 2.10 e pouco perceptível nas cinéticas com as ferritas de cobalto, ficou mais evidente nesses experimentos com as placas absorvedoras de radiação. Não obstante, os ensaios desta seção também apresentaram curto período em regime transiente. Em todos os casos os coeficientes de correlação corresponderam a $R^2 \geq 0,9997$, indicando o bom ajuste linear desde 10 min a 120 min. Desse modo, as velocidades de evaporação foram calculadas e mostradas na Figura 4.63 e detalhadas na Tabela 4.11, onde também são mostradas as produtividades percentuais em relação a placa de referência (P001) e a de menor taxa de evaporação (P004).

Figura 4.56 – Cinética de evaporação fotoassistida (P001).



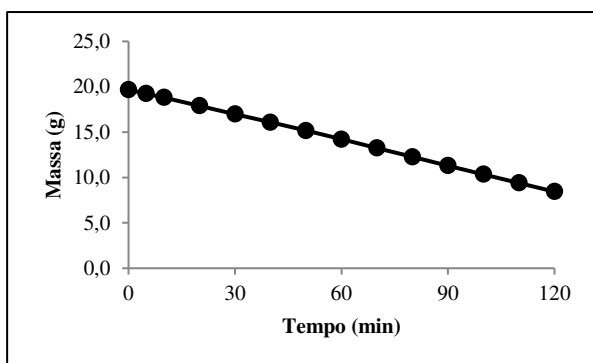
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.57 – Cinética de evaporação fotoassistida (P002).



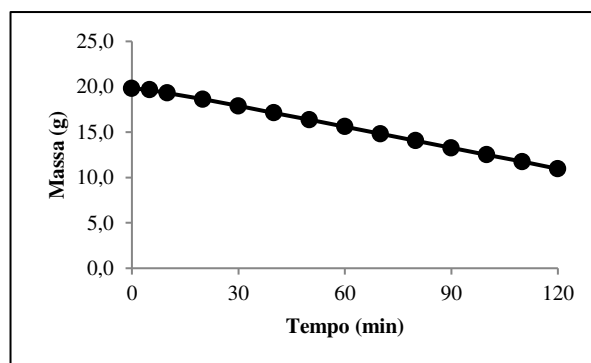
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.58 – Cinética de evaporação fotoassistida (P003).



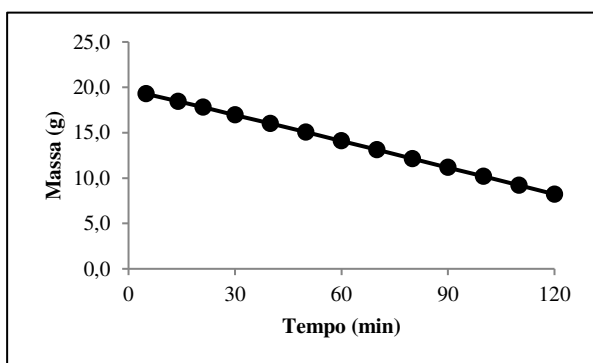
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.59 – Cinética de evaporação fotoassistida (P004).



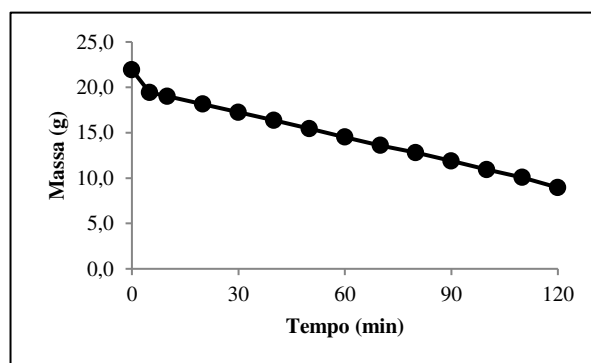
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.60 – Cinética de evaporação fotoassistida (P005).



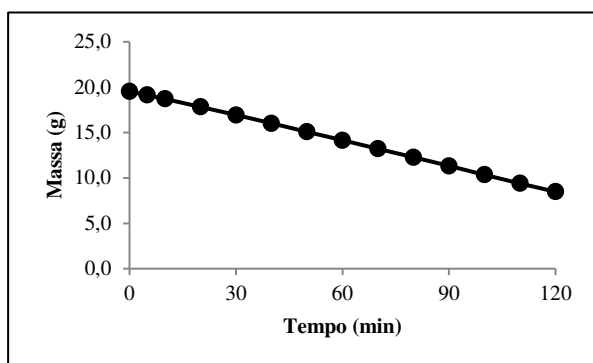
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.61 – Cinética de evaporação fotoassistida (P006).



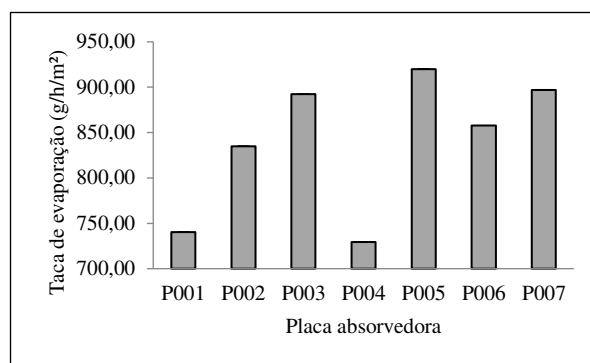
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.62 – Cinética de evaporação fotoassistida (P007).



Fonte: Autor (2019).

Figura 4.63 – Taxas de evaporação para as placas P001 a P007 nos testes fotoassistidos.



Fonte: Autor (2019).

Tabela 4.11 – Taxas de evaporação e incrementos de produtividade em relação às placas P001 e P004, alcançadas em ambiente fotoassistido.

Placa	Material absorvedor	Área (cm ²)	Taxa de evaporação (g/h/m ²)	Prod. P001 (%)	Prod. P004 (%)
P001	Vidro transparente	63,62	740,20	--	1,5
P002	Tinta preta (pintura interna)	62,77	834,85	12,8	14,5
P003	Tinta preta (pintura externa)	63,62	892,19	20,5	22,3
P004	Resina Epóxi (transparente)	62,91	729,35	-1,5	--
P005	Cinza Residual	63,05	919,86	24,3	26,1
P006	Quitosana/Grafite	63,33	857,75	15,9	17,6
P007	Mineral Monazita/Alanita	62,49	896,82	21,2	23,0

Fonte: Autor (2019).

Do gráfico da Figura 4.63 e da Tabela 4.11, as taxas de evaporação podem ser comparadas. No caso, a maior velocidade foi fomentada pela placa P005, com a cinza residual da indústria sucroalcooleira, correspondendo a 919,86 g/h/m², seguida pela placa P007 (896,82 g/h/m²), P003 (892,19 g/h/m²), P006 (857,75 g/h/m²), P002 (834,85 g/h/m²), P001 (740,20 g/h/m²) e P004 (729,35 g/h/m²). Como pode ser notada, a menor taxa de evaporação não foi promovida pela placa de referência P001 (vidro transparente), mas pela placa P004, constituída de resina epóxi sem pigmentação. Esta bacia fomentou uma taxa de evaporação 1,5% menor, em relação à placa transparente de referência. Com relação à placa P004, o aumento da produtividade do sistema absorvedor com cinza residual foi de 26,1%.

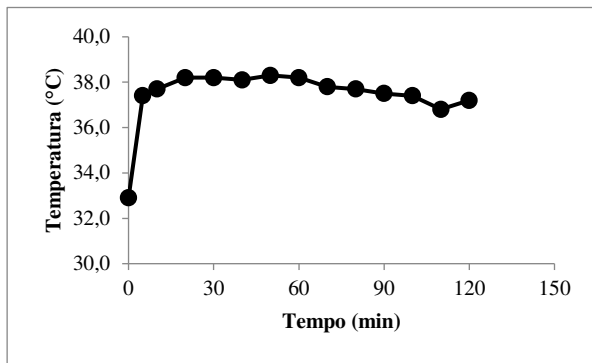
Considerando as hipóteses simplificadoras assumidas nos ensaios com ferrita de cobalto, a altura inicial média dos filmes de salmoura nas placas P001 a P007, foi calculada em 3,11 mm com desvio padrão populacional igual a 0,03 mm. Novamente, a sensível redução da altura de

filme líquido sugere não ser relevante para afetar o regime estacionário do processo, configurado pela linearidade da cinética de evaporação. Por exemplo, aos 60 min de experimento, as placas P004 e P005 (menor e maior taxas de evaporação, nessa ordem), tinham alturas de filmes calculados em aproximadamente 2,48 mm e 2,23 mm, respectivamente, correspondendo a reduções de 20,3% e 28,3% em relação à altura inicial média. No entanto, percebe-se que as cinéticas dos sistemas analisados permaneceram lineares, com o R^2 já comentado, por mais 60 min, quando os experimentos foram interrompidos. A observação deste fenômeno é visualmente perceptível nas Figuras 4.56 a 4.62.

Como nos experimentos com a ferrita de cobalto, a citada linearidade da cinética de evaporação também não foi afetada com o progressivo aumento da concentração da solução salina dos referidos sistemas investigados, valendo comentar que em todos os casos as salmouras não chegaram a 43,0 °C, muito abaixo da temperatura de ebulição.

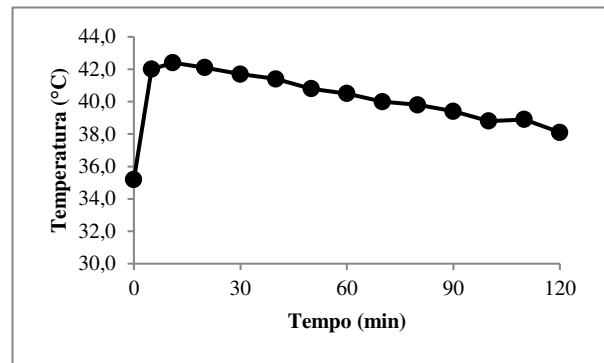
As Figuras 4.64 a 4.70 mostram as temperaturas das salmouras durante a evaporação fotoassistida com os sistemas absorvedores de radiação P001 a P007 e obtidas com o novo termopar. Nos instantes imediatamente anteriores à injeção da salmoura, a temperatura média no interior do aparato, próximo às superfícies das placas coletoras, alcançou 48,2 °C com desvio padrão populacional de 1,1 °C. Essa média é próxima das temperaturas de operação com a ferrita de cobalto. No entanto, diferentemente dos resultados obtidos naqueles experimentos, aqui o parâmetro aparentou um comportamento padrão. Iniciando com leituras relativamente baixas (promovidas pelo equilíbrio térmico entre a superfície quente da placa absorvedora e a massa de salmoura mais fria), as temperaturas atingiram um patamar máximo e decresceram a uma taxa quase linear. Em alguns casos, a temperatura tornou a crescer no final do experimento, mas esse fenômeno é desconhecido uma vez que na interrupção do ensaio, aos 120 min, ainda havia razoável volume de salmoura na bacia.

Figura 4.64 – Temperatura da salmoura durante evaporação (P001).



