



ANA MARGARIDA NUNES HELIODORO

Licenciada em Ciências de Engenharia Mecânica

MODELAÇÃO E SIMULAÇÃO DE SISTEMAS SOLARES DE DESSALINIZAÇÃO PASSIVA DE ÁGUA

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa
Dezembro, 2024

MODELAÇÃO E SIMULAÇÃO DE SISTEMAS SOLARES DE DESSALINIZAÇÃO PASSIVA DE ÁGUA

ANA MARGARIDA NUNES HELIODORO

Licenciada em Ciências de Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor Jorge Emanuel Pereira Navalho

Professor Auxiliar Convidado, Nova School of Science and Technology, Universidade Nova de Lisboa

Júri

Presidente: Doutor Luís Miguel Chagas Costa Gil
Professor Auxiliar, Nova School of Science and Technology, Universidade Nova de

Lisboa

Arguente: Doutor Daniel Cardoso Vaz
Professor Auxiliar, Nova School of Science and Technology, Universidade Nova de

Lisboa

Orientador: Doutor Jorge Emanuel Pereira Navalho
Professor Auxiliar Convidado, Nova School of Science and Technology, Universidade
Nova de Lisboa

Modelação e simulação de sistemas solares de dessalinização passiva de água

Copyright © Ana Margarida Nunes Heliodoro, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

À minha família,

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de expressar o meu agradecimento ao meu orientador, Professor Jorge Navalho, cuja disponibilidade, sessões de esclarecimento e discussões enriquecedoras foram fundamentais para o desenvolvimento desta dissertação.

Quero agradecer aos docentes do DEMI pela excelência no ensino, que foi essencial para a minha formação e um agradecimento especial ao NMFTA, pela disponibilização das condições necessárias para a realização desta dissertação.

À minha família agradeço todo o apoio incondicional e por me ensinarem que, independentemente das dificuldades e obstáculos que a vida nos coloca, é sempre possível superá-los com dedicação e perseverança. A vossa confiança em mim e o vosso exemplo de resiliência foram uma fonte constante de inspiração e força.

Ao avô Zé e à avó Juliana obrigada por me terem criado e educado da melhor forma possível, garantindo que nunca me faltasse nada. Serei eternamente grata por tudo o que fizeram por mim, quando os meus pais não o podiam fazer.

Aos meus amigos e colegas que levo deste percurso académico agradeço a vossa amizade e apoio e por tornaram esta fase mais leve e enriquecedora. Estou certa de que no futuro continuaremos a criar momentos especiais, mantendo viva a ligação e companheirismo que partilhámos neste curso.

Por fim, um agradecimento especial ao meu namorado, Rodrigo, o meu melhor amigo, que sempre me apoiou e me ajudou a ver as coisas de uma forma diferente, o que foi fundamental para a conclusão deste trabalho. Sou profundamente grata por fazeres parte da minha vida e por sempre acreditares em mim.

”

«Recomeça... se puderes, sem angústia e sem pressa e os passos que deres, nesse caminho duro do futuro, dá-os em liberdade, enquanto não alcances não descanses, de nenhum fruto queiras só metade.»

— Miguel Torga

RESUMO

A dessalinização solar passiva emerge como uma alternativa sustentável aos métodos tradicionais de dessalinização, ao utilizar a energia solar como fonte de energia renovável para converter a água salina em água potável. O dessalinizador solar revela-se uma tecnologia promissora na mitigação das deficiências de abastecimento de água potável, particularmente em regiões onde a escassez ou a qualidade da água são questões críticas. A comunidade científica tem desempenhado um papel essencial na otimização desta tecnologia, com o objetivo de aumentar continuamente o seu desempenho, refletido no incremento da quantidade de água destilada produzida.

A presente dissertação insere-se no contexto do desenvolvimento e otimização de dessalinizadores solares. Para esse fim, realizaram-se simulações numéricas e comparou-se dois modelos matemáticos implementados no programa Ansys-Fluent. O modelo mais complexo exigiu a criação de um código específico. No estudo do dessalinizador solar convencional, investigou-se a influência de parâmetros climáticos, operacionais e de projeto no desempenho do sistema. A simulação numérica de outros tipos de dessalinizadores solares, com o objetivo de aumentar a quantidade de água destilada, é igualmente investigada, sendo também analisada a aplicação de radiação solar concentrada na base da tecnologia para maximizar a sua produtividade. A comparação do desempenho entre os tipos de dessalinizadores solares também é um objetivo desta dissertação.

Os resultados numéricos obtidos permitiram avaliar de forma precisa a capacidade preditiva dos modelos bidimensionais e compreender o impacto dos diversos parâmetros no desempenho do dessalinizador solar convencional. Verificou-se um aumento significativo na produtividade do sistema decorrente do estudo desses parâmetros. A análise comparativa dos outros tipos de dessalinizadores solares considerados revelou melhorias no desempenho geral da tecnologia, destacando-se um aumento de 75,20% na produtividade cumulativa com a utilização da radiação solar concentrada na base da tecnologia e o duplo efeito, em relação ao dessalinizador solar convencional.

Palavras-chave: Água potável, Energia solar, Dessalinizador solar passivo, Produtividade de água destilada, Radiação solar concentrada, Simulação numérica

ABSTRACT

Passive solar desalination emerges as a sustainable alternative to traditional desalination methods, by utilizing solar energy as a renewable source to convert saline water into potable water. The solar still is proving to be a promising technology for mitigating potable water supply deficiencies, particularly in regions where water scarcity or quality are critical issues. The scientific community has played a key role in optimizing this technology, continuously aiming to improve its performance, as reflected in the increased amount of distilled water produced.

This dissertation is part of the development and optimization of solar stills. Two widely referenced mathematical models were numerically simulated and compared in Ansys-Fluent, one of which required a dedicated code due to its complexity. In the study of the conventional solar still, the influence of climatic, operational, and design parameters on system performance was investigated. The numerical simulation of other types of solar stills, aimed at increasing the amount of distilled water produced, is also investigated, along with the analysis of concentrated solar radiation applied to the technology to maximize its productivity. The comparison of performance between different types of solar stills is also an objective of this dissertation.

The numerical results obtained provided an accurate assessment of the predictive capability of the two-dimensional models and allowed for a deeper understanding of the impact of various parameters on the performance of the conventional solar still. A significant increase in system productivity was observed as a result of optimizing these parameters. The comparative analysis of different types of solar stills revealed overall improvements in performance, with a notable 75.20% increase in cumulative productivity when applying concentrated solar radiation at the base of the system and utilizing the double-effect process, compared to the conventional solar still.

Keywords: Potable water, Solar energy, Passive solar still, Water productivity, Concentrated solar radiation, Numerical simulation

ÍNDICE

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xv
Siglas	xvii
Nomenclatura	xviii
1 Introdução	1
1.1 Tema e a sua relevância	1
1.2 Motivação	2
1.3 Contextualização	3
1.4 Dessalinização para produção de água potável	6
1.5 Dessalinizador solar	7
1.5.1 Dessalinizador solar de inclinação e bacia simples	10
1.5.2 Dessalinizador solar de dupla inclinação	12
1.5.3 Dessalinizador solar de multi-efeitos	13
1.5.4 Dessalinizador solar do tipo cascata	14
1.5.5 Dessalinizador solar de absorvedor invertido	15
1.5.6 Dessalinizador solar com <i>designs</i> avançados	16
1.6 Estudos numéricos e experimentais	17
1.7 Objetivos	26
1.8 Estrutura do documento	27
2 Modelos	29
2.1 Modelos físicos	30
2.1.1 Modelação nível A	30
2.1.2 Modelação nível B	31
2.2 Modelos matemáticos	34
2.2.1 Modelação nível A	35

2.2.2	Modelação nível B	37
2.3	Parâmetros de desempenho do dessalinizador solar	46
2.4	Modelos numéricos	47
2.5	Dados de entrada do modelo de nível B	48
2.6	Validação	49
3	Resultados e discussão	57
3.1	Estudo de independência da malha	57
3.2	Estudo de independência do <i>time step</i>	60
3.3	Comparação dos níveis	62
3.4	Influência dos parâmetros climáticos, operacionais e de projeto	66
3.4.1	Influência da profundidade da água na bacia	66
3.4.2	Influência da velocidade do vento	72
3.4.3	Influência da espessura da cobertura de vidro	78
3.4.4	Influência da inclinação da cobertura de vidro	81
3.5	Estudo do dessalinizador solar de duplo efeito	85
3.6	Estudo do dessalinizador solar de absorsor invertido	91
3.6.1	Influência da dimensão do concentrador solar	91
3.7	Estudo do dessalinizador solar de duplo efeito e de absorsor invertido	99
3.7.1	Influência do revestimento do vidro entre bacias	105
4	Conclusões	114
	Referências	119

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Aplicabilidade global da dessalinização solar. Extraído da referência [10].	5
1.2	Classificação de métodos de dessalinização a partir do princípio de funcionamento. Extraído da referência [11].	6
1.3	Representação esquemática de um dessalinizador solar convencional. Extraído da referência [16].	8
1.4	Dessalinizador solar ativo com coletor solar incorporado. Extraído da referência [17].	8
1.5	Resumo das modificações típicas para aumento do desempenho dos dessalinizadores solares convencionais. Extraído da referência [21].	11
1.6	Dessalinizador solar de bacia simples integrado com alhetas. Extraído da referência [20].	11
1.7	Dessalinizador solar de ação capilar. Extraído da referência [22].	12
1.8	Dessalinizador solar passivo de bacia simples e dupla inclinação. Extraído da referência [21].	13
1.9	Dessalinizador solar passivo de duplo efeito e inclinação simples. Extraído da referência [20].	13
1.10	Dessalinizador solar passivo de triplo efeito e inclinação simples. Extraído da referência [20].	14
1.11	Dessalinizador solar passivo do tipo cascata. Extraído da referência [23].	15
1.12	Dessalinizador solar passivo de duplo efeito e de absorvedor invertido. Extraído da referência [20].	15
1.13	Dessalinizador solar passivo tubular. Extraído da referência [14].	16
1.14	Dessalinizador solar passivo vertical. Extraído da referência [14].	17
1.15	Dessalinizador solar passivo hemisférico. Extraído da referência [4].	17
1.16	Distribuições de temperatura (a) e da função potencial (b) da partição instalada a $x = 0,1$ m. Extraído da referência [27].	18
1.17	Distribuições de fração de volume da água líquida e do vapor de água ao longo do tempo no dessalinizador convencional e no modificado com nanofluido. Extraído da referência [29].	20

1.18	Representação esquemática do dessalinizador tubular com a incorporação de uma bomba de vácuo (a) e da sua secção transversal (b). Extraído da referência [30].	21
1.19	Distribuições de velocidade e magnitude dos vórtices com linhas potenciais à pressão de operação de 101 kPa (a); e 40 kPa (b). Extraído da referência [30].	22
1.20	Comparação da produtividade horária do dessalinizador convencional (<i>single-basin</i>) e do dessalinizador do tipo cascata (<i>six-stepped</i>). Extraído da referência [32].	23
1.21	Esquema do sistema que inclui um dessalinizador solar tubular de duplo efeito e um concentrador solar parabólico. Extraído da referência [33].	24
1.22	Representação esquemática da instalação experimental. Extraído da referência [34].	25
1.23	Dessalinizador convencional com a distribuição de geometrias em forma de cone. Extraído da referência [35].	26
2.1	Classificação da modelação dos dessalinizadores solares [36].	29
2.2	Representação esquemática da geometria e sistema de coordenadas do dessalinizador solar do modelo de nível A [41].	31
2.3	Representação esquemática da geometria, do sistema de coordenadas e das diferentes zonas do modelo de nível B [49, 53].	32
2.4	Representação esquemática da geometria, do sistema de coordenadas e das diferentes zonas do dessalinizador solar de duplo efeito.	33
2.5	Representação esquemática da geometria, do sistema de coordenadas e das diferentes zonas do dessalinizador solar de absorvedor invertido.	34
2.6	Perfis de dados de entrada dos dias 5 e 6 de agosto de 2023 na localização de Salvaterra de Magos: irradiância solar direta e difusa [61]; e (b) temperatura ambiente [60].	49
2.7	Distribuições de temperatura obtidas com o modelo de nível A (a) Presente trabalho e (b) Referência [41].	51
2.8	Distribuições de fração mássica do vapor de água obtidas com o modelo de nível A (a) Presente trabalho e (b) Referência [41].	52
2.9	Comparação entre os perfis de temperatura a $y = 0,001$ m obtido no presente trabalho e no reportado na literatura do modelo de nível A [41].	52
2.10	Comparação entre os perfis de v -velocidade a $y = 0,001$ m obtido no presente trabalho e no reportado na literatura do modelo de nível A [41].	53
2.11	Comparação entre o coeficiente de convecção obtido no presente trabalho e no reportado na literatura do modelo de nível A [41].	53
2.12	Comparação entre as taxas de evaporação obtida no presente trabalho e na reportada na literatura do modelo de nível A [41].	53
2.13	Perfis de dados de entrada: irradiância solar direta e difusa; e (b) temperatura ambiente [32, 49, 50].	54

2.14	Comparação entre a produtividade horária obtida no presente trabalho e na reportada na literatura do modelo de nível B [28, 49, 51].	55
2.15	Comparação das temperaturas médias, obtidas no presente trabalho e no reportada na literatura [49], das superfícies: da água (a); e do vidro (b). . . .	55
3.1	Estudo de independência da malha do nível A com diferentes números de elementos de malha através da comparação do perfil da temperatura a $y = 0,001$ m.	58
3.2	Estudo de independência da malha do nível B com diferentes números de elementos de malha através da comparação do perfil da produtividade horária do dessalinizador solar.	59
3.3	Estudo da independência da malha do modelo de nível B com diferentes números de elementos de malha através da comparação dos perfis de temperaturas médias das superfícies: da água (a); e do vidro (b).	60
3.4	Estudo de independência do <i>time step</i> do nível B com diferentes <i>time steps</i> através da comparação do perfil da produtividade horária do dessalinizador solar.	61
3.5	Estudo de independência do <i>time step</i> do modelo de nível B com diferentes <i>time steps</i> através da comparação dos perfis de temperaturas médias das superfícies: da água (a); e do vidro (b).	61
3.6	Distribuições de temperatura do ar húmido para o instante das 14 horas obtidas com o modelo de nível A (a) e o modelo de nível B (b).	64
3.7	Distribuições de fração mássica do vapor de água para o instante das 14 horas obtidas com o modelo de nível A (a) e o modelo de nível B (b).	65
3.8	Comparação dos perfis de temperatura ao longo do comprimento do dessalinizador, a uma distância de 1 mm da superfície livre da água para os modelos de níveis A e B.	65
3.9	Produtividade do dessalinizador solar para diferentes profundidades de água líquida: (a) perfis horários; e (b) perfis cumulativos.	67
3.10	Perfis de temperatura da água (a) e do vidro (b) ao longo do tempo para diferentes profundidades de água líquida.	67
3.11	Comparação das distribuições de temperatura para o instante das 14 horas entre os dessalinizadores solares com profundidades de água líquida de: (a) 2 cm; e (b) 4 cm.	69
3.12	Comparação das distribuições de fração mássica do vapor de água para o instante das 14 horas entre os dessalinizadores solares com profundidades de água líquida de: (a) 2 cm; e (b) 4 cm.	70
3.13	Comparação das distribuições de velocidade para o instante das 14 horas entre os dessalinizadores solares com profundidades de água líquida de: (a) 2 cm; e (b) 4 cm.	71

3.14	Produtividade do dessalinizador solar para diferentes velocidades do vento: (a) perfis horários; e (b) perfis cumulativos.	72
3.15	Perfis de temperatura da água (a) e do vidro (b) ao longo do tempo para diferentes velocidades do vento.	72
3.16	Comparação das distribuições de temperatura para o instante das 14 horas entre os dessalinizadores solares com velocidades do vento de: (a) 1 m s^{-1} ; (b) 3 m s^{-1} ; e (c) 9 m s^{-1}	75
3.17	Comparação das distribuições de fração mássica do vapor de água para o instante das 14 horas entre os dessalinizadores solares com velocidades do vento de: (a) 1 m s^{-1} ; (b) 3 m s^{-1} ; e (c) 9 m s^{-1}	76
3.18	Comparação das distribuições de velocidade para o instante das 14 horas entre os dessalinizadores solares com velocidades do vento de: (a) 1 m s^{-1} ; (b) 3 m s^{-1} ; e (c) 9 m s^{-1}	77
3.19	Produtividade do dessalinizador solar para diferentes espessuras da cobertura de vidro: (a) perfis horários; e (b) perfis cumulativos.	78
3.20	Perfis de temperatura da água (a) e do vidro (b) ao longo do tempo para diferentes espessuras da cobertura de vidro.	78
3.21	Comparação das distribuições de temperatura para o instante das 14 horas entre os dessalinizadores solares com espessuras de vidro de: (a) 2 mm; (b) 4 mm; e (c) 8 mm.	80
3.22	Produtividade do dessalinizador solar para diferentes ângulos da cobertura de vidro: (a) perfis horários; e (b) perfis cumulativos.	81
3.23	Perfis de temperatura da água (a) e do vidro (b) ao longo do tempo para diferentes ângulos da cobertura de vidro.	81
3.24	Comparação das distribuições de temperatura para o instante das 14 horas entre os dessalinizadores solares com ângulos de cobertura de vidro de: (a) $14,35^\circ$; e (b) $24,35^\circ$	83
3.25	Comparação das distribuições de velocidade para o instante das 14 horas entre os dessalinizadores solares com ângulos de cobertura de vidro de: (a) $14,35^\circ$; e (b) $24,35^\circ$	84
3.26	Produtividade do dessalinizador solar de duplo efeito para cada bacia: (a) perfis horários; e (b) perfis cumulativos.	85
3.27	Perfis de temperatura média das superfícies da água e do vidro do dessalinizador solar de duplo efeito.	86
3.28	Distribuições de temperatura do dessalinizador solar de duplo efeito convencional para os instantes: (a) 13 horas e (b) 17 horas.	87
3.29	Distribuições de fração mássica do vapor de água do dessalinizador solar de duplo efeito convencional para os instantes: (a) 13 horas e (b) 17 horas.	88
3.30	Distribuições de velocidade do dessalinizador solar de duplo efeito convencional para os instantes: (a) 13 horas e (b) 17 horas.	89

3.31	Comparação dos perfis da produtividade cumulativa do dessalinizador solar de simples efeito (convencional) e de duplo efeito.	90
3.32	Razão de concentração local de irradiação solar para cada concentrador. . .	92
3.33	Perfis de produtividade do dessalinizador solar de absorsor invertido de cada concentrador e do dessalinizador solar convencional: (a) perfis horários; e (b) perfis cumulativos.	93
3.34	Perfis de temperatura da água (a) e do vidro (b) ao longo do tempo para os diferentes concentradores e para o dessalinizador convencional.	93
3.35	Distribuições de temperatura do dessalinizador solar de absorsor invertido convencional para o instante das 14 horas com o concentrador: (a) A e (b) B.	96
3.36	Distribuições de fração mássica do vapor de água do dessalinizador solar de absorsor invertido convencional para o instante das 14 horas com o concentrador: (a) A e (b) B.	97
3.37	Distribuições de velocidade do dessalinizador solar de absorsor invertido convencional para o instante das 14 horas com o concentrador: (a) A e (b) B.	98
3.38	Perfis de produtividade entre o dessalinizador solar de duplo efeito e de absorsor invertido e o dessalinizador solar de duplo efeito, para cada bacia: (a) perfis horários; e (b) perfis cumulativos.	99
3.39	Perfis de temperatura da água e do vidro do dessalinizador solar de duplo efeito e de absorsor invertido (a) e do dessalinizador solar de duplo efeito convencional (b).	100
3.40	Distribuições de temperatura do dessalinizador solar de duplo efeito e de absorsor invertido para os instantes: (a) 12 horas e (b) 15 horas.	101
3.41	Distribuições de fração mássica do vapor de água do dessalinizador solar de duplo efeito e de absorsor invertido para os instantes: (a) 12 horas e (b) 15 horas.	103
3.42	Distribuições de velocidade do dessalinizador solar de duplo efeito e de absorsor invertido para os instantes: (a) 12 horas e (b) 15 horas.	104
3.43	Comparação dos perfis da produtividade cumulativa do dessalinizador solar de duplo efeito e de duplo efeito e de absorsor invertido.	105
3.44	Perfis de produtividade do dessalinizador solar de duplo efeito convencional, dos dessalinizadores de duplo efeito e de absorsor invertido com vidro transparente e com vidro revestido entre bacias, para cada bacia: (a) perfis horários; e (b) perfis cumulativos.	106
3.45	Perfis de temperatura das superfícies da água e do vidro para cada bacia, do dessalinizador solar de duplo efeito e de absorsor invertido com vidro revestido entre bacias.	107
3.46	Distribuições de temperatura do dessalinizador solar de duplo efeito e de absorsor invertido com um revestimento no vidro entre bacias para os instantes: (a) 13 horas e (b) 15 horas.	108

3.47	Distribuições de fração mássica do vapor de água do dessalinizador solar de duplo efeito e de absorsor invertido com um revestimento no vidro entre bacias para os instantes: (a) 13 horas e (b) 15 horas.	110
3.48	Distribuições de velocidade do dessalinizador solar de duplo efeito e de absorsor invertido com um revestimento no vidro entre bacias para os instantes: (a) 13 horas e (b) 15 horas.	111
3.49	Comparação dos perfis de produtividade cumulativa entre o dessalinizador solar de duplo efeito convencional, e entre os dessalinizadores de duplo efeito e de absorsor invertido com vidro transparente e com vidro revestido entre bacias.	112

ÍNDICE DE TABELAS

2.1	Dimensões do dessalinizador solar do modelo de nível A.	31
2.2	Dimensões do dessalinizador solar do modelo de nível B.	31
2.3	Dimensões do dessalinizador solar de duplo efeito do modelo de nível B.	32
2.4	Dimensões do dessalinizador solar de absorsor invertido do modelo de nível B.	34
2.5	Dimensões dos concentradores solares A e B e refletividades.	34
2.6	Propriedades do ar húmido em função da temperatura em graus <i>Celsius</i> . Extraído da Referência [41].	36
2.7	Propriedades termofísicas e óticas do modelo de nível B. Extraído da referência [49].	44
2.8	Parâmetros óticos de cada parte do dessalinizador solar do modelo de nível B. Extraído da referência [49].	44
2.9	Dimensões e temperaturas nas fronteiras do dessalinizador solar convencional do modelo de nível A (validação).	50
2.10	Propriedades termofísicas do ar húmido do modelo de nível A.	50
2.11	Dimensões do dessalinizador solar convencional do modelo de nível B (validação).	54
2.12	Erro quadrático médio e desvio máximo da produtividade horária.	56
3.1	Resumo dos casos e dos resultados do estudo de independência da malha do modelo de nível A.	58
3.2	Resumo dos casos e dos resultados do estudo de independência da malha do modelo de nível B.	59
3.3	Resumo dos casos e dos resultados do estudo de independência do <i>time step</i> do modelo de nível B.	61
3.4	Horários correspondentes para intervalos de tempo e um instante específico.	62
3.5	Resumo das propriedades termofísicas do ar húmido, temperaturas médias e frações mássicas do vapor de água para cada intervalo e instante.	63

3.6	Resumo da comparação das produtividades horárias obtidas pelos níveis A e	
B.		63

SIGLAS

CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
DO	<i>Discrete Ordinates</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
RNG	<i>Re-Normalisation Group</i>
RTE	<i>Radiative Transfer Equation</i>
UDF	<i>User Defined Function</i>
VoF	<i>Volume of Fluid</i>
ODS	Objetivos de desenvolvimento sustentável

NOMENCLATURA

A	Área, m^2
a	Coeficiente de absorção, m^{-1}
Bo	Número de Buoyancy, -
C	Concentração do vapor no ar, $kg\ m^{-3}$
c_p	Calor específico, $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$
D_{AB}	Coeficiente de difusão molecular (Modelo A), $m^2\ s^{-1}$
D_m	Coeficiente de difusão molecular (Modelo B), $m^2\ s^{-1}$
D	Largura da abertura do concentrador, m
E	Energia, J
F	Distância focal do concentrador, m
g	Aceleração gravítica, $m\ s^{-2}$
Gr	Número de Grashof, -
h_{cv}	Coeficiente de transferência de calor por convecção, $W\ m^{-2}\ K^{-1}$
h_E	Entalpia sensível, $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$
h_{fg}	Entalpia de vaporização/condensação, $J\ kg^{-1}$
H_l	Altura da parede esquerda do dessalinizador solar, m
H_r	Altura da parede direita do dessalinizador solar, m
H_w	Profundidade da água líquida na bacia, m
I	Intensidade de radiação, $W\ m^{-2}$
J	Fluxo difusivo, $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$
L	Comprimento do dessalinizador solar, m
l_c	Comprimento caraterístico, m
M	Massa molar, $kg\ kmol^{-1}$
$\dot{m}$	Fluxo de massa, $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$
n	Índice de refração, -
$\overline{Nu}$	Número de Nusselt médio, -
P	Pressão, Pa
Pr	Número de Prandtl, -
R_g	Constante específica do gás, $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$

Ra	Número de Rayleigh, -
Re	Número de Reynolds, -
S_h	Termo fonte de energia radiante, $W\ m^{-3}$
S_L	Termo fonte do calor latente de evaporação/condensação, $W\ m^{-3}$
T	Temperatura, K
t	Tempo, s
u	Componente-X da velocidade, $m\ s^{-1}$
V	Volume, m^3
v	Componente-Y da velocidade, $m\ s^{-1}$
$\vec{v}$	Vector velocidade, $m\ s^{-1}$
W	Profundidade do dessalinizador solar, m
Y	Fração mássica do vapor de água, -

Símbolos Gregos:

α	Coeficiente de energia, -
β	Coeficiente de expansão térmica, K^{-1}
β^*	Coeficiente de expansão das espécies, K^{-1}
ε	Emissividade, -
λ	Condutividade térmica, $W\ m^{-1}\ K^{-1}$
μ	Viscosidade dinâmica, $kg\ m^{-1}\ s^{-1}$
ν	Viscosidade cinemática, $m^2\ s^{-1}$
φ	Humidade relativa, -
ρ	Massa volúmica, $kg\ m^{-3}$
σ	Constante Stefan-Boltzmann, $W\ m^{-2}\ K^{-4}$
τ	Tensão de corte, $N\ m^{-2}$
θ	Inclinação da cobertura de vidro, $^\circ$
χ	Fração molar do vapor de água, -

Subscritos:

a	Ar seco, Ar húmido
al	Alumínio
amb	Ambiente
c	Condensação
cr	Crítica
e	Evaporação
g	Vidro
L	Bacia inferior
ref	Referência
sat	Saturado
sky	Céu

t	Turbulento
U	Bacia superior
v	Vapor
w	Água
0	Operação

INTRODUÇÃO

1.1 Tema e a sua relevância

A crescente escassez de água potável em várias regiões do mundo representa um dos desafios mais difíceis que a humanidade enfrenta atualmente. Esta crise deve-se a uma combinação de fatores, como o crescimento populacional, a poluição de fontes hídricas, a gestão inadequada de recursos hídricos e as alterações climáticas, que têm provocado secas prolongadas e mudanças nos padrões de precipitação. As consequências da escassez de água incluem a diminuição da disponibilidade de água para consumo humano, a degradação da agricultura, o aumento dos conflitos por recursos hídricos e impactos graves na saúde pública.

Diante desse cenário, a procura por soluções inovadoras e sustentáveis para a produção de água potável torna-se imperativa. Nesse contexto, a dessalinização emerge como uma alternativa vital para aproveitar vastas fontes de água salgada disponíveis globalmente. Esta tecnologia apresenta-se como uma solução promissora em regiões onde a disponibilidade de água potável é crítica, sendo económica e de fácil construção, o que a torna ideal para populações com recursos limitados, permitindo-lhes aceder a água potável de uma forma sustentável e acessível economicamente.

A presente dissertação concentra-se na modelação e simulação numérica de diversos tipos de dessalinizadores solares passivos, uma abordagem que utiliza a energia solar para impulsionar o processo de dessalinização.

O estudo numérico permite avaliar o desempenho do dessalinizador solar passivo, visando, não apenas ampliar a compreensão sobre os diversos processos envolvidos no interior desta tecnologia, mas também fornecer contribuições valiosas para o avanço de tecnologias sustentáveis de dessalinização. A relevância deste estudo reside também na sua contribuição para o desenvolvimento de métodos eficientes e ambientalmente conscientes de obtenção de água potável.

1.2 Motivação

A crescente escassez de recursos hídricos em diversas partes do mundo representa um problema complexo e multifacetado. Esse problema surge do aumento da procura por água potável, impulsionado pelo crescimento acelerado da população, e é agravado por fatores como mudanças climáticas e degradação ambiental. Todos esses elementos ressaltam a urgência em encontrar abordagens sustentáveis e eficientes para a produção de água doce.

Na agenda da Organização das Nações Unidas para 2030, estão estabelecidos objetivos para garantir a disponibilidade e a gestão sustentável de água e saneamento para todos até 2030 (ODS 6) [2]. No entanto, diante dos desafios previamente mencionados, esse objetivo está cada vez mais comprometido. He *et al.* [3] prevêem que, de 2016 a 2050, haja um aumento de um terço para metade da população urbana mundial a enfrentar o problema da escassez de água.

Para além do problema da escassez de água, muitos países em desenvolvimento enfrentam problemas relacionados à qualidade da água, devido à falta de sistemas apropriados de distribuição de água, levando a população a adotar os seus próprios métodos de dessalinização. No entanto, devido aos custos elevados, manutenção frequente e consumo energético considerável desses métodos, muitas famílias não conseguem suportar tais despesas. Consequentemente, muitas pessoas consomem água contaminada sem o conhecimento e enfrentam riscos de doenças agudas e crónicas [4].

As alterações climáticas também contribuem para a escassez de água a nível global, uma vez que desencadeiam períodos prolongados de seca em diversas regiões do mundo. Em Portugal, esses períodos têm-se tornado mais frequentes e persistentes, especialmente na região do Algarve. Posto isto, o Algarve pretende construir a primeira estação de dessalinização de água do mar, que prevê um aumento de 69 milhões de m³ por ano das disponibilidades hídricas da região [5].

Muitos estudos propõem soluções para o problema da escassez de água e da qualidade da água, mas poucos avaliam verdadeiramente a fiabilidade dessas propostas. Assim, surge a motivação para o desenvolvimento desta dissertação, a fim de estudar numericamente a técnica de dessalinização solar. Além disso, é importante destacar que a maior parte das contribuições científicas nesta área baseiam-se em abordagens experimentais e analíticas, apresentando casos frequentemente simplificados e resultados com pouca precisão. Deste modo, a necessidade de resultados numéricos mais precisos torna-se evidente, motivando ainda mais a exploração detalhada do método de dessalinização solar nesta dissertação.

Métodos tradicionais de produção de água potável a partir da água do mar, como a osmose inversa e *flash* multi-étapa, requerem altos consumos energéticos e podem ter impactos ambientais significativos ao recorrerem à queima de grandes quantidades de combustíveis fósseis. Por outro lado, a energia solar, abundante e renovável, oferece a oportunidade de desenvolver um sistema de dessalinização ambientalmente consciente. A compreensão aprofundada dos processos envolvidos, por meio da modelação matemática

e simulação numérica, permite otimizar o desempenho desses sistemas, tornando-os mais acessíveis, sustentáveis e adaptáveis a diferentes condições geográficas.

A motivação para esta pesquisa reside também na necessidade de avançar no conhecimento científico sobre dessalinização passiva solar. A capacidade de prever e entender o comportamento desse sistema por meio de modelos e simulações numéricas contribuirá não apenas para a construção de um sistema mais viável, mas também para a disseminação do conhecimento e a promoção de práticas sustentáveis a nível global.

Em última análise, a importância para o desenvolvimento deste tema é guiada também pelo desejo de oferecer contribuições tangíveis na mitigação dos desafios relacionados à água, proporcionando acesso a água potável de maneira eficaz, sustentável e ambientalmente responsável. Ao centrar-se no potencial da dessalinização solar, esta pesquisa pretende ser parte integrante de esforços mais amplos para enfrentar a crise global da água e promover a sustentabilidade no uso dos recursos hídricos.

1.3 Contextualização

A energia solar tem sido aproveitada desde a antiguidade para diversas aplicações, com evidências nas práticas de civilizações como os Egípcios, Gregos e Incas. Uma das primeiras aplicações práticas conhecidas remonta à secagem de alimentos como método de preservação. Uma das instalações mais antigas com essa finalidade, utilizando a energia solar, foi descoberta no sul de França, datada de 8000 a.C. Os Gregos, por sua vez, exploravam o uso de vidros para concentrar os raios solares num ponto central. Acredita-se que este método tenha sido utilizado por Arquimedes, um matemático e filósofo grego, para incendiar a frota de navios romana na baía de Siracusa [6]. Essas práticas antigas destacam a perspicácia e a sabedoria das civilizações antigas ao reconhecerem o potencial da energia solar em diversas aplicações.

No século XIX, testemunhou-se o início da verdadeira revolução da energia solar. Na Europa e nos Estados Unidos, diversos cientistas desenvolveram experiências com máquinas solares, concebidas para concentrar a radiação solar. A principal aplicação dessas máquinas era a irrigação de campos, utilizando a energia solar para bombear água. Esta fase marcou o advento dos primeiros coletores e concentradores solares [7].

Entre 1866 e 1956, foram construídas diversas instalações solares de pequena escala, contribuindo para o desenvolvimento e aprimoramento da tecnologia solar [7]. Todas estas iniciativas pioneiras estabeleceram as bases para a evolução contínua da energia solar ao longo do tempo.

Sob uma perspectiva teórica, a energia solar apresenta o potencial para suprir as necessidades energéticas globais, contudo, a disponibilidade de tecnologias eficientes para a captação e distribuição dessa energia é crucial. No cenário atual, apenas uma fração ínfima da energia solar total emitida anualmente é capturada, evidenciando que a contribuição atual da energia solar é negligenciável quando comparada ao consumo energético global [8]. Neste sentido, é fundamental destacar os avanços contínuos em tecnologias de

captação solar, como células fotovoltaicas mais eficientes e sistemas de concentração solar mais sofisticados. Esses desenvolvimentos promissores apontam para um futuro em que a energia solar poderá desempenhar um papel cada vez mais significativo no fornecimento global de energia, contribuindo para a transição para fontes renováveis.

A radiação solar tem sido aplicada como uma alternativa aos combustíveis fósseis no processo de dessalinização, destacando-se como uma fonte de energia limpa e renovável para impulsionar esse processo. Esta abordagem procura reduzir a dependência de recursos não renováveis, promovendo a sustentabilidade e mitigando os impactos ambientais associados aos métodos convencionais de dessalinização.

A dessalinização solar baseia-se no processo natural de dessalinização que ocorre na Terra que culmina na formação de chuva, produzindo-se desta forma a principal fonte de água potável. Nessa perspectiva, um dessalinizador solar pode ser considerado um processo em pequena escala quando comparado com a dessalinização natural em grande escala, sendo que neste último, a água salina evapora a partir da energia solar, gerando vapores que são transportados pelo vento. Quando esses vapores arrefecem até se atingir o ponto de orvalho, ocorre a condensação do vapor de água, originando água potável através da precipitação.

A destilação é um processo tradicional e antigo de dessalinização. A destilação solar, que utiliza a energia solar para aquecer a água salina e induzir a sua evaporação, tem sido praticada há muitos anos. Além disso, a destilação solar foi também utilizada em práticas antigas para destilar bebidas alcoólicas ou óleos perfumados [9].

Ao longo dos séculos, a dessalinização para produção de água potável tem sido reconhecida historicamente, evoluindo de um conceito para uma tecnologia estabelecida. Em 1872, o engenheiro sueco Carlos Wilson inaugurou a primeira central de destilação solar em Las Salinas, Chile, marcando o início da produção em larga escala de água destilada. A central, operacional por cerca de 40 anos, cobria uma área total de 4450 m² e era composta por 64 bacias de destilação. Essa instalação fornecia água potável a uma comunidade de trabalhadores envolvidos na exploração de uma mina de salitre, que utilizavam o sal proveniente da mina como parte do processo da dessalinização [7, 9].

Após a Primeira Guerra Mundial, o interesse na destilação solar foi renovado, resultando no desenvolvimento de novos equipamentos de dessalinização. Já durante as décadas de 1930 a 1940, a seca na Califórnia impulsionou novamente a dessalinização. Durante a Segunda Guerra Mundial, a destilação solar despertou grande interesse devido à necessidade urgente de água potável enfrentada por tropas aliadas em áreas remotas, como o Norte da África e ilhas do Oceano Pacífico. Após o conflito, o rápido crescimento populacional reacendeu as preocupações com a qualidade da água, provocando um aumento da pesquisa e desenvolvimento nesta área. Ainda de referir que, entre 1965 e 1970, foram construídas instalações de destilação solar em quatro ilhas gregas para atender às necessidades de pequenas comunidades, demonstrando a crescente importância dessa tecnologia em áreas isoladas.

Este método de produção de água potável teve uma longa história de utilização e,

apesar de algumas das instalações referidas não existirem nos dias de hoje, esta tecnologia mostra-se promissora para abastecer água a comunidades que sofram problemas de escassez ou qualidade da água.

A dessalinização solar pode ser mais vantajosa em alguns locais do que em outros, devido a diversos fatores. Nesse contexto, Pugsley *et al.* [10] realizaram um estudo global para identificar as áreas onde a dessalinização solar é mais aplicável, utilizando um método que correlaciona dados internacionais sobre escassez e *stress* hídrico, recursos hídricos salinos e níveis de insolação. Esse método gera um índice R, de 0 a 1, que classifica os locais no mundo onde a dessalinização é mais eficaz sob esses parâmetros. Na Figura 1.1 é apresentado o mapa mundial com os resultados da classificação deste estudo. Desta observa-se que em países onde a água potável é escassa ou ocorre *stress* hídrico, e há abundância de energia solar e água salina, o índice R é superior a 0,422, indicando que a dessalinização solar é altamente aplicável. Regiões com elevados índices são visíveis no Médio Oriente, na maioria dos países periféricos do Norte e Leste de África, em grande parte da Índia, China e EUA, além do México, Paquistão, África do Sul e Namíbia. Em locais com baixa densidade populacional, a dessalinização solar mostra-se localmente viável, especialmente nas áreas mais densamente povoadas próximas às costas, como na Austrália Oriental, ou em regiões próximas a aquíferos salinos, como no Sul do Afeganistão.

Conclui-se, deste modo, que a dessalinização solar pode desempenhar um papel significativo na abordagem de desafios relacionados à escassez de água potável em várias partes do mundo, especialmente nas regiões mencionadas.

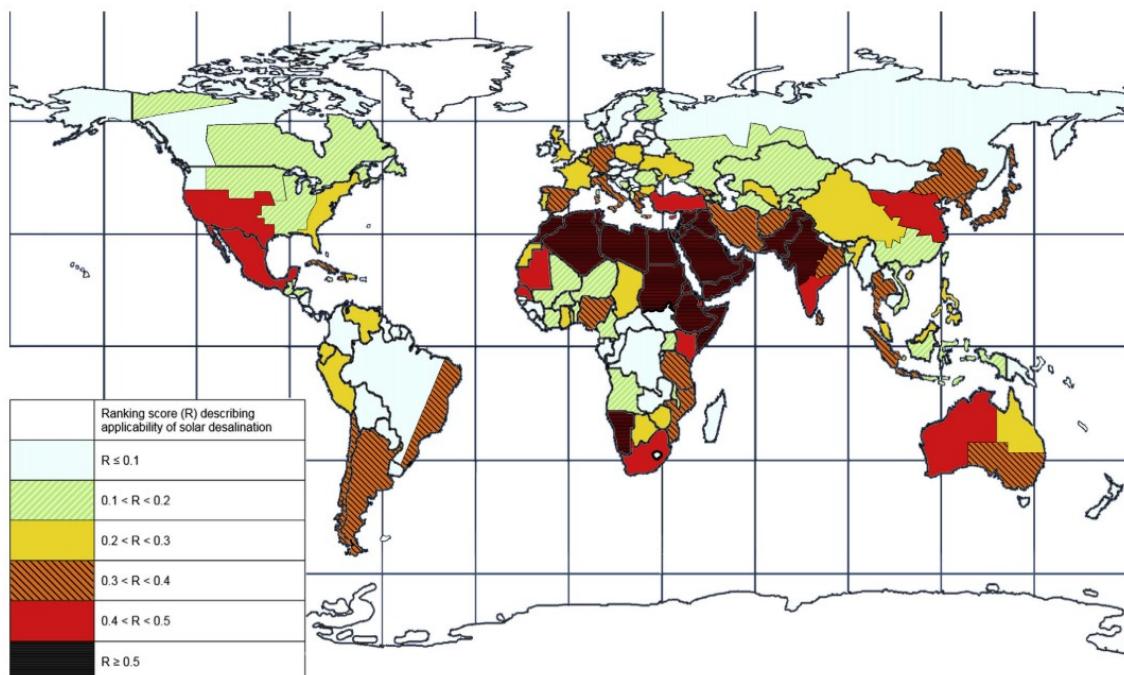


Figura 1.1: Aplicabilidade global da dessalinização solar. Extraído da referência [10].

1.4 Dessalinização para produção de água potável

A dessalinização é o processo de remoção do sal e de outras impurezas da água do mar ou da água salobra para produzir água potável. Existem diferentes métodos de dessalinização que podem ser classificados a partir do seu princípio de operação. Na Figura 1.2 observa-se os métodos de dessalinização categorizados com base no seu princípio de funcionamento: evaporação e condensação; filtração e cristalização. A evaporação e condensação, por sua vez, divide-se em processo mecânico e processo térmico. Um processo mecânico envolve a utilização de energia mecânica para a criação de vácuo, de forma a ocorrer a evaporação da água salina. Por outro lado, um processo térmico envolve o aquecimento da água salina até à sua evaporação, deixando para trás os sais e outras impurezas, seguido pela condensação do vapor para obter a água potável [11, 12]. Estes processos obtêm a sua energia principalmente através da combustão de combustíveis fósseis, ou menos frequentemente da energia solar.

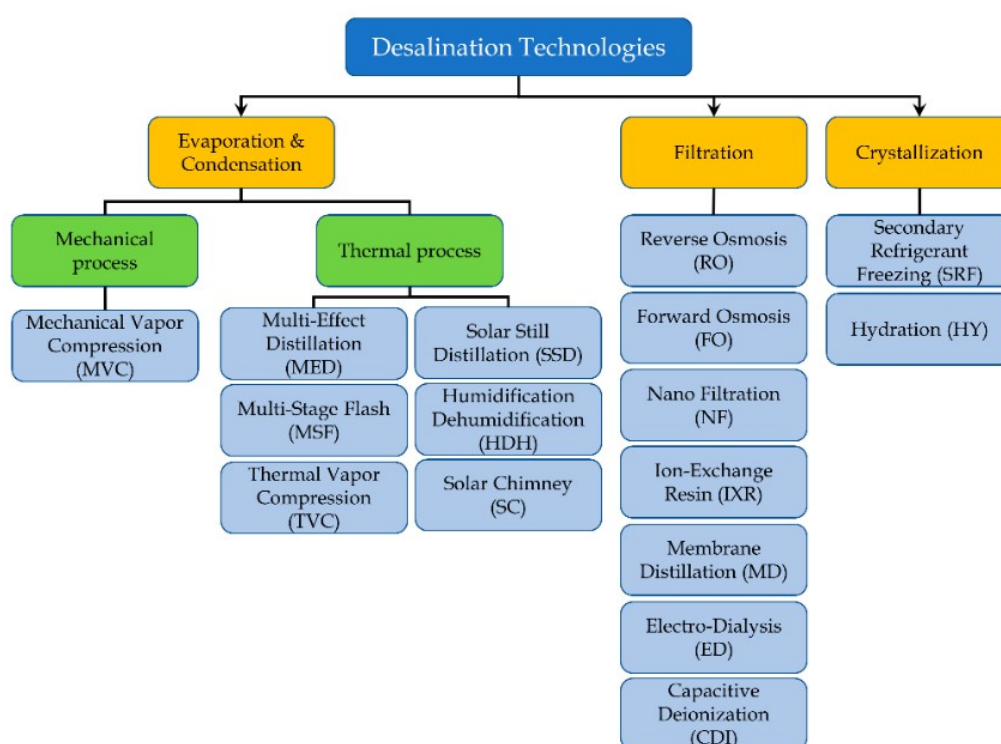


Figura 1.2: Classificação de métodos de dessalinização a partir do princípio de funcionamento. Extraído da referência [11].

Atualmente, os métodos mais amplamente utilizados globalmente são a osmose inversa (RO) e o processo de *flash* multi-etapa (MSF) [11, 12]. É importante destacar que estes métodos frequentemente dependem da queima de combustíveis para a produção de água potável, o que contribui significativamente para as emissões de CO₂ na atmosfera.

Por outro lado, a aplicabilidade do aproveitamento da energia solar no processo térmico da dessalinização é elevada, uma vez que este processo opera a temperaturas

relativamente baixas ou médias [13]. Além disso, a utilização da energia solar apresenta-se como uma alternativa mais sustentável para a dessalinização. Deste modo, a energia solar pode ser diretamente aplicada num equipamento designado por dessalinizador solar para produzir água potável. Esta técnica de dessalinização, que utiliza uma fonte renovável de energia, será detalhadamente explorada no próximo subcapítulo, destacando o processo de funcionamento, os parâmetros que afetam a sua produtividade e as suas vantagens e desvantagens.

1.5 Dessalinizador solar

Os dessalinizadores solares são utilizados para converter água salina em água destilada e destacam-se pela sua simplicidade, tanto no princípio de funcionamento como a nível da sua constituição, apresentando baixo custo de construção e manutenção e não produzem qualquer tipo de poluição associado ao seu funcionamento. Apesar de todos esses benefícios, a sua aplicação permanece restrita, a menos que haja um aumento na produtividade (A produtividade refere-se à quantidade de água destilada por área ocupada pelo dessalinizador, por dia) [14, 15]. Estes equipamentos são capazes de remover da água contaminantes inorgânicos, bacteriológicos, orgânicos, não voláteis e bactérias [4].

Um dessalinizador solar convencional consiste numa bacia com água salina, sendo fechado por uma cobertura transparente (*e.g.* vidro) que promove a transmissão de energia solar para a água. Esta cobertura é inclinada para facilitar o escoamento da água condensada. O seu princípio básico de funcionamento baseia-se no aumento da temperatura da água salina até à sua evaporação e posterior condensação do vapor de água na superfície interior da cobertura, que se encontra mais fria. Deste modo, obtém-se a água destilada que desliza sobre a cobertura pelo o efeito da gravidade, sendo recolhida num canal de destilação [15]. De seguida, é transportada para ser usada em diferentes aplicações, como para a agricultura, indústria ou para consumo humano. Existem vários tipos de dessalinizadores, porém na Figura 1.3 apresenta-se uma representação esquemática da configuração mais básica de um dessalinizador solar.

Os dessalinizadores solares são geralmente classificados em duas categorias principais de acordo com a fonte de energia: ativos ou passivos. Os dessalinizadores solares ativos apresentam componentes externos para fornecer energia térmica adicional, nomeadamente um coletor solar ou energia térmica residual de fábricas de processos industriais. O suplemento de um destes componentes tem como objetivo aumentar a produtividade do dessalinizador, requerendo-se menos calor para ocorrer a evaporação [14, 15]. Na Figura 1.4 consta uma representação esquemática de um dessalinizador solar ativo que incorpora um coletor solar para contribuir no aquecimento da água salina.

Já os dessalinizadores solares passivos utilizam exclusivamente a energia solar para aquecer a água salina, permitindo que os processos de evaporação e condensação ocorram de maneira natural, por meio da convecção natural [14].