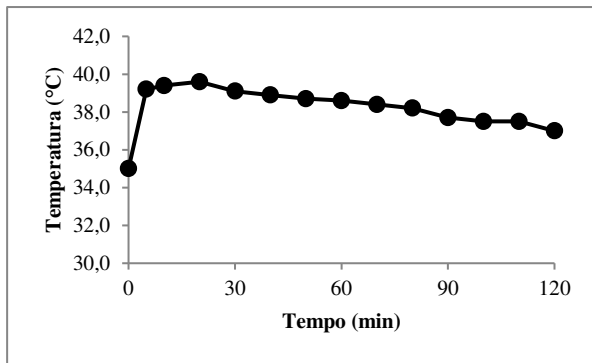
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.65 – Temperatura da salmoura durante evaporação (P002).



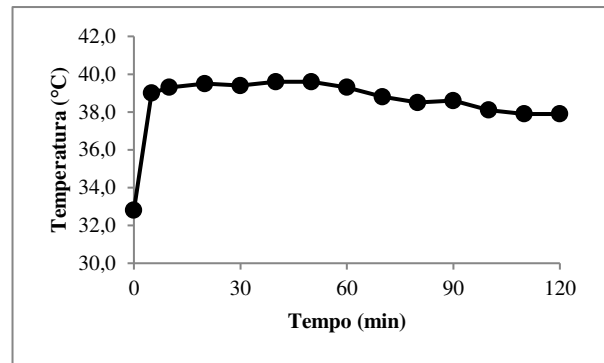
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.66 – Temperatura da salmoura durante evaporação (P003).



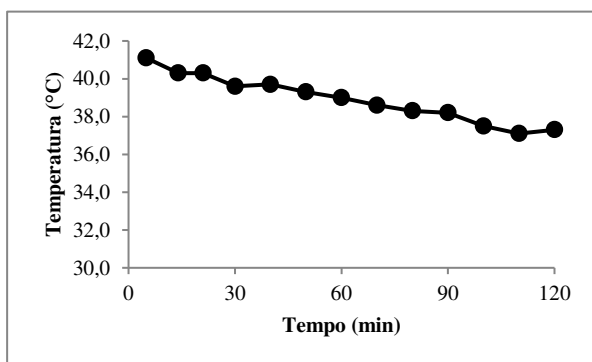
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.67 – Temperatura da salmoura durante evaporação (P004).



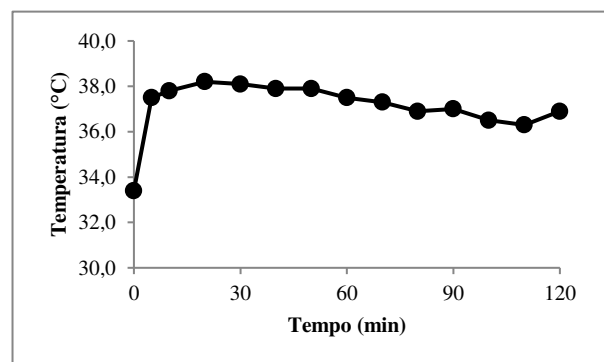
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.68 – Temperatura da salmoura durante evaporação (P005).



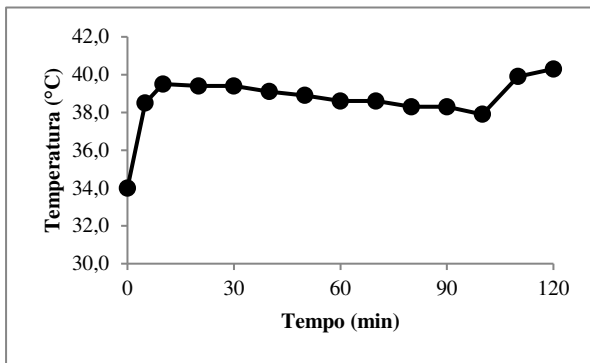
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.69 – Temperatura da salmoura durante evaporação (P006).



Fonte: Autor (2019).

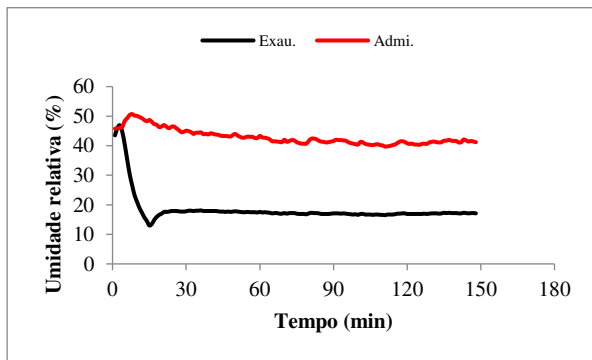
Figura 4.70 – Temperatura da salmoura durante evaporação (P007).



Fonte: Autor (2019).

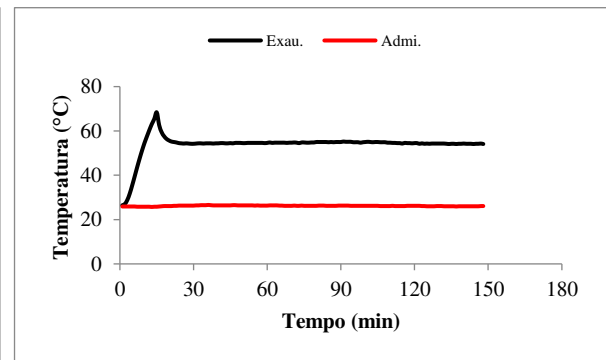
As Figuras 4.71 a 4.84 mostram as umidades relativas e as temperaturas em função do tempo para o ar de admissão e de exaustão do sistema de arrefecimento do evaporador fotoassistido. Nesses gráficos os referidos parâmetros são computados durante todo o transcorrer do experimento com as placas coletoras de radiação, isto é, desde o acionamento da lâmpada até a coleta do último ponto experimental. Na coluna da esquerda estão organizados os gráficos das referidas umidades relativas e na coluna da direita estão dispostos os gráficos das temperaturas.

Figura 4.71 – Umidade relativa (P001).



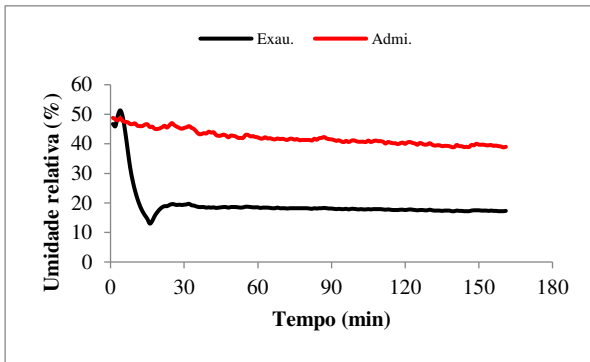
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.72 – Temperatura (P001).



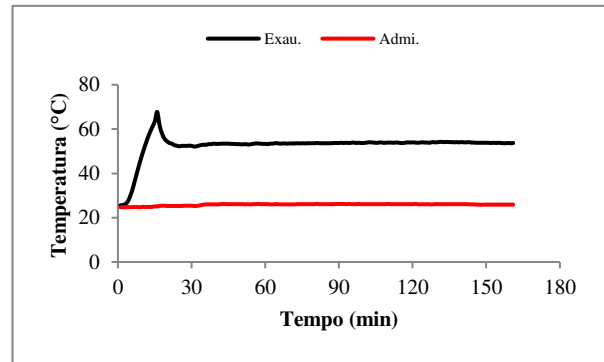
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.73 – Umidade relativa (P002).



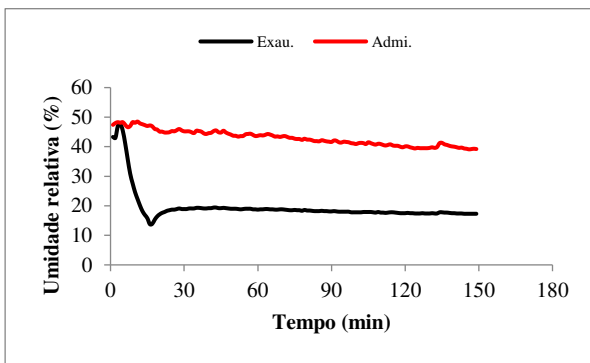
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.74 – Temperatura (P002).



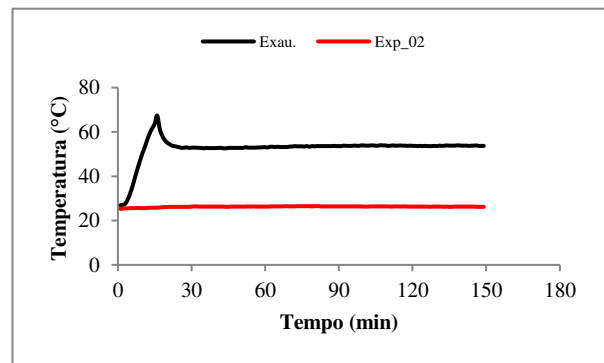
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.75 – Umidade relativa (P003).



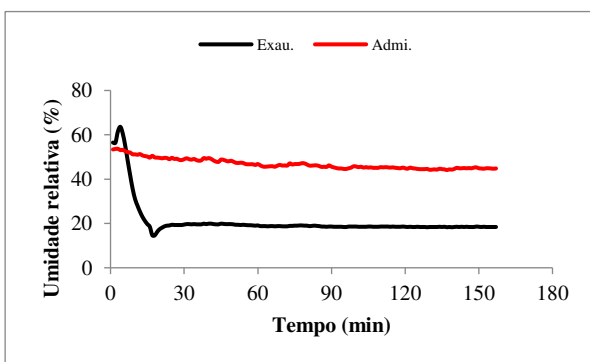
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.76 – Temperatura (P003).



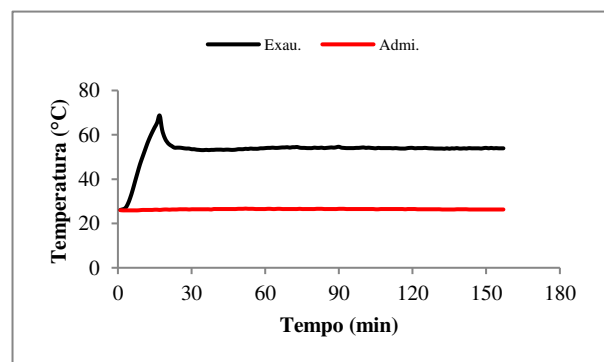
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.77 – Umidade relativa (P004).



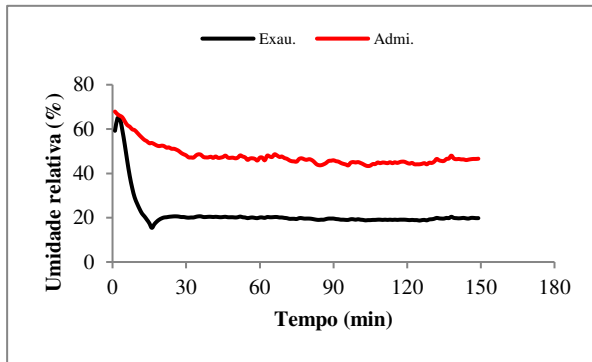
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.78 – Temperatura (P004).



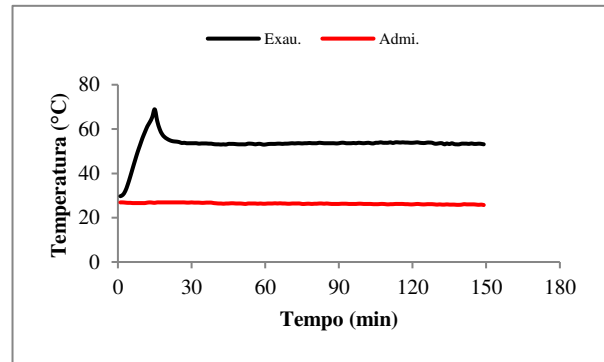
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.79 – Umidade relativa (P005).