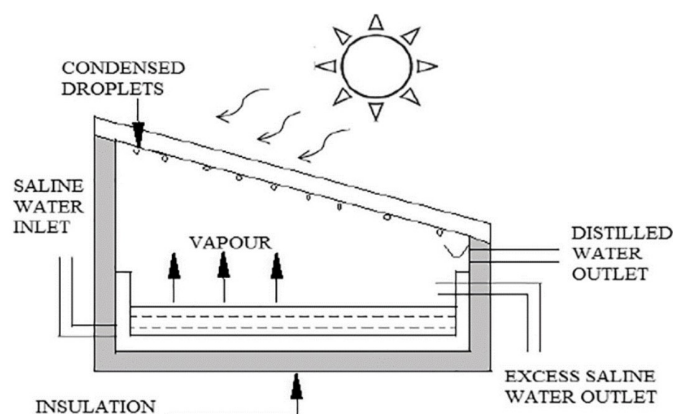


Figura 1.3: Representação esquemática de um dessalinizador solar convencional. Extraído da referência [16].

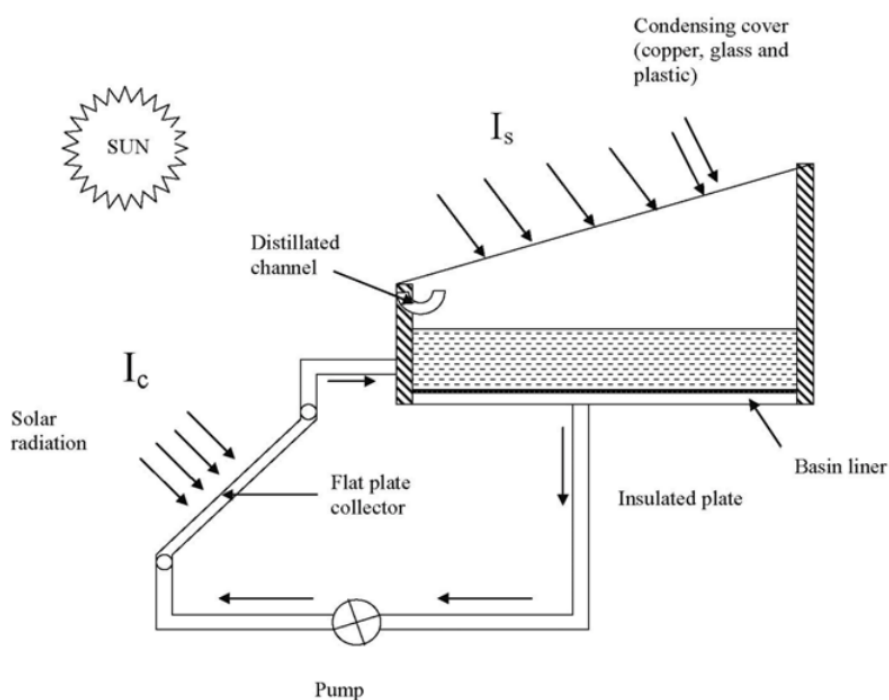


Figura 1.4: Dessalinizador solar ativo com coletor solar incorporado. Extraído da referência [17].

A produtividade dos dessalinizadores solares passivos depende essencialmente de três parâmetros identificados na literatura: parâmetros climáticos, parâmetros de projeto e parâmetros operacionais [14, 18]. Neste sentido, efetuaram-se diversos estudos para compreender de que modo é que estes parâmetros impactam a eficiência do dessalinizador, visando maximizar a sua produtividade.

O primeiro parâmetro refere-se às condições climáticas do local, como a intensidade solar, temperatura ambiente do ar, velocidade do vento, humidade da atmosfera e nebulosidade, sendo por isso não controlável. O segundo parâmetro diz respeito ao *design* do dessalinizador solar, sendo que é possível variar ou modificar este parâmetro. A orientação

do dessalinizador e o ângulo de inclinação da cobertura são alguns exemplos de possíveis variações que podem otimizar a eficiência do dessalinizador [14, 15]. Para além disso, é possível realizar modificações no projeto do dessalinizador, como a incorporação de alhetas, o arrefecimento da cobertura de vidro e utilização de materiais de armazenamento de calor sensível e latente, que permitem aumentar o fluxo de transferência de calor no interior e exterior do dessalinizador [18]. O último parâmetro identificado está relacionado com as condições de operação do dessalinizador como a profundidade da água salina e a salinidade da água.

Os dessalinizadores solares apresentam algumas vantagens e desvantagens, destacando-se as seguintes [14, 18–20]:

- **Vantagens**

- Tecnologia economicamente viável para produção em pequena escala, abastecendo pequenas comunidades, sobretudo em áreas com abundância de radiação solar e onde a água é escassa ou de difícil acesso;
- Apresenta um princípio de funcionamento simples, sem quaisquer partes móveis ou eletrônicas, não requerendo mão de obra qualificada para a sua montagem;
- Manutenção fácil e de baixo custo;
- Permite a sua construção com materiais de baixo custo;
- Utiliza a energia solar, fonte sustentável e renovável, para produzir água;
- Produz água com melhor sabor do que a água destilada comercial, uma vez que a água não é submetida a ebulição, não afetando assim o valor do pH da mesma.

- **Desvantagens**

- Produtividade limitada, com estudos experimentais que mostram que a produção de água em dessalinizadores solares convencionais é relativamente baixa, em comparação com outros métodos de dessalinização tradicionais;
- Requer uma área significativa para a captura da radiação solar, tornando a tecnologia inviável para produção em grande escala, especialmente em áreas urbanas onde o espaço disponível é limitado e dispendioso;
- Elevada dependência das condições meteorológicas do local de instalação.

Atualmente, existe uma ampla variedade de dessalinizadores solares. Nesta dissertação, destacam-se alguns dos principais tipos de dessalinizadores passivos, que podem ser classificados de acordo com o *design* do evaporador e do condensador, opções de armazenamento de calor, geometria da cobertura e quantidade de bacias. Inicialmente,

aborda-se o dessalinizador solar convencional e de seguida os vários tipos descendentes deste.

O desenvolvimento de novos *designs* de dessalinizadores tem como objetivos aumentar a produtividade por minimização das perdas de calor durante o processo de dessalinização, reduzir os custos ao escolher materiais mais económicos sem comprometer o desempenho, adaptar-se a diferentes condições climáticas e geográficas, e ainda personalizar para aplicações específicas, como o uso em pequenas comunidades ou em processos industriais.

De seguida serão apresentados diversos tipos de dessalinizadores solares, destacando as suas principais características que permitem aumentar o desempenho.

1.5.1 Dessalinizador solar de inclinação e bacia simples

O dessalinizador solar de inclinação e bacia simples (Figura 1.3) é o tipo de dessalinizador convencional mais estudado. No entanto, a sua produtividade é baixa devido à perda de calor latente da condensação para a atmosfera através da cobertura de vidro [15, 20]. Como resultado, ao longo das décadas, foram conduzidos estudos para aumentar a produção de água destilada desses dessalinizadores solares.

Peng e Sharshir [21] identificaram cinco categorias que resumem várias modificações ao dessalinizador convencional para aumentar a absorção da radiação solar, a evaporação da água salina ou a condensação do vapor. A Figura 1.5 apresenta o resumo das modificações, sendo estas as seguintes: (1) otimização da estrutura da bacia; (2) otimização da estrutura da cobertura de vidro; (3) adição de componentes passivos; (4) utilização de aparelhos ativos auxiliares; e (5) desenvolvimento e utilização de novos materiais.

A produtividade do dessalinizador pode variar de acordo com a forma da bacia. Já a modificação da cobertura do vidro pode ter um impacto significativo na produtividade, afetando a absorção da radiação solar, a área de condensação e o processo de transferência de calor e massa do dessalinizador solar [21].

A incorporação de componentes passivos, ou seja, componentes que não requerem energia adicional além da energia solar, possibilita o aumento da absorção da energia solar ou melhora a transferência de calor e de massa. Por exemplo, um dessalinizador que incorpora alhetas no revestimento da bacia permite aumentar a área de superfície do absorvedor, localizado na base da bacia, aumentando assim o fluxo de transferência de calor entre a água salina e o absorvedor, resultando num aumento da produtividade do dessalinizador. Para além disso, a utilização de esponjas expande ainda mais a área de exposição [20]. Uma representação desse dessalinizador pode ser observada na Figura 1.6.

Como mencionado anteriormente, a utilização de aparelhos ativos auxiliares, como bombas de circulação, motores ou outros equipamentos que não consomem energia, mas alteram significativamente o processo de dessalinização, como coletores solares, torna o sistema mais complexo e com um custo de investimento inicial superior em comparação com dessalinizadores solares passivos [21]. Apesar disso, estes equipamentos operam a uma temperatura comparativamente mais elevada, logo a taxa de evaporação da água

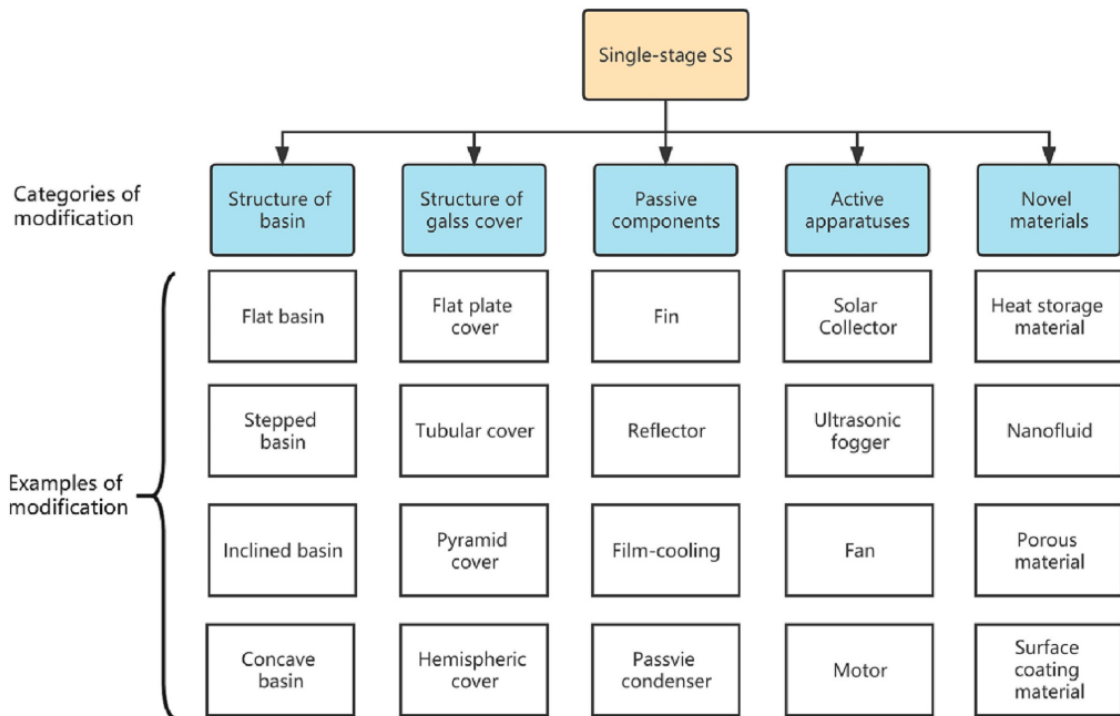


Figura 1.5: Resumo das modificações típicas para aumento do desempenho dos dessalinizadores solares convencionais. Extraído da referência [21].

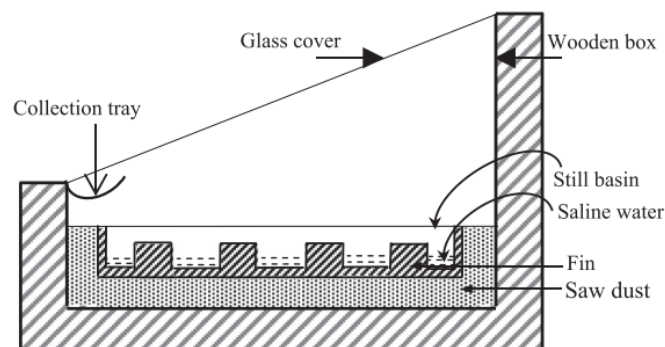


Figura 1.6: Dessalinizador solar de bacia simples integrado com alhetas. Extraído da referência [20].

salina é maior e, conseqüentemente, obtém-se uma maior quantidade de água destilada [4].

Os dessalinizadores solares com novos materiais é igualmente importante e tem sido objeto de investigação mais recente, com foco na melhoria da absorção da energia solar ou na evaporação da água salina utilizando, por exemplo, materiais porosos. Um exemplo é o dessalinizador com ação capilar, onde a água flui através de um material poroso (*wick material*), como algodão ou serapilheira, verificando-se a ação capilar. A água da bacia aquece rapidamente devido ao movimento lento da água no material poroso e vaporiza. Essa modificação aumenta a eficiência em 80-85% em relação a um dessalinizador convencional, pois o material poroso proporciona uma maior capacidade de armazenamento de calor [18, 22]. Na Figura 1.7 é possível observar um dessalinizador de ação capilar.

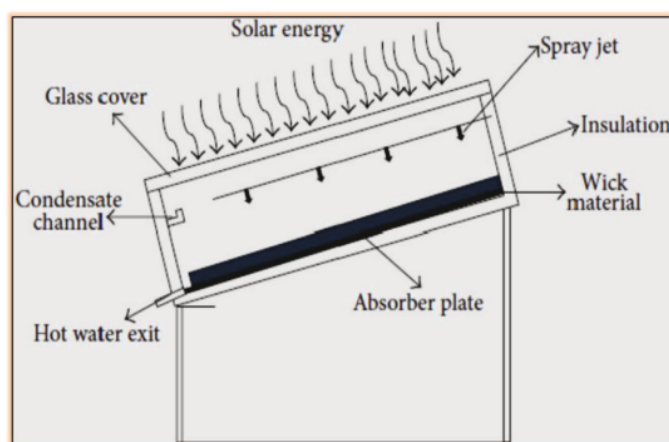


Figura 1.7: Dessalinizador solar de ação capilar. Extraído da referência [22].

É importante de referir que todas as típicas modificações podem ser efetuadas nos tipos de dessalinizadores que se seguem.

1.5.2 Dessalinizador solar de dupla inclinação

O dessalinizador solar de dupla inclinação opera de maneira similar ao dessalinizador convencional, mas possui duas superfícies de condensação, ou seja, duas coberturas de vidro, capturando a radiação solar de diferentes direções. Essa configuração proporciona uma área de condensação maior, resultando numa maior produção de água destilada [23]. A Figura 1.8 apresenta um dessalinizador solar passivo de bacia simples com dupla inclinação.

Este tipo de dessalinizador é o mais recomendado para pequenas comunidades, considerando a relação custo-produtividade [13].

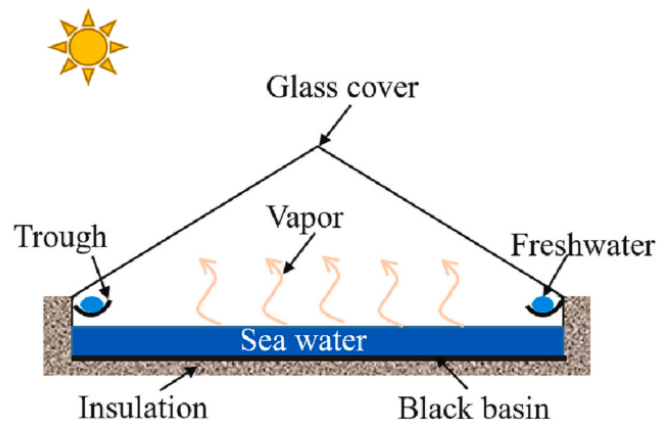


Figura 1.8: Dessalinizador solar passivo de bacia simples e dupla inclinação. Extraído da referência [21].

1.5.3 Dessalinizador solar de multi-efeitos

A utilização de múltiplas bacias num só dessalinizador possibilita a dessalinização de efeito múltiplo, resultando numa produção significativamente mais elevada quando comparada com o dessalinizador convencional [24]. Num dessalinizador de multi-efeitos, o calor latente de condensação da água libertado pela cobertura de vidro inferior (efeito anterior) é aproveitado na bacia superior (efeito seguinte) para aquecer a água dessa bacia, conduzindo assim o processo subsequente de evaporação [15, 20, 24].

As Figuras 1.9 e 1.10 apresentam um dessalinizador solar de duplo efeito e de triplo efeito, respetivamente.

O número de efeitos pode ser tão grande quanto desejado; no entanto, é crucial considerar as desvantagens deste tipo de dessalinizador, que incluem um aumento da manutenção e custos associados à adição de bacias [24].

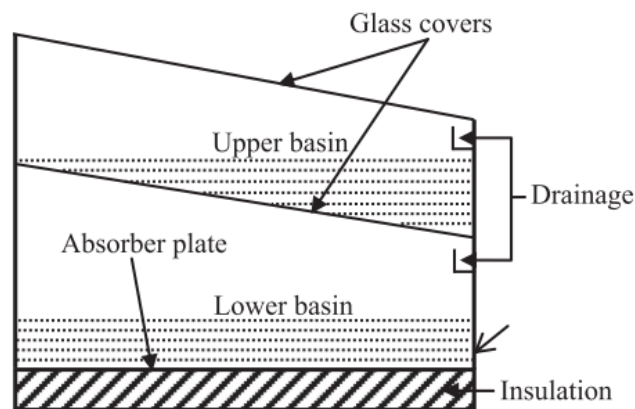


Figura 1.9: Dessalinizador solar passivo de duplo efeito e inclinação simples. Extraído da referência [20].

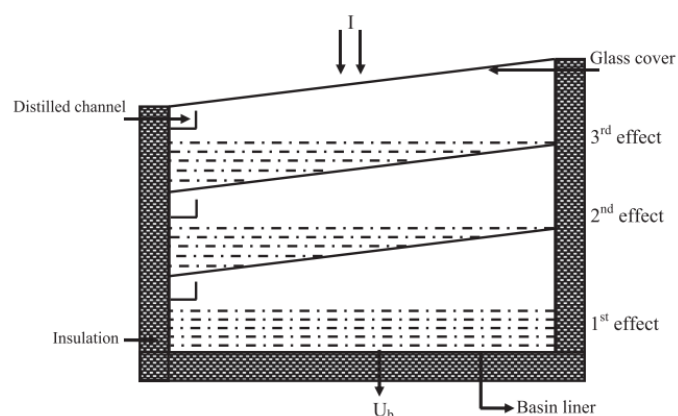


Figura 1.10: Dessalinizador solar passivo de triplo efeito e inclinação simples. Extraído da referência [20].

1.5.4 Dessalinizador solar do tipo cascata

O dessalinizador solar do tipo cascata surgiu como resposta à dificuldade em manter uma profundidade mínima de água salina no dessalinizador, um parâmetro relevante que impacta a produtividade deste. A configuração deste dessalinizador solar é similar ao dessalinizador convencional, contudo, a parte interna de absorção é composta por vários degraus, formando uma estrutura escalonada no seu interior. Essa abordagem permite manter uma profundidade mínima de água salina sem a formação de regiões secas na superfície da bacia [20, 23].

Neste tipo de dessalinizador, as temperaturas nas superfícies da água e da cobertura são mais elevadas em comparação com o dessalinizador convencional, devido à configuração escalonada da bacia, resultando numa maior taxa de evaporação e condensação [23]. Na Figura 1.11 apresenta-se uma representação esquemática de um dessalinizador solar do tipo cascata.

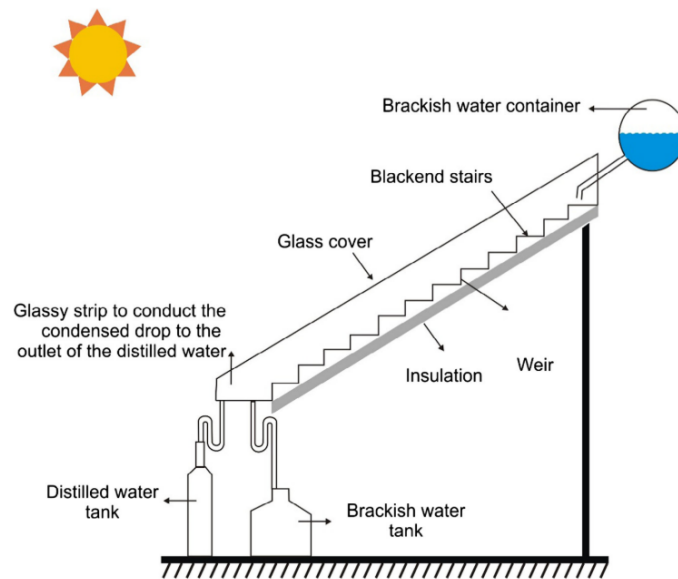


Figura 1.11: Dessalinizador solar passivo do tipo cascata. Extraído da referência [23].

1.5.5 Dessalinizador solar de absorsor invertido

O dessalinizador solar de absorsor invertido integra um concentrador solar num dessalinizador com uma ou mais bacias. Este concentrador é constituído por um refletor curvo coberto por um vidro, inserido sob a bacia do dessalinizador, permitindo que a radiação solar passe pelo vidro e seja refletida de volta para a bacia na forma de radiação solar concentrada. Isto possibilita o aquecimento da superfície inferior da bacia, reduzindo-se a perda de calor nesta zona. Ao incluir este sistema, obtém-se praticamente o dobro da produção de água destilada em comparação com dessalinizadores convencionais [14, 20, 25, 26]. Na Figura 1.12 apresenta-se um dessalinizador solar de absorsor invertido de duplo efeito, que proporciona um aumento ainda maior na produção de água destilada.

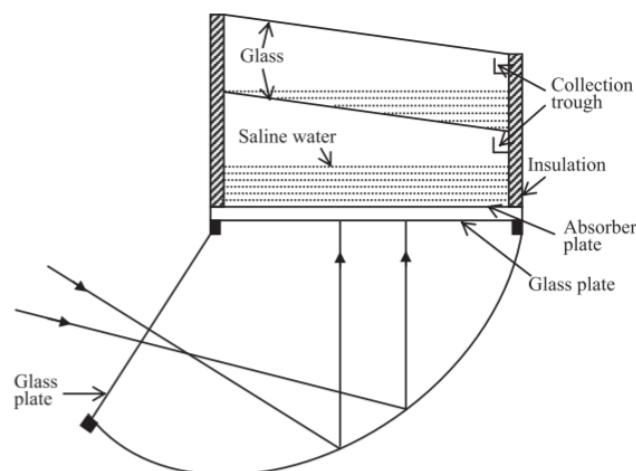


Figura 1.12: Dessalinizador solar passivo de duplo efeito e de absorsor invertido. Extraído da referência [20].

1.5.6 Dessalinizador solar com *designs* avançados

No decorrer dos anos, diversos investigadores desenvolveram dessalinizadores com outros *designs* mais complexos para aprimorar a produtividade. Dentro das inovações mais notáveis, destacam-se os dessalinizadores solares tubulares, verticais e hemisféricos. As Figuras 1.13, 1.14 e 1.15 exibem representações esquemáticas de dessalinizadores solares passivos do tipo tubular, vertical e hemisférico, respectivamente.

O dessalinizador solar tubular é caracterizado pelo formato cilíndrico, que utiliza tubos transparentes para capturar a luz solar. Esses tubos concentram a radiação solar, aumentando a temperatura na área de evaporação. A água evaporada, condensa na superfície interior do tubo e, posteriormente, desloca-se até à zona inferior do mesmo, por parte da ação da gravidade. Este *design* é instalado diretamente em condutas subterrâneas que conectam a locais contendo água salina, permitindo que a água destilada seja fornecida diretamente nas raízes das plantas por infiltração no solo. Estudos apontam que este tipo de dessalinizador é particularmente eficaz em regiões com elevada exposição solar, sendo aplicado com sucesso na irrigação de áreas desertas [14, 20].

O dessalinizador solar vertical é uma abordagem inovadora que adota uma estrutura elevada verticalmente para maximizar a exposição à luz solar. Desenvolvido para oferecer maior flexibilidade operacional, o dessalinizador vertical é especialmente conveniente em ambientes urbanos, nos quais a instalação de dessalinizadores com bacia é inviável devido à falta de espaço e ao custo elevado dessas áreas [20].

O dessalinizador solar hemisférico apresenta uma cobertura em forma de semiesfera, maximizando a captura da radiação solar durante todo o dia. A forma curva permite uma distribuição uniforme da luz solar, otimizando a eficiência do processo de dessalinização [24].

Outro tipos de dessalinizadores solares com múltiplas inclinações seguiram o mesmo princípio do dessalinizador solar hemisférico, procurando capturar a radiação solar de diferentes direções [24].

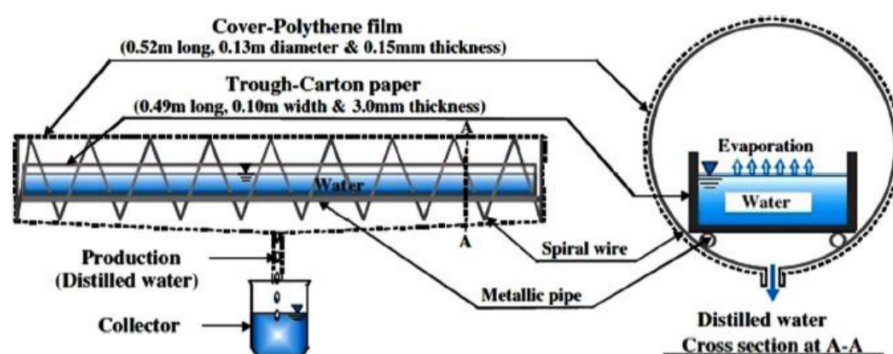


Figura 1.13: Dessalinizador solar passivo tubular. Extraído da referência [14].

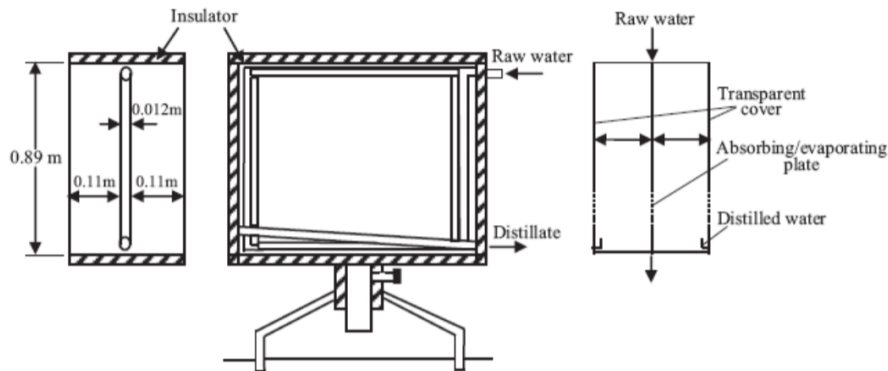


Figura 1.14: Dessalinizador solar passivo vertical. Extraído da referência [14].

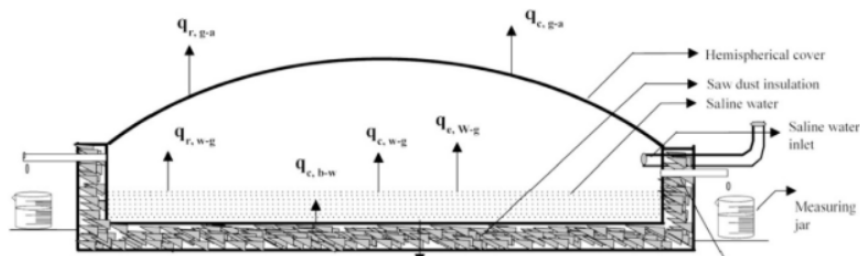


Figura 1.15: Dessalinizador solar passivo hemisférico. Extraído da referência [4].

1.6 Estudos numéricos e experimentais

Este subcapítulo tem como objetivo apresentar uma compilação de estudos experimentais e numéricos relevantes na área, organizados por ordem cronológica e destacando os principais objetivos e conclusões de cada autor.

Em 2015, Edalatpour *et al.* [27] examinaram o impacto da instalação de partições no interior de um dessalinizador convencional, no sentido de aumentar a produtividade do mesmo. Para tal, recorreram a simulações numéricas, adotando uma abordagem bidimensional e considerando um escoamento laminar em regime permanente. As partições foram inseridas verticalmente, separadamente, nas parede inferior e superior do dessalinizador.

Os resultados analisados incidiram nas distribuições de temperatura e da função potencial com várias configurações de partições. Nas Figuras 1.16(a) e 1.16(b) apresentam-se as distribuições de temperatura e da função potencial, respetivamente, para um dessalinizador com uma partição instalada na parede superior do dessalinizador, a uma distância de 0,1 m da origem e com uma altura de partição de 5 cm.

O estudo obteve as seguintes conclusões: i) sem a presença das partições, observou-se a formação de um grande vórtice, prolongando assim o tempo necessário para a transferência de calor entre a superfície da água e a cobertura de vidro. Este fenómeno resulta numa diminuição da eficiência e da produtividade do sistema; ii) com a instalação das partições, verificou-se a formação de pequenos vórtices e plumas térmicas descendentes, resultando numa diminuição do tempo necessário para a troca de calor entre as superfícies.

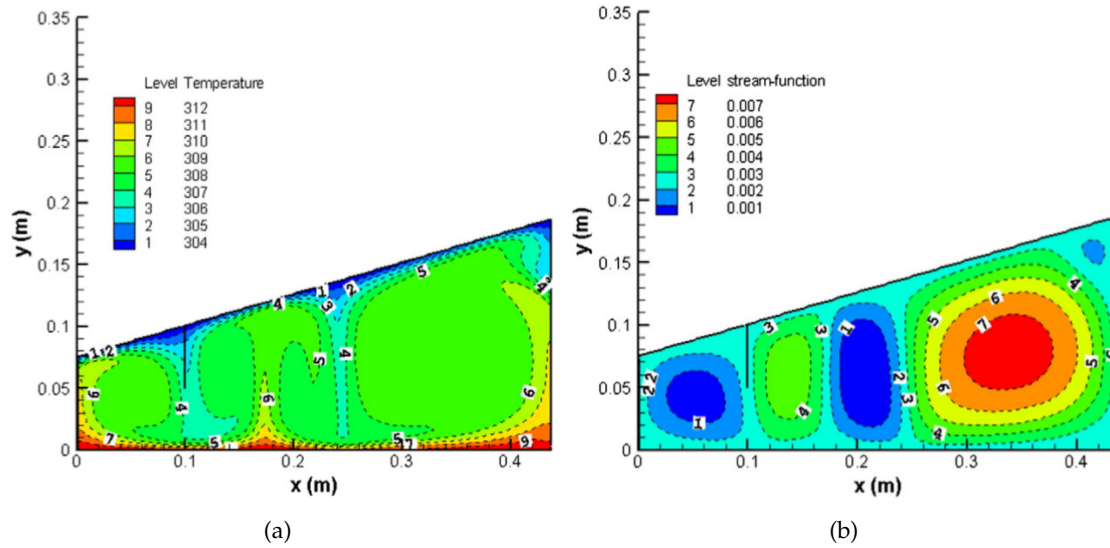


Figura 1.16: Distribuições de temperatura (a) e da função potencial (b) da partição instalada a $x = 0,1$ m. Extraído da referência [27].

Este cenário reflete-se numa maior produtividade e eficiência do processo; iii) não foi encontrada uma relação direta entre a altura das partições e a sua localização dentro do dessalinizador no número médio de Nusselt; e iv) para alcançar a máxima eficiência, a instalação das partições deve ser feita a uma distância de $x = 0,1$ m, com uma altura da partição de 5 cm.

No estudo realizado por Feilizadeh *et al.* (2017) [28], foi conduzida uma investigação sobre o impacto do comprimento, altura e largura das paredes de um dessalinizador solar na otimização da produção de água destilada. Para a realização desta pesquisa foi desenvolvido um novo modelo matemático de radiação que considera separadamente os componentes da irradiação solar (irradiação direta e difusa). A irradiação solar difusa de cada parede do dessalinizador foi considerada através da geometria do dessalinizador e da irradiância solar direta. O modelo também incorporou a influência do tamanho das paredes do dessalinizador solar na irradiância solar absorvida pela água salina, uma vez que a sombra criada pelas paredes pode afetar esta irradiância.

Através de um estudo experimental, foi demonstrado que as previsões do modelo matemático coincidem com os valores da execução prática. A análise dos resultados experimentais permitiu aos autores estabelecer algumas correlações, evidenciando que o aumento da altura do dessalinizador solar está relacionado com a diminuição da eficiência do mesmo. Isso ocorre porque o aumento da altura das paredes faz com que mais energia seja absorvida por estas, criando mais sombras e reduzindo a energia recebida pela água, o que diminui a produção de água destilada. No que diz respeito ao comprimento, um aumento do mesmo resultou na redução das sombras nas paredes laterais, contribuindo para o aumento da eficiência do dessalinizador. Por fim, ao aumentar a largura do dessalinizador, observa-se um aumento da eficiência até um ponto ótimo,

seguido por um declínio. Isso ocorre devido ao objetivo de manter o ângulo da cobertura de vidro, o que implica aumentar a altura da parede traseira do dessalinizador solar quando é aumentada a largura do mesmo.

Em 2018, Rashidi *et al.* [29] utilizaram o método de volume de fluido (VoF) para estudar numericamente a utilização de um nanofluido, no sentido de maximizar a produtividade de um dessalinizador convencional. O nanofluido é produzido a partir da adição de nanopartículas de Al_2O_3 . Os autores também avaliaram o modelo desenvolvido do ponto de vista da segunda lei da termodinâmica, recorrendo à análise de geração de entropia térmica e viscosa.

A metodologia envolveu o uso do método VoF, possibilitando a modelação da mudança de fase da água líquida para o vapor de água e vice-versa, bem como a observação da superfície livre entre as duas fases nas simulações. Os fluidos no interior do dessalinizador são a água líquida na bacia com 2 cm de altura e o ar húmido na parte restante. Como não foi considerada a transferência de calor por radiação, necessitou-se de definir as temperaturas das superfícies da água e do vidro. Adicionalmente, foi assumido um escoamento bidimensional, laminar e em regime transiente.

Como resultados foram analisadas as distribuições de fração de volume da água líquida e do vapor de água no decorrer do tempo, tanto para o dessalinizador com o nanofluido, como para o dessalinizador convencional para efeitos de comparação. Na Figura 1.17 apresentam-se as distribuições mencionadas, onde é possível observar que, inicialmente, apenas é visível água no estado líquido e, no decorrer da simulação, ocorre a formação de vapor de água. Este vapor surge da superfície da água e é transportado para junto da cobertura de vidro devido à convecção natural e à força de impulsão gerada no dessalinizador. Ao entrar em contacto com a cobertura de vidro, que está a uma temperatura mais baixa, o vapor condensa, produzindo-se a água destilada.

Neste estudo numérico conclui-se que os valores das transferências de calor por evaporação e condensação aumentam com a incorporação do nanofluido, pois, constatou-se que a taxa de evaporação foi maior no dessalinizador com o nanofluido. A produtividade e o número de Nusselt aumentaram 25% e 18%, respetivamente, com o aumento da fração de volume de nanopartículas num intervalo de 0% a 5%. O valor máximo de geração de entropia térmica ocorreu nas regiões próximas à cobertura de vidro e à base da bacia, devido aos elevados gradientes de temperatura nessas regiões. Ainda nestas regiões, observou-se valores elevados da geração de entropia viscosa, por conta de um maior gradiente de velocidade nas regiões. Por último, conclui-se que o aumento da quantidade de nanopartículas para o mesmo intervalo mencionado, aumentou as gerações de entropia térmica e viscosa em 25% e 95%, respetivamente.

Yan *et al.* (2020) [30] recorreram à análise de CFD para estudar os efeitos no escoamento do ar húmido, sob a condição de vácuo e a influência de dois parâmetros no desempenho de um dessalinizador solar tubular. Estes parâmetros consistem na relação do raio da bacia com água e do raio geral do dessalinizador e na profundidade da água na bacia. Nas Figuras 1.18(a) e 1.18(b) apresentam-se o dessalinizador solar tubular com a incorporação

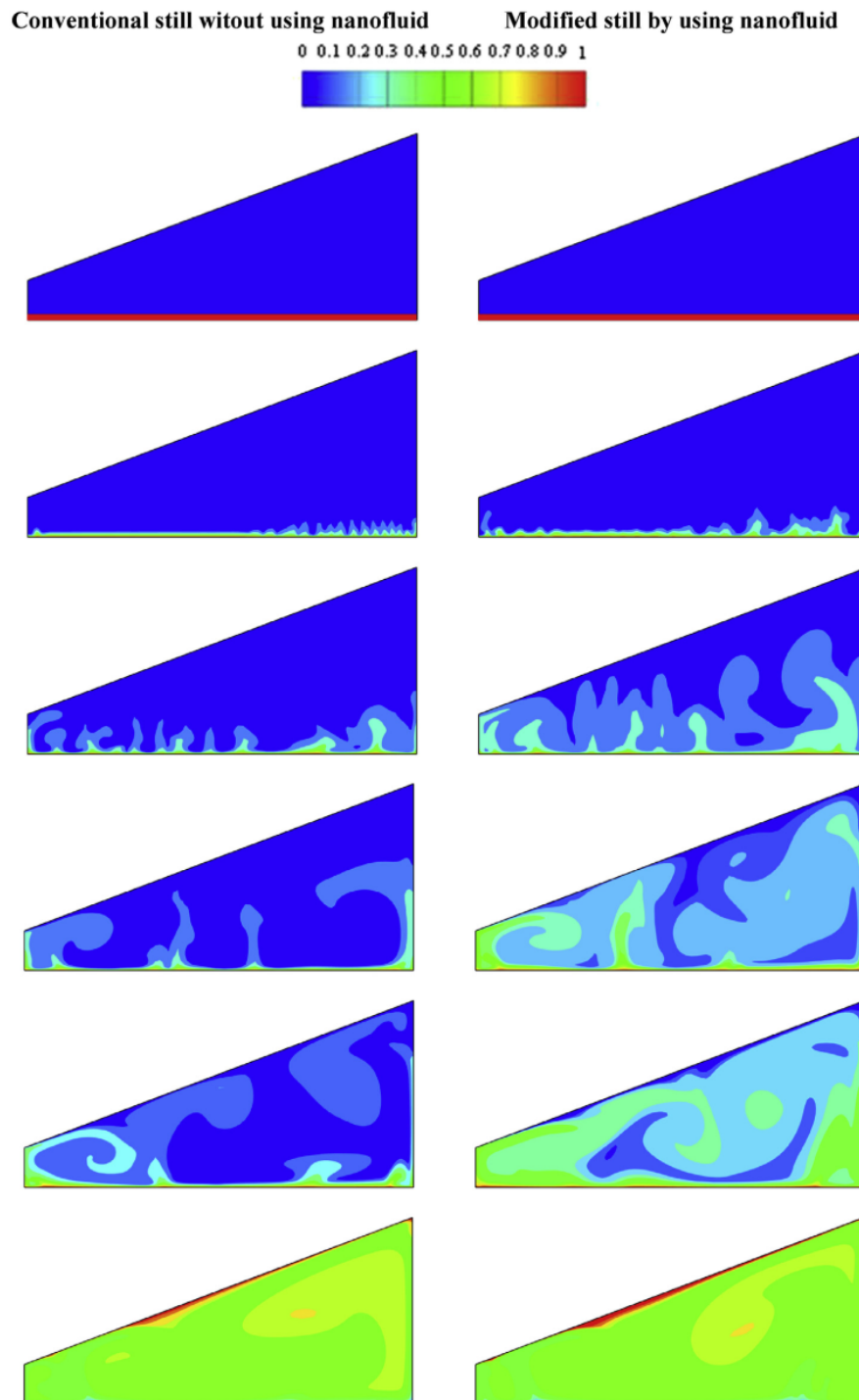


Figura 1.17: Distribuições de fração de volume da água líquida e do vapor de água ao longo do tempo no dessalinizador convencional e no modificado com nanofluido. Extraído da referência [29].

da bomba de vácuo e a secção transversal do mesmo, respetivamente. Neste estudo foi utilizado um modelo de *CFD* transiente, com escoamento laminar e bidimensional.

Os resultados analisados consistiram na produtividade e na velocidade do escoamento

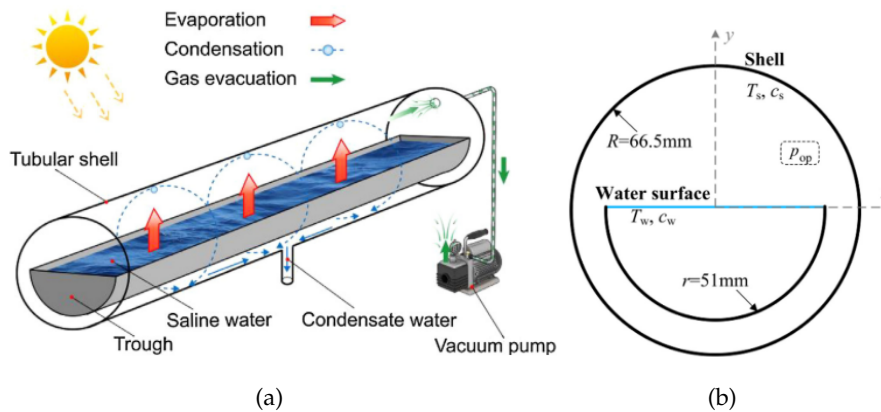


Figura 1.18: Representação esquemática do dessalinizador tubular com a incorporação de uma bomba de vácuo (a) e da sua secção transversal (b). Extraído da referência [30].

no interior do dessalinizador a diferentes pressões de operação. Na Figura 1.19(a) observa-se que, a uma pressão de 101 kPa, o máximo da velocidade do escoamento dá-se no espaço existente entre os dois vórtices que rodam em direções opostas. Na Figura 1.19(b), verifica-se também um aumento na velocidade do escoamento a uma pressão de operação de 40 kPa.

As principais conclusões retiradas deste estudo foram as seguintes: i) o vácuo no interior do dessalinizador solar tubular permitiu maiores velocidades do escoamento do ar húmido e uma maior difusão do vapor de água. Consequentemente, a produtividade aumentou em mais de 50% para valores abaixo dos 60 kPa; ii) a produtividade diminuiu 30% e 38% quando ocorreu uma diminuição da profundidade da água de 20% do valor do raio da bacia e quando, a uma pressão de operação de 20 kPa a relação de raios se alterou de 0,6 para 0,9, respetivamente; iii) o escoamento em regime transiente foi observado quando o número de Rayleigh térmico ultrapassou o valor 10^5 , a profundidades de água de 40% e 60% do valor do raio da bacia; e iv) o número de Nusselt calculado com a correlação desenvolvida no estudo apresentou uma elevada precisão quando comparado com os resultados experimentais.

Nadgire *et al.* (2020) [31] realizaram um estudo experimental e numérico com o objetivo de avaliar a produtividade de um dessalinizador solar passivo de duplo efeito e comparar os resultados obtidos experimentalmente e numericamente. No estudo experimental, foram medidas as temperaturas da cobertura de vidro da bacia superior e inferior a cada hora. De seguida, no estudo numérico foi desenvolvido um modelo tridimensional, usando o método de múltiplas fases (*VoF*) para representar as três fases: ar, água líquida e vapor de água. O estudo considerou um escoamento turbulento com o modelo de turbulência $k-\epsilon$ (*RNG*) e as simulações realizaram-se em regime transiente.

Os autores concluíram que o dessalinizador solar de duplo efeito apresenta uma produtividade superior em comparação com o dessalinizador convencional, devido à utilização do calor latente de condensação da bacia inferior para elevar a temperatura da

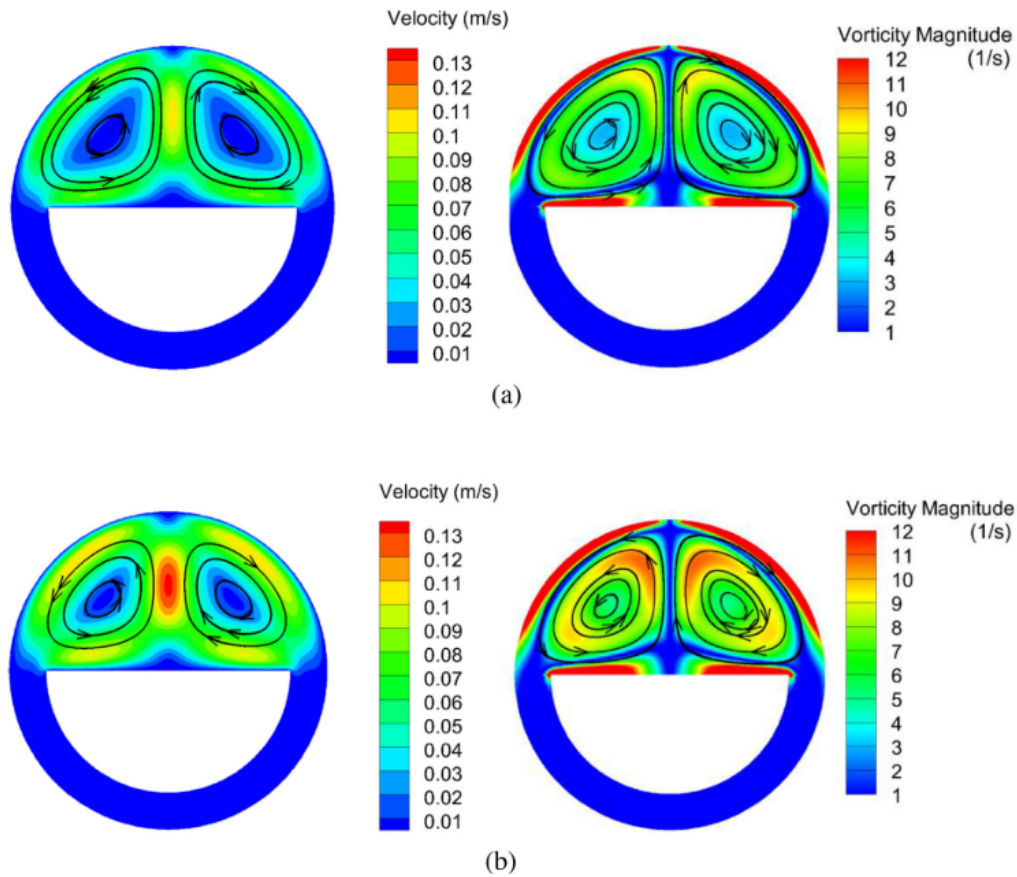


Figura 1.19: Distribuições de velocidade e magnitude dos vórtices com linhas potenciais à pressão de operação de 101 kPa (a); e 40 kPa (b). Extraído da referência [30].

água na bacia superior. Na análise numérica, os perfis de temperatura do vidro indicaram que as temperaturas na superfície interior do vidro de condensação são relativamente mais baixas do que as temperaturas da superfície exterior. Isto ocorre porque a água destilada escorre na superfície interna do vidro, movendo-se da parte mais alta para a parte mais baixa da cobertura de vidro, provocando o seu arrefecimento. No estudo experimental e no numérico, a quantidade de água destilada por unidade de área foi de $3,2 \text{ L m}^{-2}$ e $3,74 \text{ L m}^{-2}$, respetivamente, o que demonstra uma concordância entre as previsões numéricas e os resultados experimentais.

Keshtar *et al.* (2020) [32] utilizaram um método numérico em regime transiente para um para um dia completo, a fim de investigar a influência de parâmetros de projeto, climáticos e operacionais na produtividade do dessalinizador solar passivo de bacia e inclinação simples (convencional). Esses parâmetros são a velocidade do vento, a espessura da cobertura de vidro, a profundidade da água, a distância da água ao vidro e a inclinação da cobertura. Adicionalmente, foi objetivo de estudo, avaliar os efeitos do número de degraus e a influência do parâmetro da distância da água ao vidro na produtividade de um dessalinizador solar do tipo cascata.

Para implementar o método adotado, os autores consideraram apenas as condições

climáticas, introduzindo-se dados meteorológicos instantâneos reais por meio de funções definidas pelo utilizador (*UDF*). Desta forma, incorporaram os parâmetros de entrada, como a irradiância solar na superfície da cobertura de vidro e a temperatura ambiente para cada espaço de tempo.

Os resultados obtidos incluíram as distribuições de temperatura, da fração mássica do vapor de água e da velocidade e perfis que mostram a variação da quantidade de água destilada por metro quadrado ao longo do tempo, tendo em conta a influência dos parâmetros anteriormente mencionados. Na Figura 1.20 apresenta-se a produtividade horária do dessalinizador convencional e do tipo cascata.

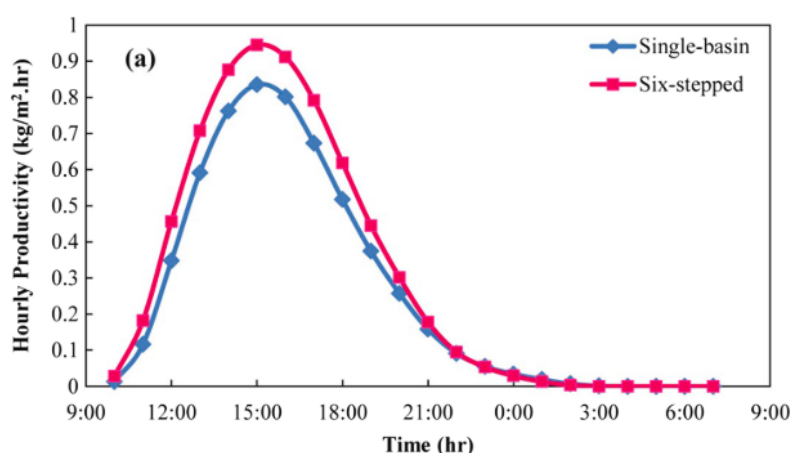


Figura 1.20: Comparação da produtividade horária do dessalinizador convencional (*single-basin*) e do dessalinizador do tipo cascata (*six-stepped*). Extraído da referência [32].

As conclusões obtidas deste estudo numérico para o dessalinizador convencional são as seguintes: i) o aumento da velocidade do vento de 1 m s^{-1} para 6 m s^{-1} , resulta num aumento de 14,4% na produtividade; ii) foi determinado que a profundidade ideal da água para maximizar a produtividade do dessalinizador é de 2 cm; iii) a distância ótima entre a superfície da água e a cobertura de vidro para máxima produtividade é de 8 cm; no entanto, reduzir essa distância para 4 cm ou aumentá-la para 12 cm resulta numa diminuição de 2,7% e 13,5%, respetivamente; iv) observou-se um aumento de 3,5% na produtividade ao considerar uma espessura de cobertura de vidro de 2 mm em comparação com 4 mm; e v) a inclinação ideal da cobertura de vidro, que corresponde à latitude do local do estudo, foi de 30° . No caso do segundo tipo de dessalinizador estudado revelou-se mais benéfico, a nível da produtividade, um dessalinizador com seis degraus no seu interior. Por fim, verificou-se que uma distância da superfície da água à cobertura de vidro de 2 cm, permite aumentar a produtividade em 17,4% comparado com o dessalinizador convencional.

Ahmed *et al.* (2021) [33] realizaram um estudo experimental, no qual desenvolveram um concentrador solar parabólico para utilizar a radiação solar concentrada num dessalinizador solar tubular de duplo efeito. O principal objetivo desta pesquisa é analisar o impacto da radiação solar concentrada na produtividade do dessalinizador mencionado.

O concentrador solar parabólico concentra a radiação solar num ponto específico

do dessalinizador, aquecendo a água salina nele contida. O concentrador foi ajustado manualmente através dos seus dois ângulos, segundo os eixos vertical e horizontal a cada 15 minutos para acompanhar o movimento solar. Na Figura 1.21, é apresentada uma secção transversal do sistema completo, que inclui o dessalinizador e o concentrador. A produção de água utilizando este dessalinizador solar de duplo efeito ocorre em duas etapas. Na primeira etapa, o calor latente libertado durante a condensação da água no primeiro efeito é transferido para a água salina do segundo efeito, causando a sua evaporação. Na segunda etapa, o vapor do segundo efeito condensa na superfície do tubo exterior e desce até o canal de extração. Esta abordagem possibilita o aumento da quantidade de água destilada por unidade área e de tempo.

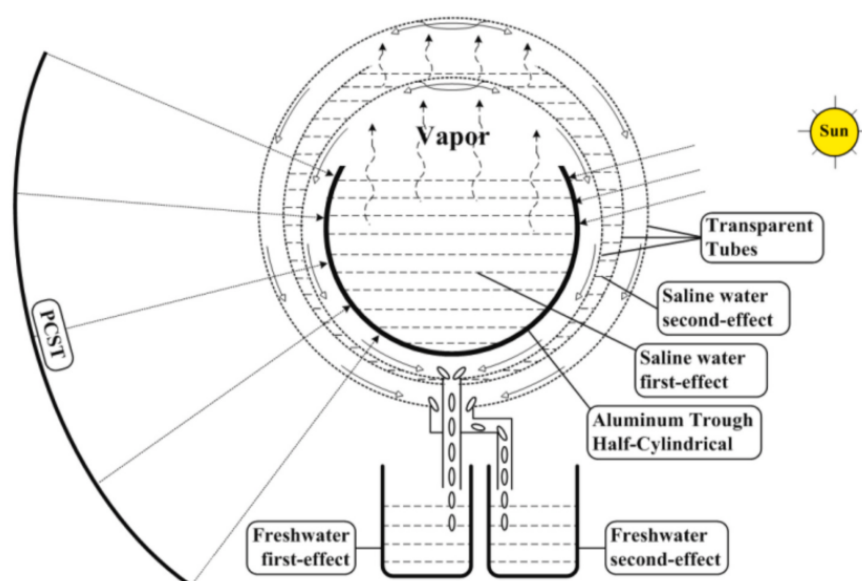


Figura 1.21: Esquema do sistema que inclui um dessalinizador solar tubular de duplo efeito e um concentrador solar parabólico. Extraído da referência [33].

As conclusões do estudo foram as seguintes: i) o uso do concentrador aumentou a produtividade do dessalinizador em 13% a 50% em comparação com um dessalinizador solar convencional de múltiplos efeitos; ii) a produtividade do dessalinizador solar estudado foi de $5,2 \text{ L m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, demonstrando-se suficiente para atender às necessidades básicas de uma pessoa; iii) a produtividade aumentou em 31,65% e a eficiência térmica em 26,65% quando comparada com um dessalinizador de simples efeito; e iv) a utilização do segundo efeito resultou num aumento de 25,8% na quantidade total de água destilada pelo dessalinizador em estudo.

Moustafa *et al.* (2022) [34] efetuaram um estudo experimental, tendo como foco dois objetivos principais. O primeiro visa otimizar a produção de água destilada num dessalinizador solar tubular, incorporando um aquecedor elétrico na placa de absorção localizada na bacia, alimentado por uma bateria carregada por um painel solar fotovoltaico. A avaliação do desempenho desta otimização incluiu os valores de água destilada produzida, energia consumida e eficiência energética do sistema, sendo esta última calculada em

relação à quantidade de água destilada produzida, calor latente de vaporização, área da bacia e irradiância solar. O segundo objetivo relaciona-se com o desenvolvimento de um modelo de inteligência artificial, treinado com dados experimentais, para prever os valores de eficiência térmica do sistema e produção de água destilada. O esquema da instalação, apresentado na Figura 1.22, compreende os dois dessalinizadores solares tubulares mencionados, um convencional e outro modificado com a adição de um aquecedor elétrico alimentado por bateria carregada pelo painel solar.

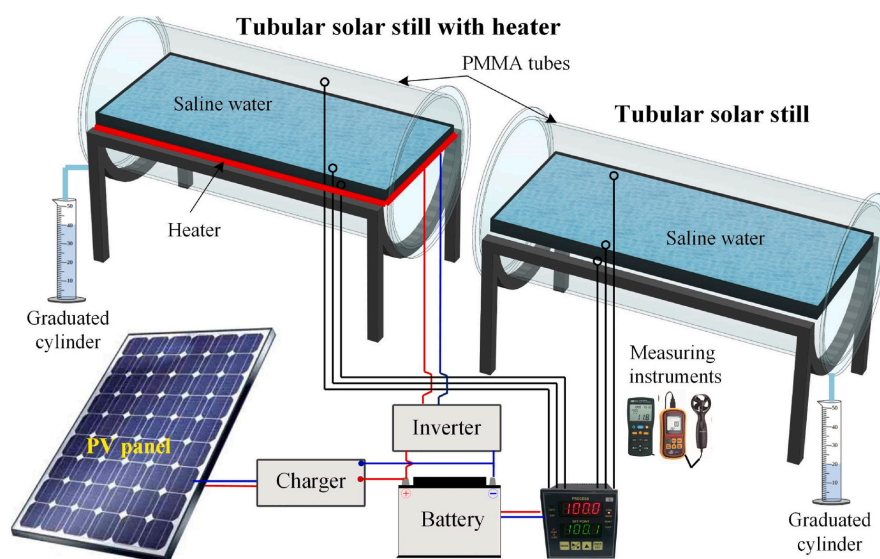


Figura 1.22: Representação esquemática da instalação experimental. Extraído da referência [34].

Os resultados obtidos neste estudo, demonstram que, utilizando o dessalinizador tubular modificado, é possível verificar um aumento de 31,85% na produção média de água destilada, sendo que o dessalinizador solar modificado acumulou em média uma produtividade de $3,41 \text{ L m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, em comparação com os $2,58 \text{ L m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ do dessalinizador convencional tubular. Além disso, o dessalinizador solar modificado demonstrou uma eficiência energética diurna superior, atingindo 38,61%, enquanto que o convencional alcançou apenas 30,67%. O aumento do aquecimento da água da bacia pelo aquecedor elétrico resultou numa maior evaporação e circulação do ar húmido no interior do dessalinizador em estudo. Numa última análise, a utilização do algoritmo de inteligência artificial também se mostrou bastante útil na realização de previsões precisas, destacando-se pela elevada exatidão em comparação com outros modelos existentes.

Num estudo numérico conduzido por Hassanain *et al.* (2023) [35] foi investigada a influência da modificação do *design* da base de absorção, localizada na parte inferior da bacia do dessalinizador convencional, na sua produtividade. O estudo adotou uma abordagem simples, através da modificação no *design*, baseando-se na utilização de diferentes formas e tamanhos de geometrias de aço inoxidável distribuídas na base de absorção. O objetivo desta modificação consiste na ampliação da superfície de evaporação,

provocando um aumento na eficiência de absorção da radiação solar. Deste modo, foram selecionadas três geometrias distintas com dois volumes diferentes, pequeno ou grande: esferas, cilindros horizontais, cilindros verticais e cones, sendo este último com um volume aproximadamente semelhante ao das esferas de grande volume ou dos cilindros de grande volume.

Os autores do estudo concluíram que a mudança na forma da geometria não afetava significativamente a produção de água destilada no dessalinizador convencional. No entanto, a mudança no volume da geometria produziu um aumento considerável. A produtividade máxima foi atingida aquando da utilização da geometria em forma de cone (Figura 1.23), com um aumento de 38,24% em relação ao dessalinizador convencional. Com isto, pode-se inferir que a modificação no *design* da base de absorção do dessalinizador com geometrias de aço inoxidável, permite um aumento na taxa de evaporação, resultando numa maior produtividade.

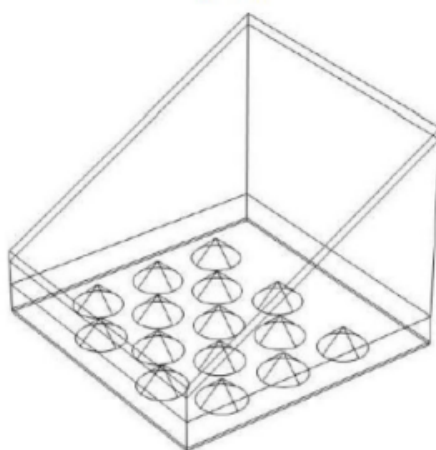


Figura 1.23: Dessalinizador convencional com a distribuição de geometrias em forma de cone. Extraído da referência [35].

1.7 Objetivos

O primeiro objetivo desta dissertação é investigar a utilização de diferentes modelos matemáticos para a previsão numérica do desempenho de um dessalinizador solar convencional passivo.

Pretende-se desenvolver e validar dois modelos matemáticos (níveis de modelação) frequentemente considerados na literatura para um dessalinizador solar convencional. De seguida, procede-se à escolha de um modelo, mediante a comparação do desempenho preditivo de cada modelo.

As simulações numéricas incidem sobre quatro tipos de dessalinizadores solares passivos: i) dessalinizador de bacia e inclinação simples (*single-slope basin-type solar still*); ii) dessalinizador de duplo efeito e inclinação simples (*single-slope double-effect solar still*); iii) dessalinizador de absorsor invertido (*inverted absorber solar still*); e iv) dessalinizador

de duplo efeito e de absorvedor invertido (*inverted absorber double-effect solar still*). Estas simulações são conduzidas com base nas condições climáticas típicas de um dia em Portugal, com o objetivo de avaliar o potencial desta tecnologia no país.

No caso do primeiro tipo de dessalinizador, pretende-se investigar o efeito de diferentes parâmetros climáticos, operacionais e de projeto na sua produtividade. Em particular, analisa-se a influência de diferentes velocidades do vento, profundidades da água salina na bacia, espessuras da cobertura de vidro e inclinações dessa cobertura no desempenho do dessalinizador solar convencional. No fim destas simulações, pretende-se avaliar o desempenho de um dessalinizador solar de duplo efeito, que aproveita o calor latente da condensação do vapor de água para o aquecimento da água salina da bacia superior. Importa ainda referir que se pretende comparar o desempenho deste tipo de dessalinizador solar com o do dessalinizador solar convencional, que é considerado como referência.

No seguimento do objetivo anterior, investiga-se também a utilização de radiação solar concentrada para um dessalinizador solar de absorvedor invertido e para um dessalinizador solar de duplo efeito e de absorvedor invertido, com o intuito de aumentar a produção de água destilada. Adicionalmente, comparam-se os desempenhos do dessalinizador solar de absorvedor invertido com o dessalinizador solar convencional (referência), e comparam-se os desempenhos do dessalinizador solar de duplo efeito e de absorvedor invertido com o dessalinizador solar de duplo efeito. Por fim, pretende-se analisar a influência de um revestimento no vidro que separa as bacias do dessalinizador solar de duplo efeito e de absorvedor invertido, com o objetivo de bloquear a radiação proveniente da bacia superior na bacia inferior, avaliando assim o impacto no seu desempenho, ou seja, na quantidade de água destilada produzida. Neste último estudo, pretende-se ainda comparar o seu desempenho com o do dessalinizador de duplo efeito convencional e com o de duplo efeito e de absorvedor invertido, ambos com um vidro transparente entre bacias.

1.8 Estrutura do documento

A presente dissertação é composta por quatro capítulos, sendo o primeiro capítulo a introdução onde é abordado o tema de investigação e a sua relevância, bem como a motivação para o trabalho proposto e uma contextualização do tema. Este capítulo também engloba uma revisão bibliográfica para destacar o estado atual do conhecimento sobre a dessalinização solar e um resumo dos objetivos e conclusões dos vários estudos numéricos e experimentais identificados na literatura. Ainda neste capítulo são apresentados os objetivos desta dissertação, juntamente com uma visão geral da estrutura do documento.

No Capítulo 2 são abordados ao detalhe os modelos físicos, matemáticos e numéricos dos dois níveis de modelação dos dessalinizadores solares considerados promissores nesta dissertação. Para cada nível são descritos os modelos físicos, as dimensões dos dessalinizadores considerados, as equações governantes, as condições fronteira adotadas, as propriedades termofísicas e os parâmetros numéricos utilizados. Além disso, este capítulo inclui os parâmetros mais utilizados na literatura para avaliar o desempenho

de um dessalizador solar, bem como uma descrição das condições climáticas de um dia representativo em Portugal. De seguida, é apresentada a validação de cada nível de modelação.

No Capítulo 3 são apresentados os resultados e a sua discussão, que inclui a comparação dos dois níveis de modelação e a escolha do nível mais adequado à dissertação. Posto isto, para o nível selecionado são detalhados os resultados de cada um dos objetivos mencionados anteriormente. Neste capítulo é também efetuado um estudo de independência da malha e do *time step* na solução de maneira a garantir a credibilidade na adequada precisão dos resultados obtidos.

Por último, o Capítulo 4 inclui as conclusões do trabalho, destacando as principais descobertas e implicações dos estudos realizados, bem como sugestões para trabalhos futuros que possam ampliar a pesquisa desenvolvida.

MODELOS

Na literatura foram identificados dois níveis distintos de modelação dos dessalinizadores solares: o nível A e o nível B [36–39]. Estes níveis demonstraram-se promissores para a presente dissertação, devido à sua alta aplicabilidade e recorrência nos estudos existentes na literatura. A classificação em dois níveis permite uma progressão gradual na complexidade das simulações, dado que o nível A é um modelo mais simplificado que o modelo do nível B, proporcionando uma abordagem flexível e adaptável à modelação dos dessalinizadores solares, mediante os objetivos que se pretendem estudar. A Figura 2.1 apresenta os dois modelos que foram identificados na literatura, evidenciando as suas principais características.

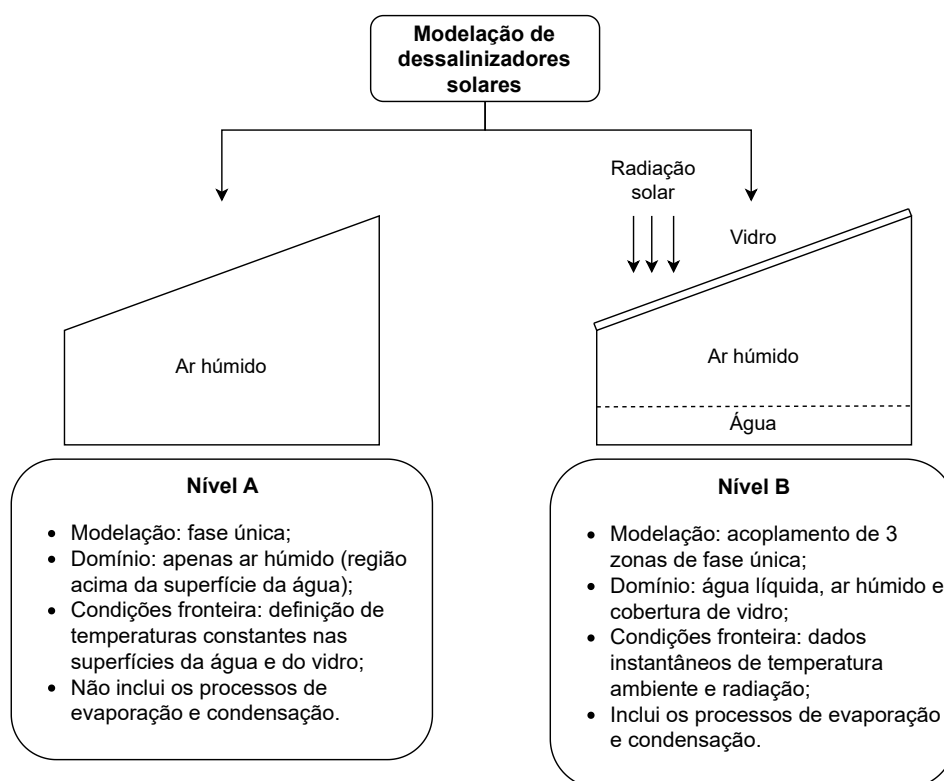


Figura 2.1: Classificação da modelação dos dessalinizadores solares [36].

De seguida será apresentado ao pormenor os dois níveis de modelação, sendo que para cada nível, serão abordados os modelos físicos, as hipóteses assumidas, as equações governantes, as condições de fronteira e as propriedades termofísicas dos fluidos considerados. Através desta análise de cada nível, procura-se identificar lacunas e aspetos que necessitam de aprimoramento.

A falta de consenso sobre qual o nível de modelação é o mais apropriado para determinadas aplicações, pode dificultar a escolha do nível mais adequado para os objetivos de estudo. Além disso, na literatura não foi encontrado nenhum estudo que compare os dois níveis de modelação. Assim, a modelação e comparação destes dois níveis revelam-se objetivos relevantes na presente dissertação.

2.1 Modelos físicos

Nesta secção, serão apresentados os modelos físicos correspondentes a cada nível de modelação, assim como as dimensões adotadas para cada tipo de dessalinizador solar analisado.

2.1.1 Modelação nível A

Na modelação do nível A, apenas a região acima da superfície da água é considerada, e o fluido de trabalho no interior do dessalinizador solar é assumido como uma mistura gasosa de vapor de água e ar seco, denominada de ar húmido. A transferência de calor por radiação e os processos de evaporação e condensação não são contemplados neste modelo. Desta forma, é necessário definir as temperaturas das superfícies da água e da cobertura do vidro com base em dados experimentais. Esta modelação é simplificada devido à suposição de um fluido de trabalho ideal e de fase única, proporcionando uma boa relação entre a qualidade e tempo de simulação, com resultados numéricos consistentes com os resultados experimentais [36].

Na literatura identificaram-se muitos estudos que utilizaram a abordagem do nível A para a análise numérica do dessalinizador solar [27, 30, 40–48]. A maioria destes estudos concentrou-se em dessalinizadores solares convencionais. Neste contexto, a presente dissertação tem como objetivo aplicar o modelo de nível A ao dessalinizador solar convencional. O modelo físico do modelo de nível A para o dessalinizador analisado está representado na Figura 2.2, caracterizando-se por uma altura à esquerda de H_l , uma altura à direita de H_r , um comprimento de L e uma cobertura de vidro inclinada a um ângulo de θ . Além disso, as temperaturas definidas como constantes das superfícies da água e do vidro são representadas por T_w e T_g , respetivamente.

As dimensões consideradas no estudo do modelo de nível A, referente ao dessalinizador convencional nesta dissertação, são apresentadas na Tabela 2.1.

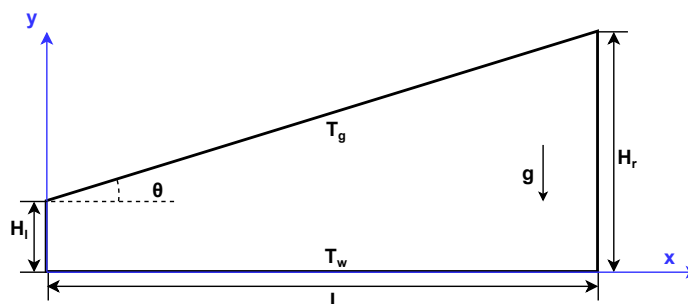


Figura 2.2: Representação esquemática da geometria e sistema de coordenadas do dessalinizador solar do modelo de nível A [41].

Tabela 2.1: Dimensões do dessalinizador solar do modelo de nível A.

L [m]	H_l [m]	H_r [m]	θ [°]
0,438	0,055	0,167	14,35

2.1.2 Modelação nível B

A modelação do nível B abrange a modelação da água líquida, do ar húmido e da região da cobertura de vidro, incorporando também a transferência de calor por radiação. Consequentemente, as simulações numéricas são conduzidas, exclusivamente, mediante a definição das condições climáticas da região, tornando-se uma abordagem auto-suficiente e a mais próxima da realidade [36].

Alguns estudos adotaram a abordagem deste nível de modelação [32, 49–53], sendo que a maioria focou os seus estudos em dessalinizadores solares convencionais. A seguir, serão apresentados os modelos físicos e as dimensões de cada tipo de dessalinizador solar analisado nesta dissertação, especificamente para o modelo de nível B.

Dessalinizador solar convencional

A Figura 2.3 apresenta o modelo físico do dessalinizador solar convencional, que engloba as três zonas consideradas neste nível de modelação: a zona de ar húmido, a zona da água líquida e a zona da cobertura de vidro. Nesta figura, L representa o comprimento do dessalinizador, W a profundidade (perpendicular ao plano), H_w a profundidade da água na bacia, H_l a altura da parede esquerda, t_g a espessura da cobertura de vidro e θ a sua inclinação.

A Tabela 2.2 apresenta as dimensões do dessalinizador solar convencional consideradas para os estudos subsequentes desta dissertação, para o modelo de nível B.

Tabela 2.2: Dimensões do dessalinizador solar do modelo de nível B.

L [m]	W [m]	H_w [m]	H_l [m]	t_g [m]	θ [°]
0,438	0,75	0,02	0,1	0,004	14,35

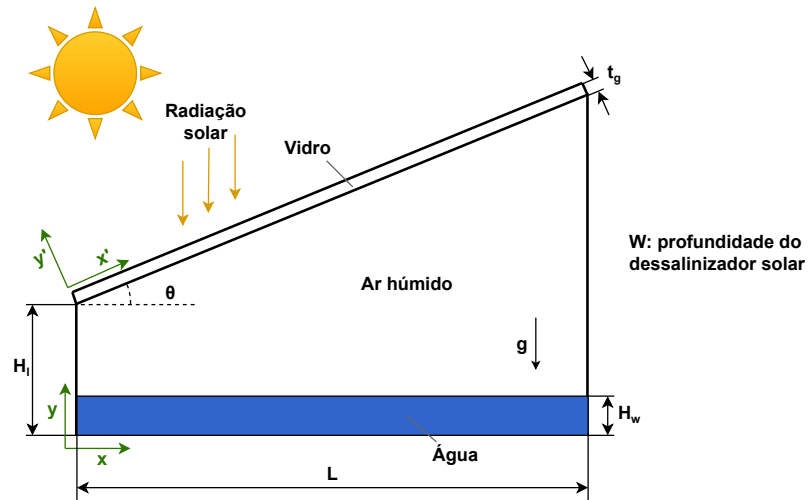


Figura 2.3: Representação esquemática da geometria, do sistema de coordenadas e das diferentes zonas do modelo de nível B [49, 53].

Dessalinizador solar de duplo efeito

Nesta dissertação, modelou-se um dessalinizador solar de duplo efeito utilizando a geometria, o sistema de coordenadas e as diferentes zonas apresentadas na Figura 2.4, cujas as dimensões estão detalhadas na Tabela 2.3. Entre as duas bacias, existe um vidro transparente que permite a passagem da radiação solar. Assim, a radiação que incide de cima atravessa o vidro da bacia superior e o vidro entre bacias, alcançando a bacia inferior. A espessura do vidro entre as bacias (t_{gL}) é superior à do vidro da bacia superior, de forma a suportar o peso da água líquida e da estrutura da bacia superior. A escolha da inclinação da cobertura de vidro entre a bacia inferior e a bacia superior (θ_L) foi feita de forma a garantir que a água líquida na bacia superior conseguisse cobrir uniformemente toda a base desta bacia.

Tabela 2.3: Dimensões do dessalinizador solar de duplo efeito do modelo de nível B.

L [m]	H_{iL} [m]	H_{wL} [m]	t_{gL} [m]	θ_L [°]	H_{iU} [m]	H_{wU} [m]	t_{gU} [m]	θ_U [°]
0,438	0,075	0,02	0,008	7	0,085	0,06	0,004	14,35

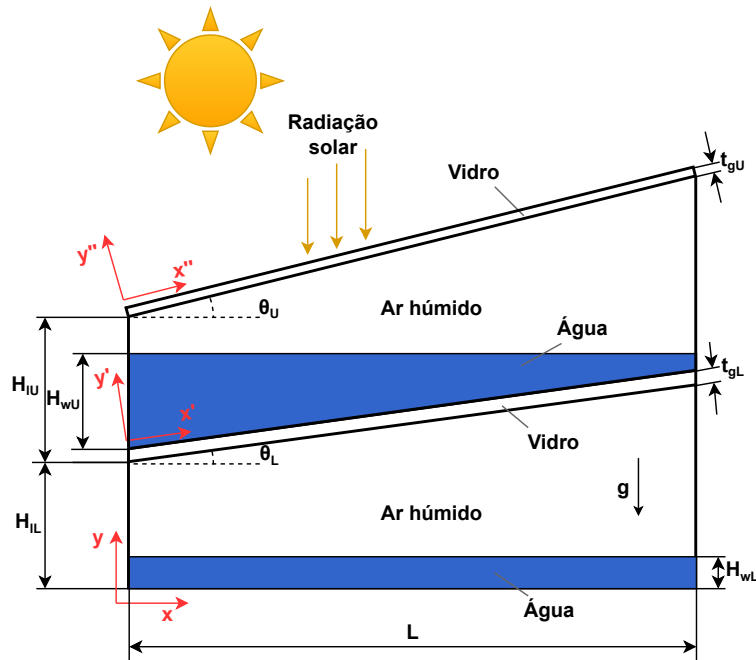


Figura 2.4: Representação esquemática da geometria, do sistema de coordenadas e das diferentes zonas do dessalinizador solar de duplo efeito.

Dessalinizador solar de absorsor invertido

O dessalinizador solar de absorsor invertido considera dois tipos de radiação solar: a radiação solar não-concentrada, que incide de cima para baixo e atravessa o vidro, e a radiação solar concentrada, que é direcionada para a base do dessalinizador a partir do concentrador solar. Neste caso, o tipo de concentrador solar indicado para o efeito é a calha parabólica (*parabolic trough*), devido à sua capacidade de direcionar a radiação solar concentrada para uma linha focal de uma superfície linear, o que a torna ideal para sistemas com geometria retangular, como a base do dessalinizador em análise.

A Figura 2.5 apresenta o esquema bidimensional representativo do conjunto, que, no caso do dessalinizador solar de absorsor invertido, integra o dessalinizador solar convencional com um concentrador solar em forma de parábola. Desta forma, o dessalinizador aproveita a radiação solar direta (não-concentrada) que incide de cima para baixo e atravessa o vidro, como a radiação concentrada que atinge a base, graças ao concentrador solar posicionado por baixo, sendo o seu centro alinhado verticalmente com o centro da base do dessalinizador.

A Tabela 2.4 apresenta as dimensões do dessalinizador solar de absorsor invertido modelado, que são idênticas às do dessalinizador solar convencional, exceto a profundidade da água líquida (H_w), que aumentou para 4 cm.

Na Tabela 2.5 apresentam-se as dimensões dos dois concentradores analisados, designados por A e B, onde se incluem a distância focal e a largura da abertura da calha parabólica, representadas por F e D , respetivamente. Nesta tabela também se observa

as refletividades consideradas para a superfície interior do concentrador e para a superfície exterior da base do dessalinizador, que têm os mesmo valores para ambos os concentradores A e B.

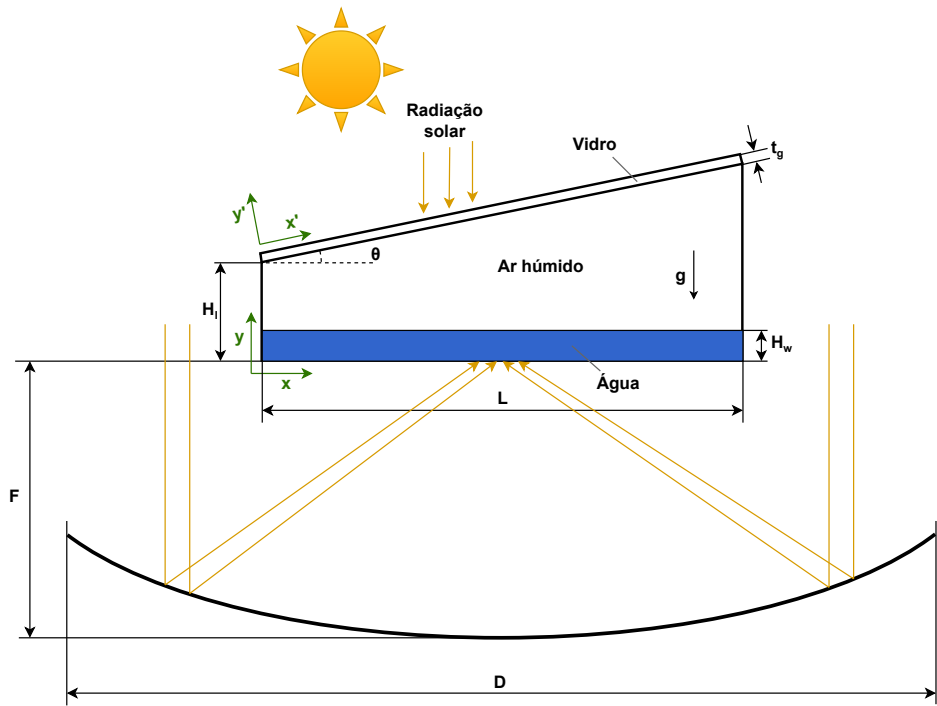


Figura 2.5: Representação esquemática da geometria, do sistema de coordenadas e das diferentes zonas do dessalinizador solar de absorvedor invertido.

Tabela 2.4: Dimensões do dessalinizador solar de absorvedor invertido do modelo de nível B.

L [m]	W [m]	H_w [m]	H_l [m]	t_g [m]	θ [°]
0,438	0,75	0,04	0,1	0,004	14,35

Tabela 2.5: Dimensões dos concentradores solares A e B e refletividades.

	F [m]	D [m]	Refletividade do concentrador	Refletividade da base do dessalinizador
Concentrador A	1,5	0,8	0,9	0,7
Concentrador B	1,5	0,7	0,9	0,7

2.2 Modelos matemáticos

Os modelos matemáticos para cada nível de modelação serão apresentados nesta secção, que incluem as hipóteses assumidas, as equações governantes, as condições fronteira e as propriedades termofísicas dos fluidos considerados. No modelo de nível A, será detalhado o modelo matemático correspondente ao dessalinizador solar convencional. Já no modelo de nível B, além do modelo matemático para o dessalinizador solar convencional,

serão também apresentadas equações adicionais para o dessalinizador solar de duplo efeito e para o dessalinizador solar de absorsor invertido.

2.2.1 Modelação nível A

As hipóteses assumidas neste nível são as seguintes: i) a modelação é bidimensional; ii) a mistura gasosa é considerado um gás incompressível; iii) assume-se temperaturas constantes nas superfícies da água (T_w) e do vidro (T_g); iv) as propriedades físicas do ar húmido são constantes e determinadas pela temperatura média das superfícies da água e do vidro; v) as paredes laterais do dessalinizador são assumidas como adiabáticas; vi) o ar húmido é considerado saturado nas superfícies da água e do vidro (humidade relativa de 100%); e vii) a dissipação viscosa é negligenciável.

Tendo em conta as considerações anteriores e assumindo um regime permanente e um escoamento laminar, as equações governantes deste modelo são as equações da continuidade, quantidade de movimento em x e y , energia e concentração, dadas pelas Equações (2.1), (2.2), (2.3), (2.4) e (2.5), respetivamente [27, 40–48, 54]:

Continuidade:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.1)$$

Balço da quantidade de movimento em x :

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2.2)$$

Balço da quantidade de movimento em y :

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + [\beta(T - T_0) + \beta^*(C - C_0)]g \quad (2.3)$$

Conservação da energia:

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (2.4)$$

Concentração do vapor de água na mistura:

$$\left(u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} \right) = D_{AB} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) \quad (2.5)$$

Onde u e v representam as componentes horizontal e vertical da velocidade, respetivamente. A massa volúmica do fluido é representada por ρ , ν representa a viscosidade cinemática do fluido, c_p representa o calor específico e λ a condutividade térmica. Os

termos β e β^* são os coeficientes de expansão de volume e das espécies, respetivamente. A aceleração gravítica é representada por g .

As condições de fronteira aplicadas a este tipo de modelação baseiam-se na definição clara da temperatura, velocidade e concentração do vapor de água na mistura gasosa nas superfícies do domínio considerado, sendo as seguintes:

Na cobertura de vidro: $u = 0, v = 0, T = T_g, C = C|_{T=T_g, \varphi=100\%}$

Na superfície da água: $u = 0, v = 0, T = T_w, C = C|_{T=T_w, \varphi=100\%}$

Nas laterais: $u = 0, v = 0, \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \frac{\partial C}{\partial x} = 0$

Na Tabela 2.6 são apresentadas as propriedades termofísicas do ar húmido. A temperatura média das superfícies da água e do vidro é representada por T_i , enquanto T_w e T_g correspondem, respetivamente, às temperaturas das superfícies da água e do vidro.

Tabela 2.6: Propriedades do ar húmido em função da temperatura em graus *Celsius*. Extraído da Referência [41].

Propriedade	Expressão
Calor específico, c_p [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]	$999,2 + 0,1434 \times T_i + 1,101 \times T_i^2 - 6,758 \times 10^{-8} \times T_i^3$
Massa volúmica, ρ [kg m^{-3}]	$355,9/(T_i + 273,15)$
Condutividade térmica, λ [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]	$0,0244 + 0,7673 \times 10^{-4} \times T_i$
Viscosidade dinâmica, μ [$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$]	$1,718 \times 10^{-5} + 4,62 \times 10^{-8} \times T_i$
Pressão parcial saturada à T_g , P_g [Pa]	$\exp(25,317 - 5144/(T_g + 273))$
Pressão parcial saturada à T_w , P_w [Pa]	$\exp(25,317 - 5144/(T_w + 273))$

O ar húmido é constituído por duas espécies efectivas distintas, ar seco e vapor de água, ambas comportando-se como gases ideais. A quantidade de vapor de água presente no ar húmido é expressa pela humidade relativa, que, neste caso, é igual a 1 (Equação (2.6)) [55]. Logo, a pressão parcial do vapor de água no ar húmido é igual à pressão parcial do vapor de água saturado.

$$\varphi = \frac{P_v}{P_v^{sat}} \quad (2.6)$$

A partir da Tabela 2.6, é possível determinar a pressão parcial do vapor de água saturado nas superfícies da água e do vidro, com base nas suas respetivas temperaturas. A pressão total da mistura é constante e igual à pressão atmosférica. De acordo com a lei de *Dalton*, a pressão total da mistura é igual à soma das pressões parciais de cada espécie efectiva constitutiva:

$$P = P_a + P_v \quad (2.7)$$

Para determinar a fração molar do vapor de água em termos de pressões, aplica-se a lei dos gases ideais ao vapor de água e à mistura. A razão entre essas pressões é igual à fração molar do vapor de água:

$$\frac{P_v}{P} = \chi_v \quad (2.8)$$

A soma das frações molares das duas espécies efectivas da mistura deve ser igual a 1, logo a fração molar do ar é dada por:

$$\chi_a = 1 - \chi_v \quad (2.9)$$

A fração mássica do vapor de água, a partir da sua fração molar, é determinada da seguinte forma:

$$Y_v = \chi_v \frac{M_v}{\bar{M}} \quad (2.10)$$

$$\bar{M} = \sum_{k=1}^N \chi_k M_k \quad (2.11)$$

Onde $\bar{M}$ é a massa molar média da mistura, obtida a partir da contribuição do vapor de água e do ar ($N = 2$).

Por fim, o coeficiente de difusão molecular do vapor de água no ar é calculado pela Equação (2.12) [56].

$$D_{AB} = \frac{0,001 T_i^{1,75} \sqrt{\frac{1}{M_v} + \frac{1}{M_a}}}{P \left[(\sum v_v)^{1/3} + (\sum v_a)^{1/3} \right]^2} \quad (2.12)$$

Onde T_i é a temperatura média das superfícies da água e do vidro do dessalinizador (em *Kelvin*), M_v e M_a são as massas molares do vapor de água e do ar seco (em kg kmol^{-1}), respetivamente, e P é a pressão total (em atm). Os termos $\sum v_v$ e $\sum v_a$ são as somas dos volumes de difusão para o vapor de água e para o ar seco, respetivamente, que se podem encontrar nas tabelas da Referência [56].

Ao analisar os estudos que utilizam esta modelação do nível A foram identificadas algumas limitações. A exclusão de processos importantes que ocorrem no dessalinizador, como a evaporação e a condensação, podem subestimar a complexidade do sistema e resultar em previsões menos precisas. Outra limitação deste nível vem da definição de temperaturas constantes nas condições de fronteira, baseada em resultados experimentais, revelando-se uma abordagem pouco auto-suficiente. Adicionalmente, estas temperaturas constantes nas condições fronteira do dessalinizador, normalmente não são conhecidas com precisão e variam ao longo do tempo. Deste modo, estas limitações destacam a necessidade de modelos mais abrangentes e autónomos para melhorar a precisão dos resultados das simulações de dessalinizadores solares.

2.2.2 Modelação nível B

Dessalinizador solar convencional

Para o desenvolvimento do modelo de nível B, assumiram-se algumas hipóteses e simplificações, nomeadamente [32, 49–53]: i) a modelação é bidimensional; ii) o ar húmido é considerado como um gás ideal incompressível; iii) a fração mássica do vapor de água na superfície da água líquida e na superfície interior da cobertura de vidro é calculada

assumindo a condição de saturação, isto é, com uma humidade relativa de 100%; e iv) para incluir o calor absorvido ou libertado dos processos de evaporação e condensação nas equações de energia, considerou-se os fluxos de massa associados à evaporação e condensação, bem como a entalpia necessária para a evaporação e condensação, nos termos fonte na equação de energia.

A metodologia passou pela utilização de um regime transiente e o escoamento do ar húmido no interior do dessalinizador é turbulento, enquanto que o escoamento da água líquida é laminar. Ainda de referir que, a irradiância solar e a temperatura ambiente ao longo de um dia, foram os únicos dados introduzidos para o desenvolvimento da metodologia. Neste modelo, para efeitos de simplificação, considerou-se que a posição do sol em relação ao dessalinizador permanece fixa ao longo do dia, sendo o mais considerado na literatura. Embora essa simplificação possa facilitar a análise, na realidade, a posição solar varia continuamente, podendo influenciar o desempenho do dessalinizador.

As equações que governam o estudo do dessalinizador convencional deste nível são [32, 49–53]: i) a equação da continuidade para as zonas da água líquida na bacia e do ar húmido (Equação (2.13)); ii) a equação do balanço da quantidade de movimento para as mesmas zonas já referidas (Equações (2.14)-(2.15)); iii) a equação da conservação da energia para todas zonas mencionadas e adicionando também a zona da cobertura de vidro (Equações ((2.16)-(2.18))); iv) as equações complementares, mais concretamente as equações de transporte das espécies (Equações((2.26)-(2.27))), a equação do modelo de turbulência $k-\varepsilon$ RNG (Equações ((2.28)-(2.29))), sendo ambas apenas para a zona do ar húmido e, por fim, a equação da transferência de calor por radiação (Equação (2.30)).

Continuidade:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (2.13)$$

Onde ρ e $\vec{v}$ representam a massa volúmica e o vetor da velocidade, respetivamente.

Balanço da quantidade de movimento:

- Ar húmido

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\bar{\tau}_{eff}) + \rho \vec{g} \quad (2.14)$$

- Água líquida

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} \beta (T - T_0) \quad (2.15)$$

Onde P representa a pressão estática e a tensão de corte efetiva é definida por $\bar{\tau}_{eff}$, sendo calculada a partir do modelo de turbulência $k-\varepsilon$ RNG. O termo β é o coeficiente de expansão da água e os termos ρg e $\rho g \beta (T - T_0)$ representam a força gravitacional por unidade de volume e a força de impulsão, respetivamente.

Conservação de energia:

- Ar húmido

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + P)) = \nabla \cdot (\lambda_{eff} \nabla T - \sum_j h_{E,j} \vec{J}_j) + S_h + S_L \quad (2.16)$$

- Água líquida

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + P)) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_h + S_L \quad (2.17)$$

- Cobertura de vidro

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_h + S_L \quad (2.18)$$

Onde λ_{eff} é definido como a condutividade térmica efetiva, calculado com o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ RNG. A entalpia sensível e o fluxo difusivo das espécies j são representados por h_E e J , respetivamente. Os termos do lado direito da Equação (2.16) representam a transferência de calor por condução e a difusão das espécies, respetivamente.

O termo S_h identifica-se como a energia radiante absorvida. O termo S_L representa o calor latente de evaporação ou condensação que é adicionado à equação de energia como termo de dissipação ou de fonte. Nas Equações (2.19)-(2.21) estão definidas as expressões dos termos referidos para cada zona.

- Cobertura de vidro

$$S_L = + \frac{\alpha_g \dot{m}_c h_{fg,g} A_g}{V_g} \quad (2.19)$$

- Água líquida

$$S_L = - \frac{\alpha_w \dot{m}_e h_{fg,w} A_w}{V_w} \quad (2.20)$$

- Ar húmido

$$S_L = \frac{+(1 - \alpha_g) \dot{m}_c h_{fg,g} A_g - (1 - \alpha_w) \dot{m}_e h_{fg,w} A_w}{V_a} \quad (2.21)$$

Onde as áreas da cobertura do vidro e da bacia com água são representadas por A_g e A_w . Os volumes do vidro, da água e zona do ar húmido são representados por V_g , V_w e V_a , respetivamente. Os termos $h_{fg,w}$ e $h_{fg,g}$ correspondem às entalpias necessárias para a evaporação e condensação, respetivamente, sendo calculadas em função da temperatura média das superfícies da água e do vidro. A Equação (2.22) permite calcular as entalpias já mencionadas em função das respetivas temperaturas (em °C). As taxas de evaporação e condensação são representadas por $\dot{m}_e$ e $\dot{m}_c$, respetivamente. O coeficiente α é uma constante definida pelo utilizador que representa a percentagem de calor retirada da água (α_w) ou fornecida ao vidro (α_g). Keshtkar *et al.*[32, 50] adotaram o valor de 0,5 para ambos os coeficientes, enquanto que Aghakhani *et al.* [49] optaram por diferentes valores para a água (0,46) e para o vidro (0,48), pois esses valores proporcionaram resultados

mais próximos dos observados experimentalmente. Na presente dissertação adotou-se os valores definidos por Aghakhani *et al.* [49].

$$h_{fg} = 2,4935 \times 10^6 [1 - (9,4779 \times 10^{-4}T + 1,3132 \times 10^{-7}T^2 - 4,7947 \times 10^{-9}T^3)] \quad (2.22)$$

As taxas de evaporação e condensação são calculadas pelas Equações (2.24) e (2.25). Nestas equações, L_g e L representam o comprimento da cobertura de vidro e do dessalinizador solar, respetivamente. As taxas dependem do gradiente da fração mássica do vapor de água que é medido perpendicularmente à correspondente interface. Deste modo, para a taxa de evaporação, o gradiente é medido segundo o eixo y , enquanto que para a taxa de condensação, o gradiente é medido segundo o eixo y' da Figura 2.3. Além disso, estas taxas são influenciadas pelo coeficiente de difusão molecular, D_m , e da massa volúmica da mistura gasosa. O coeficiente de difusão molecular do vapor de água no ar é determinado a partir da temperatura e da pressão (Equação (2.23)).

$$D_m = 2,6 \times 10^{-5} \left(\frac{101325}{P} \right) \left(\frac{T}{298} \right)^{1,5} \quad (2.23)$$

- Taxa de evaporação na interface água líquida - ar húmido

$$\dot{m}_e = -\frac{\rho D_m}{L} \int_0^L \left. \frac{\partial Y}{\partial y} \right|_{\text{água}} dx \quad (2.24)$$

- Taxa de condensação na superfície interior do vidro

$$\dot{m}_c = -\frac{\rho D_m}{L_g} \int_0^{L_g} \left. \frac{\partial Y}{\partial y'} \right|_{\text{vidro}} dx' \quad (2.25)$$

As Equações (2.26)-(2.27) determinam a concentração de vapor na zona do ar húmido em cada ponto deste domínio. A Equação (2.27) corresponde à lei de Fick, permitindo quantificar a taxa de evaporação e condensação por unidade de área.