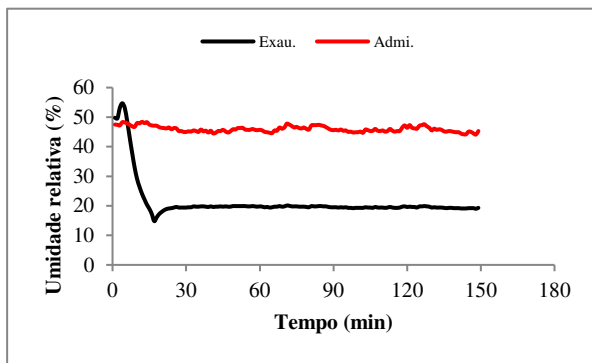
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.80 – Temperatura (P005).



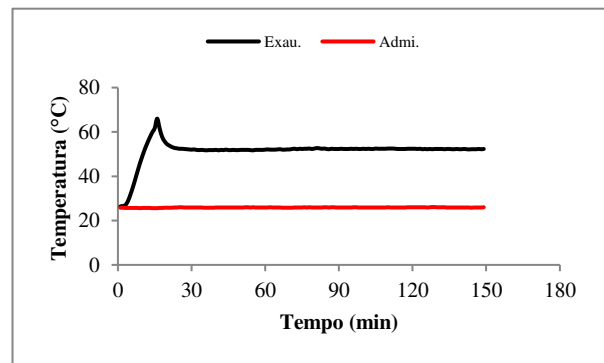
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.81 – Umidade relativa (P006).



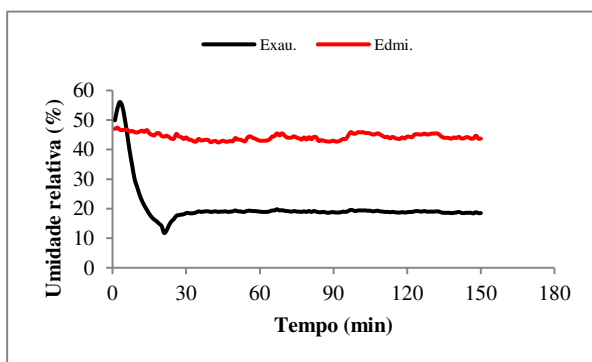
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.82 – Temperatura (P006).



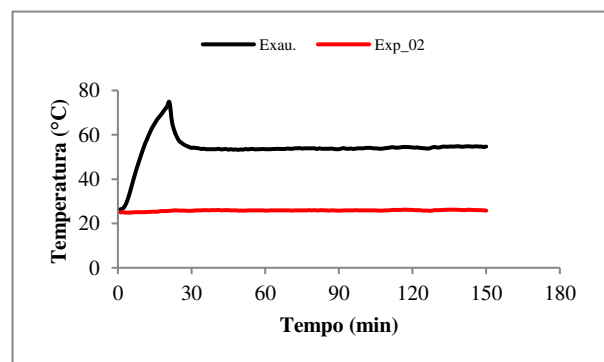
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.83 – Umidade relativa (P007).



Fonte: Autor (2019).

Figura 4.84 – Temperatura (P007).



Fonte: Autor (2019).

A análise das Figuras 4.71 a 4.84 sugerem que os parâmetros de exaustão de todas as corridas experimentais se encontraram estáveis após 30 min do acionamento da lâmpada. Os quais, decorridos 10 min da injeção da salmoura, permaneceram estáveis com modestos desvios padrões populacionais até a interrupção dos ensaios, conforme computados na Tabela 4.12.

Essa tabela corrobora a compreensão do comportamento dos parâmetros nos gráficos citados, detalhando os valores médios das temperaturas e das umidades relativas de admissão e exaustão de ar, decorridos 10 min da injeção da salmoura, destacando entre parêntesis, os respectivos desvios padrões populacionais.

Tabela 4.12 – Temperaturas (T) e umidades relativas (UR) médias do ar de admissão e exaustão à partir do momento de injeção da salmoura no evaporador fotoassistido. Entre parêntesis destacam-se os desvios padrões populacionais de cada grandeza.

Placa	Momento da injeção (min)	Admissão de ar		Exaustão de ar	
		T (°C)	h_r (%)	T (°C)	h_r (%)
P001	30	26,2 (0,1)	41,5 (1,0)	54,6 (0,3)	17,1 (0,3)
P002	42	26,1 (0,1)	40,6 (1,0)	53,8 (0,2)	17,8 (0,4)
P003	40	26,4 (0,1)	41,7 (1,7)	53,5 (0,3)	18,1 (0,6)
P004	38	26,5 (0,1)	45,4 (0,8)	54,0 (0,2)	18,6 (0,6)
P005	31	26,2 (0,2)	45,7 (1,3)	53,5 (0,3)	19,5 (0,5)
P006	30	25,9 (0,1)	45,8 (0,8)	52,2 (0,2)	19,6 (0,2)
P007	32	25,9 (0,1)	44,1 (0,9)	54,0 (0,4)	19,0 (0,3)

Fonte: Autor (2019).

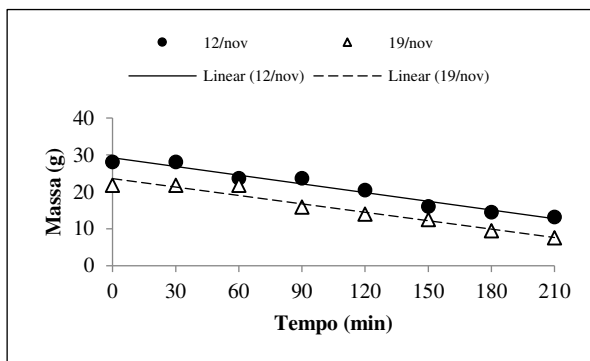
O comportamento dos parâmetros de exaustão, nos instantes que antecedem o estado de estabilidade alcançada pelo evaporador, é configurado pela elevação da temperatura promovida pelo funcionamento da lâmpada até um valor de máximo que caracteriza o acionamento do sistema de arrefecimento. Naturalmente, o aumento da temperatura provoca a diminuição na umidade relativa do ar, uma vez que essas grandezas têm correlações entre si, como mostradas nas Equações 4 e 5. Nos ensaios com as placas P001 a P006, o arrefecimento foi ativado aos 15 min e, portanto, os picos mínimos e máximos das umidades relativas e das temperaturas do ar de exaustão foram evidenciados, respectivamente, nesse instante. Excepcionalmente para o sistema coletor P007, o arrefecimento foi acionado aos 20 min, deslocando para este tempo os picos já comentados. Como efeito da ativação tardia das ventoinhas, a temperatura máxima de exaustão atingiu 74,7 °C, no entanto o arrefecimento do sistema se mostrou eficaz trazendo essa temperatura para patamares de 54,0 °C e desvio de 0,4 °C, comuns às médias alcançadas nos outros experimentos, como detalhado na Tabela 4.12.

4.3 Experimentos Solares

4.3.1 Evaporação

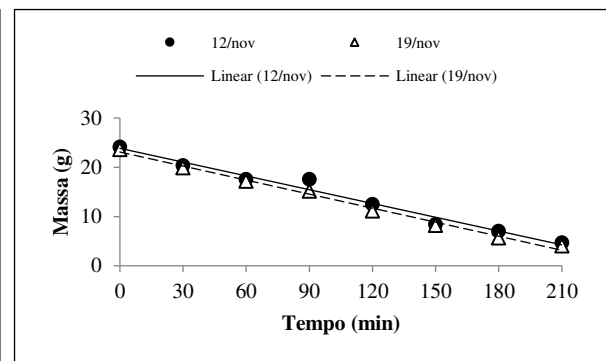
Os gráficos mostrados nas Figuras 4.85 a 4.91 referem-se às cinéticas de evaporação (obtidas pela metodologia descrita na seção 3.6.1) fomentadas pelas placas absorvedoras de radiação P001 a P007 em ambiente com exposição à irradiação real. Os ensaios foram realizados nos dias 12 e 19 de novembro de 2018. A linearidade para os sistemas coletores no experimento do dia 12 alcançou coeficiente de determinação $R^2 \geq 0,9642$, enquanto que a investigação do dia 19 obteve linearidade ajustada com $R^2 \geq 0,9152$, ambos entre 0 min e 210 min de exposição ao sol. Estabelecidas as inclinações de cada reta e procedendo-se como outrora comentado nos experimentos fotoassistidos, as taxas de evaporação foram calculadas e mostradas na Figura 4.92 na Tabela 4.13.

Figura 4.85 – Cinéticas de evaporação (P001).



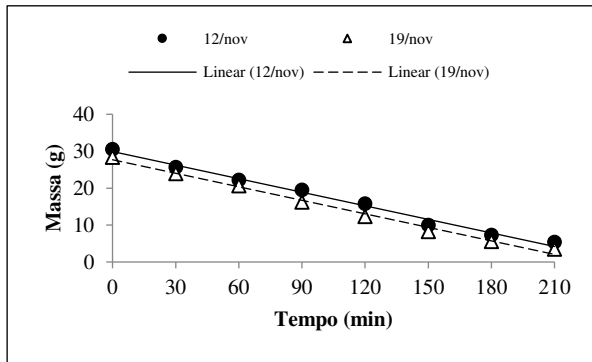
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.86 – Cinéticas de evaporação (P002).



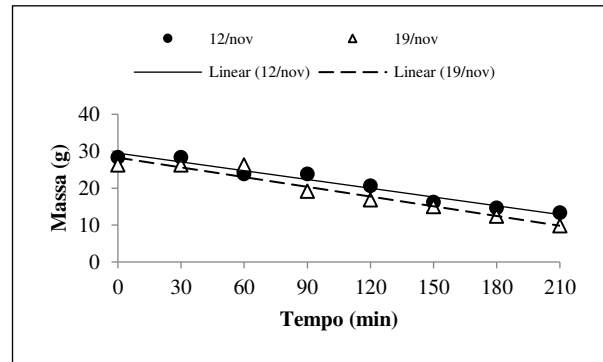
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.87 – Cinéticas de evaporação (P003).



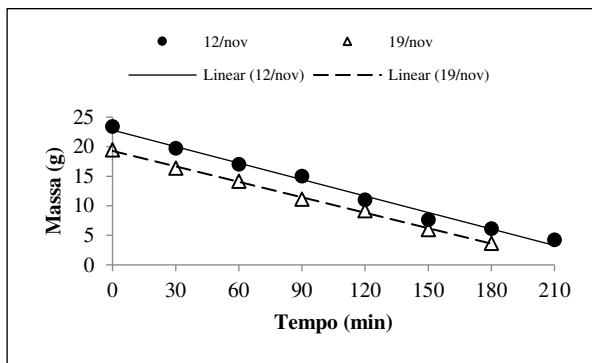
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.88 – Cinéticas de evaporação (P004).