Transporte das espécies:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot (\vec{J}_i) \quad (2.26)$$

$$\vec{J}_i = -\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_i \quad (2.27)$$

O termo $(\frac{\mu_t}{Sc_t})$ é determinado com base no modelo de turbulência. O número Schmidt turbulento e a viscosidade turbulenta são representados por Sc_t e μ_t , respetivamente.

O modelo utilizado para a turbulência neste estudo foi o modelo $k-\varepsilon$ RNG, devido ao elevado número de Rayleigh na zona de ar húmido. Este modelo é bastante utilizado na simulação de escoamentos turbulentos e é baseado na resolução das equações de transporte da energia cinética turbulenta (Equação (2.28)) e da taxa de dissipação de energia turbulenta (Equação (2.29)), sendo representados por k e ε , respetivamente.

Modelo de turbulência:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} G_K + C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{K} - S_\epsilon \quad (2.29)$$

Entre os modelos de radiação disponíveis, o modelo de ordens discretas (DO) foi o selecionado neste estudo numérico, devido à sua capacidade de representação com precisão da interação da radiação solar e de superfícies semi-transparentes, como o vidro. Este modelo resolve a Equação (2.30), considerando um conjunto finito de ângulos sólidos discretos. Cada ângulo sólido está associado a um vetor direcional fixo $\vec{s}$ no sistema cartesiano global (x, y, z) . Após a resolução da equação de transferência de radiação (RTE), a absorção da irradiância solar é incorporada nas equações de energia (Equações (2.16)-(2.18)), por meio do termo S_h .

Transferência de calor por radiação:

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = a n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' \quad (2.30)$$

Onde I representa a intensidade da radiação. Os coeficientes a , n e σ_s definem-se como o coeficiente de absorção, índice de refração e a constante de Stefan-Boltzmann, respectivamente.

As condições de fronteira aplicadas a este estudo são as seguintes [32, 49–53]:

$$x = 0 \text{ e } x = L : \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \text{ \& } \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (2.31)$$

$$y = 0 : \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (2.32)$$

$$\text{Na interface água - ar húmido: } \lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial y} = \lambda_a \frac{\partial T_a}{\partial y} \text{ \& } T_w = T_a \quad (2.33)$$

$$\text{Na interface ar húmido - vidro: } \lambda_a \frac{\partial T_a}{\partial y'} = \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial y'} \text{ \& } T_a = T_g \quad (2.34)$$

$$\text{Na superfície exterior do vidro: } -\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial y'} = h_{cv}(T_g - T_{amb}) + \epsilon \sigma (T_g^4 - T_{sky}^4) \quad (2.35)$$

$$\bar{h}_{cv} = [\bar{h}_{Lg,free}^3 + \bar{h}_{Lg,forced}^3]^{\frac{1}{3}} \quad (2.36)$$

$$T_{sky} = 0,0552 T_{amb}^{1,5} \quad (2.37)$$

$$\bar{h}_{Lg} = \frac{\overline{Nu}_{Lg} \lambda}{L_g} \quad (2.38)$$

$$\overline{Nu}_{Lg,free} = 0,14 [Ra_{Lg}^{\frac{1}{3}} - Ra_{cr}^{\frac{1}{3}}] + 0,56 (Ra_{cr} \cos \gamma)^{\frac{1}{4}} \quad (2.39)$$

$$Ra_{Lg} = Pr \cdot Gr_{Lg} = \frac{g\beta L_g^3 \rho^2 c_p (T_g - T_\infty)}{\mu \lambda} \quad (2.40)$$

$$Gr_{cr} = \begin{cases} 5 \times 10^9, & \gamma = 15^\circ \\ 2 \times 10^9, & \gamma = 30^\circ \\ 10^8, & \gamma = 60^\circ \\ 10^6, & \gamma = 70^\circ \end{cases} \quad (2.41)$$

$$\overline{Nu}_{Lg,forced} = A(Pr) \sqrt{Re_{Lg}} \left[1 + \left(\frac{B(Pr)}{A(Pr)} Bo^{\frac{1}{5}} \right)^3 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2.42)$$

$$A(Pr) = 2 \times 0,464 \times Pr^{\frac{1}{3}} \left[1 + \left(\frac{0,0207}{Pr} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{-\frac{1}{4}} \quad (2.43)$$

$$B(Pr) = \frac{5}{4} \times Pr^{\frac{2}{5}} [4 + 9\sqrt{Pr} + 10Pr]^{-\frac{1}{5}} \quad (2.44)$$

$$Gr_{Lg} = \frac{g\beta L_g^3 (T_g - T_\infty)}{\nu^2} \quad (2.45)$$

$$Bo = \frac{Gr_{Lg} \cos \gamma}{Re_{Lg}^{\frac{5}{2}}} \quad (2.46)$$

Onde T_a , T_{amb} , T_g e T_w representam as temperaturas do ar húmido, do ambiente e das superfícies do vidro e da água, respetivamente, enquanto que T_{sky} define-se como a temperatura externa de radiação, sendo calculada a partir da temperatura ambiente (Equação (2.37)). A condutividade térmica do ar húmido, da água e do vidro é representado por λ_a , λ_w e λ_g . O coeficiente de transferência de calor é representado por h_{cv} e Y representa a fração mássica do vapor de água.

As Equações (2.31)-(2.32) referem-se às paredes laterais e à base da bacia como sendo adiabáticas. As Equações (2.33)-(2.34) representam condições de fronteira acopladas para conservar a energia entre as interfaces água - ar húmido e vidro - ar húmido.

A Equação (2.35) define a condição fronteira para a superfície externa do vidro, onde ocorre perda de calor por convecção e radiação para o ambiente. A convecção é composta pela convecção forçada e natural. O coeficiente de transferência de calor por convecção é calculado pela Equação (2.36), sendo que a parte referente à convecção natural é determinada pelas Equações (2.39)-(2.41), e a parte referente à convecção forçada é determinada pelas Equações (2.42)-(2.46), considerando uma velocidade constante do vento do ambiente exterior representada por v . Os coeficientes $A(Pr)$ e $B(Pr)$ são funções empíricas, que dependem do número de Prandtl. A variável γ representa o ângulo que a cobertura do vidro faz com a parede lateral direita. Ainda de referir que, no cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção e radiação, as propriedades termofísicas do ambiente exterior foram determinadas para a temperatura de película.

Essas propriedades são apresentadas nas tabelas das propriedades termofísicas do ar à pressão atmosférica da Referência [57].

$$Y = \frac{1}{1 + \frac{1}{\omega}} \quad (2.47)$$

$$\omega = 0,622 \frac{\varphi P_{sat}}{P - \varphi P_{sat}} \quad (2.48)$$

$$K = 4,39553 - 6,2442 \left(\frac{T}{1000} \right) + 9,953 \left(\frac{T}{1000} \right)^2 - 5,151 \left(\frac{T}{1000} \right)^3 \quad (2.49)$$

$$P_{sat}(T) = P_{cr} \left[10^{K \left(1 - \frac{T_{cr}}{T} \right)} \right] \quad (2.50)$$

$$x = 0 \text{ e } x = L : \frac{\partial Y}{\partial x} = 0 \quad (2.51)$$

Na interface da água líquida e do ar húmido, bem como na interface do ar húmido e da cobertura de vidro, assume-se que o ar está totalmente saturado de vapor de água. Desta forma, a fração mássica do vapor de água é determinada pela Equação (2.47). Esta fração mássica em cada interface depende da pressão de saturação à temperatura correspondente, P_{sat} , calculada pelas Equações (2.49)-(2.50). Além disso, é influenciada pelo rácio de humidade, ω , e pela humidade relativa, φ , que, sob a condição de saturação total, é igual a 1. Nestas equações, a pressão crítica (P_{cr}) é 22,1 MPa e a temperatura crítica (T_{cr}) é 647,3 K. Por fim, a Equação (2.51) representa a condição de fronteira para as paredes laterais e a base do dessalinizador que são assumidas como impermeáveis.

Na Tabela 2.7 são apresentadas as propriedades termofísicas de todos os fluidos e materiais analisados deste estudo. As paredes laterais e a base do dessalinizador são assumidos como sendo feitos de alumínio. A maioria das propriedades são constantes, com exceção das massas volúmicas do ar e do vapor de água da zona da mistura, que são assumidas como gases ideais incompressíveis (Equação (2.52)), e do coeficiente molecular de difusão (Equação (2.23)). Nesta tabela também são apresentadas as propriedades óticas consideradas no estudo e na Tabela 2.8, apresentam-se os parâmetros óticos de cada parte do dessalinizador solar.

A fração difusa da água é definida para a interface água líquida-ar húmido e a fração difusa do vidro é definida para a interface ar húmido-cobertura de vidro. De notar que, neste modelo, considera-se que a água líquida absorve parte da radiação solar em volume, devido ao seu coeficiente de absorção não nulo e ao facto de possuir um índice de refração. Em contraste, o ar húmido apresenta um coeficiente de absorção nulo, e tem um índice de refração igual a 1, o que sugere que o ar húmido é um meio não participativo na absorção de radiação solar.

As propriedades do ar húmido são obtidas pelas Equações (2.53)-(2.56). A massa volúmica da mistura é calculada através da ponderação do volume de cada espécie presente, enquanto que as outras propriedades são determinadas pela lei da mistura ponderada pela massa.

Tabela 2.7: Propriedades termofísicas e óticas do modelo de nível B. Extraído da referência [49].

Propriedade	Ar	Água		Vidro	Alumínio
		Vapor (saturado)	Líquido (saturado)		
Massa volúmica, ρ [kg m ⁻³]	Gás Ideal	Gás Ideal	998,2	2700	2719
Calor específico, c_p [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	1006,43	2014	4182	840	871
Condutividade térmica, λ [W m ⁻¹ K ⁻¹]	0,028	0,0261	0,6	0,96	202,4
Viscosidade dinâmica, μ [kg m ⁻¹ s ⁻¹]	$1,7894 \times 10^{-5}$	$1,34 \times 10^{-5}$	0,001003	-	-
Coefficiente de expansão térmica, β [K ⁻¹]	-	-	0,0005	-	-
Constante de gás específica, R_g [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	287	461,4	-	-	-
Coefficiente de absorção, a [m ⁻¹]	-	-	0,15	0,2	3500
Índice de refração, n [-]	-	-	1,33	1,5	1
Emissividade, ε [-]	-	-	0,96	0,94	0,09

Tabela 2.8: Parâmetros óticos de cada parte do dessalinizador solar do modelo de nível B. Extraído da referência [49].

Fração difusa		Emissividade	
Água	Vidro	Paredes laterais	Base do dessalinizador
0,04	0,06	0,09	0,9

$$\rho = \frac{P_0}{R_g T} \quad (2.52)$$

$$\rho = \frac{1}{\sum_i \frac{Y_i}{\rho_i}} \quad (2.53)$$

$$c_p = \sum_i Y_i c_{p,i} \quad (2.54)$$

$$\lambda = \sum_i Y_i \lambda_i \quad (2.55)$$

$$\mu = \sum_i Y_i \mu_i \quad (2.56)$$

A abordagem deste nível de modelação é mais completa do que a do nível A, ao englobar a radiação e os processos de evaporação e condensação do dessalinizador solar. Desta forma, este nível permite que as condições de fronteira sejam dinamicamente ajustadas com base nas condições climáticas reais no momento da simulação, em vez de usar valores fixos predefinidos através de resultados experimentais. Isto aumenta a precisão e a relevância dos resultados numéricos, uma vez que as variações nas condições climáticas são levadas em consideração durante o processo de simulação.

Dessalinizador solar de duplo efeito

O modelo matemático do dessalinizador solar de duplo efeito, seguiu o mesmo procedimento utilizado no modelo de nível B para o dessalinizador solar convencional, apresentado anteriormente, com a adição da condição de fronteira de acoplamento entre as duas bacias, mais especificamente na interface entre o vidro da bacia inferior e a água líquida da bacia superior. Esta nova condição de fronteira permite conservar a energia

entre a água e o vidro, sendo que a Equação (2.57(a)) representa a igualdade do fluxo de calor e a Equação (2.57(b)) representa a igualdade da temperatura na fronteira.

$$\text{Na interface vidro - água: (a) } \lambda_g \frac{\partial T_{gL}}{\partial y'} = \lambda_w \frac{\partial T_{wU}}{\partial y'} \text{ \& (b) } T_{gL} = T_{wU} \quad (2.57)$$

Na bacia superior, as equações governantes e as condições de fronteira seguem o mesmo raciocínio aplicado ao dessalinizador convencional. Apenas no vidro da bacia superior são consideradas as perdas de calor por radiação e convecção para o exterior, sendo as restantes paredes tratadas como adiabáticas e impermeáveis.

Dessalinizador solar de absorsor invertido

O modelo matemático do dessalinizador solar de absorsor invertido considera um fluxo de calor aplicado na base do dessalinizador solar. O fluxo de calor incidente ao longo do comprimento do dessalinizador e ao longo do tempo, aplicou-se como condição de fronteira na base do dessalinizador.

Para além do fluxo de calor concentrado na base do dessalinizador, é importante considerar as perdas de calor por convecção e radiação nesta base, que é feita de alumínio. Estas perdas são agora significativas, porque o dessalinizador não se encontra apoiado no solo, ao contrário do dessalinizador convencional, no qual as perdas de calor ocorriam apenas na superfície exterior do vidro. Neste sentido, considerou-se no modelo as perdas de calor por convecção natural e forçada, bem como por radiação na base do dessalinizador. Estas perdas foram incorporadas como condições de fronteira na base do dessalinizador.

A Equação (2.58(a)) representa o fluxo de calor incidente na superfície exterior da base do dessalinizador, que varia ao longo do comprimento do dessalinizador e ao longo do tempo, enquanto que a Equação (2.58(b)) representa as perdas de calor por convecção e radiação nessa mesma superfície.

Dado que as equações para o cálculo dos coeficientes de transferência de calor por convecção natural e forçada, apresentadas no modelo matemático para o dessalinizador solar convencional, foram desenvolvidas para uma superfície inclinada, como a cobertura de vidro, tornou-se necessário aplicar novas equações específicas para uma superfície horizontal arrefecida pela parte inferior, como é o caso da base do dessalinizador. Estas equações foram extraídas da Referência [58].

$$\text{(a) } \lambda_{al} \frac{\partial T_{al}}{\partial y'} = H(x, t) \text{ \& (b) } -\lambda_{al} \frac{\partial T_{al}}{\partial y'} = h_{cv}(T_{al} - T_{amb}) + \varepsilon \sigma (T_{al}^4 - T_{sky}^4) \quad (2.58)$$

$$\bar{h}_{cv} = [\bar{h}_{L,free}^3 + \bar{h}_{L,forced}^3]^{\frac{1}{3}} \quad (2.59)$$

$$T_{sky} = 0,0552 T_{amb}^{1,5} \quad (2.60)$$

$$\bar{h}_L = \frac{\overline{Nu}_L \lambda}{L} \quad (2.61)$$

$$l_c = \frac{A}{P} \Leftrightarrow l_c = \frac{LW}{2(L+W)} \Leftrightarrow l_c = \frac{L}{2(\frac{L}{W} + 1)} \Leftrightarrow l_c = \frac{L}{2} \quad (2.62)$$

$$\overline{Nu}_{lc,free} = \begin{cases} 0,54Ra_{lc}^{\frac{1}{4}}, & 10^5 \leq Ra_{lc} \leq 10^7 \\ 0,15Ra_{lc}^{\frac{1}{3}}, & 10^7 \leq Ra_{lc} \leq 10^{11} \end{cases} \quad (2.63)$$

$$Ra_L = Pr \cdot Gr_L \quad (2.64)$$

$$Gr_L = \frac{g\beta L^3(T_{al} - T_{\infty})}{\nu^2} \quad (2.65)$$

$$\overline{Nu}_{L,forced} = A(Pr)\sqrt{Re_L} \left[1 + \left(\frac{B(Pr)}{A(Pr)}Bo^{\frac{1}{5}} \right)^3 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2.66)$$

$$A(Pr) = 2 \times 0,339 \times Pr^{\frac{1}{3}} \left[1 + \left(\frac{0,0468}{Pr} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{-\frac{1}{4}} \quad (2.67)$$

$$B(Pr) = \frac{5}{3} \times \left(\frac{Pr}{5} \right)^{\frac{1}{5}} Pr^{\frac{1}{2}} [0,25 + 1,6\sqrt{Pr}]^{-1} \quad (2.68)$$

$$Bo = \frac{Gr_L}{Re_L^{\frac{5}{2}}} \quad (2.69)$$

Nesta análise, λ_{al} representa a condutividade térmica do alumínio e T_{al} a temperatura da base do dessalinizador. O termo $H(x, t)$ representa o perfil temporal do fluxo de calor ao longo do comprimento do dessalinizador solar. A Equação (2.59) corresponde ao cálculo geral do coeficiente de transferência de calor por convecção, enquanto que as Equações (2.62)-(2.65) determinam o coeficiente referente à convecção natural e as Equações (2.65)-(2.69) determinam o coeficiente referente à convecção forçada, considerando uma velocidade constante do vento no ambiente exterior. O comprimento característico necessário para a convecção natural, é dado pela Equação (2.62) e corresponde ao rácio entre a área total da superfície da base e o perímetro da mesma. Como o modelo é bidimensional, considerou-se uma profundidade infinita para o dessalinizador (W), o que resultou num comprimento característico equivalente a metade do comprimento do dessalinizador.

O restante princípio de modelação seguiu o mesmo procedimento utilizado no modelo de nível B para o dessalinizador solar convencional, apresentado anteriormente.

2.3 Parâmetros de desempenho do dessalinizador solar

A produtividade de um dessalinizador solar é uma medida importante para avaliar a quantidade de água destilada que o sistema é capaz de produzir num determinado intervalo de tempo. Na comunidade científica têm sido efetuados esforços para maximizar a produtividade de dessalinizadores solares, refletindo-se diretamente na sua eficiência. Posto isto, a produtividade horária de um dessalinizador solar convencional pode ser calculada da seguinte forma [50]:

$$\dot{m}[\text{kg m}^{-2}\text{h}^{-1}] = \frac{-3600 \times \rho \times D_m}{L_g} \int_0^{L_g} \frac{\partial Y}{\partial y} \Big|_{\text{vidro}} dx \quad (2.70)$$

Ao analisar a Equação (2.70), conclui-se que a produtividade depende da massa volúmica da mistura do ar e do vapor de água (ρ), do coeficiente de difusão do vapor de água no ar (D_m), do comprimento do vidro do dessalinizador (L_g) e do integral do gradiente de fração mássica do vapor de água (Y) na superfície do vidro. A massa volúmica e o coeficiente de difusão mencionados são calculados em função da temperatura local.

Alguns estudos também definem a eficiência horária como uma medida do quão eficientemente o dessalinizador utiliza a energia solar disponível para produzir água destilada, podendo esta ser calculada da seguinte forma [34, 59]:

$$\eta_h[\%] = \frac{\dot{m} \times h_{fg}}{3600 \times A_b \times I(t)} \times 100 \quad (2.71)$$

Da Equação (2.71) observa-se que a eficiência horária depende da produtividade ($\dot{m}$), do calor latente de vaporização (h_{fg}), da área total da bacia do dessalinizador (A_b) e da irradiância solar ($I(t)$), que varia em função do tempo e é medida em W/m^2 . Neste caso, o calor latente de vaporização é calculado em função da temperatura da água.

2.4 Modelos numéricos

As simulações numéricas decorreram no programa comercial de volumes finitos *Ansys-Fluent*, o qual possibilitou a resolução das equações governantes de cada nível de modelação, permitindo uma análise detalhada do comportamento do fluido e da transferência de calor associada aos principais processos que ocorrem no interior dos dessalinizadores solares. O *Ansys-Fluent*, para além de oferecer uma ampla gama de ferramentas para análise de fluidos e transferência de calor, permite também a personalização de modelos através de funções definidas pelo utilizador (*UDFs*) programadas em linguagem C, sendo esta capacidade de adaptabilidade essencial para o desenvolvimento do modelo de nível B.

Modelação nível A

O algoritmo *Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations-Consistent* (*SIMPLEC*) foi utilizado para acoplar a pressão e a velocidade e para resolver as equações governantes. Para as interpolações da pressão, foi aplicado o esquema *PREssure STaggering Option* (*PRESTO*). Os termos de convecção e difusão foram tratados com o esquema *second order upwind*.

A convergência da solução foi estabelecida para resíduos inferiores a 10^{-6} para todas as equações analisadas.

Modelação nível B

Para acoplar a velocidade e a pressão e resolver as equações governantes, foi utilizado o algoritmo *Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations* (*SIMPLE*). O esquema *PRESTO* foi aplicado para as interpolações da pressão. Para as equações de quantidade

de movimento, energia e espécies, foi empregue uma discretização *second order upwind*, enquanto que para a discretização temporal foi utilizada a discretização *first order upwind*.

A convergência das soluções das equações de energia e radiação foi estabelecida para resíduos inferiores a 10^{-6} , enquanto que para as restantes equações a convergência foi considerada aceitável para resíduos inferiores a 10^{-3} . Estes valores são os mais comuns na literatura para este nível de modelação.

Neste nível, foram desenvolvidas diversas *UDFs* para as seguintes características, de forma ordenada:

- Perfis temporais de funções polinomiais da irradiância solar direta e difusa, e da temperatura ambiente, aplicadas na superfície exterior do vidro;
- Coeficiente de difusão da mistura gasosa (Equação (2.23));
- Massa volúmica de cada constituinte da mistura gasosa (Equação (2.52));
- Coeficiente de transferência de calor por convecção na superfície exterior do vidro (Equações (2.38)-(2.46));
- Condição de fronteira nas interfaces água-ar húmido e vidro-ar húmido (Equações (2.47)-(2.50));
- Taxas de evaporação e condensação nas interfaces água-ar húmido e vidro-ar húmido, respetivamente (Equação (2.24) e Equação (2.25));
- Calor latente de vaporização e condensação, com base nas respetivas temperaturas médias das interfaces mencionadas (Equação (2.22));
- Termos fonte da equação de energia (Equação (2.19), Equação (2.20) e Equação (2.21));
- Perfil temporal do fluxo de calor concentrado ao longo do comprimento da base, representado como uma função polinomial, especificamente para o caso do dessalinizador solar de absorsor invertido (Equação (2.58(a))).

2.5 Dados de entrada do modelo de nível B

Com o intuito de analisar o desempenho do dessalinizador solar num dia representativo de Portugal, procuraram-se obter dados de entrada específicos de um local de Portugal. Nas Figura 2.6(a) e 2.6(b) são apresentadas os dados de irradiância solar e temperatura ambiente, respetivamente, recolhidos entre as sete horas da manhã do dia 5 de agosto de 2023 e a meia noite do dia 6 de agosto de 2023, em Salvaterra de Magos, localizada na região do Ribatejo. Os dados de temperatura ambiente foram obtidos através da plataforma *Visual Crossing* [60], uma *API* de dados meteorológicos, enquanto que os dados de irradiância

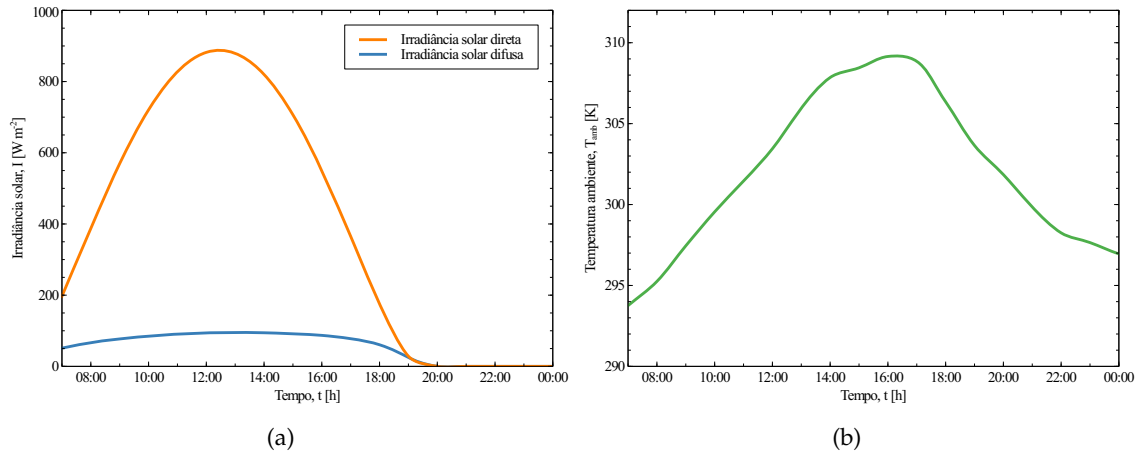


Figura 2.6: Perfis de dados de entrada dos dias 5 e 6 de agosto de 2023 na localização de Salvaterra de Magos: irradiância solar direta e difusa [61]; e (b) temperatura ambiente [60].

solar foram extraídos do *Copernicus Atmosphere Monitoring Service* [61], uma base de dados atmosféricos gerida pelo programa espacial *Copernicus*.

A escolha deste dia e local baseou-se na combinação de condições meteorológicas típicas do verão português, caracterizadas por alta irradiância solar e temperaturas elevadas, que são ideais para testar o desempenho do dessalinizador solar. Salvaterra de Magos, situada no Ribatejo, oferece um clima representativo da região central de Portugal, onde a disponibilidade de energia solar é significativa, tornando o local adequado para a análise do desempenho desta tecnologia.

Os dados de entrada aplicados nos estudos subsequentes desta dissertação incluem também as condições iniciais, nas quais a temperatura do dessalinizador e a velocidade do ar húmido foram definidas como 293 K e 0 m s^{-1} , respetivamente. A velocidade do vento foi considerada constante, com um valor de 3 m s^{-1} .

2.6 Validação

Modelação nível A

A validação dos resultados numéricos é essencial para garantir a precisão e a confiabilidade das simulações realizadas. Nesse sentido, para validar os resultados numéricos obtidos do nível A, estes serão comparados com os resultados numéricos apresentados por Rahbar e Esfahani [41].

Conforme apresentado pelos autores, o modelo matemático desenvolvido é detalhadamente descrito no Subcapítulo 2.2.1. As dimensões específicas do dessalinizador solar convencional modelado, juntamente com as temperaturas consideradas nas superfícies da água e do vidro estão listadas na Tabela 2.9. As propriedades termofísicas do ar húmido para o nível A estão apresentadas na Tabela 2.10. As frações mássicas do vapor de

água calculadas para a superfície da água e do vidro têm os valores de 0,1486 e 0,0694, respetivamente.

Tabela 2.9: Dimensões e temperaturas nas fronteiras do dessalinizador solar convencional do modelo de nível A (validação).

$T_w [^{\circ}\text{C}]$	$T_g [^{\circ}\text{C}]$	$L [\text{m}]$	$H_l [\text{m}]$	$H_r [\text{m}]$	$\theta [^{\circ}]$
63	48	0,438	0,075	0,187	14,35

Tabela 2.10: Propriedades termofísicas do ar húmido do modelo de nível A.

Propriedade	Valor
$\rho [\text{kg m}^{-3}]$	1,08
$c_p [\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}]$	4398,502
$\lambda [\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}]$	0,02866
$\mu [\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}]$	$1,974 \times 10^{-5}$
$D_{AB} [\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$	$2,982 \times 10^{-5}$

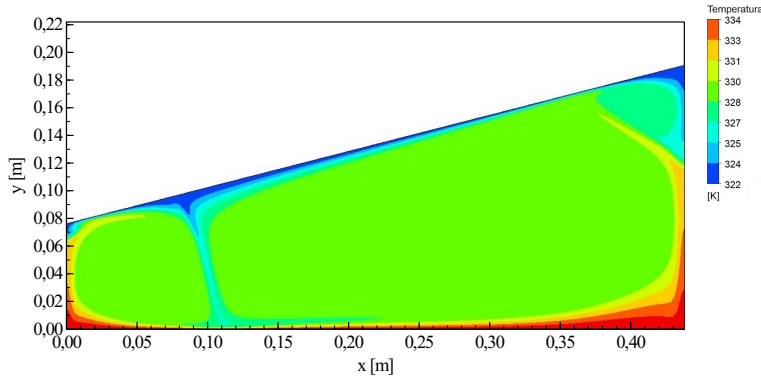
Os resultados numéricos permitiram a análise comparativa das distribuições de temperatura e de fração mássica do vapor de água entre o presente trabalho e a literatura. As Figuras 2.7(a) e 2.8(a) apresentam as distribuições de temperatura e de fração mássica do vapor de água obtidos neste trabalho, respetivamente. Esses resultados foram comparados com os obtidos por Rahbar e Esfahani [41] (Figuras 2.7(b) e 2.8(b)). A comparação permite realçar uma elevada similaridade entre os resultados obtidos. Estas quatro figuras destacam a presença de duas bolhas de recirculação e a formação de uma pluma térmica descendente e de uma pluma de fração mássica descendente, localizadas aproximadamente a $x = 0,11 \text{ m}$.

Para uma melhor clareza dos resultados obtidos, foram analisados perfis de temperatura e da componente vertical da velocidade (v) ao longo do comprimento do dessalinizador, a uma altura de $y = 0,001 \text{ m}$. Nas Figuras 2.9 e 2.10 observa-se os perfis de temperatura e da componente vertical da velocidade ao longo do comprimento do dessalinizador, respetivamente, dos resultados obtidos do presente trabalho e dos obtidos por Rahbar e Esfahani [41].

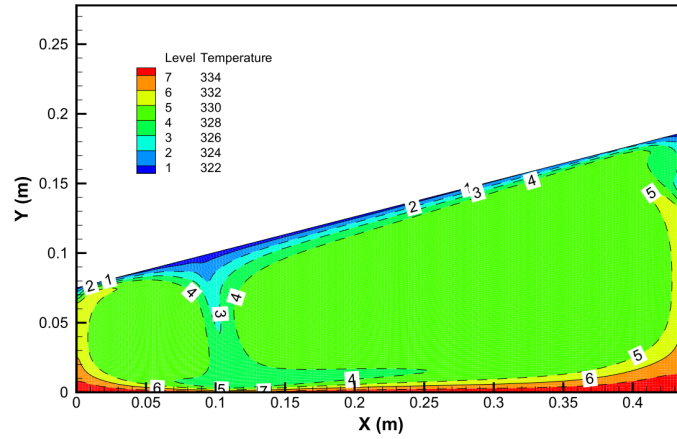
A Figura 2.11 apresenta a comparação do coeficiente de convecção na superfície da água ao longo do comprimento do dessalinizador, entre o presente trabalho e o obtido por Rahbar e Esfahani [41]. O coeficiente de convecção é calculado a partir da Equação (2.72), onde a condutividade térmica do ar húmido e a temperatura de referência são representadas por λ e T_{ref} , respetivamente.

$$h_c(x) = -\frac{\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0}}{T(x, y=0) - T_{ref}}(x) \quad (2.72)$$

Devido à ausência de uma temperatura de referência para o cálculo do coeficiente de convecção na Referência [41], foi adotada uma temperatura de referência de 310 K.



(a)



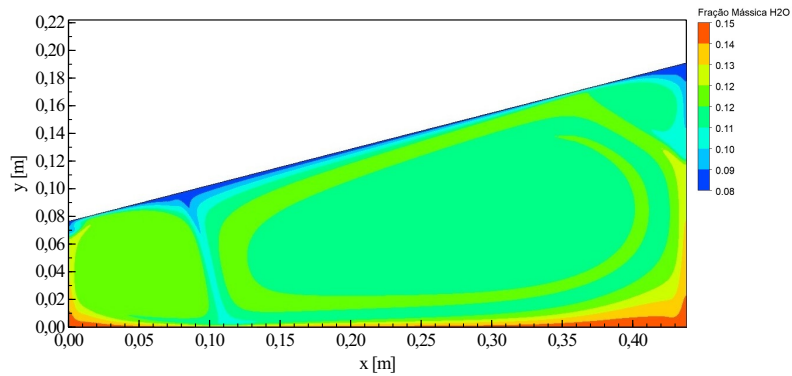
(b)

Figura 2.7: Distribuições de temperatura obtidas com o modelo de nível A (a) Presente trabalho e (b) Referência [41].

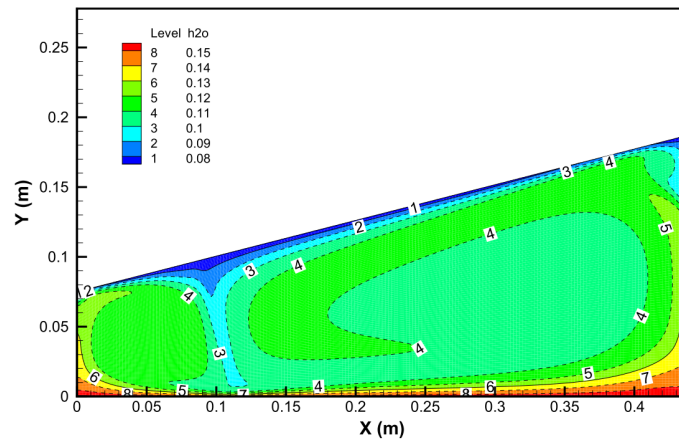
Na Figura 2.12 apresenta-se a comparação entre a taxa de evaporação por unidade de área obtida no presente trabalho e no reportado na literatura [41]. A taxa de evaporação por unidade de área foi calculada pela Equação (2.73), onde D_{AB} e ρ representam o coeficiente de difusão molecular do vapor de água no ar e a massa volúmica da mistura gasosa, respetivamente.

$$\dot{m}''(x) = -D_{AB}\rho \left. \frac{\partial Y}{\partial y} \right|_{y=0} (x) \quad (2.73)$$

Deste modo, as Figuras 2.9, 2.10, 2.11 e 2.12 permitem demonstrar que os resultados obtidos neste trabalho são consistentes com os resultados reportados na literatura [41]. Esta validação efetiva do modelo de nível A, abre caminho para o desenvolvimento de modelos mais sofisticados, como o modelo de nível B.



(a)



(b)

Figura 2.8: Distribuições de fração mássica do vapor de água obtidas com o modelo de nível A (a) Presente trabalho e (b) Referência [41].

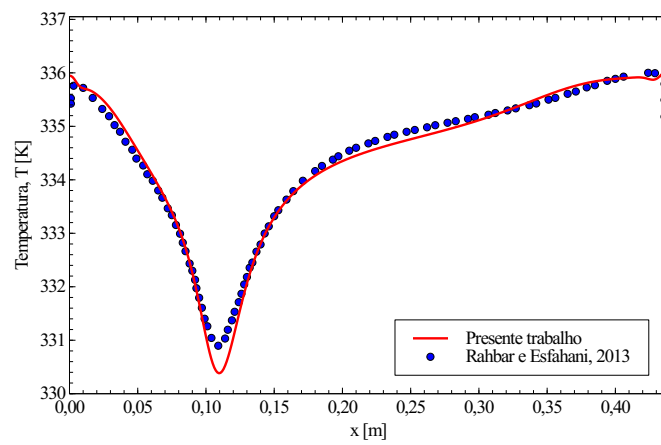


Figura 2.9: Comparação entre os perfis de temperatura a $y = 0,001$ m obtido no presente trabalho e no reportado na literatura do modelo de nível A [41].

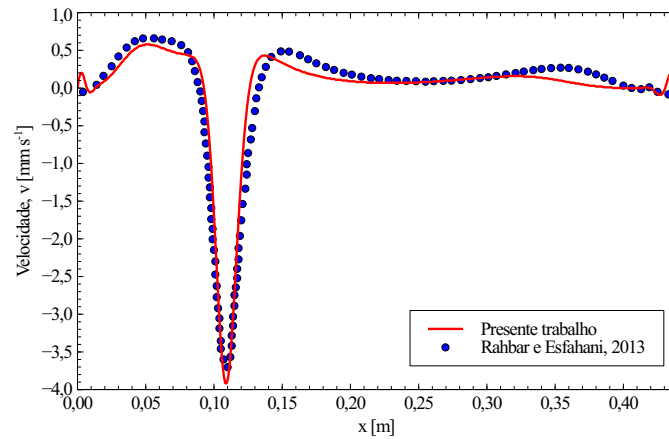


Figura 2.10: Comparação entre os perfis de v -velocidade a $y = 0,001$ m obtido no presente trabalho e no reportado na literatura do modelo de nível A [41].

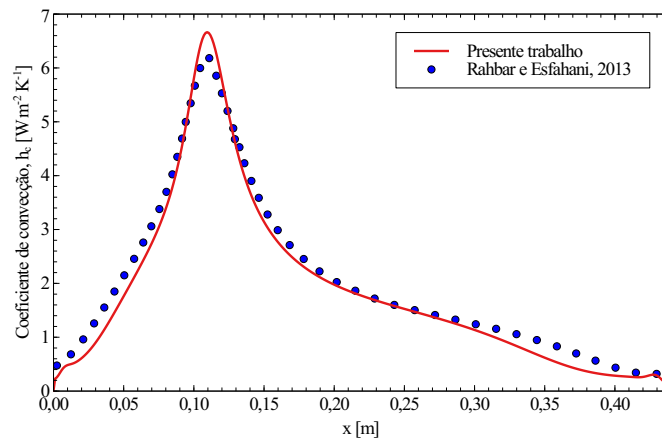


Figura 2.11: Comparação entre o coeficiente de convecção obtido no presente trabalho e no reportado na literatura do modelo de nível A [41].

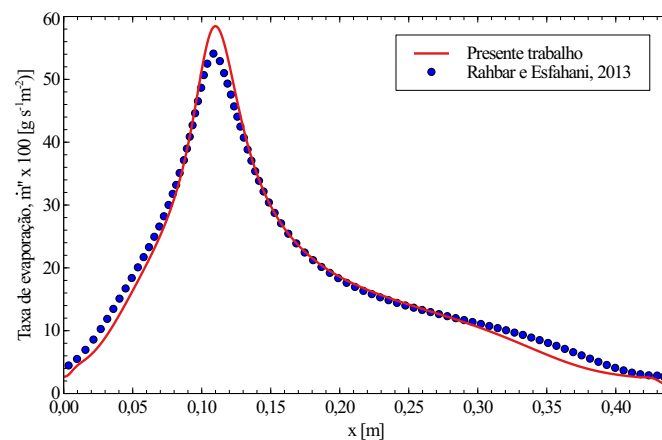


Figura 2.12: Comparação entre as taxas de evaporação obtida no presente trabalho e na reportada na literatura do modelo de nível A [41].

Modelação nível B

Para a validação dos resultados numéricos obtidos do nível B, comparou-se estes com resultados numéricos reportados na literatura por Aghakhani *et al.* [49] e Moreno *et al.* [51], e com resultados experimentais reportados na literatura por Feilizadeh *et al.* [28].

O Subcapítulo 2.2.2 descreve ao pormenor o modelo matemático desenvolvido. As dimensões do dessalinizador solar convencional modelado são apresentadas na Tabela 2.11. Conforme mencionado anteriormente, os únicos dados de entrada necessários para o desenvolvimento deste nível de modelação são os perfis de irradiância solar direta e difusa, assim como a temperatura ambiente (Figuras 2.13(a) e 2.13(b)). Estes perfis são baseados em resultados experimentais de um dia de verão no Irão [28] e são introduzidos por meio da aproximação de funções polinomiais, sendo aplicadas na superfície externa da cobertura de vidro. Por fim, para as condições iniciais, definiu-se a temperatura do dessalinizador e a velocidade do ar húmido, com valores de 302 K e 0 m s^{-1} , respetivamente. A velocidade do vento definiu-se como um valor constante de 3 m s^{-1} .

Tabela 2.11: Dimensões do dessalinizador solar convencional do modelo de nível B (validação).

L [m]	W [m]	H_w [m]	H_l [m]	t_g [m]	θ [°]
0,75	0,75	0,02	0,1	0,004	30

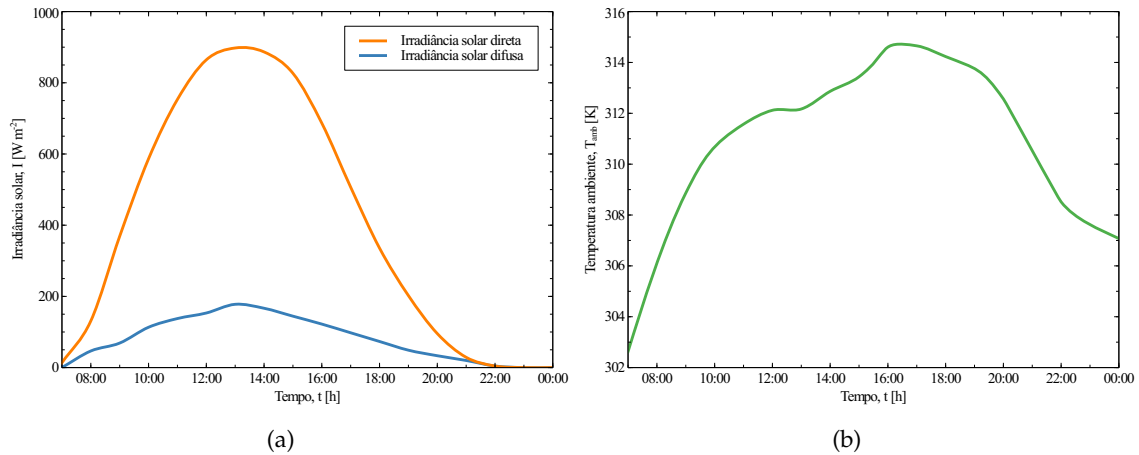


Figura 2.13: Perfis de dados de entrada: irradiância solar direta e difusa; e (b) temperatura ambiente [32, 49, 50].

Na Figura 2.14 observa-se a comparação da produtividade horária ao longo do tempo entre os resultados obtidos numericamente na presente dissertação e os resultados numéricos e experimentais reportados na literatura. No Subcapítulo 2.3, é detalhado o método de cálculo da produtividade horária.

As Figuras 2.15(a) e 2.15(b) mostram a comparação entre os resultados numéricos da temperatura média da superfície da água e da superfície interna do vidro ao longo do

tempo, respetivamente.

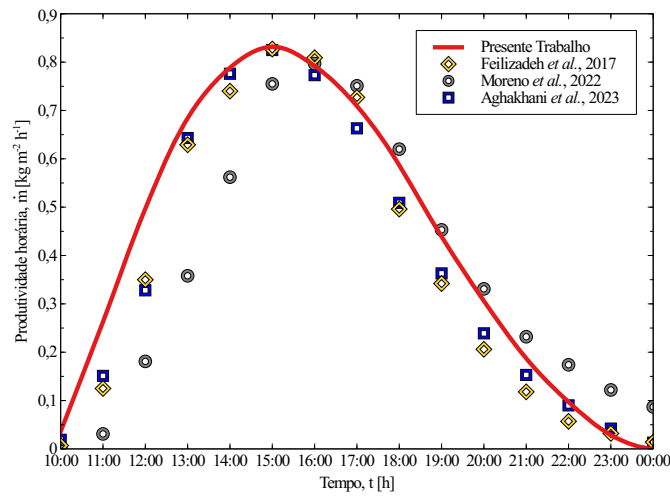


Figura 2.14: Comparação entre a produtividade horária obtida no presente trabalho e na reportada na literatura do modelo de nível B [28, 49, 51].

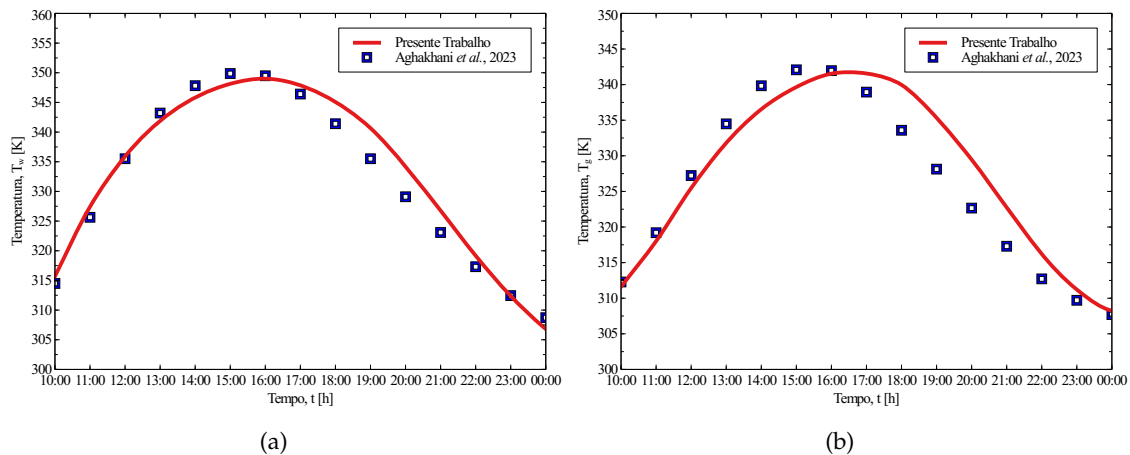


Figura 2.15: Comparação das temperaturas médias, obtidas no presente trabalho e no reportada na literatura [49], das superfícies: da água (a); e do vidro (b).

De forma a quantificar o desvio dos resultados numéricos em relação aos experimentais no que diz respeito à produtividade horária, foi calculado o erro quadrático médio (*RMSE*) e o desvio máximo. Na Tabela 2.12 são apresentados os valores correspondentes, bem como a hora em que ocorreu o desvio máximo. Estes valores indicam que a presente dissertação conseguiu uma boa aproximação entre os resultados numéricos e os experimentais. Embora os resultados numéricos obtidos por Aghakhani *et al.* [49] sejam os que mais se aproximam dos resultados experimentais, na presente dissertação obteve-se um erro quadrático médio significativamente menor do que o apresentado por Moreno *et al.* [51].

Tabela 2.12: Erro quadrático médio e desvio máximo da produtividade horária.

	Presente Trabalho	Aghakhani <i>et al.</i> , 2023 [49]	Moreno <i>et al.</i> , 2022 [51]
RMSE [kg m ⁻² h ⁻¹]	0,074	0,029	0,124
Desvio máximo [kg m ⁻² h ⁻¹]	0,146	0,064	0,271
Hora [h]	12:00	17:00	13:00

Em conclusão, os resultados obtidos apresentam consistência com os resultados reportados pela literatura, validando-se o modelo do nível B.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Estudo de independência da malha

Neste subcapítulo serão apresentados os estudos de independência da malha para os modelos de níveis A e B, de modo a garantir a confiabilidade dos resultados numéricos.

Modelação nível A

No sentido de garantir a confiabilidade e a fiabilidade dos resultados obtidos nos estudos subsequentes, é necessário realizar um estudo de independência da malha. De maneira que, analisou-se a variação dos resultados numéricos ao alterar o número de elementos da malha do dessalinizador solar modelado. Para esse efeito, considerou-se as dimensões do dessalinizador solar convencional apresentadas na secção dos modelos físicos do modelo de nível A. As temperaturas nas superfícies da água e do vidro, ou seja, nas superfícies inferior e superior do dessalinizador solar, bem como as propriedades termofísicas do ar húmido, são iguais às apresentadas no subcapítulo da validação do modelo de nível A.

No estudo de independência da malha, analisaram-se os resultados numéricos de cinco malhas com diferentes números de elementos. Na Tabela 3.1 são apresentadas as cinco malhas, onde, do Caso 1 ao Caso 5, ocorre um sucessivo refinamento da malha através do aumento do número de divisões em cada fronteira do dessalinizador no programa *Ansys-Fluent*. A independência da malha foi avaliada com base no número de Nusselt médio e na produtividade horária do dessalinizador solar. Para o modelo de nível A, o número de Nusselt médio é determinado pela Equação (3.1) e a produtividade horária é calculada pela Equação (3.2) [41], onde H representa a altura média do dessalinizador solar. Os integrais dos gradientes de temperatura e de fração mássica do vapor de água segundo o eixo vertical y ao longo do superfície da água foram obtidos pelo próprio programa. Desta forma, é possível concluir que, a partir do Caso 3, são observadas diferenças relativas desprezáveis para este tipo de modelo ($< 2\%$).

$$\overline{Nu} = \frac{-H}{L(T_w - T_g)} \int_0^L \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{\text{água}} dx \quad (3.1)$$

$$\dot{m}_{\text{horária}} = \frac{-3600 \times \rho \times D_{AB}}{L} \int_0^L \left. \frac{\partial Y}{\partial y} \right|_{\text{água}} dx \quad (3.2)$$

Tabela 3.1: Resumo dos casos e dos resultados do estudo de independência da malha do modelo de nível A.