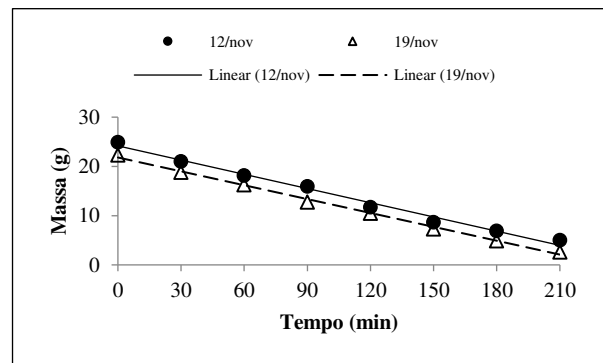
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.89 – Cinéticas de evaporação (P005).



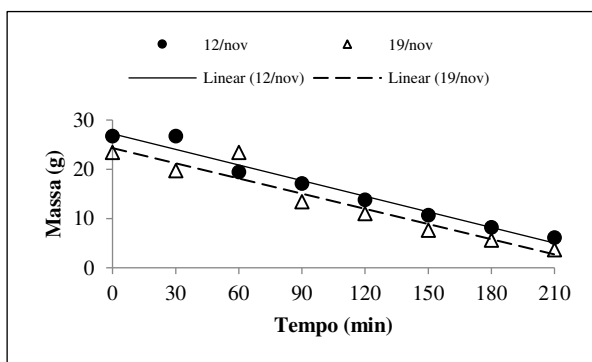
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.90 – Cinéticas de evaporação (P006).



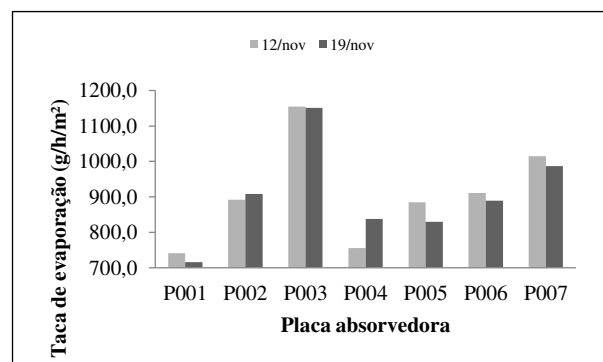
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.91 – Cinéticas de evaporação (P007).



Fonte: Autor (2019).

Figura 4.92 – Taxas de evaporação.



Fonte: Autor (2019).

Tabela 4.13 – Taxa de evaporação fomentada pelas placas P001 a P007 em ambiente de exposição solar real nos dias 12 e 19 de novembro de 2018.

Placa	Material absorvedor	Área (cm ²)	Tx. Evap. 12/nov (g/h/m ²)	Tx. Evap. 19/nov (g/h/m ²)
P001	Vidro transparente	63,62	740,91	716,13
P002	Tinta preta (pintura interna)	62,77	892,03	907,89
P003	Tinta preta (pintura externa)	63,62	1.154,44	1.150,84
P004	Resina Epóxi (transparente)	62,91	755,30	837,36
P005	Cinza Residual	63,05	884,28	829,47
P006	Quitosana/Grafite	63,33	911,25	889,58
P007	Mineral Monazita/Alanita	62,49	1.014,34	986,92

Fonte: Autor (2019).

Como mostrado na Tabela 4.13, as melhores taxas de evaporação foram promovidas pelas placas absorvedoras P003 e P007 nos dois experimentos solares, do dia 12 e 19 de novembro. A pior desenvoltura foi, naturalmente, promovida pela bacia transparente de referência P001. Comparando as taxas de evaporação alcançadas pelos sistemas absorvedores de maior desempenho com a bacia P001, a placa P003 promoveu incrementos na produtividade de 55,8% e 60,7%, ao passo que a placa P007 fomentou ganhos de 36,9% e 37,8%, em relação aos dias 12 e 19 de novembro.

Em comparação aos 597,2 g/h/m² alcançados pelo sistema contínuo de dessalinização proposto por Aybar (2006) sob a irradiação ótima de 700 W/m², as taxas de evaporação fomentadas pelas placas coletoras demonstradas na Tabela 4.13, apresentaram valores competitivos. Não obstante, é compreensível caso as velocidades alcançadas nos cenários investigados sejam reduzidas na conjuntura de funcionamento de um destilador solar real, computando, por exemplo, as perdas de energias decorrentes da reflexão ($Q_{refl.}$) e da absorção ($Q_{absor.}$), existente na cobertura de vidro do destilador (Figura 2.9). No entanto, fica passível de investigações futuras, se tais perdas serão compensadas pelo uso de isolamento térmico, inexistente nos experimentos conduzidos nesta pesquisa, causando produtividades ainda maiores que as apresentadas e discutidas nessa seção.

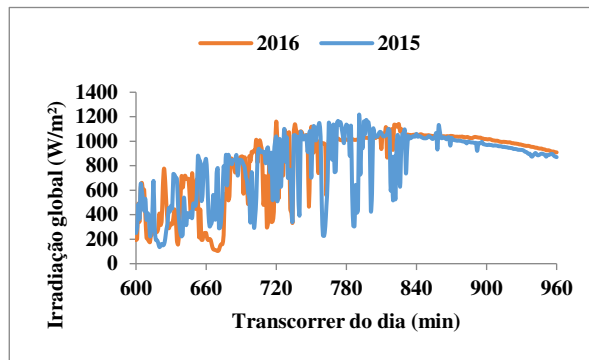
Analisando, ainda, as taxas de evaporação da Tabela 4.13, percebe-se que as condições climáticas do dia 19 de novembro foram mais adequadas para as placas P002 e P004, enquanto que as demais alcançaram maiores velocidades de evaporação para as condições climáticas do dia 12 de novembro. No entanto, vale salientar que comparações quantitativas entre resultados de exposição solar em dias diferentes, não são razoáveis diante da grande variabilidade dos parâmetros experimentais inerentes ao ambiente real.

Em comparação com as taxas alcançadas em ambiente fotoassistido, os experimentos em ambiente com irradiação real promoveram maiores velocidades de evaporação, exceto para os sistemas P005 e P001. Este último com relação ao dia 19 de novembro. Nesse contexto, a placa P003 aumentou sua velocidade em até 262,25 g/h/m² ao passo que a placa P005 reduziu em até 90,34 g/h/m² a taxa de evaporação. Do ponto de vista qualitativo, enquanto os sistemas absorvedores P007 e P003 ocupavam, respectivamente, a 2^a e a 3^a colocações no ambiente controlado, as mesmas placas passaram a ocupar a 2^a e a 1^a colocações, respectivamente, em velocidade de evaporação no ambiente de irradiação real.

Analisando as taxas de evaporação promovidas por cada sistema absorvedor nos dois cenários experimentais investigados, pode parecer que o aparato fotoassistido ou a metodologia para aquisição de dados são satisfatórios. No entanto, considerando que cada material fotoativo que compõe as placas absorvedoras, é ativado numa faixa espectral distinta, é compreensível que os materiais tenham comportamentos distintos sob diferentes radiações. Sabe-se que o espectro solar é sazonal, havendo dias com maior proporção de incidência de radiação ultravioleta, por exemplo. Hipoteticamente, este pode ter sido um dos fatores que influenciou os resultados dos dias 12 e 19 de novembro.

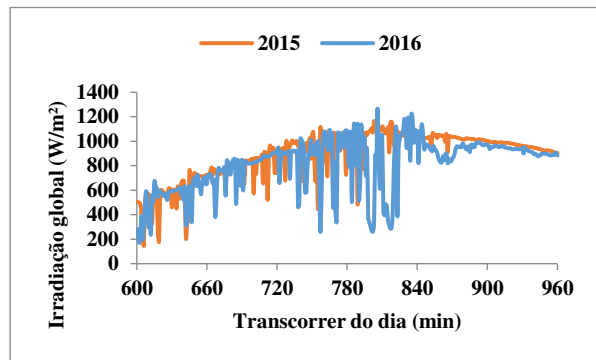
O comportamento linear característico das cinéticas de evaporação foi amplamente discutido para os ensaios em ambiente fotoassistido, no entanto os bons ajustes alcançados no ambiente real propõem que o processo também ocorre próximo do regime estacionário, mesmo diante das incontestes variações na taxa de irradiação solar global, entre às 10h30min (0 min, experimental) e 14h00min (210 min, experimental), e dos demais parâmetros experimentais, intrínsecos ao ambiente não controlado. Apenas para exemplificar as mudanças na radiação incidente no transcorrer do dia, são mostrados nos gráficos das Figuras 4.93 e 4.94 o comportamento deste parâmetro na cidade de Natal – RN, entre 600 min (10h30min) e 960 min (14h00min), dos dias 12 e 19 de novembro dos anos 2015 e 2016.

Figura 4.93 – Irradiação entre 10h30min e 14h00min em 12 de novembro, para os anos de 2015 e 2016.



Fonte: Adaptação (INPE, 2019b, 2019d).

Figura 4.94 – Irradiação entre 10h30min e 14h00min em 19 de novembro, para os anos de 2015 e 2016.



Fonte: Adaptação (INPE, 2019b, 2019d).

Considerando a hipótese de evaporação em regime estacionário no intervalo experimental de 3,5 h, a placa P003 sugere acumulado de aproximadamente 4,0 kg/m², seguido pelo acumulado da placa P007, de 3,5 kg/m² para o dia 12 e 3,4 kg/m² para o dia 19. Notadamente, entre os materiais absorvedores de radiação investigados, as piores produções foram promovidas pela placa transparente (P001), calculadas em torno de 2,6 kg/m² e 2,5 kg/m², para os dias 12 e 19 de novembro, respectivamente. Não obstante, a produtividade em apenas 3,5 h de exposição solar é boa comparada àquelas obtidas por Silva et al. (2014), com produção máxima de 3,7 kg/m²/dia na cidade de Natal/RN, Saettone e Valencia (2016) com 0,990 kg/m²/dia para o destilador de calha parabólica, 0,855 kg/m²/dia para o destilador de Fresnel e 5,910 kg/m²/dia para o destilador de bacia escalonada, todos nas adjacências de Lima, Peru. Os sistemas coletores pesquisados também apresentaram resultados satisfatórios frente aos apresentados por Saettone et al. (2017), com acumulado, em dias ensolarados, de 5,690 kg/m²/dia e 3,648 kg/m²/dia em dias nublados.

Analisando o desempenho das placas P003 e P007 nos cenários de evaporação fotoassistida e solar, constata-se que os materiais apresentaram qualidades interessantes para a composição das placas coletoras de radiação dos destiladores solares, objetivo desta pesquisa. Mesmo com a redução média de 22,6% entre as velocidades de evaporação solar e fotoassistida, a placa fabricada com tinta comercial preta com aplicação externa (P003), apresentou as vantagens de aliar boa produtividade e inercia química, uma vez que a salmoura não fica em contato direto com o pigmento preto, mas sim com o vidro da bacia, que é reconhecidamente inerte. A vantagem da monazita/alanita (P007) é que o mineral é encontrado naturalmente em jazidas brasileiras, e foram empregadas sem processamentos químicos. Lembrando que os dois materiais foram, outrora, categorizados como alternativos. Não obstante, vale ressaltar que para

o emprego da monazita/alanita na composição de placas absorvedoras requer um substituto inerte para a resina epóxi, sendo o assunto motivo de estudos futuros.