	Número de elementos	$\overline{Nu}$ [-]	$\dot{m}_{\text{horária}}$ [kg m ⁻² h ⁻¹]	$\Delta \overline{Nu}$ [%]	$\Delta \dot{m}_{\text{horária}}$ [%]
Caso 1	1008	11,377	0,600	-9,12	-9,35
Caso 2	4032	11,878	0,601	-5,11	-9,27
Caso 3	16128	12,705	0,672	1,49	1,43
Caso 4	64512	12,645	0,670	1,01	1,11
Caso 5	258048	12,518	0,662	-	-

Neste estudo analisaram-se também os perfis de temperatura ao longo do comprimento do dessalinizador segundo uma linha horizontal, a uma altura de 0,001 m da superfície da água. A Figura 3.1 apresenta os perfis referidos para os Casos 3, 4 e 5, evidenciando que, à medida que a malha é refinada, os perfis de temperatura convergem progressivamente para uma solução comum, o que indica a estabilização da solução numérica. Esta convergência ocorre principalmente porque malhas mais refinadas conseguem captar com maior precisão os gradientes térmicos e de fração mássica do vapor de água nas proximidades das superfícies da água e do vidro, onde ocorrem as maiores variações de temperatura e de fração mássica. Assim, verifica-se, portanto, que a temperatura do Caso 4 para o Caso 5 não varia de forma significativa.

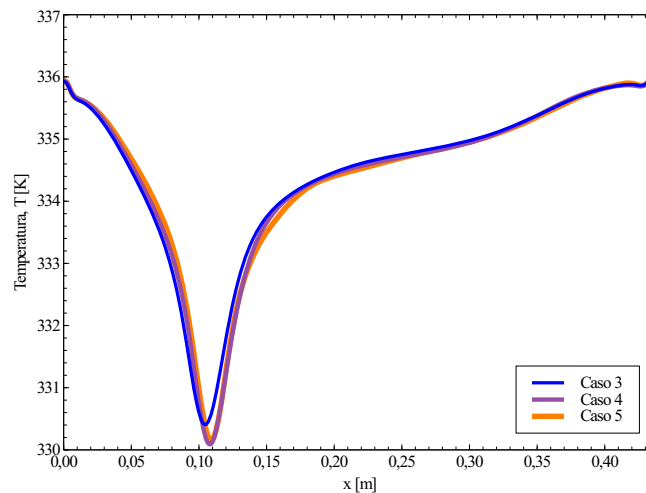


Figura 3.1: Estudo de independência da malha do nível A com diferentes números de elementos de malha através da comparação do perfil da temperatura a $y = 0,001$ m.

Tendo em conta as diferenças relativas do número de Nusselt médio e da produtividade horária apresentadas na Tabela 3.1 e os perfis de temperatura, conclui-se que a malha correspondente ao Caso 4 possui a independência e precisão necessárias para fundamentar o estudo subsequente deste nível.

Modelação nível B

Para o modelo de nível B, é igualmente fundamental realizar um estudo de independência da malha. Neste estudo, utilizaram-se as dimensões do dessalinizador solar convencional apresentadas na secção dos modelos físicos do modelo de nível B. As condições iniciais e os dados de entrada relativos à irradiância solar e à temperatura ambiente utilizados neste estudo, são apresentados na secção dos dados de entrada do modelo de nível B.

Seguindo o mesmo procedimento utilizado no estudo de independência da malha para o modelo de nível A, analisaram-se cinco malhas com diferentes números de elementos. A Tabela 3.2 apresenta os cinco casos, as respetivas produtividades cumulativas, calculadas como a soma acumulativa da produtividade horária, e as diferenças relativas associadas.

Tabela 3.2: Resumo dos casos e dos resultados do estudo de independência da malha do modelo de nível B.

	Número de elementos	Produtividade cumulativa [kg m^{-2}]	Diferença relativa [%]
Caso 1	420	7,074	-10,81
Caso 2	2755	7,412	-6,54
Caso 3	11210	7,661	-3,40
Caso 4	44840	7,974	0,54
Caso 5	64800	7,931	-

As Figuras 3.2, 3.3(a) e 3.3(b) apresentam os perfis da produtividade horária e das temperaturas médias das superfícies da água e do vidro ao longo do tempo, respetivamente.

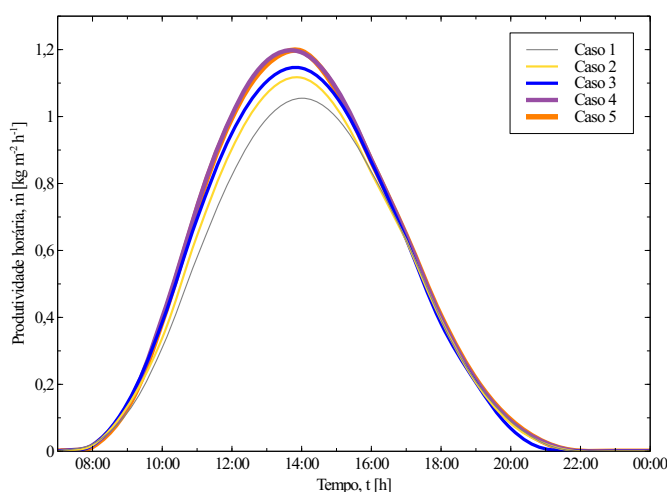


Figura 3.2: Estudo de independência da malha do nível B com diferentes números de elementos de malha através da comparação do perfil da produtividade horária do dessalinizador solar.

Deste modo, verifica-se que a diferença relativa da produtividade cumulativa entre o Caso 4 e 5 é desprezável. Além disso, as distribuições da produtividade horária e das temperaturas médias das superfícies da água e do vidro nestes casos, permanecem

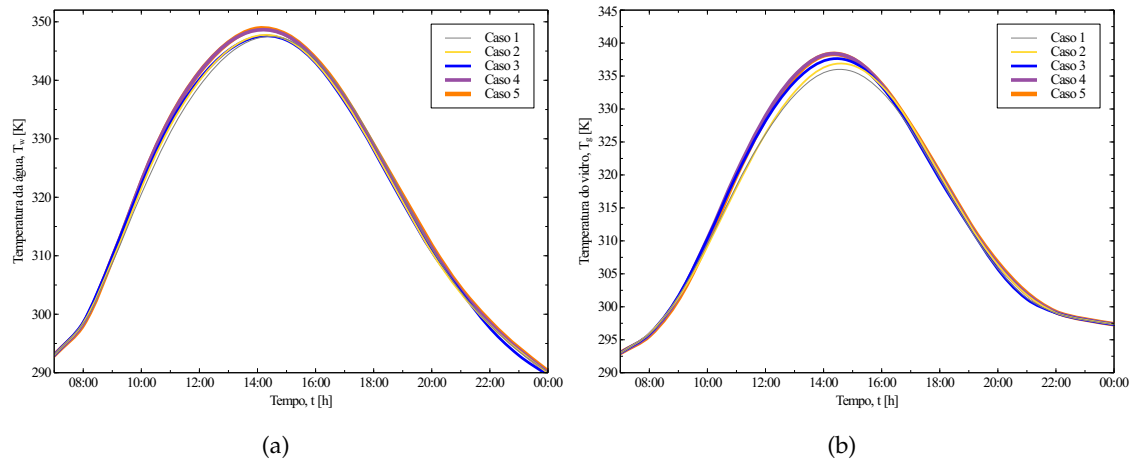


Figura 3.3: Estudo da independência da malha do modelo de nível B com diferentes números de elementos de malha através da comparação dos perfis de temperaturas médias das superfícies: da água (a); e do vidro (b).

praticamente inalteradas. Com base nesses resultados, conclui-se que a malha do Caso 4 é a mais adequada para os estudos subsequentes, oferecendo um equilíbrio ajustado entre a precisão numérica e o custo computacional.

3.2 Estudo de independência do *time step*

No presente subcapítulo será apresentado o estudo de independência do *time step* para o modelo de nível B, tratado em regime transiente, para garantir a confiabilidade dos resultados numéricos.

O modelo de nível B utiliza um regime transiente, pelo que a escolha de um *time step* apropriado é fundamental para garantir que os resultados numéricos sejam independentes do valor adotado, assegurando a fiabilidade dos resultados obtidos. A determinação de um *time step* adequado, suficientemente pequeno para garantir a precisão, mas não tão pequeno que aumente desnecessariamente o tempo de simulação, é essencial para a eficiência dos próximos estudos.

Posto isto, realizou-se um estudo de independência do *time step*, onde se averiguou três casos com diferentes *time steps*. A Tabela 3.3 apresenta os três casos estudados, as correspondentes produtividades cumulativas e a diferenças relativas associadas. As Figuras 3.4, 3.5(a) e 3.5(b) apresentam os perfis da produtividade horária e das temperaturas médias das superfícies da água e do vidro ao longo do tempo, respetivamente, verificando-se que estes perfis não variam significativamente entre os casos 1 e 2.

Como a diferença relativa da produtividade cumulativa entre o Caso 1 e o Caso 2 é praticamente desprezável, optou-se por adotar o *time step* de 10 segundos nos estudos subsequentes, minimizando assim o custo computacional e o tempo de simulação.

Tabela 3.3: Resumo dos casos e dos resultados do estudo de independência do *time step* do modelo de nível B.

	<i>Time step</i> [s]	Produtividade cumulativa [kg m ⁻²]	Diferença relativa [%]
Caso 1	5	7,902	-
Caso 2	10	7,974	0,91
Caso 3	20	8,348	5,64

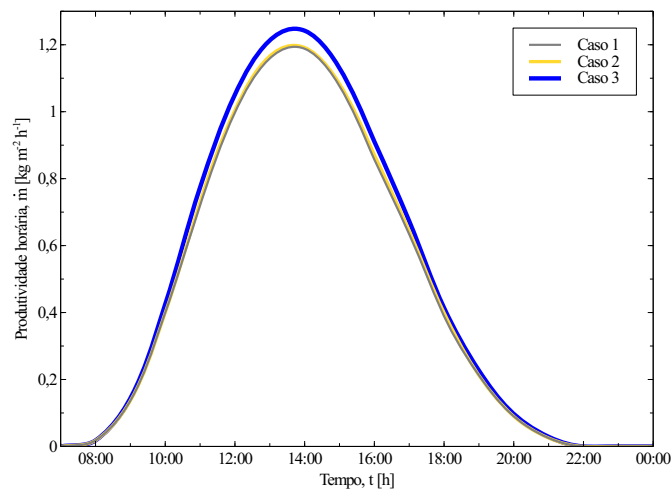


Figura 3.4: Estudo de independência do *time step* do nível B com diferentes *time steps* através da comparação do perfil da produtividade horária do dessalinizador solar.

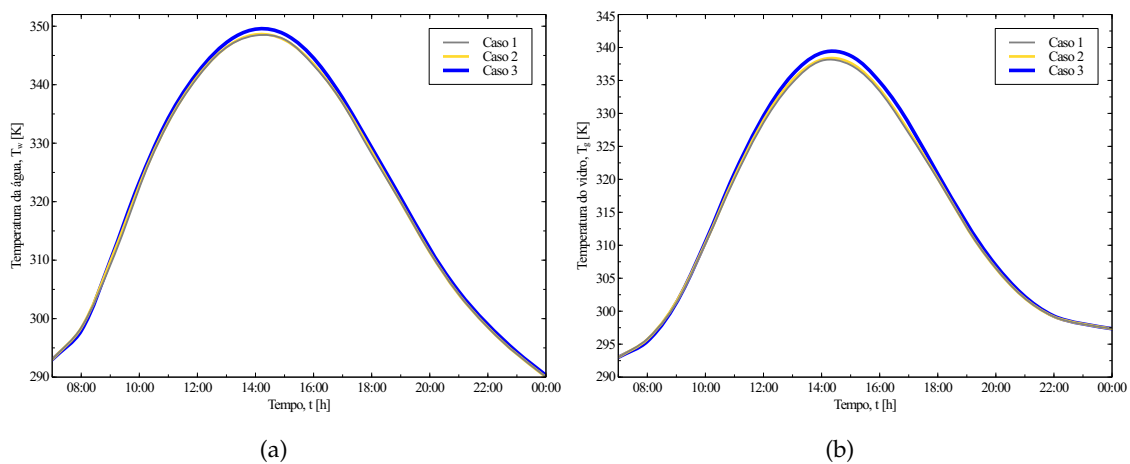


Figura 3.5: Estudo de independência do *time step* do modelo de nível B com diferentes *time steps* através da comparação dos perfis de temperaturas médias das superfícies: da água (a); e do vidro (b).

3.3 Comparação dos níveis

No sentido de avaliar a capacidade preditiva do modelo de nível A, realizou-se uma comparação com o modelo de nível B, visto que este último é mais sofisticado por incluir aspetos importantes na dessalinização solar que o modelo de nível A não considera.

No estudo comparativo, procurou-se assegurar que as dimensões do dessalinizador solar convencional do modelo de nível A correspondessem às dimensões da zona de ar húmido do dessalinizador solar convencional do modelo de nível B, dado que o modelo de nível A inclui apenas este fluido. Assim, as dimensões dos dessalinizadores solares convencionais em ambos os níveis de modelação são as mesmas apresentadas na secção dos modelos físicos para cada nível.

Tendo em conta que o nível A opera em regime estacionário e o nível B em regime transiente, a comparação entre ambos foi realizada considerando intervalos de tempo específicos do nível B, incluindo, no limite, um instante de tempo particular. Os intervalos de tempo e o instante analisados estão apresentados na Tabela 3.4, iniciando-se com um intervalo mais amplo que é progressivamente reduzido até alcançar o instante em que a produtividade horária do modelo de nível B atingiu o seu valor máximo, ou seja, às 14 horas.

Tabela 3.4: Horários correspondentes para intervalos de tempo e um instante específico.

	Horário
Intervalo 1	11:00 - 18:00
Intervalo 2	13:00 - 16:00
Intervalo 3	13:00 - 15:00
Instante	14:00

As temperaturas da água e do vidro no modelo de nível A foram determinadas pela média das temperaturas das superfícies da água e do vidro obtidas no modelo de nível B para cada intervalo de tempo. Com base nessas temperaturas, calcularam-se as propriedades do ar húmido e as frações mássicas de vapor de água nas fronteiras do dessalinizador solar do modelo de nível A, que dependem diretamente dessas mesmas temperaturas. As equações utilizadas para calcular estas propriedades encontram-se na secção dos modelos matemáticos para o modelo de nível A, e os valores resultantes estão apresentados na Tabela 3.5.

De seguida, para cada intervalo e instante do modelo de nível A, foi calculada a produtividade horária e compararam-se os valores obtidos com as respetivas produtividades horárias do modelo de nível B. As produtividades horárias do modelo de nível B foram calculadas como a média das produtividades ao longo de cada intervalo. Na Tabela 3.6 são apresentadas as produtividades mencionadas, bem como a respetiva diferença relativa. Destaca-se que a menor diferença relativa ocorreu no instante das 14 horas. No entanto, para os intervalos, a diferença relativa manteve-se na mesma ordem de grandeza, o que sugere que a capacidade preditiva do modelo de nível A não é significativamente

Tabela 3.5: Resumo das propriedades termofísicas do ar húmido, temperaturas médias e frações mássicas do vapor de água para cada intervalo e instante.

Propriedade	Intervalo 1	Intervalo 2	Intervalo 3	Instante
$\overline{T_w}$ [°C]	67,7	73,4	75,0	75,5
$\overline{T_g}$ [°C]	57,0	63,0	64,8	65,0
Y_w	0,187	0,248	0,269	0,275
Y_g	0,110	0,149	0,162	0,164
ρ [kg m ⁻³]	1,05	1,04	1,03	1,03
c_p [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	5288,06	6129,67	6383,81	6441,13
λ [W m ⁻¹ K ⁻¹]	0,0292	0,0296	0,0298	0,0298
μ [kg m ⁻¹ s ⁻¹]	2,006e-5	2,033e-5	2,041e-5	2,043e-5
D_{AB} [m ² s ⁻¹]	3,09e-5	3,19e-5	3,21e-5	3,22e-5

influenciada pela escolha entre considerar um intervalo ou um instante específico.

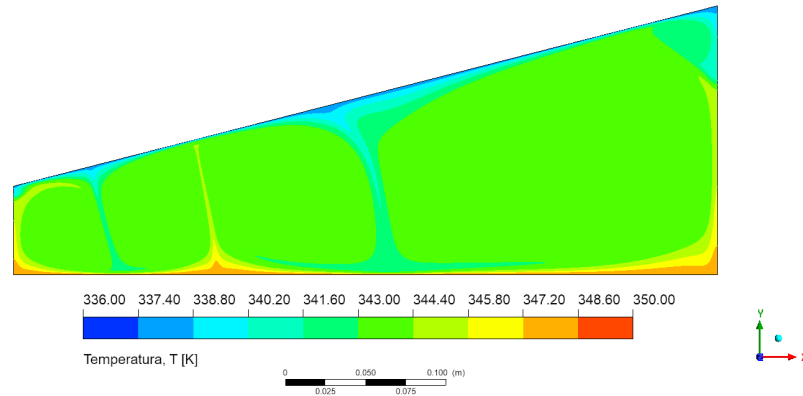
Tabela 3.6: Resumo da comparação das produtividades horárias obtidas pelos níveis A e B.

	$\dot{m}_{\text{horária}}$ [kg m ⁻² h ⁻¹] (Nível A)	$\dot{m}_{\text{horária}}$ [kg m ⁻² h ⁻¹] (Nível B)	$\Delta\dot{m}_{\text{horária}}$ [%]
Intervalo 1	0,856	0,887	-3,49
Intervalo 2	1,027	1,078	-4,73
Intervalo 3	1,104	1,138	-2,99
Instante	1,166	1,192	-2,18

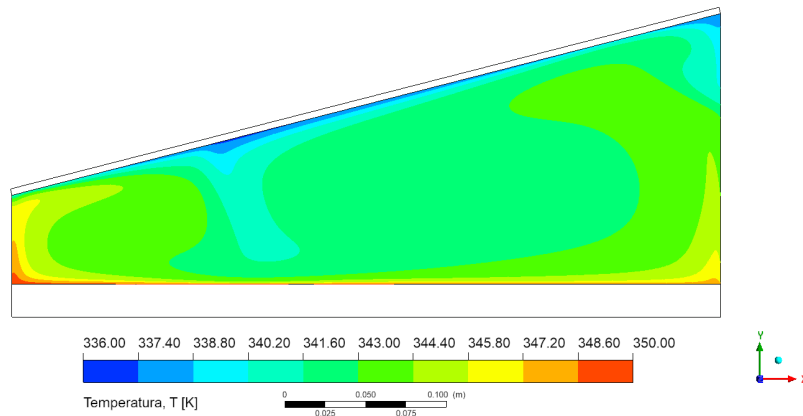
Para uma comparação mais detalhada, analisou-se as distribuições de temperatura do ar húmido e fração mássica do vapor de água dos dessalinizadores solares de ambos os modelos, considerando o instante das 14 horas. As Figuras 3.6(a) e 3.6(b) apresentam as distribuições de temperatura da região do ar húmido para os modelos de nível A e B, respetivamente, para o instante das 14 horas. Já nas Figuras 3.7(a) e 3.7(b), observam-se as distribuições de fração mássica do vapor de água para os modelos de nível A e B, respetivamente, também para o instante das 14 horas.

Para o modelo de nível A, verifica-se a formação de quatro bolhas de recirculação, acompanhadas por duas plumas térmicas descendentes e uma ascendente, com temperaturas de 340,2 e 344,4 K, respetivamente. Em contrapartida, no modelo de nível B, ocorreu apenas a formação de duas bolhas de recirculação, associadas a uma pluma térmica descendente com uma temperatura de 340,2 K. No modelo de nível A, a temperatura no centro das quatro bolhas de recirculação é uniforme, com um valor de 343 K. Por outro lado, no modelo de nível B, a temperatura no centro das bolhas de recirculação varia, apresentando 343 K na bolha do lado esquerdo e 341,6 K na bolha localizada no lado direito.

Nas distribuições de fração mássica do vapor de água, observa-se que, junto às superfícies da água e do vidro, as frações mássicas calculadas e inseridas diretamente no programa para o modelo de nível A são idênticas às calculadas pelo programa no modelo



(a)



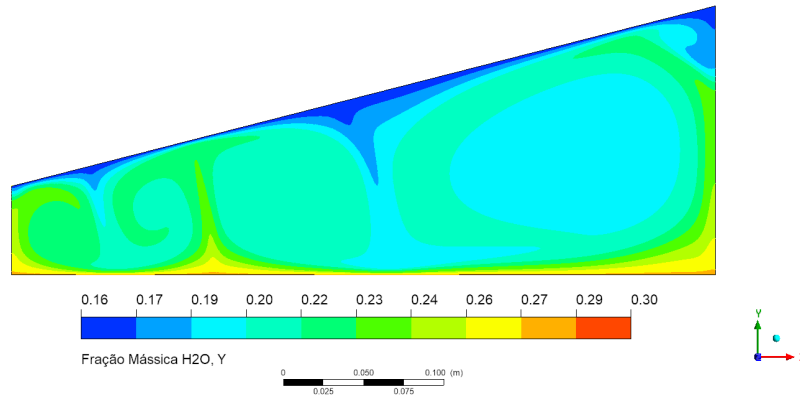
(b)

Figura 3.6: Distribuições de temperatura do ar húmido para o instante das 14 horas obtidas com o modelo de nível A (a) e o modelo de nível B (b).

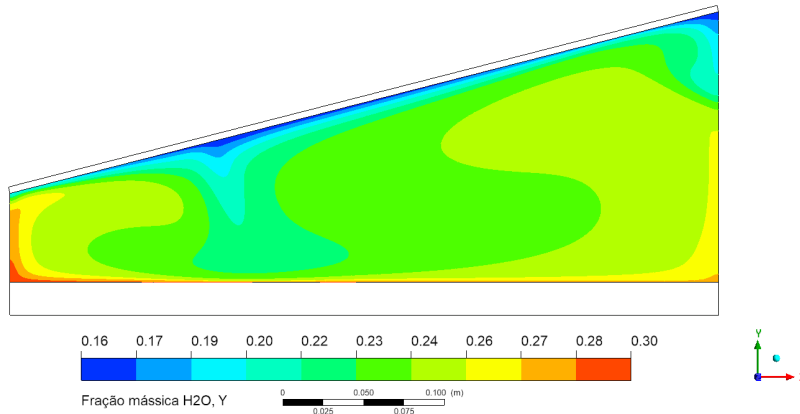
de nível B. No entanto, enquanto que as frações mássicas no centro das bolhas no modelo de nível A tendem a diminuir ao longo do comprimento do dessalinizador, no modelo de nível B, essas frações mantêm-se mais uniformes.

A Figura 3.8 apresenta uma comparação da variação de temperatura ao longo do comprimento dos dessalinizadores, a uma distância de 1 mm da superfície livre da água, entre os modelos para o instante das 14 horas. Esta comparação evidencia as diferentes localizações das plumas térmicas ao longo do dessalinizador, realçando também as diferenças significativas nos valores de temperaturas das plumas entre os dois modelos.

Em suma, a análise comparativa entre os modelos de nível A e B revelou diferenças significativas na distribuição de temperatura e fração mássica do vapor de água nos dessalinizadores solares. O modelo de nível A apresentou um maior número de formação de bolhas de recirculação e plumas térmicas, com variações mais acentuadas nos valores de fração mássica no centro das bolhas ao longo do comprimento do dessalinizador. Por



(a)



(b)

Figura 3.7: Distribuições de fração mássica do vapor de água para o instante das 14 horas obtidas com o modelo de nível A (a) e o modelo de nível B (b).

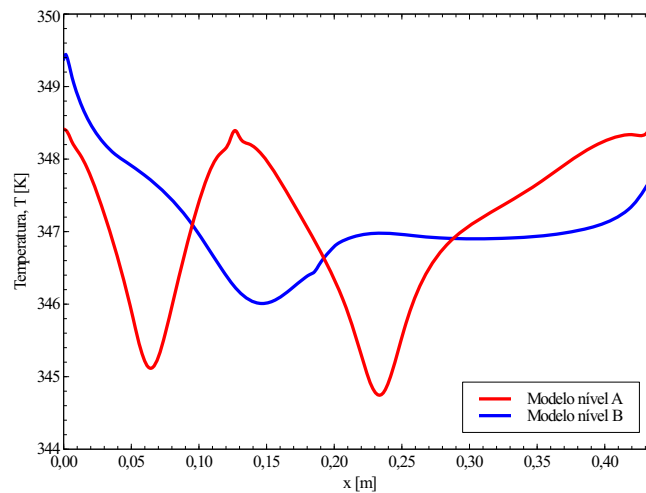


Figura 3.8: Comparação dos perfis de temperatura ao longo do comprimento do dessalinizador, a uma distância de 1 mm da superfície livre da água para os modelos de níveis A e B.

outro lado, o modelo de nível B demonstrou uma maior uniformidade, especialmente na fração mássica do vapor de água. As principais diferenças observadas sugerem que, no modelo de nível A, a consideração apenas do ar húmido e a suposição de temperaturas constantes na superfície do vidro e da água resultam em distribuições significativamente diferentes de temperatura e fração mássica do vapor de água em comparação com o modelo de nível B. Apesar dessas diferenças, a capacidade preditiva do modelo de nível A para a produtividade horária mostrou-se consistente, independentemente de se considerar intervalos ou o instante específico para a análise.

Desta forma, o modelo de nível A, apesar da sua simplicidade, facilidade de implementação, curto tempo de simulação e baixo custo computacional, pode subestimar a complexidade do processo de dessalinização em dessalinizadores solares. Por conseguinte, o modelo de nível B é mais adequado para os estudos subsequentes, por retratar com maior precisão a realidade do processo de dessalinização. Ainda assim, acredita-se que o modelo de nível A pode ser útil em contextos onde se necessita de resultados rápidos e a precisão possa ser secundária.

3.4 Influência dos parâmetros climáticos, operacionais e de projeto

O estudo da influência de parâmetros climáticos, operacionais e de projeto é fundamental para otimizar o desempenho do dessalinizador solar. Ao identificar e ajustar as variáveis que impactam diretamente o processo de dessalinização, é possível não apenas aumentar a produção de água potável e maximizar o aproveitamento dos recursos disponíveis, mas também reduzir os custos económicos associados à construção do dessalinizador. Este conhecimento também possibilita o desenvolvimento de soluções mais eficientes, contribuindo para a sustentabilidade a longo prazo e a viabilidade do uso de dessalinizadores solares em diversas regiões.

Os estudos realizados incidiram sobre influência da profundidade da água na bacia, da velocidade do vento, da espessura da cobertura de vidro e da inclinação da cobertura de vidro no desempenho do dessalinizador solar convencional. Todos os estudos realizados incluíram a simulação numérica correspondente à situação do estudo de independência da malha e do *time step* do modelo de nível B, variando apenas um parâmetro específico em cada caso, permitindo uma comparação direta e precisa dos efeitos de cada variável sobre o desempenho do dessalinizador solar.

3.4.1 Influência da profundidade da água na bacia

No estudo da profundidade da água líquida na bacia do dessalinizador solar, analisaram-se duas profundidades de água líquida (H_w), de 2 cm e 4 cm. O objetivo deste estudo é investigar como uma maior profundidade de água líquida influencia a produtividade do dessalinizador solar.

3.4. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS CLIMÁTICOS, OPERACIONAIS E DE PROJETO

As Figuras 3.9(a) e 3.9(b) apresentam, respectivamente, a produtividade horária e a produtividade cumulativa para ambas as profundidades. Já as Figuras 3.10(a) e 3.10(b) mostram as temperaturas médias das superfícies da água líquida e do interior do vidro ao longo do tempo.

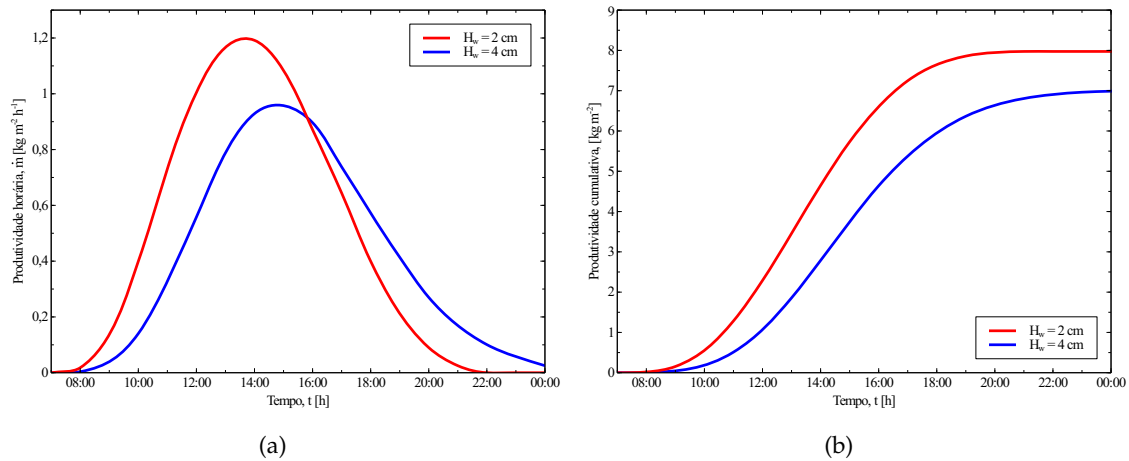


Figura 3.9: Produtividade do dessalinizador solar para diferentes profundidades de água líquida: (a) perfis horários; e (b) perfis cumulativos.

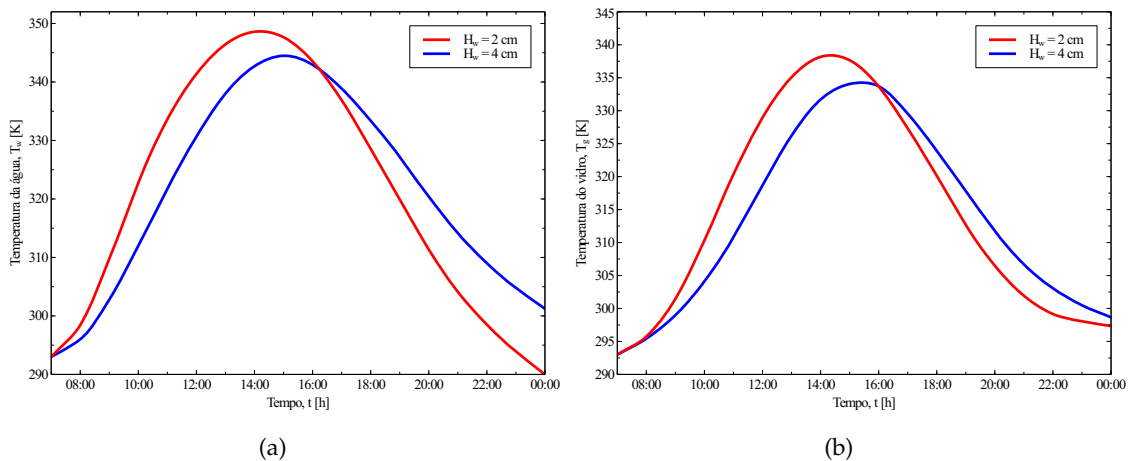


Figura 3.10: Perfis de temperatura da água (a) e do vidro (b) ao longo do tempo para diferentes profundidades de água líquida.

A produtividade horária é superior para a profundidade de 2 cm até aproximadamente às 16 horas, uma vez que um menor volume de água líquida aquece mais rapidamente, permitindo que o processo de evaporação ocorra mais rapidamente, resultando numa maior produtividade. Ainda assim, o atraso no aquecimento da água para profundidades maiores contribui para uma produção noturna mais elevada.

No que toca à temperatura da água, é possível verificar que, no caso do dessalinizador com profundidade de água de 2 cm, a água líquida aquece mais rapidamente e atinge

uma temperatura mais elevada antes do que no dessalinizador com uma profundidade de água de 4 cm, dado que, com um volume menor de água, o calor é absorvido mais rapidamente. Por outro lado, um volume maior de água requer mais tempo para aquecer completamente, o que resulta em temperaturas mais baixas inicialmente.

A temperatura do vidro para a profundidade de 2 cm é inicialmente superior devido à maior taxa de evaporação, o que faz com que mais calor seja transferido da água líquida para o vidro, elevando a sua temperatura. No entanto, os resultados mostram que, a partir das 16 horas, as temperaturas da superfície da água e do vidro para a profundidade de 4 cm ultrapassam as da profundidade de 2 cm. Isto ocorre porque, assim que a água de maior volume absorve calor suficiente, consegue armazená-lo por mais tempo, e eventualmente, manter uma temperatura mais elevada em comparação com a profundidade de 2 cm. Embora o dessalinizador com 2 cm de profundidade de água aqueça mais rapidamente, também perde calor mais rapidamente, o que explica o ponto de interseção observado nas Figuras 3.10(a) e 3.10(b). Estes resultados são consistentes com os resultados apresentados na literatura [32].

As Figuras 3.11(a) e 3.11(b) apresentam as distribuições de temperatura para as profundidades de água líquida de 2 cm e 4 cm, respetivamente, para o instante das 14 horas. Este instante corresponde ao pico de produtividade horária do dessalinizador solar com uma profundidade de água de 2 cm.

A comparação das distribuições de temperatura entre as diferentes profundidades de água líquida revelam que, para o caso da profundidade de água a 4 cm, as temperaturas registadas foram mais baixas no geral, embora, em ambos os cenários, se tenham formado duas bolhas de recirculação com uma pluma térmica descendente.

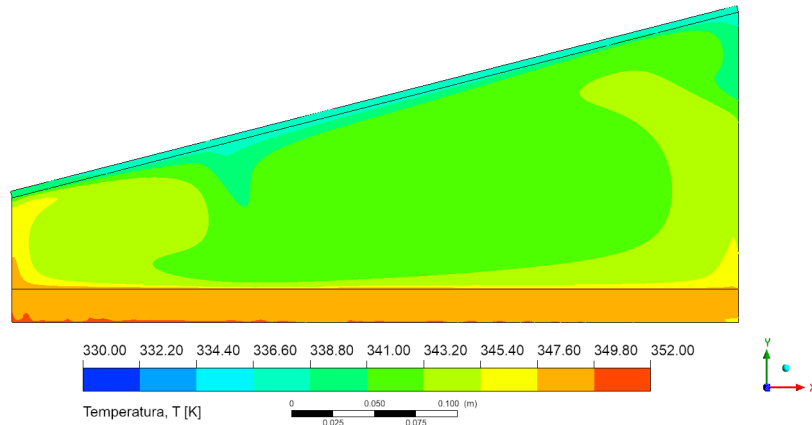
As Figuras 3.12(a) e 3.12(b) apresentam as distribuições de fração mássica do vapor de água para as profundidades de água líquida de 2 cm e 4 cm, respetivamente, para o instante das 14 horas.

Quanto à comparação das distribuições de fração mássica do vapor de água para as diferentes profundidades, esta revelou que, os valores de fração mássica também foram inferiores para a profundidade de 4 cm, mas, tal como nas temperaturas, ambas as situações apresentaram a pluma descendente a separar as bolhas de recirculação.

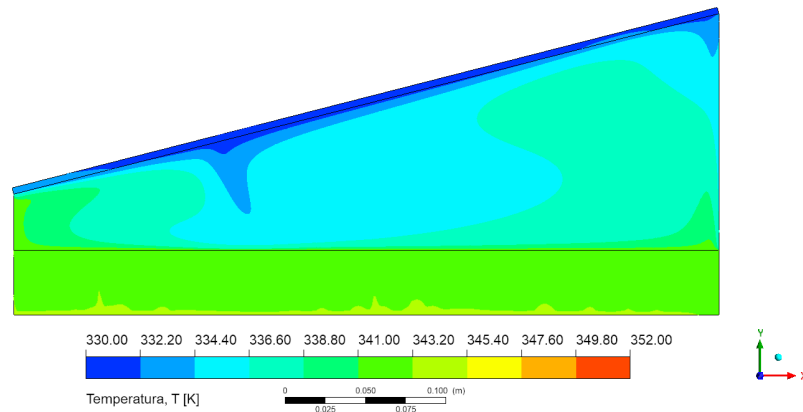
Já as Figuras 3.13(a) e 3.13(b) apresentam as distribuições de velocidade para as profundidades de água líquida de 2 cm e 4 cm, respetivamente, para o instante das 14 horas.

Em relação à comparação das distribuições de velocidade para as diferentes profundidades, demonstrou-se que, os valores de velocidade foram igualmente mais baixos para a profundidade de 4 cm, especialmente nas junto às superfícies do vidro e da água, evidenciando dois vórtices principais.

O dessalinizador solar com uma profundidade de água na bacia de 4 cm apresentou uma diminuição na produtividade cumulativa de 12,37% em comparação com o dessalinizador solar com uma profundidade de água na bacia de 2 cm. Isso sugere que, para maximizar a produtividade cumulativa, a profundidade de 2 cm é a melhor opção, pois permite um



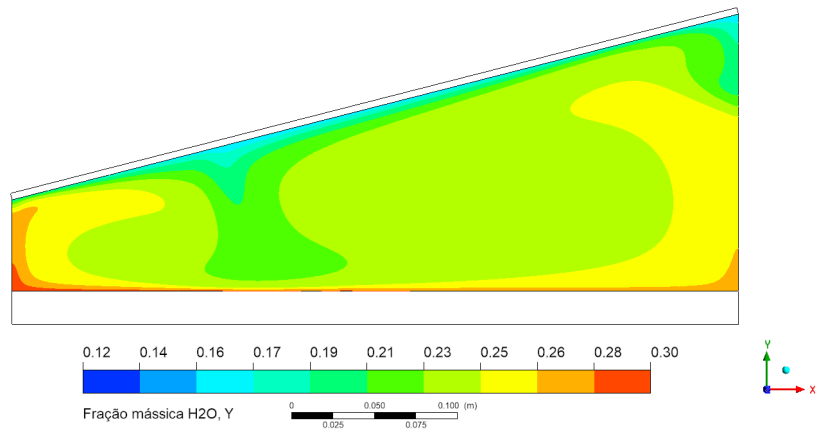
(a)



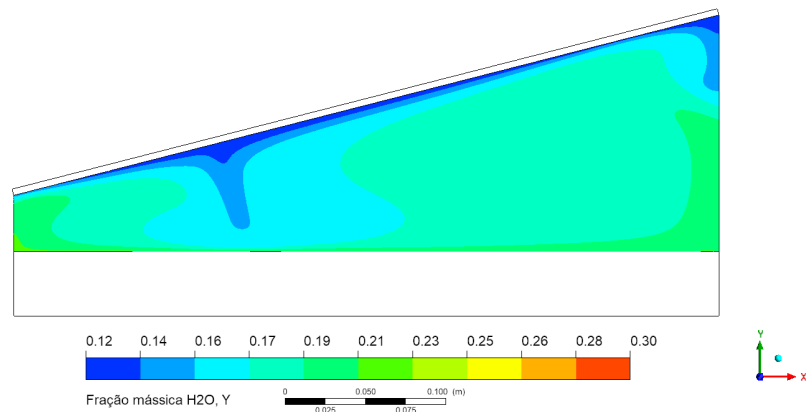
(b)

Figura 3.11: Comparação das distribuições de temperatura para o instante das 14 horas entre os dessalinizadores solares com profundidades de água líquida de: (a) 2 cm; e (b) 4 cm.

aquecimento e evaporação mais rápidos, resultando num maior desempenho num curto prazo. No entanto, a escolha entre 2 cm e 4 cm de profundidade de água líquida pode ser feita com base nas necessidades específicas da aplicação da tecnologia. Enquanto que a profundidade de 2 cm oferece uma maior produtividade cumulativa, a profundidade de 4 cm pode ser mais vantajosa para operações de longa duração ou para maximizar a produção de água destilada durante a noite, graças à sua capacidade de armazenar calor por mais tempo e garantir uma produção contínua, mesmo após o pôr do sol. Além disso, a profundidade de 4 cm pode proporcionar uma maior estabilidade térmica, o que pode ser fundamental em condições climáticas que se alterem drasticamente.



(a)



(b)

Figura 3.12: Comparação das distribuições de fração mássica do vapor de água para o instante das 14 horas entre os dessalinizadores solares com profundidades de água líquida de: (a) 2 cm; e (b) 4 cm.

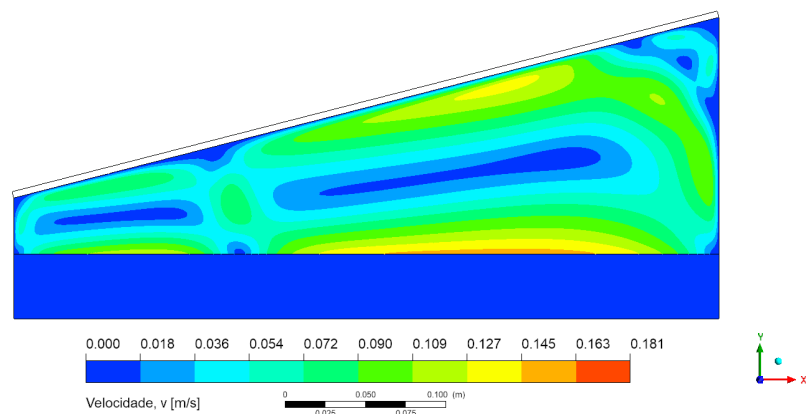
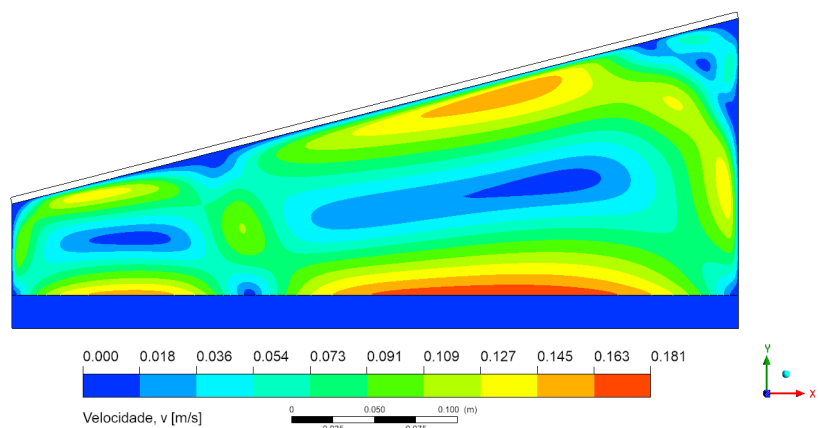


Figura 3.13: Comparação das distribuições de velocidade para o instante das 14 horas entre os dessalinizadores solares com profundidades de água líquida de: (a) 2 cm; e (b) 4 cm.

3.4.2 Influência da velocidade do vento

O presente estudo investiga o efeito da velocidade do vento no desempenho do dessalinizador solar, considerando a velocidade do vento como constante ao longo do tempo, com valores de 1 m s^{-1} , 3 m s^{-1} e 9 m s^{-1} . Este estudo é particularmente relevante, na medida em que a velocidade do vento contribui para o arrefecimento do vidro, promovendo a condensação do vapor de água. Consequentemente, o desempenho do dessalinizador pode ser significativamente influenciado por este parâmetro climático.

As Figuras 3.14(a) e 3.14(b) apresentam, respetivamente, a produtividade horária e a produtividade cumulativa para as diferentes velocidades do vento. As Figuras 3.15(a) e 3.15(b) mostram as temperaturas médias das superfícies da água líquida e do interior do vidro ao longo do tempo.

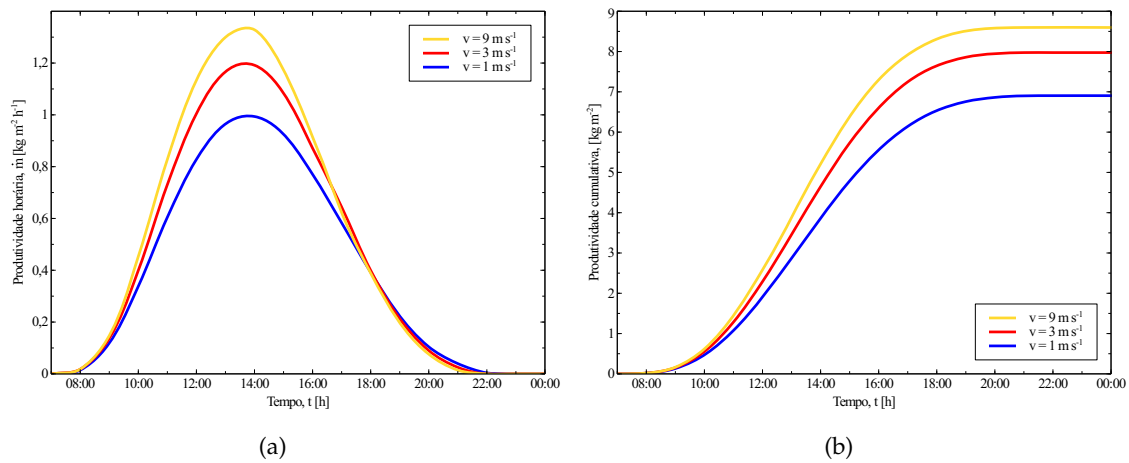


Figura 3.14: Produtividade do dessalinizador solar para diferentes velocidades do vento: (a) perfis horários; e (b) perfis cumulativos.

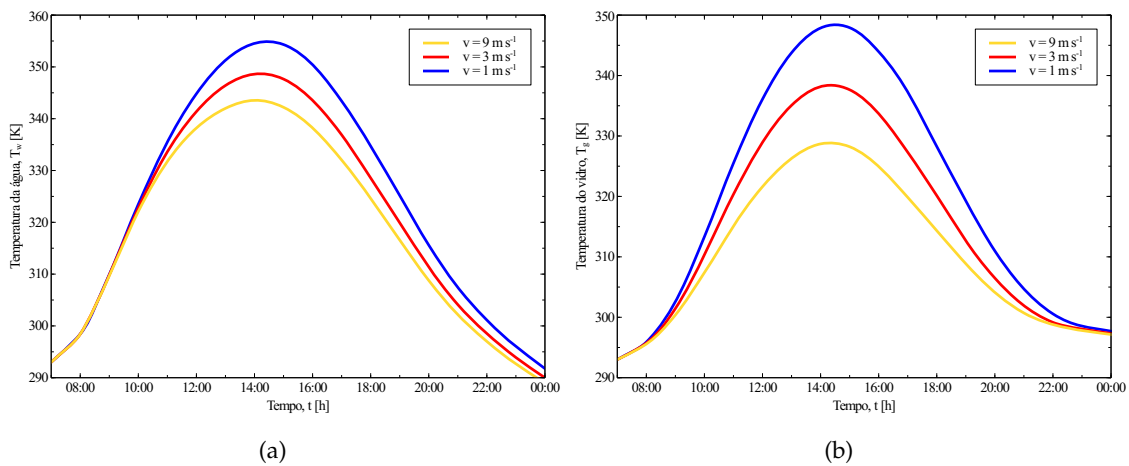


Figura 3.15: Perfis de temperatura da água (a) e do vidro (b) ao longo do tempo para diferentes velocidades do vento.