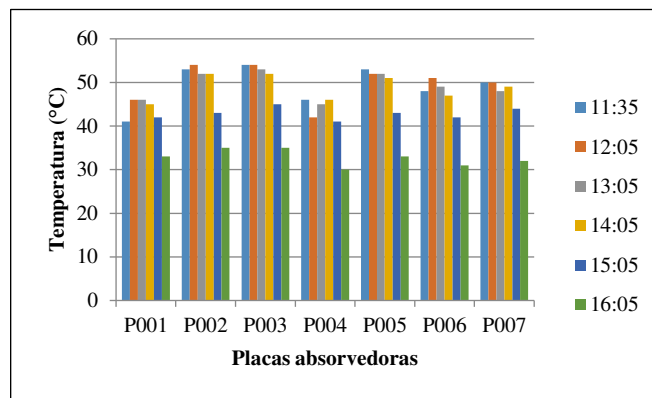
O comportamento linear das cinéticas de evaporação das Figuras 4.85 a 4.91 pressupõe o já comentado efeito indiferente ou compensatório da elevação da salinidade e da diminuição da altura do filme de solução salina sobre a taxa de evaporação, corroborando para inferir a já comentada operação em batelada de destiladores solares sem prejuízos sobre sua produtividade.

4.3.2 Aquecimento Superficial

Os gráficos mostrados nas Figuras 4.95 e 4.96 detalham as temperaturas superficiais obtidas pelas placas absorvedoras de radiação (P001 a P007), sem a presença de solução salina.

A Figura 4.95 mostra o ensaio realizado no dia 08 de agosto de 2018. Às 11h35min, com apenas 30 min de exposição à radiação solar, apenas as placas pintadas de preto (P002 e P003), com cinza residual (P005) e com quitosana/grafite (P007), haviam atingido ou superado 50 °C. Durante as 5 h de exposição solar, em nenhum momento as placas sem pigmentação (P001) e com resina epóxi (P004) superaram os 46 °C, mesmo nos horários com maior taxa de irradiação (G). Os resultados são razoáveis mediante a absorvidade (α) das duas superfícies transparentes serem qualitativamente mais baixa em comparação a dos demais materiais absorvedores testados. Não obstante as máximas temperaturas alcançadas são resultados do efeito sinérgico das elevadas temperaturas da vizinhança com as propriedades radiantes intrínsecas dessas superfícies. A Figura 4.95 também apresenta as placas P003, P002 e P005, como aquelas que mantiveram suas temperaturas acima de 50 °C por mais tempo, de 11h35min até às 14h05min (150 min). A ordem das placas citadas anteriormente também revela as características térmicas do maior para o menor interesse entre as três.

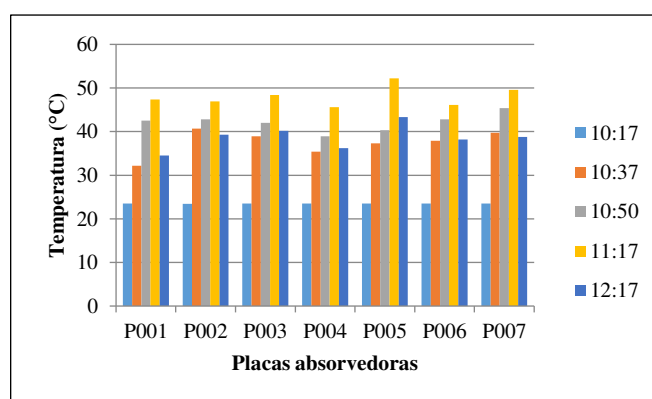
Figura 4.95 – Temperatura superficial das placas coletoras na ausencia de salmoura. Experimento realizado em 08 de agosto de 2018.



Fonte: Autor (2019).

A Figura 4.96 apresenta as temperaturas superficiais das placas coletoras de radiação, na ausência de salmoura, obtidas no experimento realizado no dia 28 de agosto de 2018. As placas foram expostas à radiação solar às 10h17min, todas registrando 24 °C no instante imediatamente anterior à exposição. O experimento durou exatamente 2 h. Com 1 h irradiação, apenas a placa com cinza residual (P005) superou a temperatura de 50 °C. Das 10h50min às 12h17min (87 min) as placas P005 e P003 alcançaram temperaturas iguais ou superiores a 40 °C, com picos de 52 °C e 48 °C às 11h17min para as respectivas placas. Vale comentar que às 12h17min, o céu estava nublado. A placa P002 superou a marca dos 40 °C durante maior tempo, a saber, 100 min (das 10h37min às 12h17min) com pico de 47 °C, também, às 11h17min.

Figura 4.96 – Temperatura superficial das placas coletoras na ausencia de salmoura. Experimento realizado em 28 de agosto de 2018.

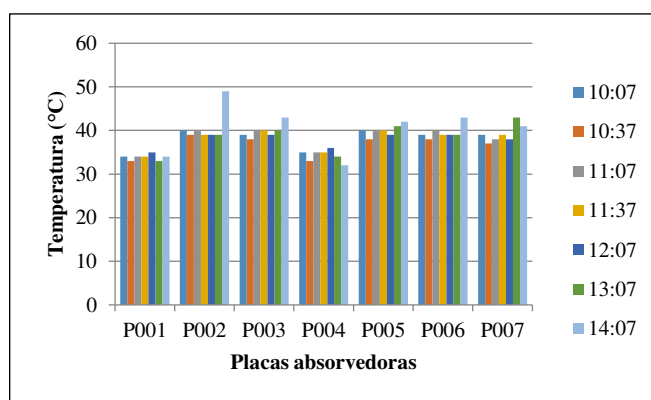


Fonte: Autor (2019).

Os comportamentos dissertados nos dois parágrafos anteriores apontam para propriedades de certos materiais que o destacam de outros, como foram os casos das placas pintadas com tinta preta fosca (P002 e P003) e a placa constituída com cinza residual da indústria sucroalcooleira (P005).

Os gráficos mostrados nas Figuras 4.97 e 4.98 apresentam as temperaturas superficiais das placas absorvedoras de radiação na presença de salmoura, valendo lembrar que em ambos os ensaios foram empregados 25,0 mL de solução salina com 30%. A Figura 4.97 retrata o experimento do dia 13 de agosto de 2018, com exposição solar de 5 h, iniciada às 9h37min e concluída às 14h37min. É nítida que em todas as placas contendo material absorvedor não transparente a temperatura da superfície rondou os 40 °C, com as placas superando esse patamar no registro das 14h04min, quando toda a salmoura já havia evaporado.

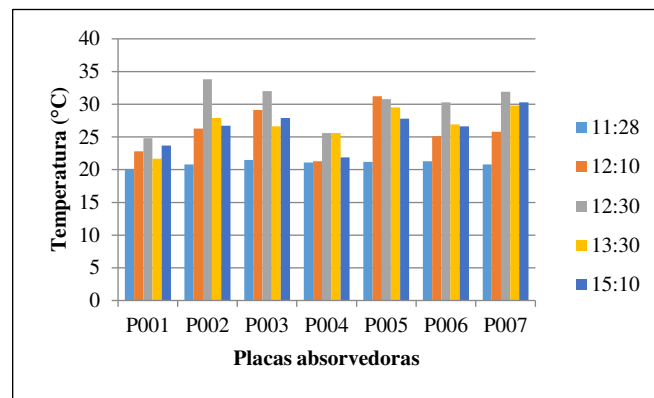
Figura 4.97 – Temperatura superficial das placas coletoras na presença de salmoura. Experimento realizado em 13 de agosto de 2018.



Fonte: Autor (2019).

A Figura 4.98 mostra o mesmo experimento com salmoura, mas sendo conduzido em 29 de agosto de 2018, com exposição inicial às 11h28min e término às 15h10min (222 min). Neste dia, as placas com pigmentação se igualaram ou superaram apenas os 30 °C, com a maioria dos picos de temperatura alcançados às 12h30min, exceto para a cinza residual (P005) que alcançou 31 °C às 12h10min.

Figura 4.98 – Temperatura superficial das placas coletoras na presença de salmoura. Experimento realizado em 29 de agosto de 2018.



Fonte: Autor (2019).

Os dados de aquecimento superficial fomentarão informações imprescindíveis para o correto dimensionamento do isolamento térmico dos futuros destiladores solares, mediante a escolha de materiais com baixo coeficiente de condutividade térmica e cálculos de fluxos térmicos. A temperatura superficial também é parâmetro importante para a escolha de materiais com baixo coeficiente de dilatação térmica, evitando problemas de vazamentos ocasionados pelo aparecimento de trincas na estrutura do destilador.

CAPÍTULO 5

Conclusão

5 Conclusão

Os ensaios fotoassistidos com ferritas de cobalto nanoestruturadas, promoveram ganhos na produtividade de até 14,8% em relação ao sistema de referência, fomentando taxas máximas de evaporação de 998,46 g/h/m² com a amostra 2, de menor tamanho (22 nm). Os ensaios apresentaram boa reprodutibilidade, acima de 99,0%, sugerindo que tanto o evaporador fotoassistido quanto a metodologia para a aquisição de dados cinéticos geraram resultados estatisticamente confiáveis. Também ficou evidenciado que o aumento do tamanho do cristalito tem efeito negativo sobre a taxa de evaporação, de modo maiores dimensões proporcionam menores desempenhos.

Os materiais absorvedores de radiação cinza residual (P005), monazita/alanita (P007) e tinta comercial preta com pintura externa (P003), proporcionaram taxas de evaporação de 919,86 g/h/m², 986,82 g/h/m² e 892,19 g/h/m², respectivamente, representando incrementos na produtividade, nessa ordem, de 26,1%, 23,0% e 22,3% com relação ao sistema com resina epóxi transparente (P002).

No ambiente com irradiação solar real, as melhores taxas de evaporação foram alcançadas pela tinta comercial preta com pintura externa (P003) e monazita/alanita (P007), produzindo, nessa ordem, 1154,44 g/h/m² e 1014,34 g/h/m² e correspondendo a aumentos na produtividade de 60,7% e 36,9%, respectivamente, com relação à placa transparente de referência (P001). Constatada a boa linearidade da cinética de evaporação, os respectivos materiais absorvedores de radiação sugeriram bons acumulados de aproximadamente 4,0 kg e 3,5 kg de destilado em apenas 3,5 h de exposição solar.

A comentada linearidade da cinética de evaporação propõe que a operação semibatelada de destiladores solares não interferem na produtividade do equipamento, trazendo economia e facilitação para a condução do processo, uma vez dispensados componentes de alimentação e controle de nível da salmoura, por exemplo. Também ficou evidenciado que as alterações conjuntas de salinidade e nível da salmoura não têm efeito, nos limites investigados, sobre a cinética de evaporação,

Em linhas gerais, percebe-se que a otimização dos destiladores solares passa, inevitavelmente, por três aspectos extremamente importantes: custo, desempenho e segurança. Nesta visão, os objetivos deste trabalho foram alcançados: produzir conhecimento científico para fomentar a popularização de destiladores solares em todo o semiárido brasileiro, como alternativa tecnológica e social no combate à seca.

Referências Bibliográficas

REFERÊNCIAS

AYBAR, H. S. **Mathematical modeling of an inclined solar water distillation system.** Desalination (2006), DOI:10.1016/j.desal.2005.07.015.

ASTM. American Society for Testing and Materials. **Standard Practice for the Preparation of Substitute Ocean Water.** Disponível em: <http://img.21food.cn/img/biaozhun/20090815/187/11183599.pdf>. Acesso em: 11 jan. 2019.

BATAINEH, K. M. **Multi-effect desalination plant combined with thermal compressor driven by steam generated by solar energy.** Desalination (2016). DOI: 10.1016/j.desal.2016.02.011.