3.4. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS CLIMÁTICOS, OPERACIONAIS E DE PROJETO

A velocidade do vento de 1 m s^{-1} revelou atingir a menor produtividade horária dos três casos analisados até aproximadamente às 18 horas. No entanto, a velocidade de 3 m s^{-1} apresentou uma produtividade inferior quando comparada com a de 9 m s^{-1} , já que, quanto menor é a velocidade do vento, menor é a transferência de calor por convecção forçada, resultando num arrefecimento mais lento da superfície do vidro. Contudo, após as 18 horas, a produtividade horária no caso da velocidade de 9 m s^{-1} diminui para valores inferiores aos da velocidade de 3 m s^{-1} , devido ao sobrearrefecimento do vidro.

Relativamente à temperatura da superfície do vidro, observou-se que, para a velocidade de 9 m s^{-1} , esta foi a mais baixa entre os três casos analisados, o que indica que velocidades do vento mais elevadas intensificam o arrefecimento do vidro. De forma semelhante, a temperatura da superfície da água apresenta uma tendência similar, embora com uma diferença de magnitude menor entre as diferentes velocidades.

Num dessalinizador solar, a taxa de evaporação depende fortemente da diferença de temperaturas entre o vapor de água e a superfície do vidro [32], sendo que temperaturas elevadas da água e temperaturas baixas do vidro favorecem a condensação do vapor de água. Inicialmente, com uma velocidade de 9 m s^{-1} , a superfície do vidro arrefece de forma eficaz, o que aumenta a diferença de temperatura entre a água e o vidro, aumentando a taxa de condensação e, consequentemente, a produtividade do sistema. Depois das 18 horas, a velocidade de 9 m s^{-1} continua a arrefecer o vidro mais do que o necessário, levando a um ponto em que este se torna demasiado frio em relação à superfície da água. Este arrefecimento excessivo provoca uma redução na taxa de evaporação, à medida que a diferença de temperaturas entre a água e o vidro começa a diminuir.

Adicionalmente, depois do instante mencionado, a água líquida pode perder uma quantidade significativa de calor devido à contínua evaporação e ao constante arrefecimento do vidro, diminuindo a diferença entre as temperaturas da água e do vidro. Com a diminuição da evaporação, a produtividade diminui também, o que explica porque a produtividade no caso da velocidade de 9 m s^{-1} se torna inferior à verificada na velocidade de 3 m s^{-1} . Estes resultados são consistentes com os resultados apresentados na literatura [32].

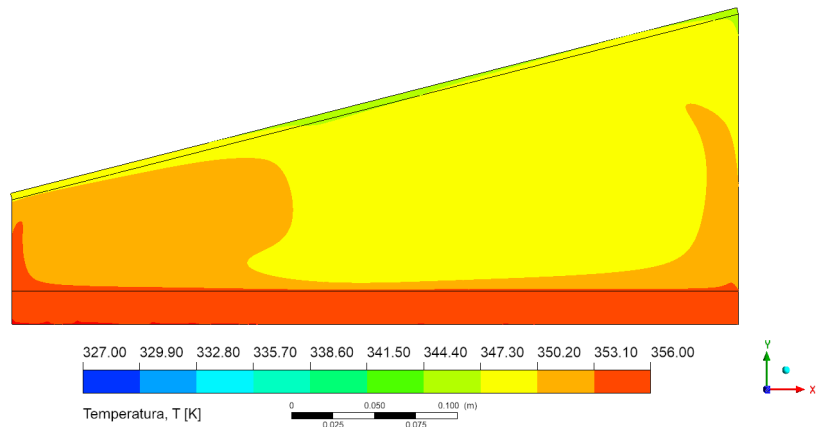
A velocidade do vento de 9 m s^{-1} resultou num aumento de 7,81% na produtividade cumulativa, em comparação com a velocidade de 3 m s^{-1} . Em contraste, uma velocidade do vento de 1 m s^{-1} causou uma diminuição de 13,41% na produtividade cumulativa em relação à velocidade de 3 m s^{-1} .

As Figuras 3.16(a), 3.16(b) e 3.16(c) apresentam a comparação de distribuição de temperatura entre os dessalinizadores com velocidades do vento de 1 m s^{-1} , 3 m s^{-1} e 9 m s^{-1} , respetivamente, para o instante das 14 horas. As Figuras 3.17(a), 3.17(b) e 3.17(c) mostram a comparação de distribuição de fração mássica do vapor de água entre os dessalinizadores com velocidades do vento de 1 m s^{-1} , 3 m s^{-1} e 9 m s^{-1} , respetivamente, para o instante das 14 horas. As Figuras 3.18(a), 3.18(b) e 3.18(c) exibem a comparação de distribuição de velocidade entre os dessalinizadores com velocidades do vento de 1 m s^{-1} , 3 m s^{-1} e 9 m s^{-1} , respetivamente, para o instante das 14 horas.

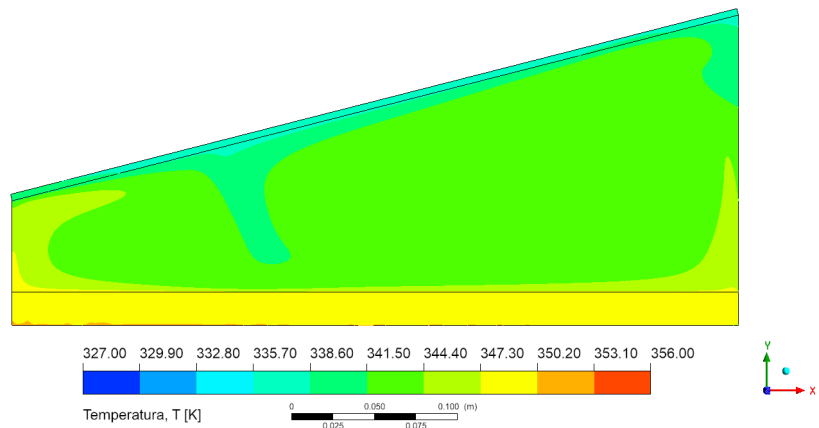
A análise comparativa das três distribuições analisadas revelaram que: i) velocidades do vento superiores provocam temperaturas mais baixas em todo o dessalinizador, devido ao aumento da convecção forçada que intensifica a perda de calor; ii) velocidades maiores de velocidade do vento provocam uma diminuição da fração mássica do vapor de água no dessalinizador, uma vez que a convecção remove o vapor mais rapidamente; e iii) à medida que a velocidade do vento aumenta, observam-se maiores valores de velocidade junto às superfícies da água e do vidro, resultado da maior diferença de temperatura entre estas superfícies.

Concluindo, velocidades moderadas, como a de 3 m s^{-1} , geralmente proporcionam um desempenho equilibrado, garantindo um bom compromisso entre o arrefecimento do vidro e a evaporação da água, permitindo uma operação mais consistente ao longo do tempo. No entanto, para maximizar a produtividade de um dessalinizador solar, a velocidade de 9 m s^{-1} pode ser a mais indicada, especialmente durante as horas de maior radiação solar, onde o maior arrefecimento do vidro se traduz numa taxa de condensação superior. Ainda assim, é importante considerar a possibilidade de ajustes dinâmicos na velocidade do vento, ou mesmo estratégias de controlo adicionais, para evitar o sobrearrefecimento do vidro durante períodos de menor insolação, garantindo assim uma produtividade otimizada em todas as condições.

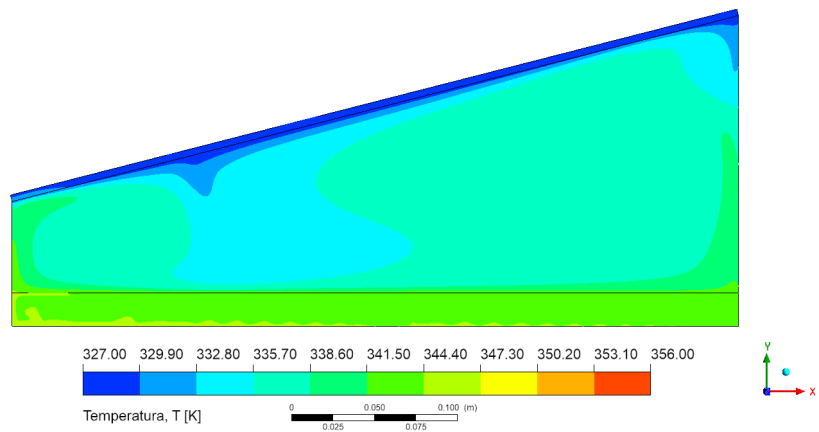
3.4. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS CLIMÁTICOS, OPERACIONAIS E DE PROJETO



(a)

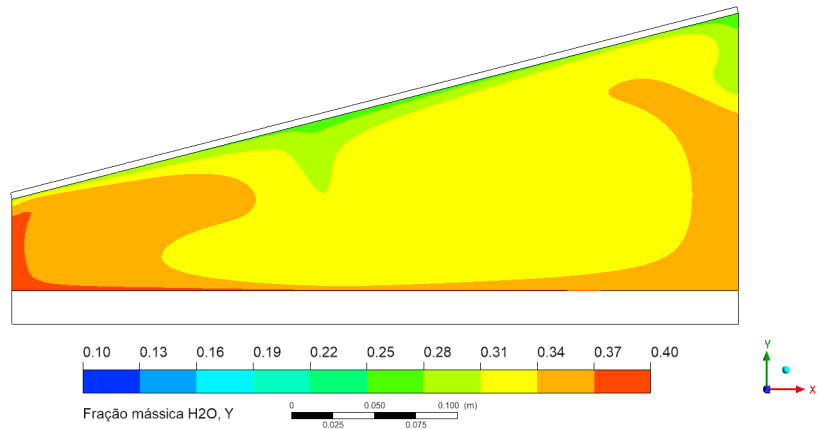


(b)

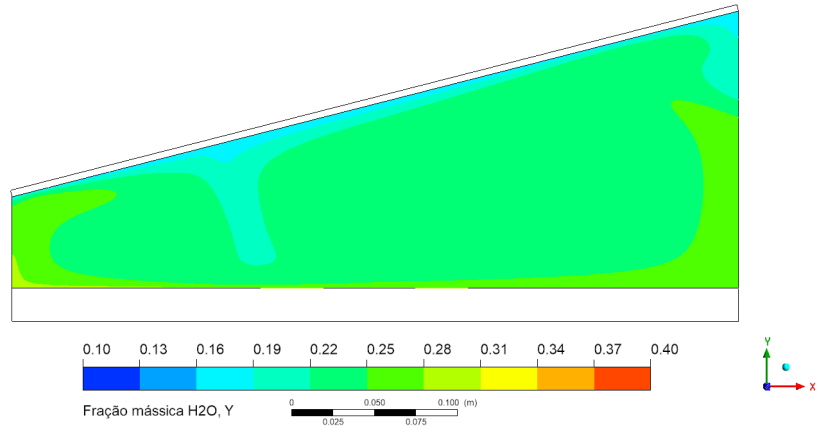


(c)

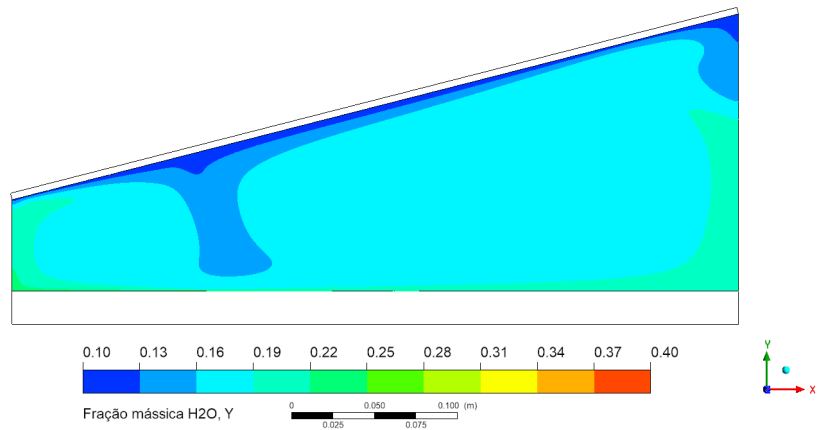
Figura 3.16: Comparação das distribuições de temperatura para o instante das 14 horas entre os dessalinizadores solares com velocidades do vento de: (a) 1 m s^{-1} ; (b) 3 m s^{-1} ; e (c) 9 m s^{-1} .



(a)



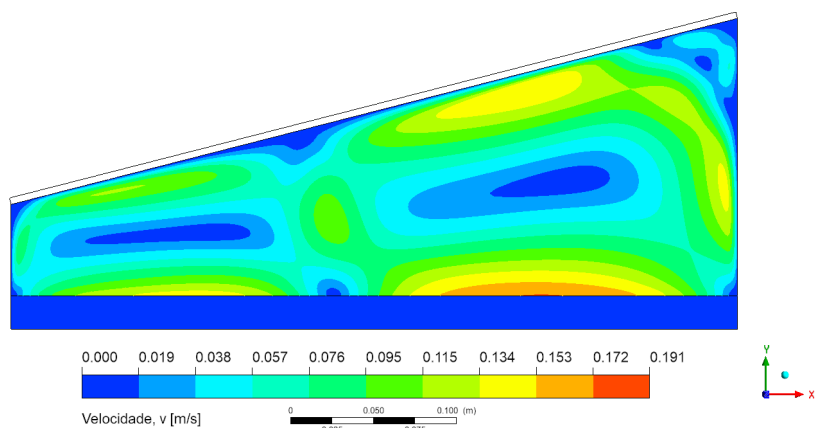
(b)



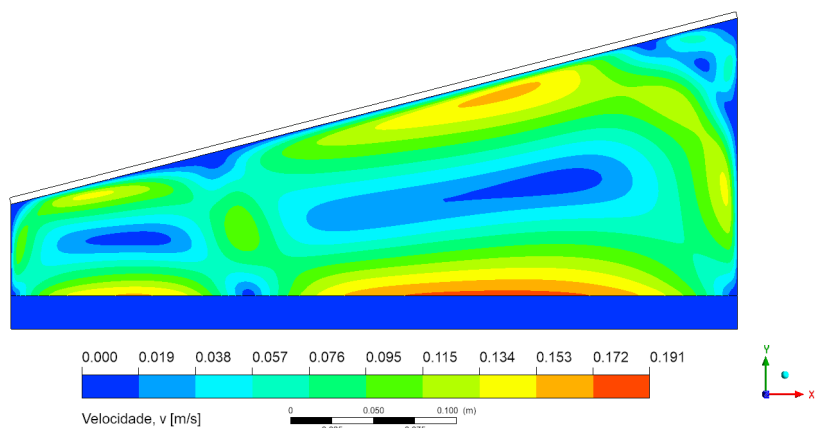
(c)

Figura 3.17: Comparação das distribuições de fração mássica do vapor de água para o instante das 14 horas entre os dessalinizadores solares com velocidades do vento de: (a) 1 m s^{-1} ; (b) 3 m s^{-1} ; e (c) 9 m s^{-1} .

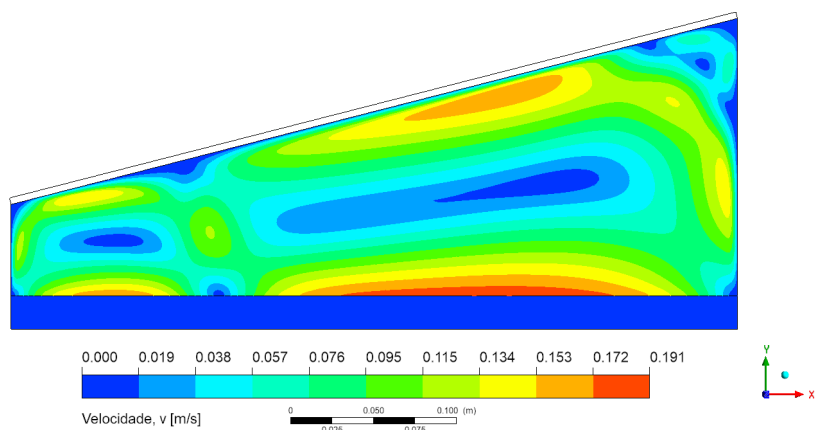
3.4. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS CLIMÁTICOS, OPERACIONAIS E DE PROJETO



(a)



(b)



(c)

Figura 3.18: Comparação das distribuições de velocidade para o instante das 14 horas entre os dessalinizadores solares com velocidades do vento de: (a) 1 m s^{-1} ; (b) 3 m s^{-1} ; e (c) 9 m s^{-1} .

3.4.3 Influência da espessura da cobertura de vidro

Este estudo tem como objetivo avaliar efeito da espessura do vidro (t_g) na produtividade do dessalinizador solar, analisando três espessuras: 2 mm, 4 mm e 8 mm.

As Figuras 3.19(a) e 3.19(b) apresentam, respectivamente, a produtividade horária e a produtividade cumulativa para as diferentes espessuras do vidro. As Figuras 3.20(a) e 3.20(b) mostram as temperaturas médias das superfícies da água líquida e do interior do vidro ao longo do tempo.

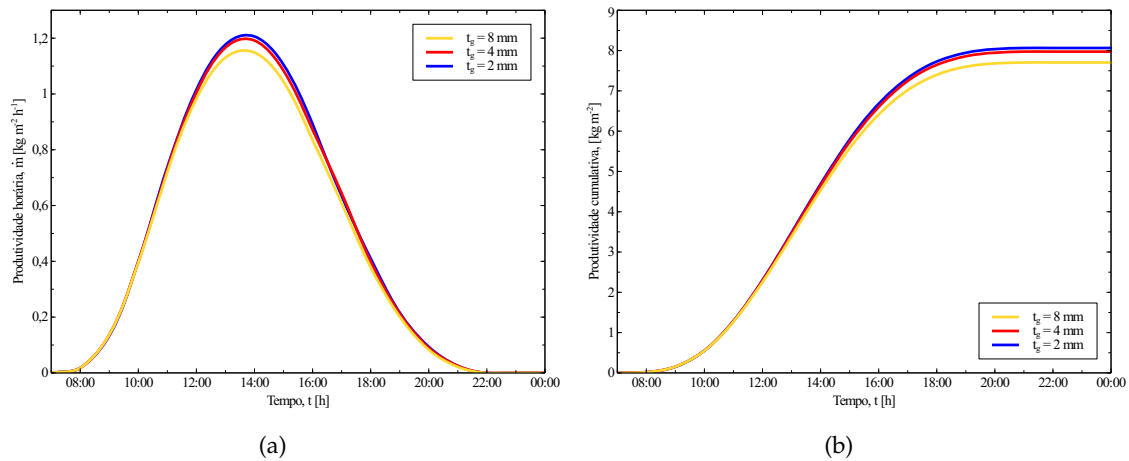


Figura 3.19: Produtividade do dessalinizador solar para diferentes espessuras da cobertura de vidro: (a) perfis horários; e (b) perfis cumulativos.

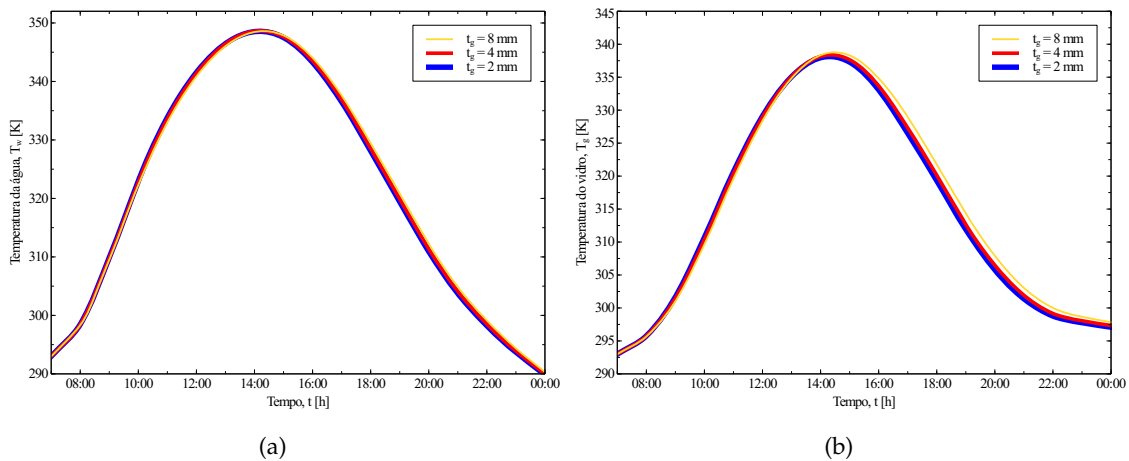


Figura 3.20: Perfis de temperatura da água (a) e do vidro (b) ao longo do tempo para diferentes espessuras da cobertura de vidro.

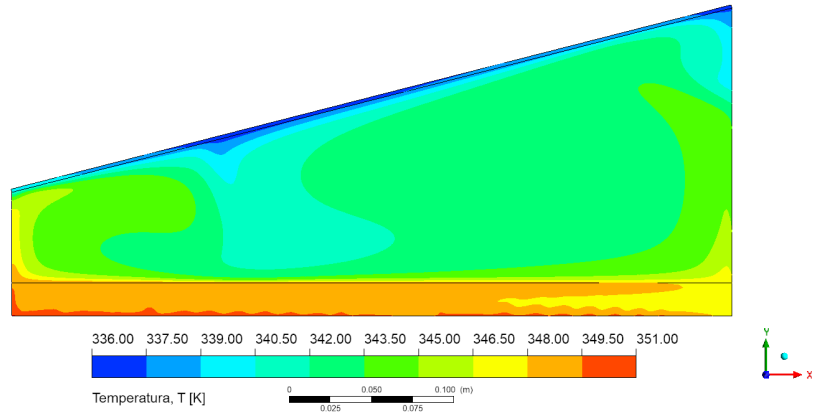
Quanto menor for a espessura do vidro, mais rapidamente a água no dessalinizador aquece, uma vez que um vidro com uma espessura mais fina oferece uma menor resistência à transferência de energia solar para a água, possibilitando a absorção de uma quantidade

3.4. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS CLIMÁTICOS, OPERACIONAIS E DE PROJETO

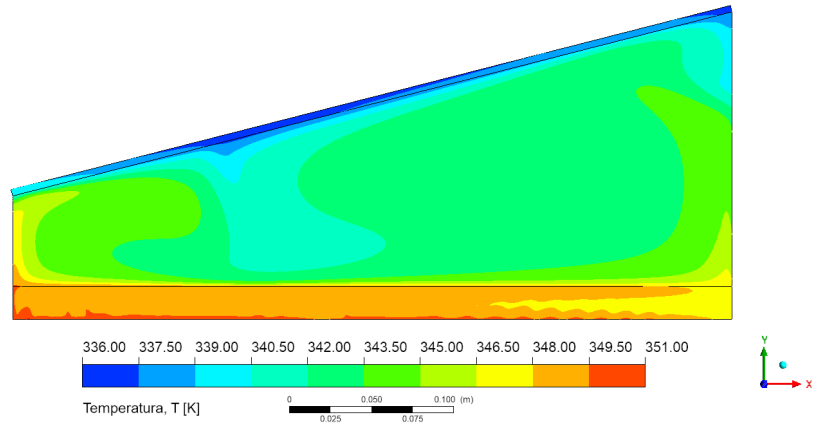
superior de radiação. Consequentemente, tanto as temperaturas da superfície da água como as do vidro aumentam rapidamente. Após as 14 horas, é possível observar que o vidro mais espesso, de 8 mm, que absorveu e armazenou uma maior quantidade de calor vindo da radiação solar, atinge temperaturas mais elevadas. Este calor é então libertado mais lentamente, mantendo as temperaturas das superfícies da água e do vidro mais elevadas por um período mais longo em comparação com as outras duas espessuras inferiores. Por outro lado, o vidro mais fino, de 2 mm, embora aqueça mais rapidamente, também arrefece mais depressa devido ao seu menor volume. Estes resultados são consistentes com os resultados apresentados na literatura [32].

As Figuras 3.21(a), 3.21(b) e 3.21(c) apresentam a comparação da distribuição de temperatura entre os dessalinizadores com as espessuras da cobertura de vidro de 2 mm, 4 mm e 8 mm, respetivamente, para o instante das 14 horas. A análise comparativa revela que a temperatura da água diminui ligeiramente à medida que a espessura da cobertura de vidro aumenta, com uma diferença de temperatura mais pronunciada entre as espessuras de 4 mm e 8 mm, comparativamente à diferença entre 2 mm e 4 mm. Nos três casos, foi observada a formação de duas bolhas de recirculação, separadas por uma pluma térmica descendente, o que sugere que a espessura do vidro tem um impacto limitado na dinâmica do escoamento interno, mas influencia a temperatura do sistema.

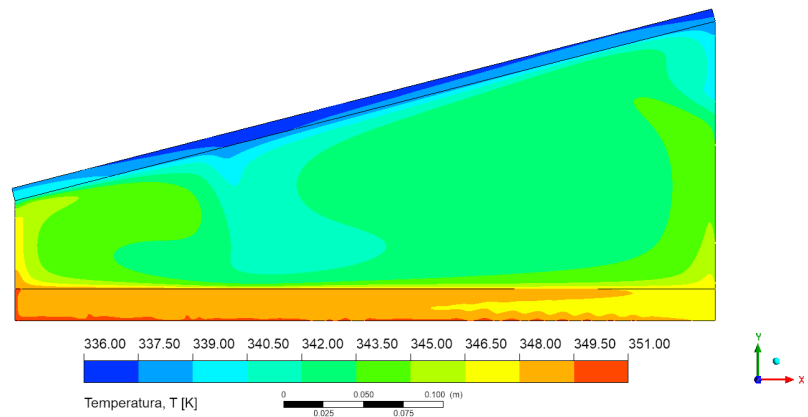
O dessalinizador solar com uma espessura de vidro de 8 mm registou uma diminuição de 3,39% na produtividade cumulativa em comparação com o vidro de espessura de 4 mm. Contrariamente, uma espessura de vidro de 2 mm permitiu aumentar a produtividade cumulativa em 1,13 % em relação ao vidro de 4 mm. Desta maneira, conclui-se que o vidro de 8 mm de espessura apresentou uma produtividade inferior em comparação com as restantes espessuras. Ainda assim, ao comparar as espessuras de 4 mm e 2 mm, não se verificou uma diferença significativa na produtividade cumulativa, sugerindo que, a partir de 4 mm de espessura, o desempenho do dessalinizador deixa de ser significativamente influenciado por este parâmetro de projeto. Posto isto, a escolha ideal da espessura do vidro tende a ser a menor possível, de modo a maximizar a produção de água destilada. Adicionalmente, ao optar por um vidro mais fino, não só aumenta o desempenho do dessalinizador solar, como também se minimiza nos custos associados ao material.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.21: Comparação das distribuições de temperatura para o instante das 14 horas entre os dessalinizadores solares com espessuras de vidro de: (a) 2 mm; (b) 4 mm; e (c) 8 mm.

3.4.4 Influência da inclinação da cobertura de vidro

O ângulo de inclinação da cobertura de vidro é um parâmetro de projeto relevante, na medida em que, diferentes ângulos podem influenciar significativamente o desempenho do dessalinizador solar. Para este fim, foram analisados dois ângulos de inclinação da cobertura (θ): $14,35^\circ$ e $24,35^\circ$. O aumento do ângulo da cobertura de vidro foi conseguido a partir do aumento da altura da parede direita do dessalinizador solar convencional.

As Figuras 3.22(a) e 3.22(b) apresentam, respectivamente, a produtividade horária e a produtividade cumulativa para as diferentes inclinações da cobertura do vidro. Já as Figuras 3.23(a) e 3.23(b) mostram as temperaturas médias das superfícies da água líquida e do interior do vidro ao longo do tempo.

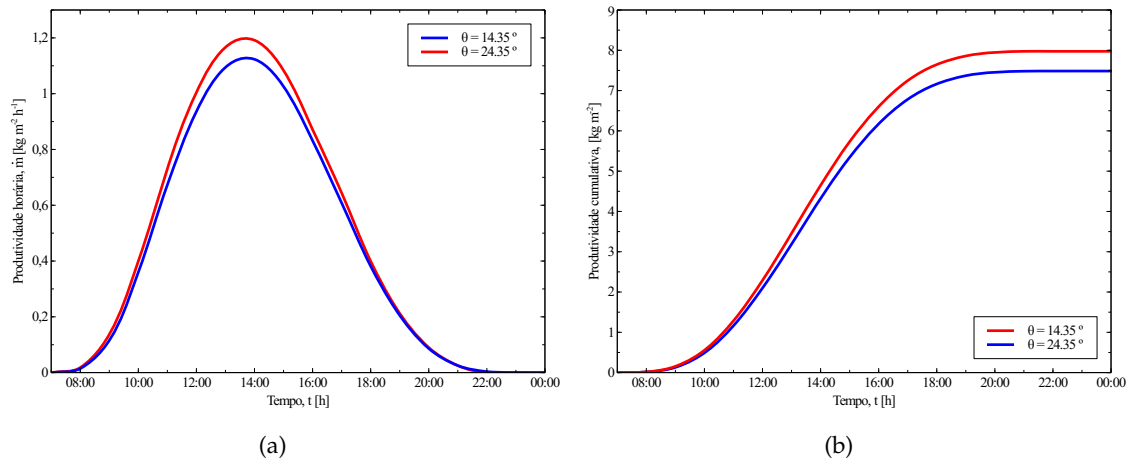


Figura 3.22: Produtividade do dessalinizador solar para diferentes ângulos da cobertura de vidro: (a) perfis horários; e (b) perfis cumulativos.

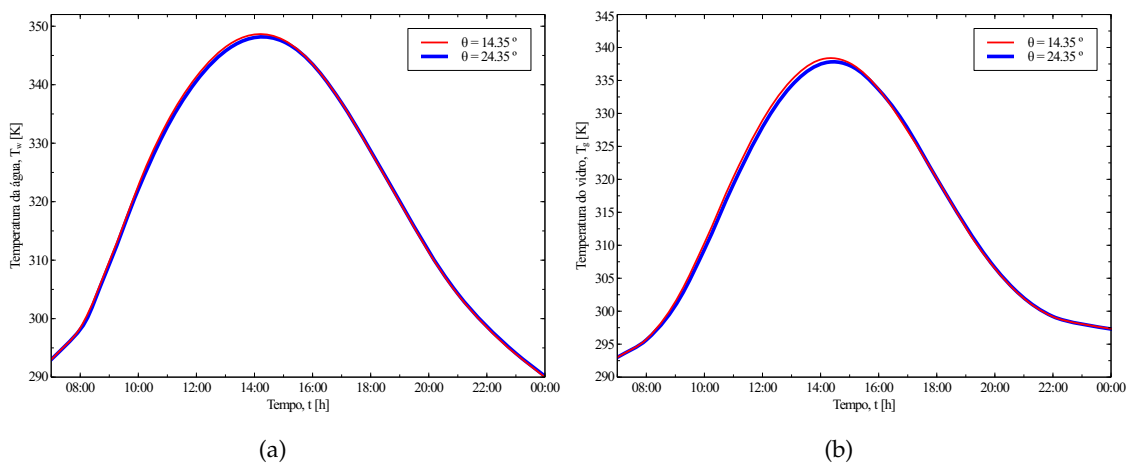


Figura 3.23: Perfis de temperatura da água (a) e do vidro (b) ao longo do tempo para diferentes ângulos da cobertura de vidro.

A produtividade horária do dessalinizador com uma inclinação da cobertura de vidro de $14,35^\circ$ foi superior até às 21 horas em comparação com a inclinação de $24,35^\circ$, igualando-se após esse momento. As temperaturas das superfícies da água líquida e do vidro são ligeiramente superiores no caso da inclinação de $14,35^\circ$ até às 16 horas; após esse horário, as temperaturas seguem uma variação muito similar. Esta diferença é explicada pela diminuição da radiação solar incidente na superfície da água para ângulos mais acentuados, o que reduz a quantidade de calor absorvido inicialmente. Com o passar do tempo, o sistema atinge um equilíbrio térmico, onde as variações de temperatura tornam-se menos pronunciadas.

As Figuras 3.24(a) e 3.24(b) apresentam a comparação da distribuição de temperatura para os ângulos de inclinação de $14,35^\circ$ e $24,35^\circ$, respetivamente, para o instante das 14 horas.

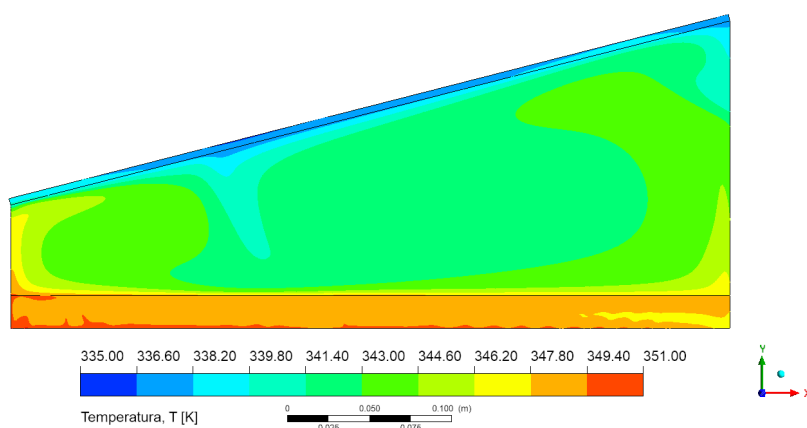
Desta comparação, observa-se que, a inclinação de $24,35^\circ$ apenas produziu uma bolha de recirculação, enquanto que a inclinação de $14,35^\circ$ produziu duas bolhas de recirculação, separadas por uma pluma térmica descendente. Também se verifica que a temperatura da água líquida no caso do dessalinizador com uma inclinação de $14,35^\circ$ é maior. Além disso, a diferença de temperaturas entre o vapor de água junto à superfície livre da água e a superfície do vidro é superior no dessalinizador com uma inclinação de $14,35^\circ$, o que resulta numa maior produtividade.

As Figuras 3.25(a) e 3.25(b) apresentam a comparação da distribuição de velocidade para os ângulos de inclinação de $14,35^\circ$ e $24,35^\circ$, respetivamente, para o instante das 14 horas. Esta comparação revela a formação de dois vórtices no caso do dessalinizador com uma inclinação de $14,35^\circ$ e de apenas um vórtice no dessalinizador com uma inclinação de $24,35^\circ$. Isto sugere que a formação de um único grande vórtice implica um aumento no tempo necessário para a transferência de calor entre a superfície da água e a cobertura de vidro, em comparação com a formação de dois vórtices mais pequenos, resultando numa produtividade cumulativa inferior no caso da inclinação de $24,35^\circ$.

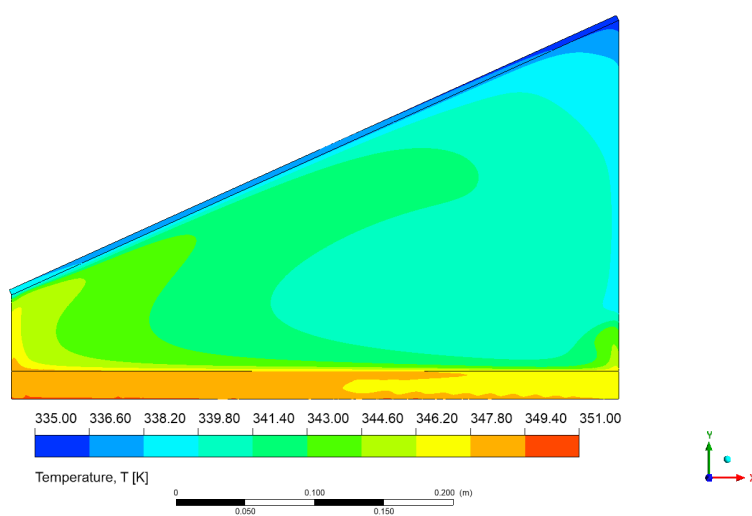
Deste modo, observa-se que ao aumentar a geometria do ar húmido, resultante de uma maior inclinação da cobertura, tem uma influência significativa no comportamento hidrodinâmico, alterando os padrões de escoamento e a formação de vórtices. Uma inclinação menor favoreceu a formação de múltiplos vórtices e uma maior circulação interna, o que influencia diretamente a distribuição de temperatura e a eficiência do processo de troca de calor no interior do dessalinizador.

O dessalinizador solar com uma inclinação de $24,35^\circ$ provocou uma diminuição na produtividade cumulativa de 6,14%. Desta forma, para este caso, sob as mesmas condições climáticas, a inclinação da cobertura de vidro de $14,35^\circ$ proporciona um desempenho superior do dessalinizador solar. Isto deve-se também a um melhor alinhamento entre a direção da radiação solar incidente e a superfície da água líquida, no caso de uma menor inclinação, permitindo que esta aqueça mais rapidamente, aumentando a taxa de evaporação e, conseqüentemente, resultando numa maior produtividade.

3.4. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS CLIMÁTICOS, OPERACIONAIS E DE PROJETO

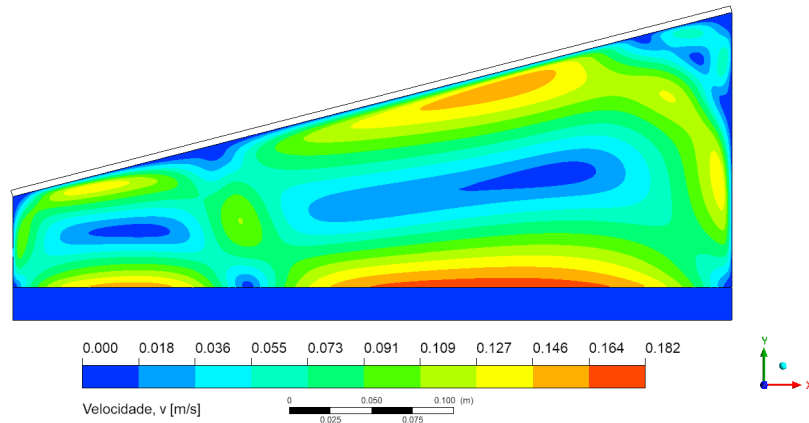


(a)

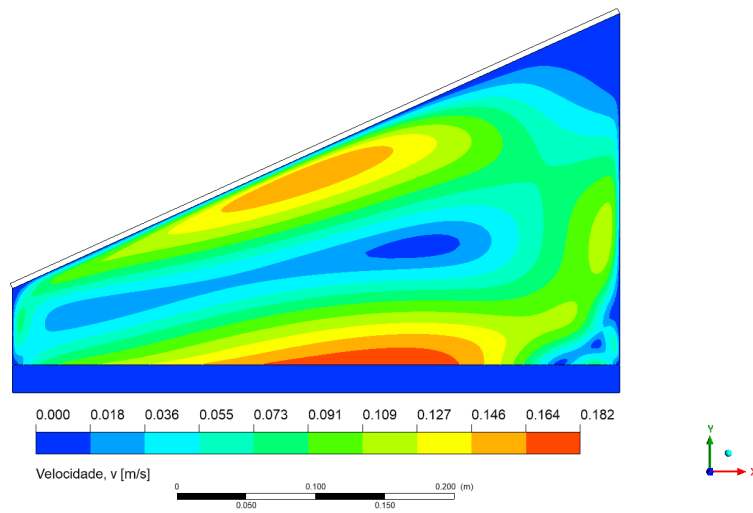


(b)

Figura 3.24: Comparação das distribuições de temperatura para o instante das 14 horas entre os dessalinizadores solares com ângulos de cobertura de vidro de: (a) $14,35^\circ$; e (b) $24,35^\circ$.



(a)



(b)

Figura 3.25: Comparação das distribuições de velocidade para o instante das 14 horas entre os dessalinizadores solares com ângulos de cobertura de vidro de: (a) $14,35^\circ$; e (b) $24,35^\circ$.

3.5 Estudo do dessalinizador solar de duplo efeito

O *design* do dessalinizador solar de duplo efeito foi concebido com o objetivo de aumentar a quantidade de água destilada produzida. Este conceito inclui uma bacia adicional colocada acima da bacia principal, permitindo que o calor latente de condensação gerado na bacia inferior seja aproveitado para aquecer a água na bacia superior, que, de outra forma, seria desperdiçado para o ar envolvente (dessalinizador convencional). Ao reutilizar este calor, o sistema torna-se mais eficiente, aumentando a quantidade de água destilada sem a necessidade de energia adicional [31, 62–64].

O modelo físico e o modelo matemático utilizados para o dessalinizador solar de duplo efeito são apresentados na secção dedicada aos modelos. As condições climáticas e as condições iniciais são as mesmas definidas no subcapítulo referente aos dados de entrada do modelo de nível B.

As Figuras 3.26(a) e 3.26(b) apresentam a produtividade horária e cumulativa, respetivamente, de cada bacia do dessalinizador solar de duplo efeito e a Figura 3.27 mostra os perfis de temperatura média das superfícies da água e do vidro ao longo do tempo para cada bacia.

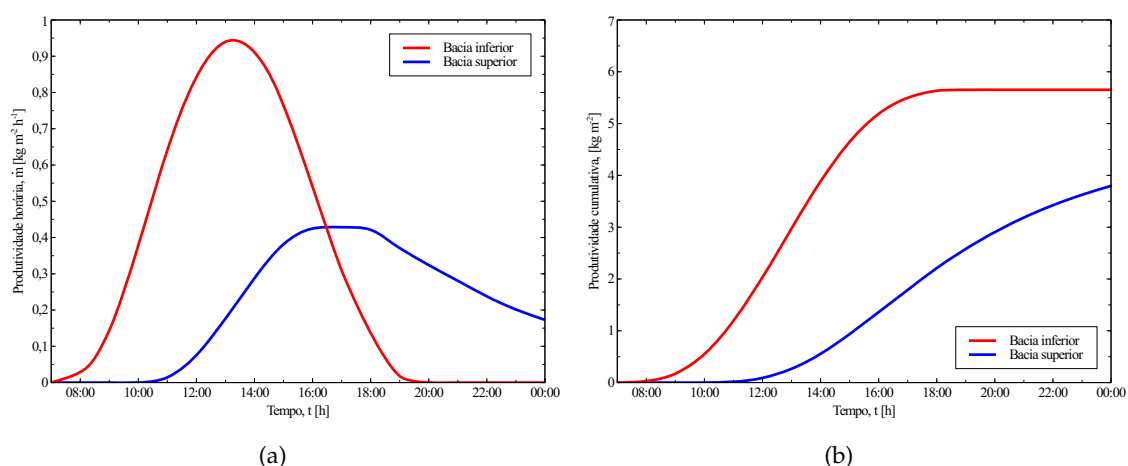


Figura 3.26: Produtividade do dessalinizador solar de duplo efeito para cada bacia: (a) perfis horários; e (b) perfis cumulativos.

Como já foi mencionado, a produtividade horária depende principalmente da diferença de temperatura entre o vapor de água e o vidro [32, 63], sendo que quanto maior for esta diferença, maior será a produtividade do dessalinizador solar. Inicialmente, a temperatura da superfície do vidro da bacia superior é elevada devido à sua exposição direta com o ambiente exterior, o que causa um atraso na produtividade desta bacia, que só se verifica por volta das 11 horas, quando a temperatura da água supera a do vidro. A radiação solar atravessa a primeira bacia e aquece a água da bacia inferior, o que permite a sua produtividade horária logo a partir das 7 horas. Com o aumento da radiação solar ao longo do dia, o calor sensível e o calor latente da condensação aproveitado da bacia inferior fazem

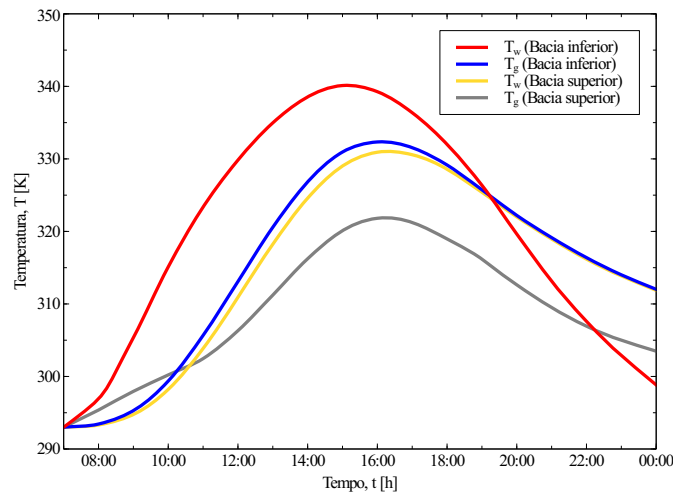


Figura 3.27: Perfis de temperatura média das superfícies da água e do vidro do dessalinizador solar de duplo efeito.

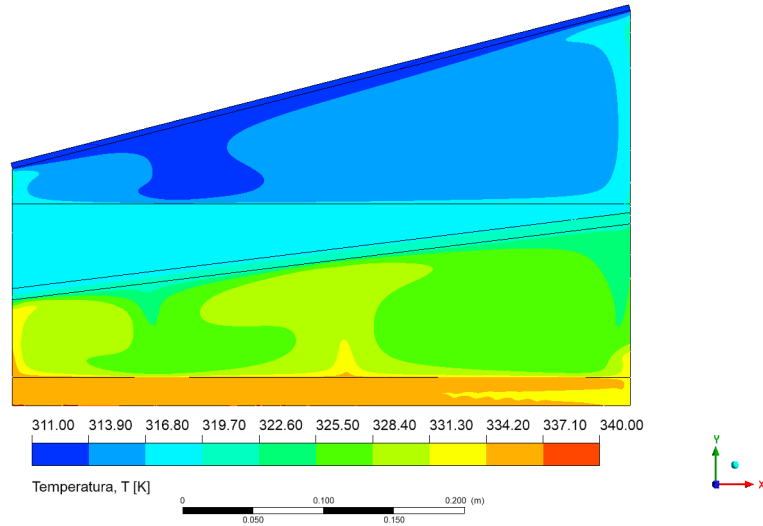
com que a água na bacia superior aqueça e, eventualmente, ultrapasse a temperatura do vidro, resultando na produtividade observada a partir das 11 horas na bacia superior.

A produtividade da bacia inferior eventualmente começa a diminuir, uma vez que a diferença entre as temperaturas do vapor de água e do vidro se reduz. Esta diminuição deve-se ao efeito de estufa dentro do dessalinizador, causado pela presença dos dois vidros, que com o aumento da radiação solar, a radiação não consegue escapar, aquecendo a água líquida da bacia superior. Como resultado, a temperatura do vidro da bacia inferior aproxima-se da temperatura da água da bacia superior, o que reduz a diferença de temperatura entre o vapor de água e o vidro da bacia inferior, levando a uma diminuição na produtividade desta bacia. Consequentemente, a produtividade horária da bacia inferior atinge o seu pico às 13 horas que se encontra desfasado do pico da temperatura da água da mesma bacia, às 15 horas. Isto acontece devido ao aumento da temperatura do vidro da bacia inferior e à consequente diminuição da temperatura entre o vapor e o vidro da mesma bacia.