BEZERRA, A. M. **Aplicação Térmica de Energia Solar.** UFPB, João Pessoa, 2001.

BEZERRA, M. A. S. **Desenvolvimento de um destilador solar para tratamento de águas de produção de petróleo com vistas a sua utilização na agricultura e geração de vapor.** 2004. Dissertação (Mestrado em engenharia química) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2004.

BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S.; INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa.** 7 ed. LTC, Rio de Janeiro, 2014.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Fenômenos de Transporte.** 2 ed. LTC, Rio de Janeiro, 2004.

BANCO DO BRASIL. **Dessalinizadores Solar: vencedor 2017.** Disponível em: <http://tecnologiasocial.fbb.org.br/tecnologiasocial/banco-de-tecnologias-sociais/pesquisar-tecnologias/dessalinizadores-solar.htm>. Acesso em: 07 fev. 2019.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. [Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências]. **Diário Oficial da União:** nº 053; p. 58-63, 18 mar. 2005.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017. [Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde]. Disponível em: <http://portalarquivos2.saude.gov.br/images/pdf/2018/marco/29/PRC-5-Portaria-de-Consolida---o-n---5--de-28-de-setembro-de-2017.pdf>. Acesso em: 08 fev. 2019.

BRASIL. Ministério da Saúde. Resolução RDC nº 56, de 16 de novembro de 2012. [Dispõe sobre a lista positiva de monômeros, outras substâncias iniciadoras e polímeros autorizados para a elaboração de embalagens e equipamentos plásticos em contato com alimentos]. **Diário Oficial da União:** nº 224, 21 nov. 2012.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. **Resenha Energética Brasileira: Exercício de 2016.** Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/91108236/1+->

+Resenha+Energ%C3%A9tica+Brasileira/5b74d286-29bb-4c7f-b72a-17c4786983da?version=1.0. Acesso em 24 nov. 2017.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Semiárido Brasileiro**. Disponível em: <http://www.integracao.gov.br/semiarido-brasileiro>. Acesso em: 27 dez. 2018a.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Programa Água Doce. **Sistemas de Dessalinização nos Estados**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/agua/agua-doce>. Acesso em: 21 nov. 2018b.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. **Resenha Energética Brasileira 2018: Ano Base 2017**. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/02+-+Resenha+Energ%C3%A9tica+Brasileira+2018+-+ano+ref.+2017+%28PDF%29/6f00cc7c-be9a-4257-ab5d-8ab1935611aa;jsessionid=DE9158023A984B962AECA56C0CB6595C.srv155>. Acesso em: 22 nov. 2018c.

BRASIL. Ministérios da Integração Nacional. **Nova Delimitação Semiárido**. Disponível em: http://sudene.gov.br/images/arquivos/semiarido/arquivos/Rela%C3%A7%C3%A3o_de_Municipios_Semi%C3%A1rido.pdf. Acesso em: 27 dez. 2018d.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Delimitação do Semiárido**. Disponível em: <http://sudene.gov.br/planejamento-regional/delimitacao-do-semiarido>. Acesso em: 27 de dez. 2018e.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Delimitação do Semiárido**. Disponível em: <http://sudene.gov.br/images/arquivos/semiarido/arquivos/mapa-semiarido-1262municipios-Sudene.pdf>. Acesso em: 27 dez. 2018f.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Delimitação do Semiárido: Rio Grande do Norte**. Disponível em: <http://sudene.gov.br/images/arquivos/semiarido/arquivos/riograndedonorte-delimitacaosemiarido-dezembro2017.jpeg>. Acesso em: 27 dez. 2018g.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Programa Água Doce. **Sistemas de Dessalinização nos Estados**. Disponível em: <https://aguadoce.mma.gov.br/#>. Acesso em: 21 nov. 2018h.

CHEN, W.; ZOU, C.; LI, X.; LIANG, H. **Application of recoverable carbon nanotube nanofluids in solar desalination system: An experimental investigation**. Desalination (2017). DOI: 10.1016/j.desal.2017.09.025.

DEAN, J. A. **Lange's Handbook of Chemistry**. 15 ed. McGraw-Hill, New York, 1998.

DELYANNIS, E. **Historic background of desalination and renewable energies**. Solar Energy (2003). DOI:10.1016/j.solener.2003.08.002.

DIY the technology. **Potenciômetro para cooler do PC**. Disponível em: <http://diythetechnology.blogspot.com/2011/08/potenciometro-para-cooler-do-pc.html>. Acesso em 14 jan. 2019.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A.; **Solar Engineering of Thermal Processes**. 4 ed. Wiley, Hoboken, 2013.

FELDER, R. M.; ROUSSEAU, R. W. **Princípios Elementares dos Processos Químicos**. 3 ed. LTC, Rio de Janeiro, 2014.

FOUST, S. A.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSON, L. B. **Princípios das Operações Unitárias**. 2 ed. LTC, Rio de Janeiro, 2013.

FU, Y.; MEI, T.; WANG, G.; GUO, A.; DAI, G.; WANG, S.; WANG, J.; LI, J.; WANG, X. **Investigation on enhancing effects of Au nanoparticles on solar steam generation in graphene oxide nanofluids**. Applied Thermal Engineering (2017). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.12.054.

GAUTO, M. A.; ROSA, G. R. **Processos e Operações Unitárias da Indústria Química**. Ciência Moderna, Rio de Janeiro, 2011.

GLEICK, P. H. Water resources. In: S. H. Schneider (ed.). **Encyclopedia of Climate and Weather**. New York: Oxford University Press, 1996. v. 2, p. 817-823.

GLEICK, P. H. (coord.) *et al.* **The World's Water: The Biennial Report on Freshwater Resources**. Island Press, Washington, 2014. v. 8.

GLEICK, P. H. (coord.) *et al.* **The World's Water: The Biennial Report on Freshwater Resources**. Island Press, Washington, 2018. v. 9.

GHAFFOUR, N.; MISSIMER, T. M.; AMY, G. L. **Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability**. Desalination (2013), DOI: 10.1016/j.desal.2012.10.015.

GOMES, M. F.; GOMES, Y. F.; LOPES-MORIYAMA, A.; BARROS-NETO, E. L.; SOUZA, C. P. **Design of carbon quantum dots via hydrothermal carbonization synthesis from renewable precursors**. Biomass Conversion and Biorefinery (2019), DOI: 10.1007/s13399-019-00387-4.

GOMIDE, R. **Operações Unitárias: operações com sistemas sólidos granulados**. Edição do Autor, São Paulo, 1983. v. 1.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Semiárido Brasileiro**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias-novoportal/cartas-e-mapas/mapas-regionais/15974-semiarido-brasileiro.html>. Acesso em: 06 out. 2017.

INPE. INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais – Estação de Natal: Novembro 2015. **NAT1508ED.csv**. Natal, 05 fev. 2019. Disponível em: <http://sonda.ccst.inpe.br/basedados/natal.html>. Acesso em: 05 fev. 2019a.

INPE. INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais – Estação de Natal: Novembro 2015. **NAT1511ED.csv**. Natal, 05 fev. 2019. Disponível em: <http://sonda.ccst.inpe.br/basedados/natal.html>. Acesso em: 05 fev. 2019b.

INPE. INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais – Estação de Natal: Novembro 2015. **NAT1608ED.csv**. Natal, 05 fev. 2019. Disponível em: <http://sonda.ccst.inpe.br/basedados/natal.html>. Acesso em: 05 fev. 2019c.

INPE. INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais – Estação de Natal: Novembro 2015. **NAT1611ED.csv**. Natal, 05 fev. 2019. Disponível em: <http://sonda.ccst.inpe.br/basedados/natal.html>. Acesso em: 05 fev. 2019d.

INPE. INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais – Estação de Natal: Novembro 2015. **NAT1708ED.csv**. Natal, 05 fev. 2019. Disponível em: <http://sonda.ccst.inpe.br/basedados/natal.html>. Acesso em: 05 fev. 2019e.

JACK, R.S., AYOKO, G.A., ADEBAJO, M.O. FROST, R. L. **A review of iron species for visible-light photocatalytic water purification**. Environ Sci Pollut Res (2015). DOI: 10.1007/s11356-015-4346-5.

JANG, S. P.; CHOI, S. U. S. **Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids**. American Institute of Physics (2004), DOI: 10.1063/1.1756684.

KABEEL, A. E.; OMARA, Z. M.; ESSA, F.A. **Enhancement of modified solar still integrated with external condenser using nanofluids: An experimental approach**. Energy Conversion and Management Journal (2014), DOI: 10.1016/j.enconman.2013.11.013.

LOPEZ, R. A. **Energia Solar para a Produção de Eletricidade**. Artliber, São Paulo, 2012.

MANDAL, J.; WANG, D.; OVERVIG, A. C.; SHI, N. N.; PALEY, D.; ZANGIABADI, A.; CHENG, Q.; BARMAK, K.; YU, N.; YANG, Y. **Scalable, “Dip-and-Dry” Fabrication of a Wide-Angle Plasmonic Selective Absorber for High-Efficiency Solar–Thermal Energy Conversion**. Advanced Materials (2017), DOI: 10.1002/adma.201702156.

MEDEIROS, I. A. F.; LOPES-MORIYAMA, A. L.; SOUZA, C. P. **Effect of synthesis parameters on the size of cobalt ferrite crystallite**. Ceramics International (2017), DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.10.105.

MIHELIC, J. R.; ZIMMERMAN, J. B. **Engenharia Ambiental: Fundamentos, Sustentabilidade e Projeto**. LTC, Rio de Janeiro, 2012.

MMA. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Resumo Executivo: Planos Estaduais do Programa Água Doce (2010 – 2019)**. [Brasília: MMA], 2010. Disponível em: http://www.mma.gov.br/images/arquivos/agua/agua_doce/2018/resumo_executivo_PAD-1.pdf. Acesso em: 30 dez. 2018.

MOLINA-REYES, J. ROMERO-MORAN, A. URIBE-VARGAS, H. LOPEZ-RUIZ, B. SANCHEZ-SALAS, J. L. ORTEGA, E. MORALES-SANCHEZ, A. LOPEZ-HUERTA, F. ZUNIGA-ISLAS, C. **Study on the photocatalytic activity of titanium dioxide nanostructures: Nanoparticles, nanotubes and ultra-thin films**. Catalysis Today (2018), DOI: 10.1016/j.cattod.2018.05.033.

NASA. NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **The water cycle**. Disponível em: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Water>. Acesso em: 20 dez. 2018.

OMARA, Z. M.; KABEEL, A. E.; ESSA, F. A. **Effect of using nanofluids and providing vacuum on the yield of corrugated wick solar still**. *Energy Conversion and Management Journal* (2015), DOI: 10.1016/j.enconman.2015.07.035.

ONU. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Goal 6: Ensure access to water and sanitation for all**. Disponível em: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/water-and-sanitation/>. Acesso em: 21 nov. 2018.

OSRAM. **More than just light: solutions in ultraviolet light**. Disponível em: <https://docs-emea.rs-online.com/webdocs/1506/0900766b81506d14.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2018.

PEREIRA, E. B. (coord.); MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 1. ed. INPE, São José dos Campos, 2006.

PEREIRA, E. B. (coord.); MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. INPE, São José dos Campos, 2017.