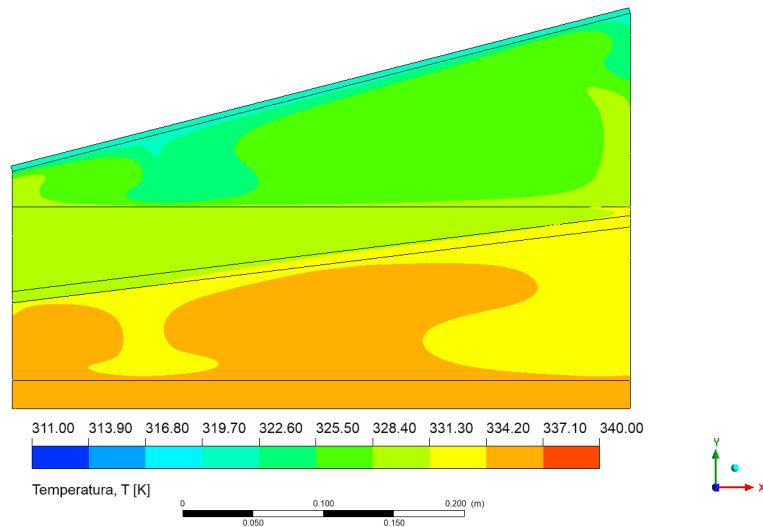
Na bacia superior, a partir das 18 horas, a produtividade começa a diminuir, pois a radiação solar já não é suficiente para aquecer a água. Além disso, a taxa de condensação na bacia inferior torna-se pouco significativa, o que reduz o aproveitamento do calor latente de condensação para o aquecimento da água na bacia superior. Com a diminuição da temperatura ambiente ao longo do dia, a temperatura do vidro da bacia superior também diminui, o que provoca uma redução na diferença de temperatura entre o vapor de água e o vidro, resultando numa queda da produtividade da bacia superior. Ainda assim, foi possível observar na bacia superior, uma produtividade mesmo após o pôr do sol, à conta da energia armazenada da água da bacia. Estes resultados encontram-se consistentes com o resultados apresentados na literatura para o dessalinizador solar de duplo efeito [63].

As Figuras 3.28(a) e 3.28(b) apresentam as distribuições de temperatura do dessalinizador solar de duplo efeito convencional, para os instantes das 13 horas e 17 horas,

respetivamente. Estes momentos correspondem aos períodos de maior produtividade horária na bacia inferior (às 13 horas) e na bacia superior (às 17 horas).



(a)



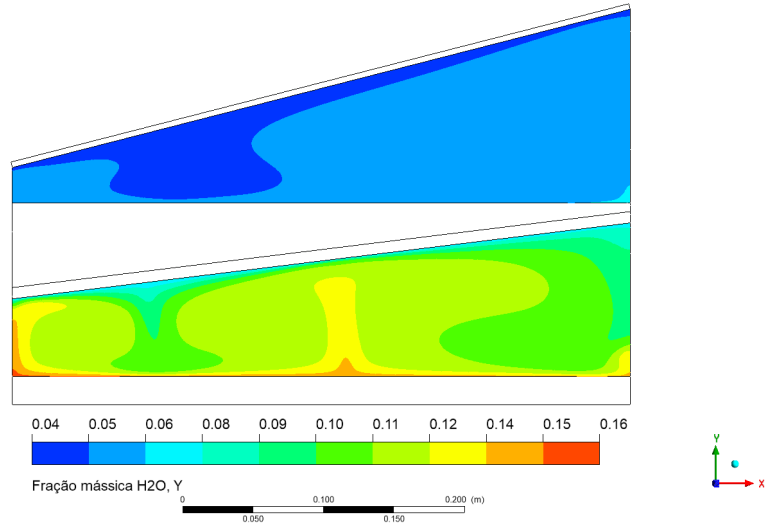
(b)

Figura 3.28: Distribuições de temperatura do dessalinizador solar de duplo efeito convencional para os instantes: (a) 13 horas e (b) 17 horas.

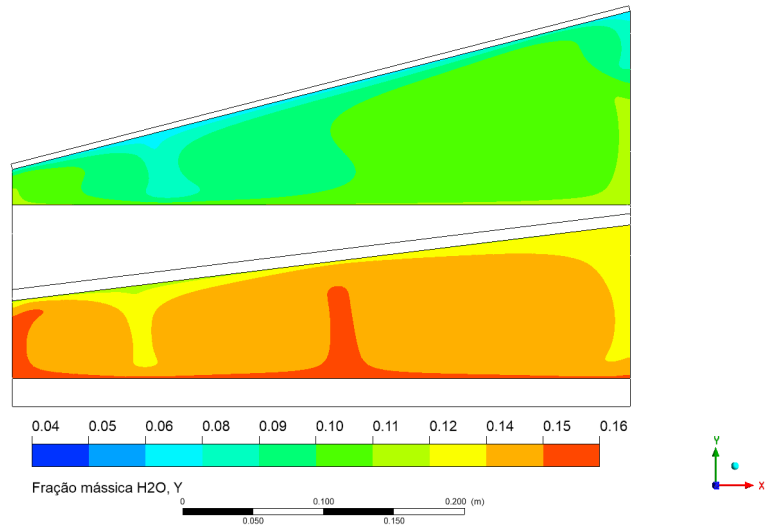
As Figuras 3.29(a) e 3.29(b) apresentam as distribuições de fração mássica do vapor de água do dessalinizador solar de duplo efeito convencional, para os instantes das 13 horas e 17 horas, respetivamente.

As Figuras 3.30(a) e 3.30(b) apresentam as distribuições de velocidade do dessalinizador solar de duplo efeito convencional, para os instantes das 13 horas e 17 horas, respetivamente.

As três distribuições analisadas evidenciaram que: i) em ambos os instantes de tempo

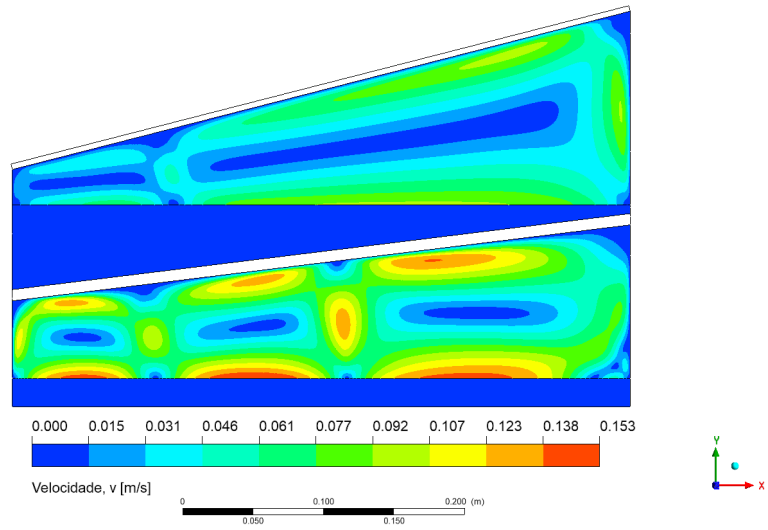


(a)

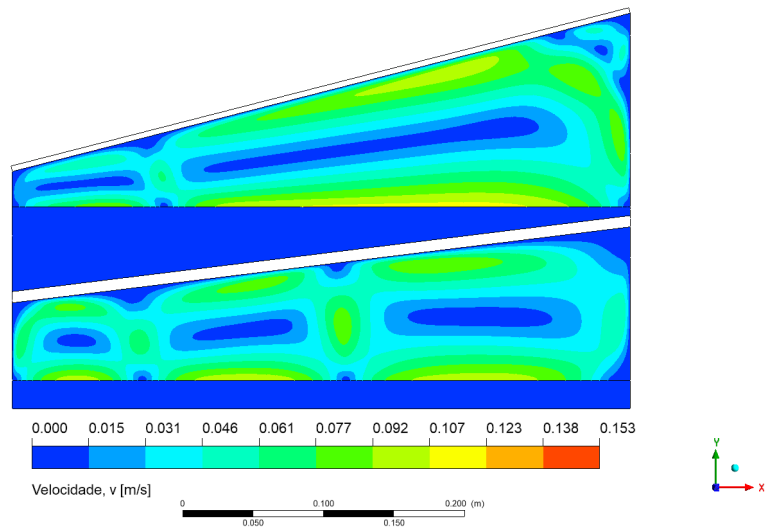


(b)

Figura 3.29: Distribuições de fração mássica do vapor de água do dessalinizador solar de duplo efeito convencional para os instantes: (a) 13 horas e (b) 17 horas.



(a)



(b)

Figura 3.30: Distribuições de velocidade do dessalinizador solar de duplo efeito convencional para os instantes: (a) 13 horas e (b) 17 horas.

(13 horas e 17 horas), a diferença de temperatura e a fração mássica do vapor de água entre a superfície da água e a superfície do vidro foi mais acentuada na bacia correspondente ao pico de produtividade (bacia inferior às 13 horas e bacia superior às 17 horas); ii) observou-se a formação de três vórtices na bacia inferior e dois vórtices na bacia superior em ambos os instantes analisados, sugerindo um padrão de escoamento mais complexo na bacia inferior; e iii) a velocidade do ar húmido foi superior junto às superfícies da água e do vidro na bacia inferior às 13 horas, em comparação com a bacia superior às 17 horas, uma vez que se atingiu uma maior diferença de temperaturas na bacia inferior, resultando também numa maior produtividade.

A Figura 3.31 apresenta a comparação da produtividade cumulativa entre o dessalinizador solar convencional (simples efeito) e o dessalinizador solar de duplo efeito. No caso do dessalinizador de duplo efeito, a produtividade cumulativa corresponde à soma da produtividade cumulativa individual de cada bacia. O dessalinizador de duplo efeito registou um aumento de 18,51% na produtividade cumulativa em relação ao convencional. Este incremento deve-se à capacidade do sistema de duplo efeito de aproveitar o calor latente gerado na bacia inferior para aquecer a água da bacia superior, que de outra forma seria desperdiçado para o ar envolvente.

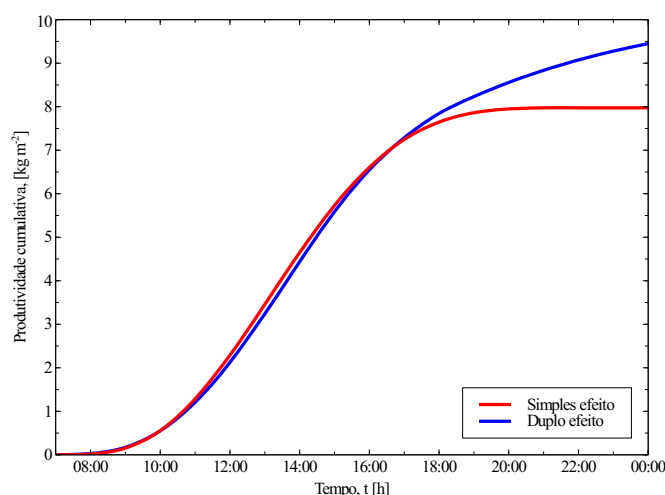


Figura 3.31: Comparação dos perfis da produtividade cumulativa do dessalinizador solar de simples efeito (convencional) e de duplo efeito.

No entanto, é importante salientar que, para determinar a viabilidade real do dessalinizador de duplo efeito, seria necessário avaliar cuidadosamente os custos adicionais dos materiais associados à inclusão da bacia superior e o aumento potencial nos requisitos de manutenção também deve ser considerado. Embora o desempenho superior deste tipo de dessalinizador seja evidente, é fundamental verificar se os benefícios em termos de produtividade compensam os custos e os desafios adicionais relacionados com a construção, manutenção e durabilidade a longo prazo. Assim, uma análise custo-benefício seria essencial para validar a sua eficiência global.

Em modo de conclusão, verificou-se que a bacia inferior apresentou uma produtividade

cumulativa superior à da bacia superior (Figura 3.26(b)), indicando também que a bacia inferior tem um desempenho predominantemente diurno. Por outro lado, a bacia superior demonstrou capacidade para operar tanto durante o dia como à noite, aproveitando o calor residual da bacia inferior e o calor latente de condensação. Este comportamento faz com que a bacia superior contribua para uma produção mais prolongada de água destilada, mesmo após o pôr do sol, o que aumenta o desempenho global do dessalinizador solar em comparação com o convencional (simples efeito).

3.6 Estudo do dessalinizador solar de absorsor invertido

O dessalinizador solar de absorsor invertido foi concebido para otimizar o desempenho do sistema de dessalinização, integrando um concentrador solar que direciona a radiação diretamente para a base da tecnologia. Este *design* permite um aquecimento mais eficiente e rápido da água salina presente na bacia, aumentando a taxa de evaporação e, consequentemente, a produção de água destilada [26].

Na presente dissertação, estudou-se a influência da radiação solar concentrada num dessalinizador convencional, cujas as dimensões são apresentadas na secção dos modelos para o dessalinizador solar de absorsor invertido. Para garantir a segurança do sistema, optou-se por uma profundidade de 4 cm de água líquida, ao invés de 2 cm, de modo a evitar a ebulição da água dentro do dessalinizador solar, o que poderia comprometer o seu desempenho. De forma a compreender a influência da radiação solar concentrada na produtividade do dessalinizador solar de absorsor invertido, analisou-se dois concentradores com dimensões diferentes: o concentrador A e o concentrador B. As dimensões destes concentradores solares, bem como as as refletividades consideradas na superfície externa da base do dessalinizador e na superfície interna do concentrador, encontram-se na secção dos modelos físicos para o dessalinizador solar de absorsor invertido.

3.6.1 Influência da dimensão do concentrador solar

Como já foi mencionado na secção dos modelos, no presente modelo, a radiação solar concentrada considerou-se com base num fluxo de calor aplicado na base do dessalinizador solar. Para determinar este fluxo, recorreu-se ao programa *Tonatiuh*, um programa especializado em simulações óticas de sistemas de radiação solar concentrada. Este programa aplica o método *Monte Carlo Ray Tracing*, que permite modelar de forma precisa a trajetória dos raios solares, simulando de forma probabilística a interação da radiação com superfícies refletoras e concentradoras.

No *Tonatiuh*, foi necessário verificar que a solução obtida para o fluxo de calor incidente na base do dessalinizador não dependia do número de raios simulados. Devido à natureza estocástica (não determinística) do método *Monte Carlo Ray Tracing*, cada simulação, mesmo com os mesmos parâmetros, não produz resultados exatamente iguais, mas há uma tendência de estabilização da solução após atingir um certo número de raios. Após

várias simulações, determinou-se que 100 milhões de raios representavam um equilíbrio ideal, garantindo que os resultados não fossem comprometidos, ao mesmo tempo que mantinham um custo computacional razoável. Este número de raios assegura uma precisão adequada na modelação do comportamento da radiação concentrada, permitindo um nível de detalhe suficiente para avaliar o fluxo de calor sem sobrecarregar os recursos computacionais. Assim, foi possível determinar o fluxo de calor incidente ao longo do comprimento do dessalinizador.

A Figura 3.32 apresenta a razão de concentração local de irradiação solar obtida para cada um dos concentradores analisados. Esta razão foi calculada dividindo o fluxo de calor obtido no *Tonatiuh* pela irradiância solar direta, definida no mesmo programa com um valor constante de 1000 W m^{-2} . Observa-se que o valor da razão é mais elevada no centro da base do dessalinizador, diminuindo significativamente ao longo do restante comprimento, onde se aproxima de valores nulos. Este comportamento deve-se à combinação da geometria retangular da base do dessalinizador com o concentrador de calha parabólica, que concentra a radiação principalmente no centro, resultando numa distribuição não uniforme do calor ao longo da base. Como seria de esperar, um concentrador com menor largura de abertura, como é o caso do concentrador B, gera também uma razão inferior, mantendo-se os restantes parâmetros constantes.

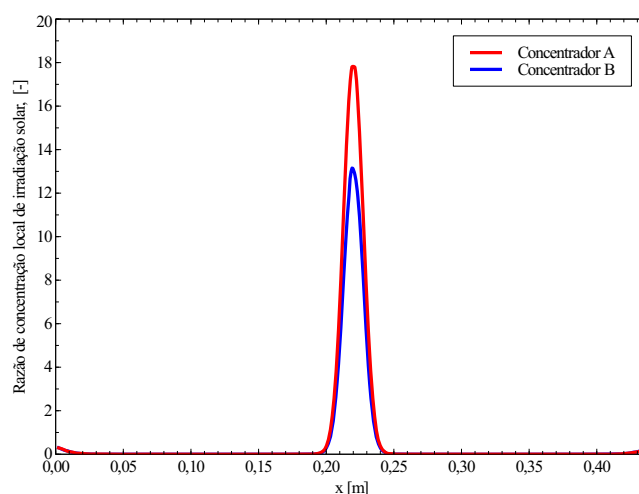


Figura 3.32: Razão de concentração local de irradiação solar para cada concentrador.

Como o modelo de nível B opera em regime transiente foi necessário aplicar um fator de escala à razão de concentração local de irradiação solar, ajustando esta razão à variação da irradiância solar direta ao longo do tempo. Este ajuste permite obter uma razão mais realista e adequada ao regime transiente em estudo.

O modelo matemático é apresentado na secção dedicada aos modelos matemáticos para o dessalinizador de absorvedor invertido. As condições climáticas e as condições iniciais são as mesmas apresentadas no subcapítulo dedicado aos dados de entrada do modelo de nível B.

As Figuras 3.33(a) e 3.33(b) apresentam a comparação da produtividade horária

e cumulativa, respetivamente, entre o dessalinizador solar de absorSOR invertido para cada um dos concentradores, e entre o dessalinizador convencional com as mesmas dimensões. As Figuras 3.34(a) e 3.34(b) mostram a comparação dos perfis de temperatura média das superfícies da água e do vidro ao longo do tempo, respetivamente, entre os dessalinizadores solares de absorSOR invertido e respetivos concentradores solares, e entre o dessalinizador solar convencional.

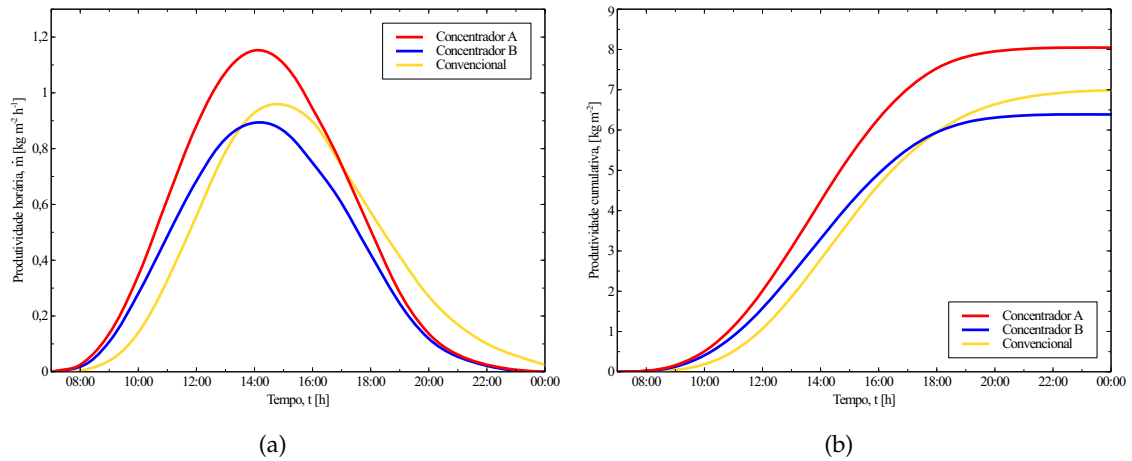


Figura 3.33: Perfis de produtividade do dessalinizador solar de absorSOR invertido de cada concentrador e do dessalinizador solar convencional: (a) perfis horários; e (b) perfis cumulativos.

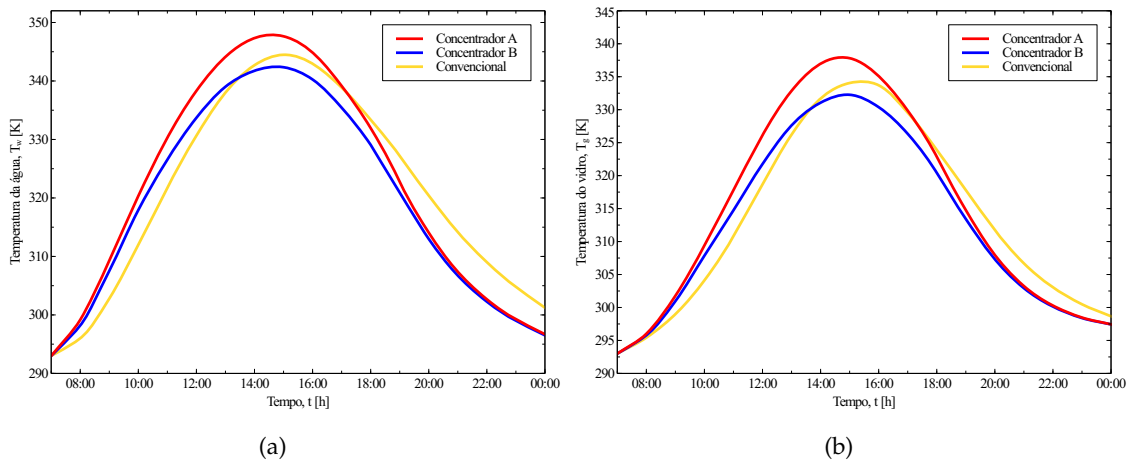


Figura 3.34: Perfis de temperatura da água (a) e do vidro (b) ao longo do tempo para os diferentes concentradores e para o dessalinizador convencional.

O dessalinizador solar de absorSOR invertido integrado com o concentrador A apresenta um pico de produtividade horária superior ao do dessalinizador integrado com o concentrador B, registando-se uma diferença de $0,26 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ no pico a ocorrer às 14 horas. Tal diferença sugere que o concentrador B, que possui uma dimensão menor no que

toca à largura da abertura, não permite captar tanta radiação solar quanto o concentrador A, resultando num pico de valor inferior de produtividade horária. Ao comparar o desempenho do dessalinizador solar de absorvedor invertido com o dessalinizador convencional, verifica-se que apenas o sistema integrado com o concentrador A superou a produtividade do dessalinizador convencional, evidenciando que o concentrador B não oferece vantagem significativa neste caso específico. Uma explicação para este fenómeno reside no facto do concentrador B não ter uma largura de abertura suficiente para captar radiação solar em quantidade necessária para aquecer a água salina até um ponto em que a diferença de temperatura entre o vapor de água e o vidro seja maximizada, condição essencial para aumentar a produtividade. Além disso, a menor largura de abertura pode resultar numa área útil de captação reduzida, devido à sombra que o próprio dessalinizador projeta sobre o concentrador, limitando ainda mais a eficiência na captação de energia solar. Outro aspeto a ter em conta é que o ganho que a base tem relativamente ao facto de ter radiação solar concentrada, não compensa as perdas de calor por convecção e radiação pela base, perdas essas que não existem no dessalinizador convencional, o que acaba por limitar o seu desempenho.

As temperaturas médias das superfícies da água e do vidro são mais elevadas no dessalinizador solar de absorvedor invertido com o concentrador A. No entanto, no caso com o concentrador B, as temperaturas da água e do vidro superam as do dessalinizador solar convencional até às 13 horas, devido ao aquecimento mais rápido da água salina proporcionado pela concentração da radiação solar. Este aquecimento rápido aumenta a diferença de temperaturas entre o vapor de água e o vidro, promovendo uma maior taxa de evaporação e, consequentemente, uma produtividade horária superior até esse momento.

Apesar do concentrador B não manter essa vantagem após as 13 horas, o seu desempenho até essa hora sugere que a concentração inicial de calor tem um impacto positivo no aquecimento da água. Contudo, a sua eficiência a longo prazo é limitada, devido ao menor fluxo de calor captado e à incapacidade de compensar as perdas de calor, o que impede de manter ou aumentar a diferença de temperatura necessária para sustentar a taxa de evaporação ao longo do dia, em comparação com o dessalinizador solar convencional. O estudo desses perfis de temperatura revela a importância não só da quantidade de radiação captada, mas também da sua distribuição ao longo do tempo que é essencial para compreender a evolução da produtividade.

Outro aspeto relevante é que, ainda que o concentrador A permita atingir um pico de produtividade horária superior aos restantes casos, a produtividade horária do dessalinizador solar convencional ultrapassa-o por volta das 17 horas. Como foi explicado anteriormente, a profundidade de água líquida de 4 cm, devido ao seu maior volume, permite armazenar uma maior quantidade de energia, mantendo a temperatura da água mais elevada durante mais tempo. Isso resulta numa maior diferença de temperatura entre o vapor de água e o vidro, aumentando a produtividade. No entanto, com a contabilização das perdas de calor na base do dessalinizador solar de absorvedor invertido, principalmente

onde o fluxo de calor é próximo ou igual a zero, faz com que a base do dessalinizador também esteja a perder calor juntamente com a superfície do vidro. Esta queda de temperatura tanto na água quanto no vidro reduz a diferença de temperaturas entre o vapor de água e o vidro, provocando a diminuição da produtividade horária observada após as 17 horas.

As Figuras 3.35(a) e 3.35(b) apresentam as distribuições de temperatura do dessalinizador solar de absorSOR invertido convencional, para o instante das 14 horas, com a integração do concentrador solar A e B, respetivamente. Este momento corresponde ao instante do pico de produtividade horária.

As Figuras 3.36(a) e 3.36(b) apresentam as distribuições de fração mássica do vapor de água do dessalinizador solar de absorSOR invertido convencional, para o instante das 14 horas, com a integração do concentrador solar A e B, respetivamente.

Já as Figuras 3.37(a) e 3.37(b) apresentam as distribuições de velocidade do dessalinizador solar de absorSOR invertido convencional, para o instante das 14 horas, com a integração do concentrador solar A e B, respetivamente.

A comparação das distribuições de temperatura, fração mássica do vapor de água e velocidade para este tipo de dessalinizador, considerando os diferentes concentradores estudados, revelou os seguintes resultados: i) a temperatura de um modo geral foi superior no dessalinizador que integrou o concentrador A, devido ao maior fluxo de calor do concentrador A; ii) a temperatura no centro da base do dessalinizador atingiu valores mais altos devido ao fluxo de calor concentrado centrado nessa região; iii) a fração mássica do vapor de água também foi superior no dessalinizador que integrou o concentrador A, com uma diferença mais acentuada de fração mássica entre as superfícies da água e do vidro; iv) ambos os dessalinizadores que integraram os concentradores A e B apresentaram a formação de três vórtices, o que indica um padrão de circulação semelhante, embora as dinâmicas de escoamento possam variar em intensidade; e v) os valores de velocidade junto às superfícies da água e do vidro foram maiores no caso do concentrador A.

Da Figura 3.33(b), conclui-se que existiu um aumento de 15,05% na produtividade cumulativa do dessalinizador solar de absorSOR invertido com o concentrador A, em comparação com o dessalinizador solar convencional. No entanto, o uso do concentrador B resultou numa diminuição de 8,60% na produtividade cumulativa face ao dessalinizador convencional.

Em resumo, o estudo comparou o desempenho de diferentes dimensões de concentradores solares em dessalinizadores de absorSOR invertido, analisando o impacto da radiação solar concentrada na produtividade de água destilada. Os resultados indicam que, enquanto o concentrador A consegue aumentar significativamente a produtividade em relação ao dessalinizador solar convencional, o concentrador B, devido à sua menor dimensão, compromete a quantidade de radiação concentrada produzida, resultando numa produtividade cumulativa inferior. A viabilidade do dessalinizador solar de absorSOR invertido com concentrador A é promissora, especialmente em cenários onde se pretende maximizar a captação de energia solar e aumentar a produção de água dessalinizada. Por

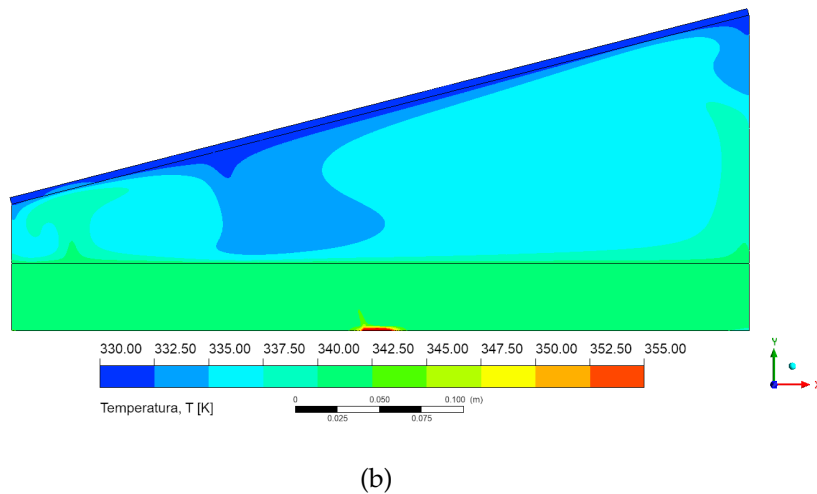
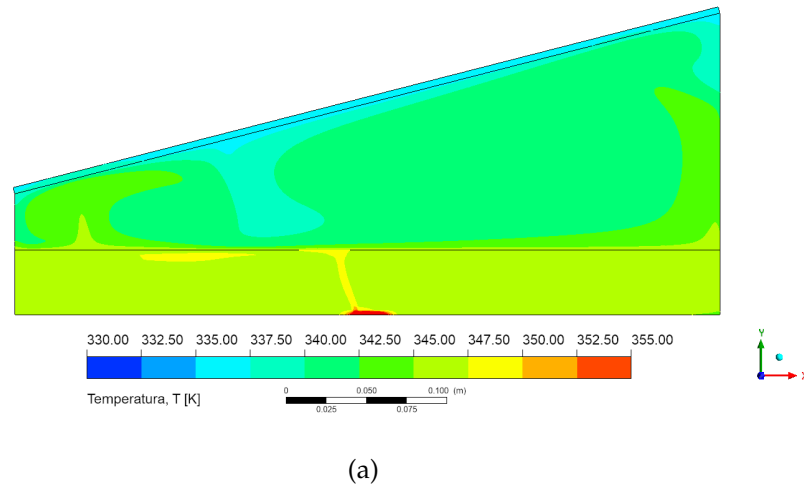
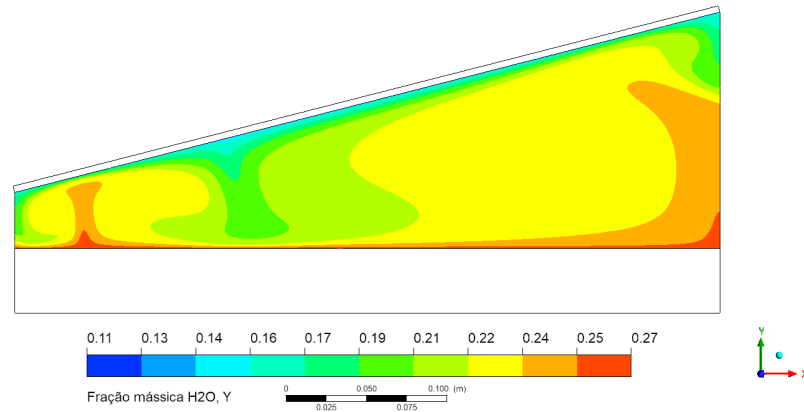


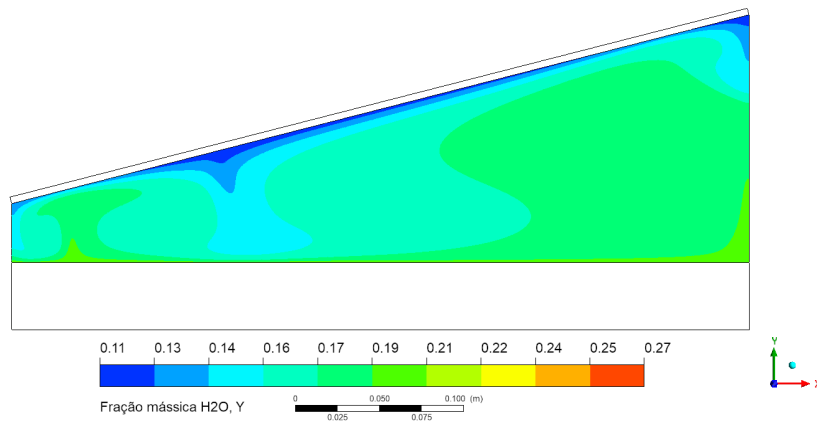
Figura 3.35: Distribuições de temperatura do dessalinizador solar de absorsor invertido convencional para o instante das 14 horas com o concentrador: (a) A e (b) B.

outro lado, a utilização do concentrador B pode não ser vantajoso, dado o seu desempenho inferior em comparação com o sistema convencional.

Todavia, este tipo de dessalinizador apresenta algumas desvantagens. O custo inicial de instalação tende a ser mais elevado, dado que a tecnologia requer a implementação de concentradores solares e de toda uma estrutura que permita o dessalinizador ficar suspenso para receber a radiação concentrada. Também existe a necessidade de uma área significativa para a instalação dos concentradores, especialmente para sistemas de maior dimensão como o concentrador A, que pode ser um desafio em locais onde o espaço é limitado. Assim, a utilização do concentrador B pode não ser vantajosa, dado o seu desempenho inferior em comparação com o sistema convencional, o que reforça a importância de se ponderar o espaço disponível e o custo-benefício na escolha do concentrador.

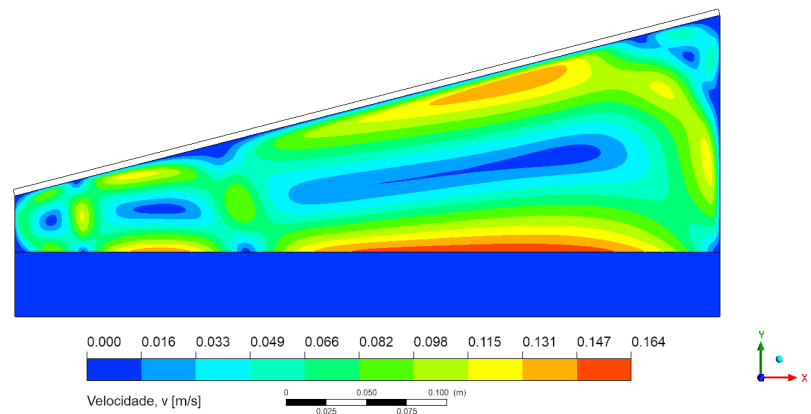


(a)

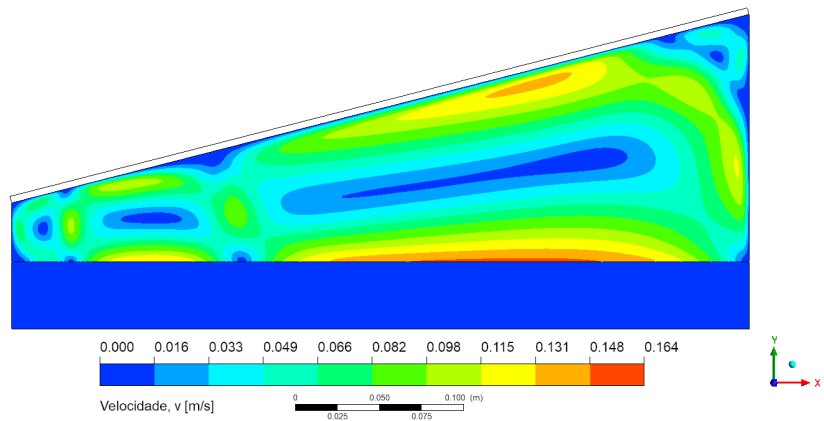


(b)

Figura 3.36: Distribuições de fração mássica do vapor de água do dessalinizador solar de absorsor invertido convencional para o instante das 14 horas com o concentrador: (a) A e (b) B.



(a)



(b)

Figura 3.37: Distribuições de velocidade do dessalinizador solar de absorvedor invertido convencional para o instante das 14 horas com o concentrador: (a) A e (b) B.

3.7 Estudo do dessalinizador solar de duplo efeito e de absorSOR invertido

O dessalinizador solar de duplo efeito e de absorSOR invertido combina as características de dois dessalinizadores solares distintos: o dessalinizador solar de absorSOR invertido e o dessalinizador solar de duplo efeito. Esta junção permite tirar proveito das vantagens de ambos os dessalinizadores. O conceito de absorSOR invertido refere-se à colocação de um concentrador solar que reflete a radiação solar diretamente na base do sistema na forma de radiação solar concentrada, permitindo um aquecimento mais acelerado da água salina, enquanto que o sistema de duplo efeito aproveita o calor latente de condensação criado durante a primeira fase de condensação na bacia inferior para promover um segundo processo de evaporação na bacia superior. Ao combinar estas duas técnicas, obtém-se um sistema que não só maximiza a absorção de calor, como também aproveita o calor residual e latente, aumentando significativamente a eficiência global do processo de dessalinização e maximizando a produtividade em comparação com os dessalinizadores convencionais.

Para o desenvolvimento deste novo dessalinizador, mantiveram-se as mesmas dimensões do dessalinizador solar de duplo efeito, bem como os mesmos dados de entrada do modelo de nível B, permitindo assim uma comparação adequada. O concentrador solar selecionado foi o concentrador A.

As Figuras 3.38(a) e 3.38(b) apresentam a comparação dos perfis da produtividade horária e de produtividade cumulativa, respetivamente, de cada bacia entre o dessalinizador solar de duplo efeito e o dessalinizador de duplo efeito e de absorSOR invertido.

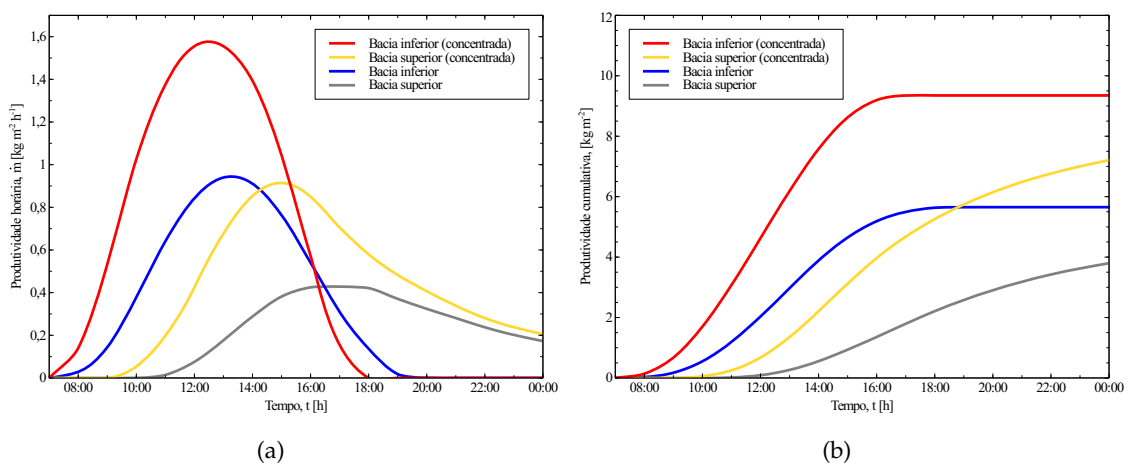


Figura 3.38: Perfis de produtividade entre o dessalinizador solar de duplo efeito e de absorSOR invertido e o dessalinizador solar de duplo efeito, para cada bacia: (a) perfis horários; e (b) perfis cumulativos.

Já as Figuras 3.39(a) e 3.39(b) mostram os perfis de temperatura média das superfícies da água e do vidro ao longo do tempo, para o dessalinizador solar de duplo efeito e de absorSOR invertido e para o dessalinizador solar de duplo efeito convencional, respetivamente.

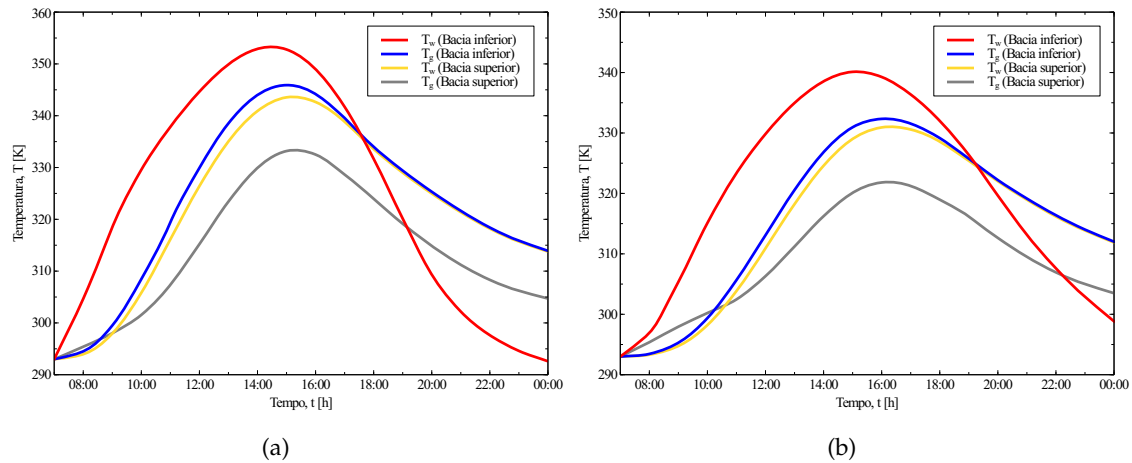


Figura 3.39: Perfis de temperatura da água e do vidro do dessalinizador solar de duplo efeito e de absorsor invertido (a) e do dessalinizador solar de duplo efeito convencional (b).

A produtividade horária deste dessalinizador solar foi significativamente superior e o seu pico foi atingido mais cedo em ambas as bacias, quando comparado com o sistema de duplo efeito convencional. Na bacia inferior, o valor máximo da produtividade horária atingiu cerca de $1,56 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, entre as 12 horas e as 13 horas, enquanto que na bacia superior, o pico foi de $0,91 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, registado por volta das 15 horas. Estes resultados demonstram não apenas uma antecipação evidente do instante de maior produtividade, como também um aumento significativo nos valores em ambas as bacias, reforçando o desempenho superior do novo dessalinizador solar em comparação com o sistema de duplo efeito convencional.

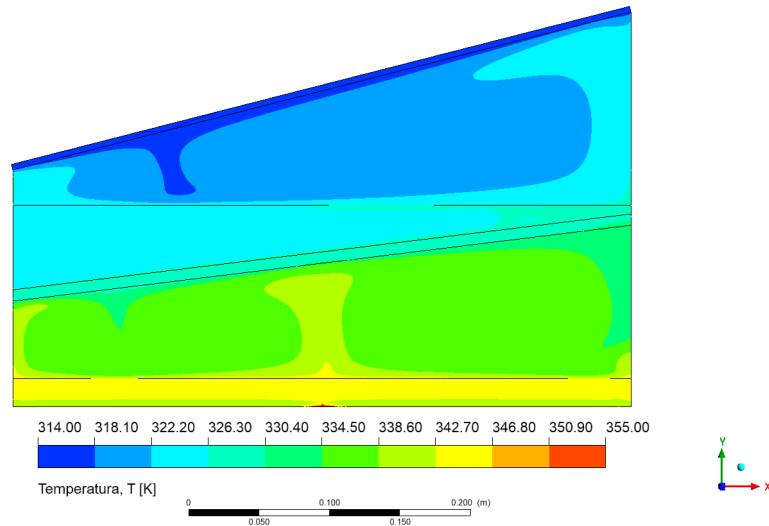
As temperaturas médias das superfícies da água e do vidro em ambas as bacias foram superiores no caso do dessalinizador de duplo efeito e de absorsor invertido. O rápido aquecimento da água líquida, devido ao fluxo de calor concentrado na base do dessalinizador, permitiu alcançar uma maior diferença de temperatura entre o vapor de água inicialmente, resultando numa produtividade horária e cumulativa mais elevada para a bacia inferior. O atraso observado na produtividade horária da bacia superior diminuiu significativamente, verificando-se uma produtividade horária logo um pouco depois das 9 horas, uma vez que a temperatura da água nessa bacia conseguiu ultrapassar a temperatura do vidro. Isto deve-se tanto ao aquecimento da base do dessalinizador proveniente da concentração da radiação solar, quanto ao aproveitamento do calor latente de condensação, que aquece a água da bacia superior com o calor libertado da condensação na bacia inferior.

Em contrapartida, as temperaturas das superfícies da água e do vidro de ambas as bacias diminuem mais rapidamente após atingirem o pico, devido às perdas de calor pela base do dessalinizador. Como resultado, a produtividade horária da bacia superior começa a diminuir de forma mais acentuada em comparação com o dessalinizador solar de

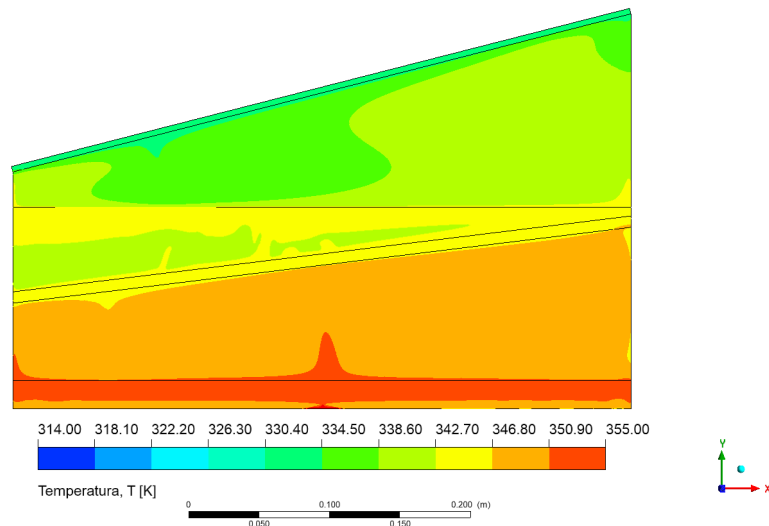
3.7. ESTUDO DO DESSALINIZADOR SOLAR DE DUPLO EFEITO E DE ABSORSOR INVERTIDO

duplo efeito, que não considerava perdas de calor pela sua base, uma vez que a diferença de temperatura entre o vapor de água e o vidro também diminui.

As Figuras 3.40(a) e 3.40(b) apresentam as distribuições de temperatura do dessalinizador solar de duplo efeito e de absorsor invertido, para os instantes das 12 horas e 15 horas, respetivamente. Estes momentos correspondem aos períodos de maior produtividade horária na bacia inferior (às 12 horas) e na bacia superior (às 15 horas).



(a)



(b)

Figura 3.40: Distribuições de temperatura do dessalinizador solar de duplo efeito e de absorsor invertido para os instantes: (a) 12 horas e (b) 15 horas.

Para o instante das 12 horas, observa-se que a temperatura na bacia inferior atinge valores mais elevados, especialmente no centro da base do sistema, onde o calor se concentra devido à radiação solar concentrada incidente. A distribuição de temperatura

mostra um padrão de circulação que favorece a bacia inferior, com uma pluma térmica ascendente que transporta o calor para a região superior. No entanto, a temperatura na parte superior é relativamente mais baixa, refletindo uma menor atividade de evaporação nesta zona durante este instante.

Já para o instante das 15 horas, verifica-se um aumento significativo da temperatura na bacia superior, sugerindo que o fluxo de calor nesta fase do dia se deslocou para as camadas superiores. A bacia superior apresenta uma maior evaporação, como indicado pelos níveis mais elevados de temperatura nesta zona. O comportamento da bacia inferior às 15 horas, embora ainda com produtividade horária elevada, apresenta temperaturas mais uniformes.

Em ambos os instantes, conclui-se que a estratificação térmica observada na base do dessalinizador sugere perdas significativas de calor nessa zona, sendo que apenas no centro, o calor recebido da radiação solar concentrada compensa essas perdas, devido à sua maior incidência nessa região.

As Figuras 3.41(a) e 3.41(b) apresentam as distribuições de fração mássica do vapor de água do dessalinizador solar de duplo efeito e de absorsor invertido, para os instantes das 12 horas e 15 horas, respetivamente.

A comparação da distribuição de fração mássica do vapor de água entre os instantes das 12 horas e 15 horas revelou que a fração mássica foi consistentemente maior na bacia inferior em ambos os instantes. Isto evidencia uma maior concentração de vapor de água na bacia inferior, o que pode ser explicado pela maior eficiência de aquecimento e consequente vaporização da água nesta região. Em ambos os instantes, observou-se a formação de duas plumas de fração mássica na bacia inferior, uma ascendente e outra descendente. Na bacia superior, foi identificada a formação de uma pluma de fração mássica descendente em ambos os instantes, indicando que a dinâmica de troca de vapor de água nesta região é menos intensa comparativamente à bacia inferior.