RAMALHO, T. E. B.; VITAL, A. B.; MORIYAMA, A. L. L.; SOUZA, C. P. **Caracterização do mineral Monazita/Alanita proveniente do Estado de Goiás**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 21., 2016, Fortaleza. *Anais do XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química*.

RIO GRANDE DO NORTE. Governo do Estado do RN. **Dados gerais do RN**. Disponível em: <http://www.rn.gov.br/Conteudo.asp?TRAN=ITEM&TARG=12083&ACT=&PAGE=0&PARM=&LBL=Conhe%EA+o+RN>. Acesso em: 27 dez. 2018.

SAETSTONE, E; VALENCIA, Y. **Comparison between Solar Distillers with and without Solar Concentrator**. *Applied Solar Energy* (2016), DOI: 10.3103/S0003701X16020201.

SAETSTONE, E; VALENCIA-TOVAR, Y; GÓMEZ-de-la-TORRE-GASTELLO, A. **Preliminary overview and evaluation of a stepped solar distiller with internal reflective walls and borosilicate vacuum tubes**. *Desalination* (2017), DOI: 10.1016/j.desal.2017.03.020.

SHARSHIR, S. W.; PENG, G.; WU, L.; ESSA, F. A.; KABEEL, A. E.; YANG, N. **The effects of flake graphite nanoparticles, phase change material, and film cooling on the solar still performance**. *Applied Energy* (2017), DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.01.067.

SHIKLOMANOV, I. A (dir.). **World Water Resources: a new appraisal and assessment for the 21st century**. UNESCO, Paris, 1998.

SILVA, M. C. C.; SENS, M. L.; SOARES, C.; ANDRADE-NETO, C. O. **Water purifications by direct solar distillation process is isoleted households**. *Acta Scientiarum* (2014), DOI: 10.4025/actascitechnol.v36i1.18737.

SKOOG, D. A.; WEST, D. M.; HOLLER, F. J.; CHOUCHE, S. R. **Fundamentos de Química Analítica**. 8 ed. Cengage Learning, São Paulo, 2005.

SOUSA, M. A. S. B. **Estudo da viabilidade da destilação solar para polimento de águas produzidas de petróleo.** 2010. Tese (Doutorado em engenharia química) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

TAWFIK, M.; TONNELIER, X.; SANSOM, C. **Light source selection for a solar simulator for thermal applications: A review.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2018), DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.059.

TIPLER, P. A. **Física.** Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1978. v. 2.

TRUONG, Q. D. LIU, J. CHUNG, C. LING, Y. Photocatalytic reduction of CO₂ on FeTiO₃/TiO₂ photocatalyst. *Catalysis Communications* (2012). DOI: 10.1016/j.catcom.2011.12.025.

TWW. THE WORLD'S WATER. **Water conflict.** Disponível em: <http://www.worldwater.org/water-conflict/>. Acesso em: 20 dez. 2018a.

TWW. THE WORLD'S WATER. **Water conflict chronology.** Disponível em: <http://www.worldwater.org/conflict/map/>. Acesso: 20 dez. 2018b.

TUNDISI, J. G. **Água no Século XXI: Enfrentando a Escassez.** RiMa, São Carlos, 2009.

WANG, L. K.; CHEN, J. P.; HUNG, Y; SHAMMAS, N. K. **Membrane and Desalination Technologies.** Humana Press, New York, 2011.

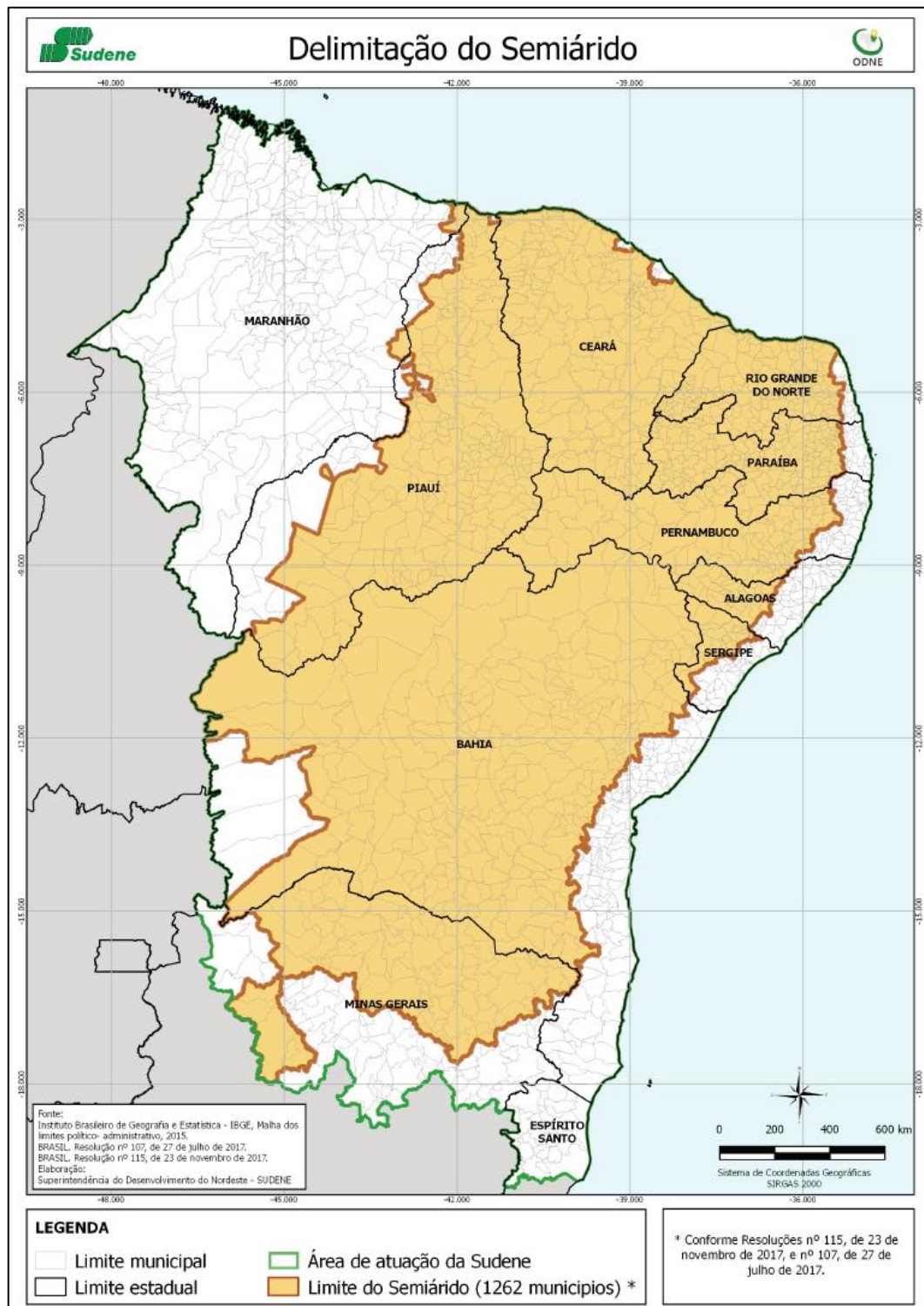
WANG, X.; HE, Y.; CHENG, G.; SHI, L.; LIU, X.; ZHU, J. **Direct vapor generation through localized solar heating via carbonnanotube nanofluid.** *Energy Conversion and Management* (2016). DOI: 10.1016/j.enconman.2016.10.049.

ZAMEN, M.; SOUFARI, S. M.; VAHDAT, S. A.; AMIDPOUR, M.; ZEINALI, M. A.; IZANLOO, H.; AGHABABAIE, H. **Experimental investigation of a two-stage solar humidification–dehumidification desalination process.** *Desalination* (2014), DOI:10.1016/j.desal.2013.10.018.

Anexos e Apêndices

ANEXO I – Delimitação do Semiárido

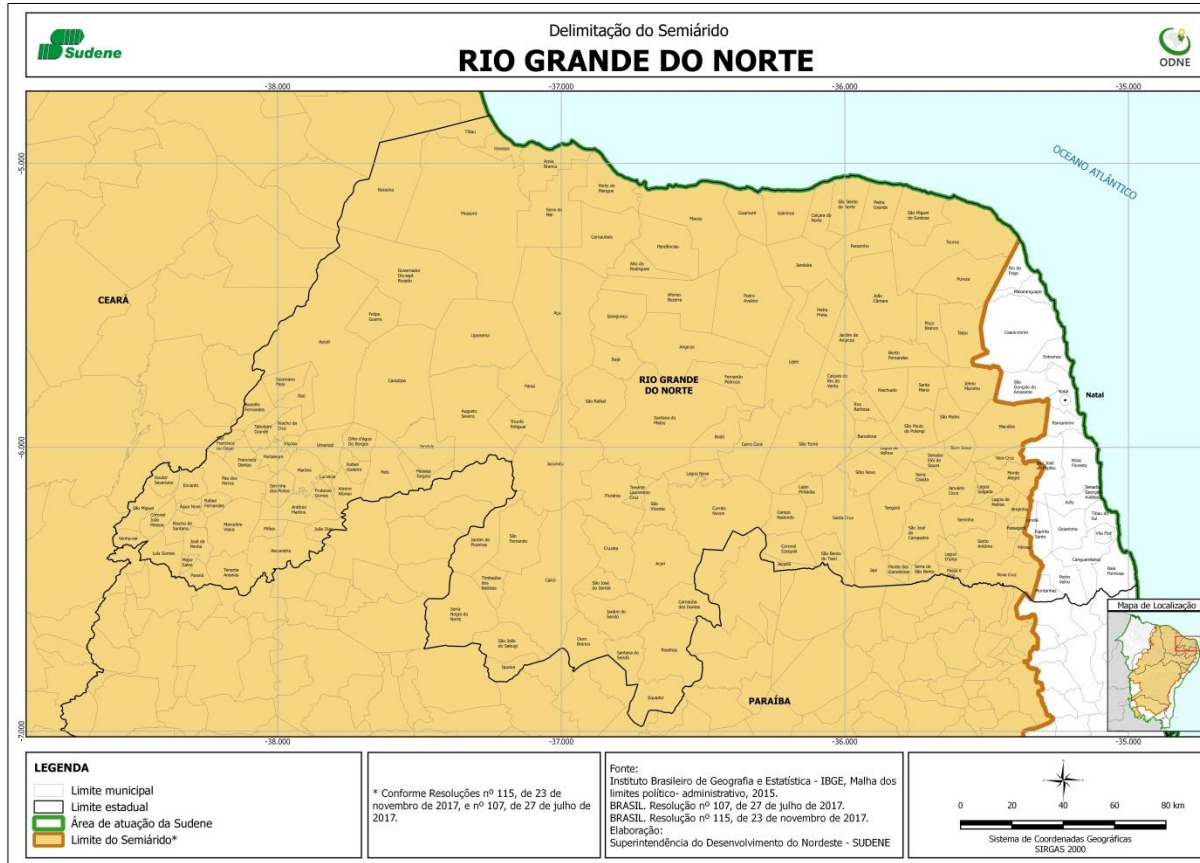
Figura A.99 – Delimitação do semiárido brasileiro.



Fonte: Brasil (2018f).

ANEXO II – Delimitação do Semiárido Potiguar

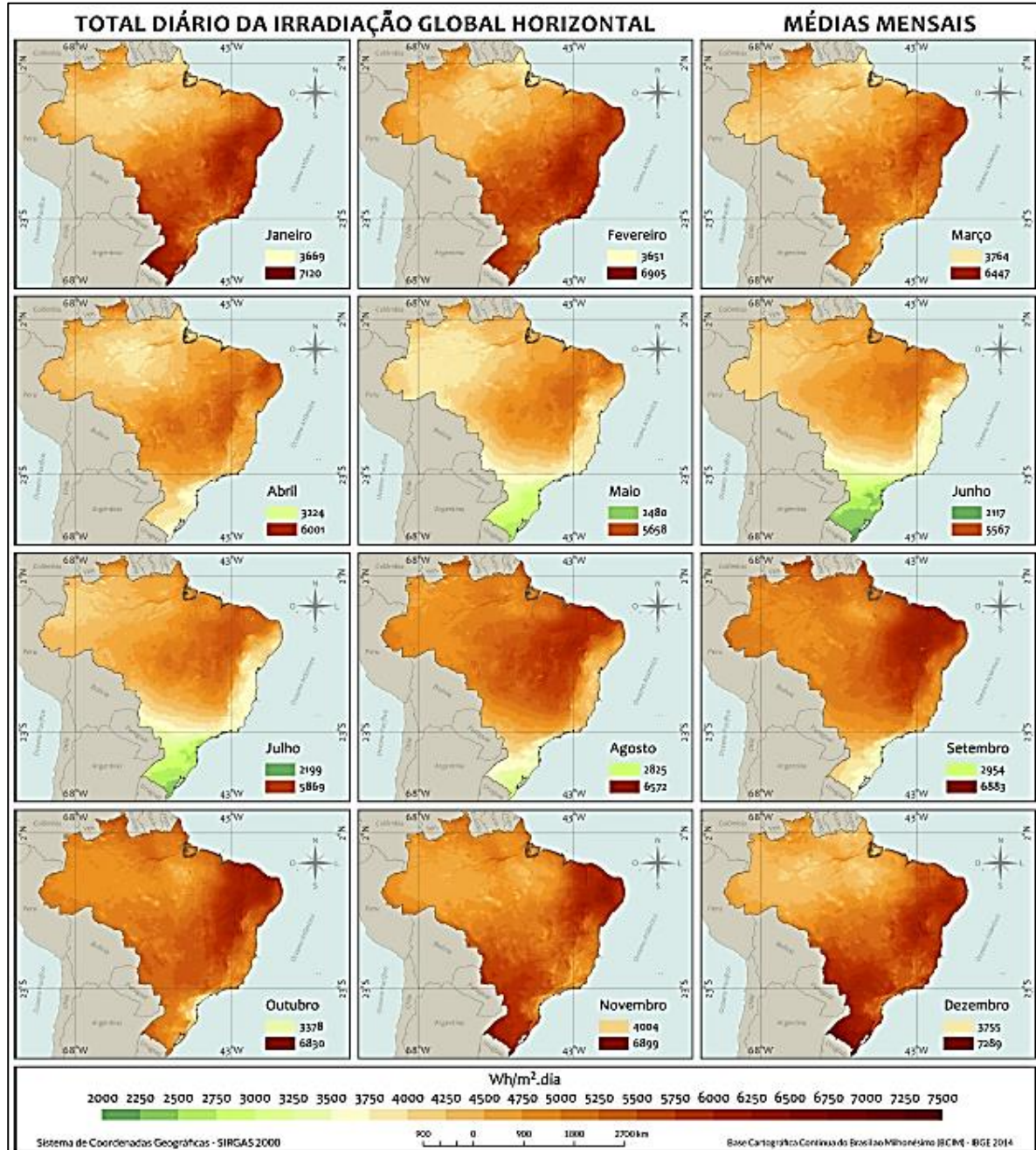
Figura A.100 – Delimitação do semiárido do Estado do Rio Grande do Norte.



Fonte: Brasil (2018g).

ANEXO III – Irradiação Global Brasileira (médias mensais do acumulado diário)

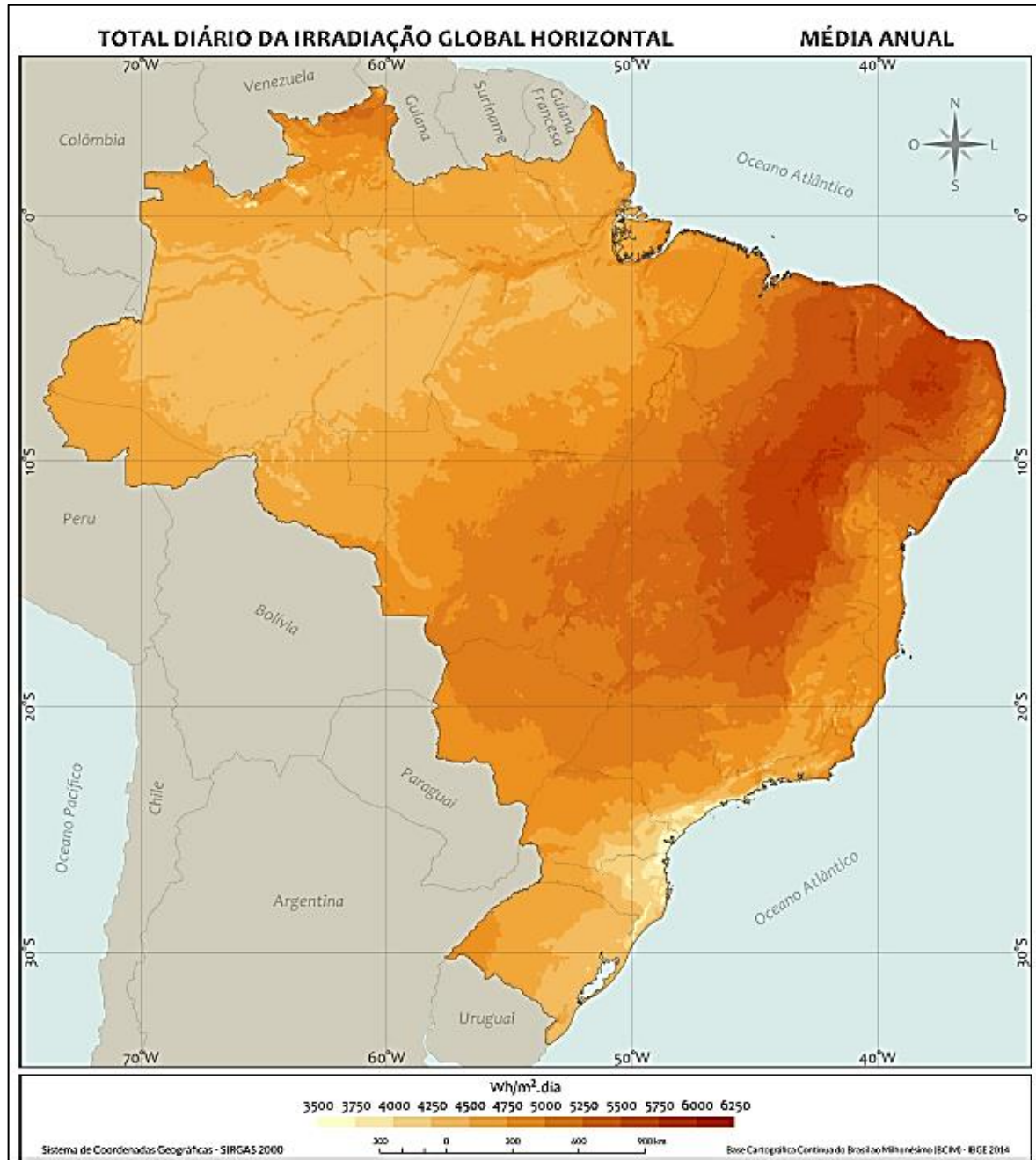
Figura A.101 – Médias mensais do total diário de irradiação global horizontal.



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

ANEXO IV – Irradiação Global Brasileira (médias anuais do acumulado diário)

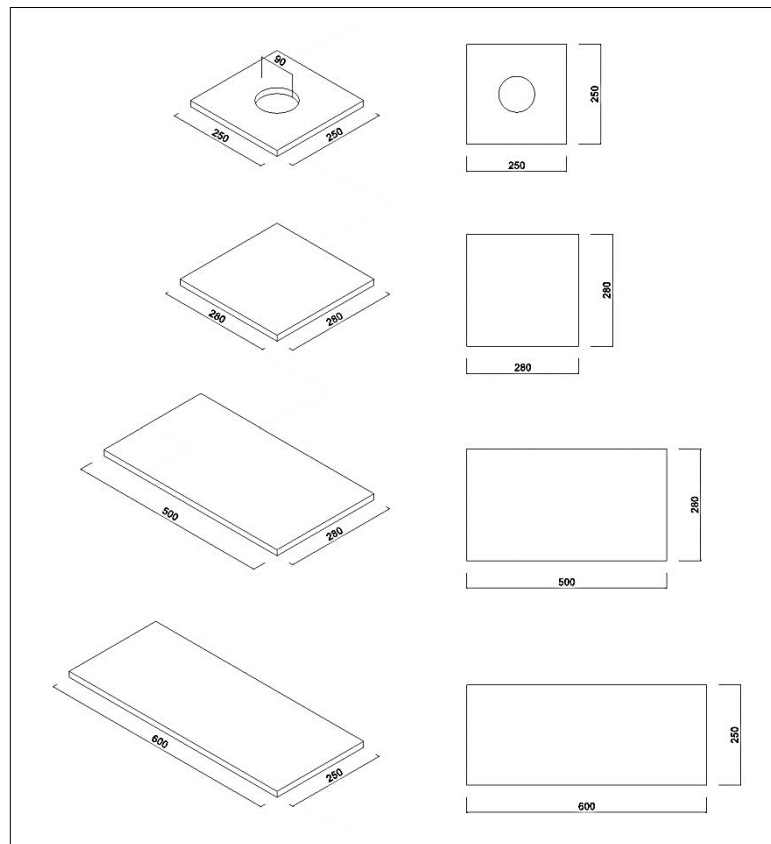
Figura A.102 – Média anual do total diário de irradiação global horizontal.



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

APÊNDICE I – Projeto do Evaporador Fotoassistido

Figura A.103 – Peças da estrutura do evaporador fotoassistido.



Fonte: Autor (2019).

APÊNDICE II – Código Arduino para Leitura dos Parâmetros dos Sensores DHT22

Quadro A.3 – Código de programação ARDUINO para dois sensores DHT22 de temperatura em umidade relativa. Leitura dos parâmetros de 1 em 1 minuto.

```
#include <DHT.h>

#define DHT1PIN 2
#define DHT2PIN 7
#define DHTTYPE DHT22
DHT dht1(DHT1PIN, DHTTYPE);
DHT dht2(DHT2PIN, DHTTYPE);

void setup() {

    dht1.begin();
    dht2.begin();
    Serial.begin(9600);

}

void loop() {
    delay(60000);

    float h1 = dht1.readHumidity();
    float t1 = dht1.readTemperature();
    float h2 = dht2.readHumidity();
    float t2 = dht2.readTemperature();

    Serial.print("T_in: ");
    Serial.print(t1);
    Serial.print(" °C ");
    Serial.print("Hr_in: ");
    Serial.print(h1);
    Serial.print(" % || ");

    Serial.print("T_out: ");
    Serial.print(t2);
    Serial.print(" °C ");
    Serial.print("Hr_out: ");
    Serial.print(h2);
    Serial.println(" %");
```

Fonte: Autor (2019).