As Figuras 3.42(a) e 3.42(b) apresentam as distribuições de velocidade do dessalinizador solar de duplo efeito convencional, para os instantes das 12 horas e 15 horas, respetivamente.

Ao analisar a distribuição de velocidades para o instante das 12 horas, verifica-se que, as velocidades mais elevadas estão concentradas na bacia inferior, próximas à superfície da água, com valores que atingem até $0,172 \text{ m s}^{-1}$. A distribuição das velocidades indica a formação de três vórtices que promovem a circulação do vapor de água, especialmente nas zonas laterais da bacia. Este comportamento sugere que o fluxo de calor e a evaporação são mais intensos na bacia inferior durante este período, o que contribui para o pico de produtividade horária às 12 horas.

Por outro lado a distribuição de velocidades para o instante das 15 horas indica que, a velocidade do ar húmido também é mais elevada junto à superfície da água na bacia superior, refletindo a maior atividade de evaporação nesse instante. No entanto, a distribuição é mais uniforme na parte superior do dessalinizador, com os valores de velocidade mais elevados situados na ordem de $0,155 \text{ m s}^{-1}$. Sugerindo que, existiu um

3.7. ESTUDO DO DESSALINIZADOR SOLAR DE DUPLO EFEITO E DE ABSORSOR INVERTIDO

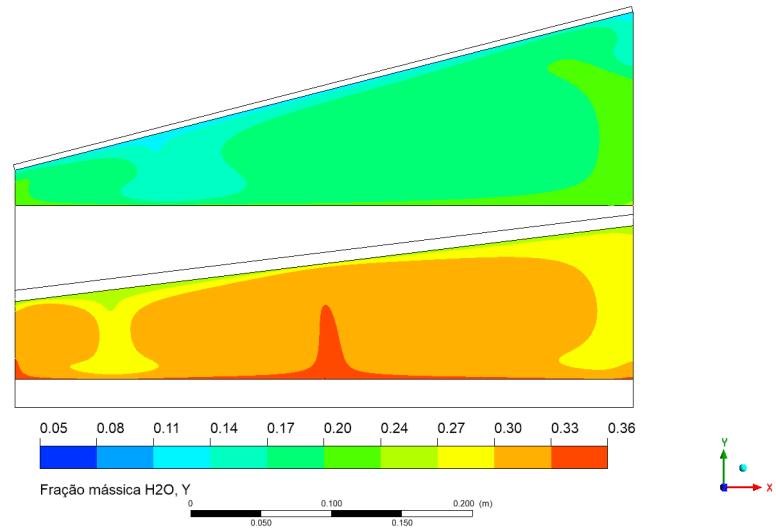
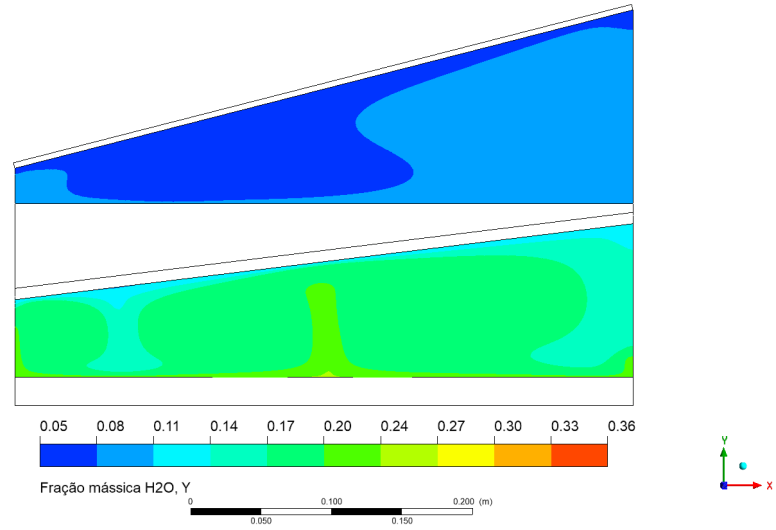


Figura 3.41: Distribuições de fração mássica do vapor de água do dessalinizador solar de duplo efeito e de absorsor invertido para os instantes: (a) 12 horas e (b) 15 horas.

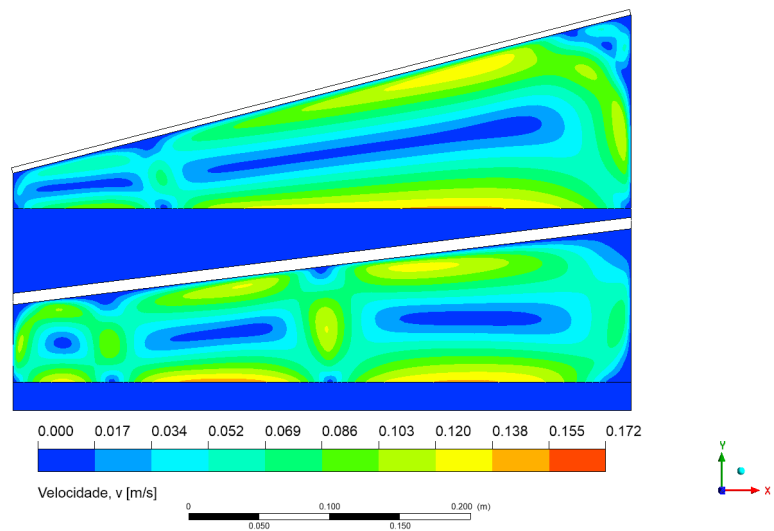
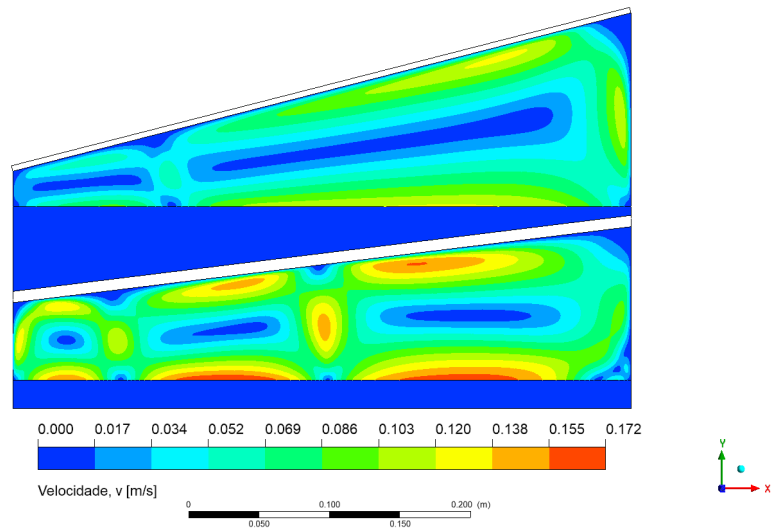


Figura 3.42: Distribuições de velocidade do dessalinizador solar de duplo efeito e de absorsor invertido para os instantes: (a) 12 horas e (b) 15 horas.

3.7. ESTUDO DO DESSALINIZADOR SOLAR DE DUPLO EFEITO E DE ABSORSOR INVERTIDO

aumento da circulação do vapor na bacia superior às 15 horas, em comparação com a bacia inferior neste instante, resultando no pico de produtividade horária observado para a bacia superior.

A Figura 3.43 compara os perfis de produtividade cumulativa ao longo do tempo entre os dois tipos de dessalinizadores analisados neste estudo. A análise desses perfis revela que o dessalinizador solar de duplo efeito e de absorsor invertido, com vidro transparente entre bacias, apresenta um aumento significativo de 75,20% na produtividade cumulativa em comparação com o dessalinizador de duplo efeito convencional.

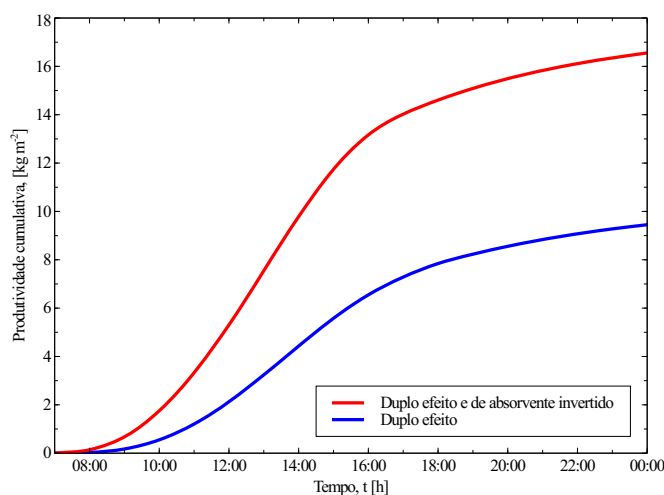


Figura 3.43: Comparação dos perfis da produtividade cumulativa do dessalinizador solar de duplo efeito e de duplo efeito e de absorsor invertido .

O dessalinizador solar de absorsor invertido com concentrador solar mostrou-se altamente viável em termos de produtividade, sendo particularmente vantajoso em regiões com alta disponibilidade de radiação solar. Ainda assim, as desvantagens associadas aos custos e à área necessária para a instalação do concentrador devem ser novamente ponderadas, especialmente em aplicações de larga escala.

3.7.1 Influência do revestimento do vidro entre bacias

Neste subcapítulo, será analisado o desempenho de um dessalinizador solar de duplo efeito e de absorsor invertido modificado com um revestimento especial no vidro que separa as bacias superior e inferior. Este revestimento foi projetado para bloquear a radiação solar incidente na bacia inferior, proveniente da bacia superior, e tem como objetivo reduzir a quantidade de energia solar direta que atinge a água na bacia inferior, de modo a evitar o sobreaquecimento e otimizar a gestão de calor entre as duas bacias. Além disso, o estudo pretende compreender como o isolamento da radiação solar concentrada afeta o aquecimento da água na bacia inferior e, consequentemente, a produtividade do sistema.

O estudo visa assim avaliar o impacto desta modificação no desempenho do sistema, com especial atenção às temperaturas das bacias e à produtividade horária e cumulativa. Os resultados serão comparados com o desempenho de dessalinizadores de duplo efeito

já estudados, nos quais o vidro entre bacias não é revestido, sendo por isso transparente e permite a passagem da radiação solar para a bacia inferior.

O dessalinizador solar modelado para este estudo apresenta as mesmas dimensões dos dessalinizadores solares de duplo efeito analisados anteriormente, utilizando também os mesmos dados de entrada. O concentrador utilizado foi o concentrador A. O revestimento aplicado em ambos os lados do vidro, para torná-lo opaco, possui a mesma emissividade que a base do dessalinizador, com um valor de 0,9.

As Figuras 3.44(a) e 3.44(b) apresentam a comparação dos perfis de produtividade horária e de produtividade cumulativa, respectivamente, de cada bacia entre o dessalinizador solar de duplo efeito convencional e os dessalinizadores de duplo efeito e de absorsor invertido, com vidro transparente e vidro revestido entre bacias.

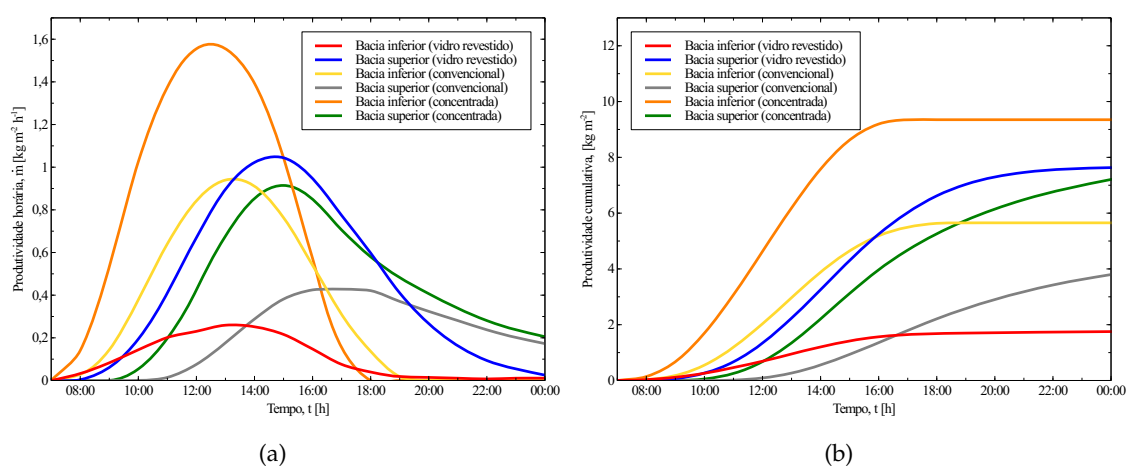


Figura 3.44: Perfis de produtividade do dessalinizador solar de duplo efeito convencional, dos dessalinizadores de duplo efeito e de absorsor invertido com vidro transparente e com vidro revestido entre bacias, para cada bacia: (a) perfis horários; e (b) perfis cumulativos.

A Figura 3.45 mostra os perfis de temperatura média das superfícies da água e do vidro ao longo do tempo para o dessalinizador solar de duplo efeito e de absorsor invertido com vidro revestido entre bacias.

O pico de produtividade horária da bacia inferior do dessalinizador solar de duplo efeito e de absorsor invertido com vidro revestido foi significativamente inferior em comparação com os outros dessalinizadores. A bacia superior, por sua vez, apresentou um pico de produtividade horária superior aos demais dessalinizadores.

Com o vidro revestido, a única fonte de aquecimento da água na bacia inferior vem da radiação concentrada que incide diretamente na base do dessalinizador. O revestimento impede que o vidro da bacia inferior perca uma quantidade de calor por radiação significativa, o que limita o seu arrefecimento e, por conseguinte, diminui a diferença de temperatura entre o vapor de água e o vidro, resultando numa produtividade horária mais baixa para esta bacia. Por outro lado, a bacia superior beneficia do revestimento do vidro. A radiação solar que atravessa o vidro transparente da bacia superior, aquece a

3.7. ESTUDO DO DESSALINIZADOR SOLAR DE DUPLO EFEITO E DE ABSORSOR INVERTIDO

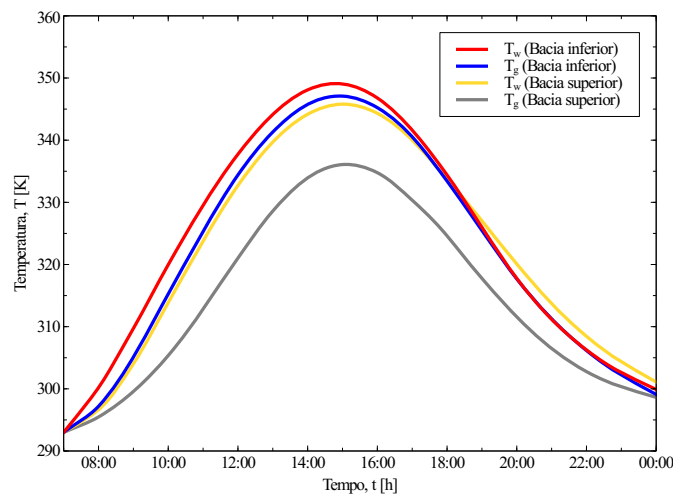


Figura 3.45: Perfis de temperatura das superfícies da água e do vidro para cada bacia, do dessalinizador solar de duplo efeito e de absorSOR invertido com vidro revestido entre bacias.

água da bacia, com perdas de calor por radiação relativamente insignificantes pelo vidro em que a água está assente. Adicionalmente, é possível ainda aproveitar o calor latente de condensação da bacia inferior. Desta forma, a bacia superior consegue manter uma diferença significativa de temperatura entre o vapor de água e o vidro, resultando numa produtividade horária superior.

Após o pico de produtividade horária na bacia superior, observa-se um declínio mais acentuado em comparação com os outros dessalinizadores. Este comportamento deve-se à redução significativa da radiação solar, que deixa de ser suficiente para aquecer a água da bacia, e à baixa taxa de condensação na bacia inferior deste dessalinizador, o que limita a quantidade de calor latente de condensação disponível para aquecer a água na bacia superior. Além disso, com a diminuição da temperatura ambiente ao longo do dia, a diferença de temperatura entre o vapor de água e o vidro torna-se menor em comparação com os outros dessalinizadores, o que contribui para a queda mais acentuada da produtividade horária. De destacar também que a produtividade noturna foi inferior à dos outros sistemas, devido ao facto do vidro revestido entre bacias ter limitado o seu arrefecimento durante o dia, dificultando a condensação do vapor de água da bacia inferior. Como resultado, o calor latente de condensação vindo da bacia inferior foi significativamente menor, comprometendo o desempenho do sistema durante a noite, altura em que o aproveitamento desse calor latente é essencial para manter a produtividade da bacia superior.

As Figuras 3.46(a) e 3.46(b) apresentam as distribuições de temperatura do dessalinizador solar de duplo efeito e de absorSOR invertido com vidro revestido entre bacias, para os instantes das 13 horas e 15 horas, respetivamente. Estes momentos correspondem aos períodos de maior produtividade horária na bacia inferior (às 13 horas) e na bacia superior (às 15 horas).

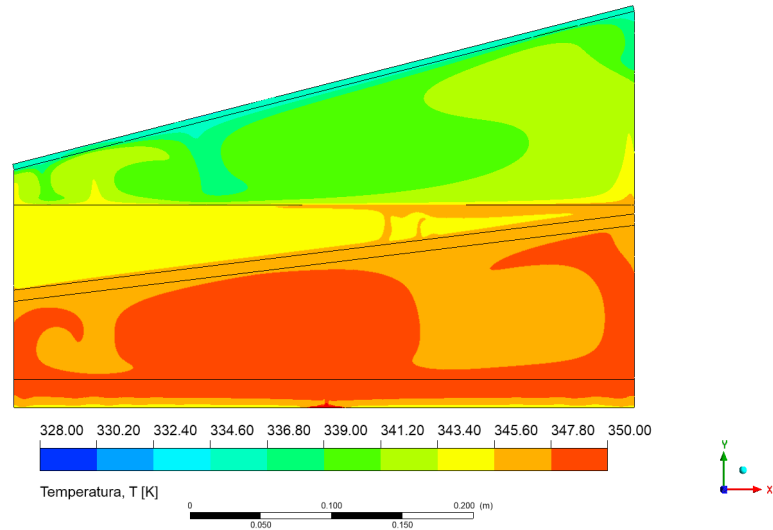
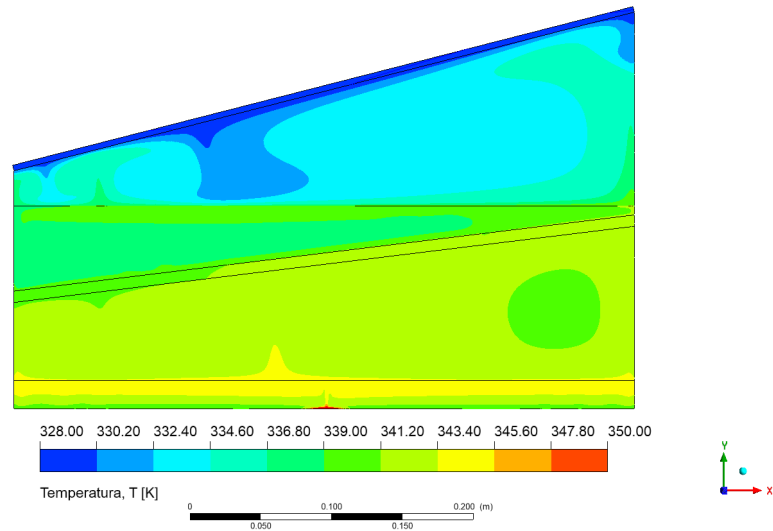


Figura 3.46: Distribuições de temperatura do dessalinizador solar de duplo efeito e de absorvedor invertido com um revestimento no vidro entre bacias para os instantes: (a) 13 horas e (b) 15 horas.

3.7. ESTUDO DO DESSALINIZADOR SOLAR DE DUPLO EFEITO E DE ABSORSOR INVERTIDO

A análise da distribuição de temperaturas no dessalinizador solar de duplo efeito com absorsor invertido, equipado com um revestimento no vidro entre bacias, para o instante das 13 horas, revela que a radiação concentrada incidente na base do dessalinizador permitiu um aquecimento significativo da bacia inferior, especialmente na região central. Por outro lado, a radiação solar incidente no vidro da bacia superior ainda não foi suficiente para elevar as temperaturas dessa bacia a níveis comparáveis aos da bacia inferior.

Já às 15 horas, a distribuição de temperatura indica uma tendência de deslocamento do fluxo térmico para a bacia superior, aquecendo a água desta bacia. Este fenómeno, combinado com a maior incidência de radiação solar proveniente de cima, fez com que a bacia superior atingisse temperaturas mais elevadas. No entanto, mesmo neste instante, a bacia inferior continua a apresentar temperaturas superiores às da bacia superior.

De realçar também que, enquanto o centro da base do dessalinizador atinge temperaturas mais elevadas, a restante base apresenta temperaturas mais baixas, onde o fluxo de calor concentrado é praticamente nulo, indicando perdas significativas de calor por radiação e convecção.

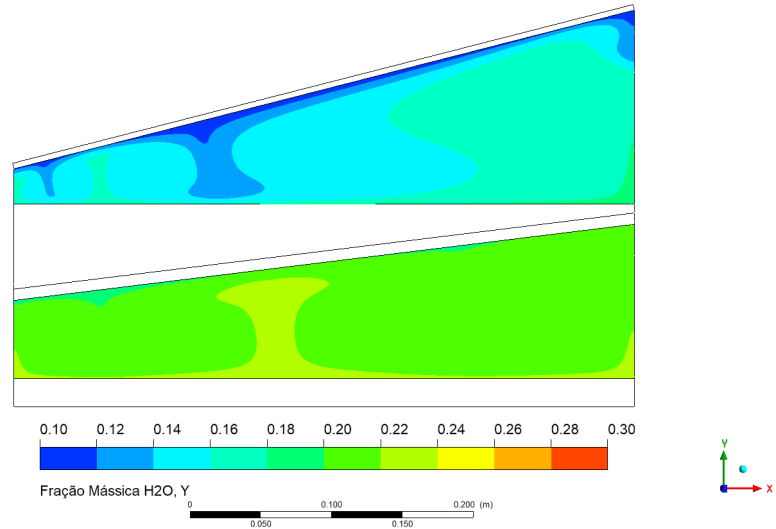
As Figuras 3.47(a) e 3.47(b) apresentam as distribuições de fração mássica do vapor de água do dessalinizador solar de duplo efeito e de absorsor invertido com vidro revestido entre bacias, para os instantes das 13 horas e 15 horas, respetivamente.

As distribuições de fração mássica do vapor de água indicam que os valores desta fração são consistentemente superiores na bacia inferior, em ambos os instantes analisados. Às 15 horas, a fração mássica na bacia inferior atingiu o valor máximo de 0,30, acompanhado pela formação de uma grande pluma de fração mássica ascendente. Na bacia superior, para o mesmo instante, a fração mássica foi inferior aos valores registados na bacia inferior, atingindo um pico inferior. No entanto, observou-se a formação de um comportamento mais dinâmico, com duas plumas de fração mássica descendentes e uma ascendente.

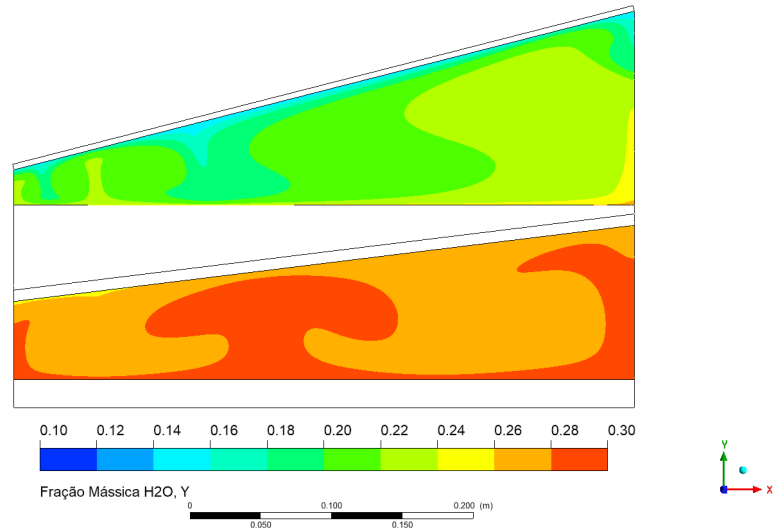
Além disso, o contraste entre as duas bacias destaca a influência das condições térmicas e de circulação de ar no processo de vaporização. A bacia inferior, beneficiada pela radiação concentrada na sua base, facilita a evaporação de forma mais direcionada. Já na bacia superior, embora a radiação solar também desempenhe um papel relevante, a menor homogeneidade térmica resulta numa distribuição mais complexa das plumas de fração mássica.

As Figuras 3.48(a) e 3.48(b) apresentam as distribuições de velocidade do dessalinizador solar de duplo efeito e de absorsor invertido com vidro revestido entre bacias, para os instantes das 13 horas e 15 horas, respetivamente.

As distribuições de velocidade revelaram a formação de quatro vórtices principais em ambas as bacias, tanto no instante das 13 horas quanto no das 15 horas. Na bacia superior, verificou-se que os valores de velocidade junto às superfícies da água e do vidro foram consistentemente mais elevados em comparação com a bacia inferior. Este aumento de velocidade é atribuído à maior transferência de calor nesta região, promovida pela incidência da radiação solar no topo da bacia. Por outro lado, a bacia inferior apresentou vórtices com tamanhos mais uniformes, o que sugere uma circulação de fluxo mais estável



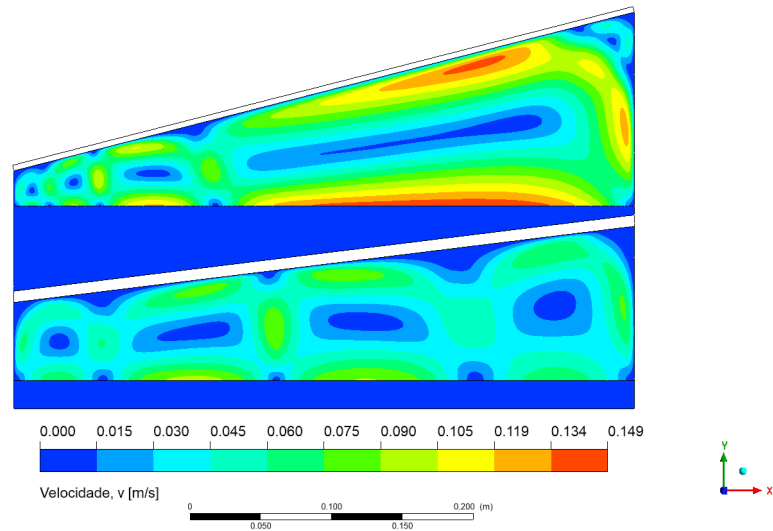
(a)



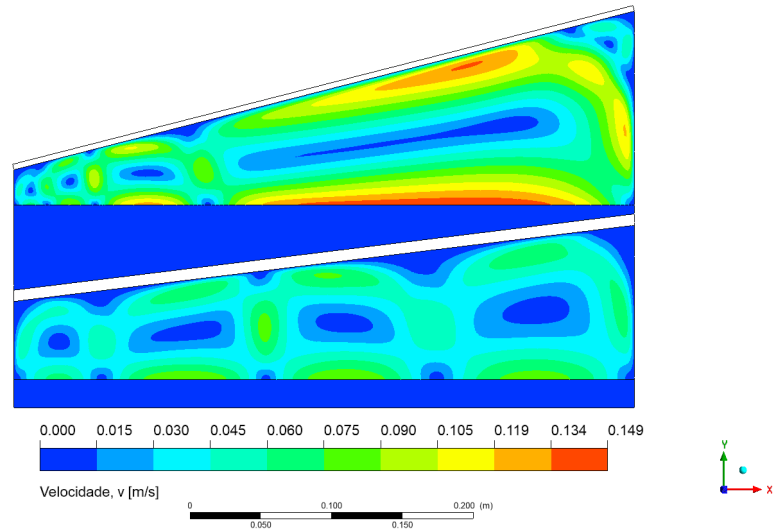
(b)

Figura 3.47: Distribuições de fração mássica do vapor de água do dessalinizador solar de duplo efeito e de absorsor invertido com um revestimento no vidro entre bacias para os instantes: (a) 13 horas e (b) 15 horas.

3.7. ESTUDO DO DESSALINIZADOR SOLAR DE DUPLO EFEITO E DE ABSORSOR INVERTIDO



(a)



(b)

Figura 3.48: Distribuições de velocidade do dessalinizador solar de duplo efeito e de absorsor invertido com um revestimento no vidro entre bacias para os instantes: (a) 13 horas e (b) 15 horas.

e homogênea. Já na bacia superior, os vórtices mostraram-se de tamanhos variados, com uma tendência de crescimento dos vórtices da esquerda para a direita. Esta diferença de tamanhos e velocidades dos vórtices entre as duas bacias é um indicativo de que a bacia inferior está a dissipar o calor de maneira mais uniforme, enquanto que na bacia superior o processo de convecção é mais dinâmico e variável, refletindo a maior influência da radiação solar vinda de cima na geração dos padrões de fluxo.

A Figura 3.49 apresenta a comparação dos perfis de produtividade cumulativa ao longo do tempo para os três tipos de dessalinizadores analisados neste estudo. A análise dos perfis mostra que o dessalinizador solar de duplo efeito e de absorvedor invertido, com vidro revestido entre bacias, apresenta uma redução relativamente pequena de 0,69% na produtividade cumulativa em comparação com o dessalinizador de duplo efeito convencional. No entanto, verifica-se uma diminuição significativa de 76,41% em relação ao dessalinizador solar de duplo efeito e de absorvedor invertido com vidro transparente entre bacias.

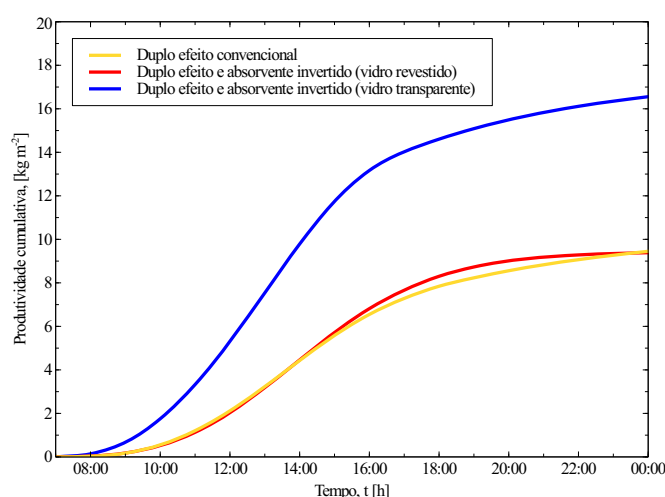


Figura 3.49: Comparação dos perfis de produtividade cumulativa entre o dessalinizador solar de duplo efeito convencional, e entre os dessalinizadores de duplo efeito e de absorvedor invertido com vidro transparente e com vidro revestido entre bacias.

Em suma, o revestimento aplicado no vidro entre bacias limitou a diferença de temperatura entre o vapor de água e o vidro, comprometendo a produtividade da bacia inferior. Na bacia superior, o revestimento mostrou-se vantajoso para a produção de água destilada durante o dia, ao reduzir a perda de calor por radiação e aumentar a taxa da evaporação. No entanto, durante a noite, essa vantagem não se verificou, resultando numa menor produtividade. No final, a produtividade cumulativa total deste dessalinizador foi ligeiramente inferior à do dessalinizador convencional, indicando que o uso do revestimento e do concentrador solar não trouxe ganhos significativos na produção de água destilada. Os custos adicionais associados ao revestimento e ao concentrador solar tornam esta solução ainda menos atraente do ponto de vista económico, sem oferecer um aumento substancial no desempenho geral, sugerindo que a combinação desses elementos não se justifica em

3.7. ESTUDO DO DESSALINIZADOR SOLAR DE DUPLO EFEITO E DE ABSORSOR INVERTIDO

termos de custo-benefício.

CONCLUSÕES

Face aos desafios globais relacionados com a escassez de água potável, a dessalinização solar passiva apresenta-se como uma solução promissora. A crescente procura por recursos hídricos em várias partes do mundo, aliada à urgência de soluções sustentáveis para reduzir os impactos ambientais tem impulsionado o desenvolvimento e a investigação de dessalinizadores solares mais eficientes e acessíveis. Nesse contexto, a presente dissertação centra-se no estudo numérico de diversos dessalinizadores solares passivos, fornecendo uma base detalhada para a análise do desempenho deste tipo de tecnologia. O estudo computacional, realizado através de simulações numéricas, incidiu sobre dois modelos matemáticos distintos, classificados em níveis de modelação: nível A e nível B. Estes modelos foram validados, tendo como referência resultados numéricos e experimentais previamente apresentados na literatura.

Inicialmente, foi realizado um estudo comparativo entre os dois níveis de modelação, com o objetivo de avaliar a capacidade preditiva do modelo de nível A em comparação com o modelo de nível B, sendo este último o mais sofisticado por considerar elementos e aspetos relevantes ao processo de dessalinização solar passiva. A partir deste estudo, retirou-se as seguintes conclusões:

- a produtividade horária estimada pelo modelo de nível A, que é tratado em regime estacionário, não apresenta variações significativas quando comparada com a produtividade horária calculada pelo modelo de nível B, que opera em regime transiente, independentemente de se considerar um intervalo temporal ou um instante específico;
- os valores de fração mássica do vapor de água calculados junto às superfícies da água e do vidro no modelo de nível B são similares aos inseridos diretamente no modelo de nível A para o instante das 14 horas;
- a análise comparativa das distribuições de temperatura e fração mássica do vapor de água para o instante das 14 horas revelou diferenças significativas entre os dois modelos, com o modelo de nível A apresentando um maior número de bolhas de

recirculação, bem como plumas térmicas e de fração mássica, em comparação com o modelo de nível B;

- o modelo de nível B foi considerado o mais adequado para os estudos subsequentes devido à consideração de aspetos relevantes e mais detalhados ao processo de dessalinização.

Posteriormente, realizaram-se estudos paramétricos utilizando o modelo de nível B, focando-se na influência de parâmetros climáticos, operacionais e de projeto, como a profundidade de água na bacia, a velocidade do vento do ambiente exterior, a espessura da cobertura de vidro e a sua inclinação no desempenho do dessalinizador solar convencional. Para o estudo de cada parâmetro considerou-se um caso comum a todos e as condições climáticas de um dia representativo de Portugal. A partir destes estudos, foram extraídas as seguintes conclusões:

- A produtividade horária foi superior para a profundidade de água líquida de 2 cm até aproximadamente às 16 horas, quando comparada com a profundidade de 4 cm;
- durante o período noturno, a produtividade horária para a profundidade de 4 cm foi superior à profundidade de 2 cm;
- as distribuições de temperatura, fração mássica do vapor de água e velocidade para o instante das 14 horas demonstraram que os seus valores atingidos no dessalinizador foram inferiores no caso da profundidade de 4 cm;
- a diferença relativa na produtividade cumulativa entre o dessalinizadores com profundidades de água de 2 cm e de 4 cm, foi de - 12,37%, concluindo-se que a profundidade de 2 cm produz uma maior quantidade de água destilada durante o período analisado;
- a velocidade do vento do ambiente exterior de 1 m s^{-1} resultou na menor produtividade horária até às 18 horas, em comparação com as velocidades de 3 m s^{-1} e 9 m s^{-1} ;
- após as 18 horas, a velocidade de 9 m s^{-1} passou a apresentar a menor produtividade horária;
- as diferenças relativas nas produtividades cumulativas entre os dessalinizadores que operaram a velocidades de 9 m s^{-1} e 3 m s^{-1} foi de 7,81%, enquanto que entre os dessalinizadores que operaram a velocidades de 1 m s^{-1} e 3 m s^{-1} foi de - 13,41%, sugerindo que a velocidade de 9 m s^{-1} produz uma maior quantidade de água destilada durante o período analisado;
- a produtividade horária do dessalinizador solar com uma espessura de vidro de 2 mm foi superior às outras espessuras, 4 mm e 8 mm, durante todo o período de tempo analisado;

- as temperaturas médias das superfícies da água líquida e do vidro foram inferiores até às 15 horas para o caso da espessura de 8 mm, quando comparada com as restantes espessuras. Após as 15 horas, a espessura de 8 mm atingiu temperaturas superiores em comparação com as espessuras menores;
- a espessura do vidro influencia mais as temperaturas do sistemas do que propriamente a dinâmica do escoamento interno;
- a diferença relativa entre os dessalinizadores com uma espessura da cobertura de vidro de 2 mm e 4 mm foi de 1,13%, enquanto que para as espessuras de 8 mm e 4 mm foi de - 3,39%, sugerindo que este parâmetro tem um impacto relativamente pequeno no desempenho global do dessalinizador solar;
- a produtividade horária do dessalinizador com uma inclinação da cobertura de vidro de $24,35^\circ$ foi inferior até às 21 horas, igualando-se após esse instante em comparação com o dessalinizador com uma inclinação de $14,35^\circ$;
- as temperaturas médias da superfície da água líquida e do vidro foram relativamente superiores no caso da inclinação de $14,35^\circ$ até às 16 horas, após o qual seguiram uma variação muito similar;
- a menor inclinação favoreceu a formação de dois vórtices, enquanto que a maior inclinação resultou na formação de apenas um vórtice, sugerindo que o aumento da geometria do ar húmido influencia significativamente o comportamento hidrodinâmico no interior do dessalinizador;
- a diferença relativa da produtividade cumulativa entre as inclinações de $24,35^\circ$ e $14,35^\circ$ foi de - 6,14%, indicando uma vantagem para a menor inclinação em termos de desempenho.

O estudo do dessalinizador solar de duplo efeito demonstrou um aumento significativo na produtividade cumulativa em comparação com o dessalinizador solar convencional, com uma diferença relativa de 18,51%. Em termos de produtividades horárias, concluiu-se que a bacia inferior apresentou um desempenho predominantemente diurno, enquanto a bacia superior produziu água destilada tanto durante o dia como à noite. Além disso, a produtividade cumulativa da bacia inferior foi superior à da bacia superior.

Em relação à comparação entre os dessalinizadores do tipo convencional e o de absorsor invertido, considerando as perdas de calor por convecção e radiação na base do dessalinizador, bem como a influência da dimensão do concentrador solar (concentrador A ou B), obtiveram-se as seguintes conclusões:

- o concentrador de maiores dimensões (concentrador A) proporcionou uma produtividade horária superior ao dessalinizador convencional até às 17 horas, e manteve-se superior também ao dessalinizador de absorsor invertido integrado com o concentrador B perante todo o período analisado;

-
- a comparação das distribuições de temperatura, fração mássica do vapor de água e velocidade para o instante das 14 horas entre os dessalinizadores com diferentes concentradores, revelaram que, o concentrador A possibilitou atingir maiores valores de temperatura e fração mássica do vapor de água, além de valores mais elevados de velocidade junto às superfícies da água e do vidro. Verificou-se ainda a formação de três vórtices com ambos os concentradores, um a mais em comparação com o dessalinizador convencional;
 - a diferença relativa na produtividade cumulativa entre dessalinizador de absorvedor invertido integrado com o concentrador A e o dessalinizador convencional foi de 15,05%. No que toca ao dessalinizador de absorvedor invertido integrado com o concentrador B, a diferença relativa foi de -8,60% face ao dessalinizador convencional, indicando que apenas o concentrador A melhorou significativamente o desempenho.

O estudo do dessalinizador solar de duplo efeito e de absorvedor invertido demonstrou um aumento significativo de 75,20% na produtividade cumulativa em comparação com o dessalinizador solar de duplo efeito convencional. De todos os dessalinizadores analisados nesta dissertação, este foi o dessalinizador que se revelou mais vantajoso a nível do desempenho da tecnologia de dessalinização solar passiva. A produtividade horária de cada bacia atingiu picos mais elevados, sendo que, na bacia superior, a produção de água destilada iniciou-se duas horas mais cedo do que no dessalinizador convencional. Em termos de temperaturas médias das superfícies da água e do vidro, observou-se um aumento mais rápido até aos respetivos picos, impulsionado pela radiação concentrada, que se intensifica ao longo do dia. No entanto, notou-se também uma descida mais rápida dessas temperaturas devido às perdas de calor pela base do dessalinizador, característica do dessalinizador de absorvedor invertido.

Por fim, o último estudo procura investigar a influência de um revestimento no vidro entre as bacias no dessalinizador solar de duplo efeito e de absorvedor invertido, avaliando o seu impacto no desempenho deste dessalinizador solar. O revestimento pretende bloquear a radiação solar que vem da bacia superior para a bacia inferior de modo a que a radiação solar concentrada produzida pelo concentrador A, seja a principal fonte de aquecimento da água líquida na bacia inferior.

Deste estudo conclui-se que esta combinação de vidro revestido entre as bacias e a radiação solar concentrada não é a melhor opção a nível de desempenho do dessalinizador, uma vez que produziu uma diminuição na produtividade cumulativa de 0,69% e 76,41%, quando comparado com dessalinizador solar de duplo efeito convencional e com o dessalinizador de duplo efeito e de absorvedor invertido, respetivamente.

Analisando cada uma das bacias, o dessalinizador solar de duplo efeito e de absorvedor invertido com vidro revestido apresentou uma produtividade horária inferior na bacia inferior, enquanto a bacia superior atingiu um pico de produtividade superior em comparação com os outros dois dessalinizadores com vidro transparente entre bacias. Concluindo-se que apenas a bacia superior é que beneficia do revestimento do vidro entre bacias. Ainda

assim, a produtividade noturna foi inferior aos outros tipos de dessalinizadores solares analisados.

De realçar também que, o uso de vidro revestido resultou na formação de um vórtice adicional em cada bacia, em comparação com os outros dois dessalinizadores utilizados neste estudo.

As sugestões para trabalhos futuros, com o objetivo de expandir a investigação desenvolvida, incluem várias abordagens. Em primeiro lugar, seria importante investigar o desempenho de um dessalinizador solar de multi-efeitos com a adição de mais bacias, avaliando se o aumento do número de bacias resulta num ganho significativo de produtividade, através do maior aproveitamento do calor latente de condensação. Outra proposta seria a modelação de um dessalinizador solar do tipo cascata, com o intuito de estudar os efeitos do aumento do número de degraus na eficiência do sistema, dado que cada degrau serve como uma etapa adicional de evaporação e condensação.

Além disso, recomenda-se a investigação do uso de radiação solar concentrada em dessalinizadores do tipo tubular, que poderia aumentar a área de receção de radiação solar concentrada, devido à sua geometria circular, aumentando o seu desempenho. Sugere-se também a exploração da adição de materiais de mudança de fase na base de um dessalinizador solar, permitindo o armazenamento de energia térmica e, assim, melhorar o desempenho durante períodos de baixa radiação solar.

Seria também relevante o estudo da opacidade da água líquida na bacia, de modo a compreender o impacto desta característica na produtividade do dessalinizador solar.

Por fim, seria relevante desenvolver a modelação tridimensional (3D) de dessalinizadores solares, o que possibilitaria uma análise mais detalhada e precisa do comportamento térmico e do escoamento de fluidos no interior do sistema.

REFERÊNCIAS

- [1] J. M. Lourenço. *The NOVAthesis L^AT_EX Template User's Manual*. NOVA University Lisbon. 2021. URL: <https://github.com/joaomlourenco/novathesis/raw/main/template.pdf> (ver p. i).
- [2] U. N. (UN). *Goal 6: Ensure access to water and sanitation for all*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/water-and-sanitation/> [Acedido a: 26/01/2024]. 2015 (ver p. 2).
- [3] C. He, Z. Liu, J. Wu, X. Pan, Z. Fang, J. Li e B. A. Bryan. «Future global urban water scarcity and potential solutions». Em: *Nature Communications* 12 (1 2021-12). ISSN: 20411723. DOI: 10.1038/s41467-021-25026-3 (ver p. 2).
- [4] V. P. Katekar e S. S. Deshmukh. «A review on research trends in solar still designs for domestic and industrial applications». Em: *Journal of Cleaner Production* 257 (2020), p. 120544. ISSN: 0959-6526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120544>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620305916> (ver pp. 2, 7, 12, 17).
- [5] G. Á. do Algarve. *Sistema de Dessalinização de Água do Mar da região do Algarve*. <https://www.aguasdoalgarve.pt/content/sistema-de-dessalinizacao-deagua-do-mar-da-regiao-do-algarve> [Acedido a: 05/05/2024]. 2023 (ver p. 2).
- [6] E. Delyannis. «Historic background of desalination and renewable energies». Em: *Solar Energy* 75.5 (2003). Solar Desalination, pp. 357–366. ISSN: 0038-092X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.08.002>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X03002779> (ver p. 3).
- [7] V. Belessiotis e E. Delyannis. «The history of renewable energies for water desalination». Em: *Desalination* 128.2 (2000), pp. 147–159. ISSN: 0011-9164. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)00030-8](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)00030-8). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916400000308> (ver pp. 3, 4).

- [8] E. Kabir, P. Kumar, S. Kumar, A. A. Adelodun e K.-H. Kim. «Solar energy: Potential and future prospects». Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82 (2018), pp. 894–900. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.094>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117313485> (ver p. 3).
- [9] S. A. Kalogirou. «Seawater desalination using renewable energy sources». Em: *Progress in Energy and Combustion Science* 31.3 (2005), pp. 242–281. ISSN: 0360-1285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2005.03.001>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128505000146> (ver p. 4).
- [10] A. Pugsley, A. Zacharopoulos, J. D. Mondol e M. Smyth. «Global applicability of solar desalination». Em: *Renewable Energy* 88 (2016), pp. 200–219. ISSN: 0960-1481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.017>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148115304353> (ver p. 5).
- [11] D. Curto, V. Franzitta e A. Guercio. «A Review of the Water Desalination Technologies». Em: *Applied Sciences* 11.2 (2021). ISSN: 2076-3417. DOI: [10.3390/app11020670](https://doi.org/10.3390/app11020670). URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/2/670> (ver p. 6).
- [12] M. A. Al-Obaidi, R. H. A. Zubo, F. L. Rashid, H. J. Dakkama, R. Abd-Alhameed e I. M. Mujtaba. «Evaluation of Solar Energy Powered Seawater Desalination Processes: A Review». Em: *Energies* 15.18 (2022). ISSN: 1996-1073. DOI: [10.3390/en15186562](https://doi.org/10.3390/en15186562). URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/18/6562> (ver p. 6).
- [13] A. Tiwari, M. K. Rathod e A. Kumar. «A comprehensive review of solar-driven desalination systems and its advancements». Em: *Environment, Development and Sustainability* 25.2 (2023-02), pp. 1052–1083. ISSN: 1573-2975. DOI: [10.1007/s10668-021-02040-5](https://doi.org/10.1007/s10668-021-02040-5). URL: <https://doi.org/10.1007/s10668-021-02040-5> (ver pp. 7, 12).
- [14] O. Younis, A. K. Hussein, M. E. H. Attia, H. S. S. Aljibori, L. Kolsi, H. Togun, B. Ali, A. Abderrahmane, K. Subkrajang e A. Jirawattanapanit. «Comprehensive Review on Solar Stills — Latest Developments and Overview». Em: *Sustainability* 14.16 (2022). ISSN: 2071-1050. DOI: [10.3390/su141610136](https://doi.org/10.3390/su141610136). URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/16/10136> (ver pp. 7–9, 15–17).
- [15] H. N. Panchal e S. Patel. «An extensive review on different design and climatic parameters to increase distillate output of solar still». Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 69 (2017), pp. 750–758. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.001>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116304920> (ver pp. 7, 9, 10, 13).
- [16] J. Zuluaga-Gomez, P. Bonaveri, D. Zuluaga, C. Álvarez-Peña e N. Ramírez-Ortiz. «Techniques for water disinfection, decontamination and desalinization: A review». Em: *Desalination and Water Treatment* 181 (2020-03), pp. 47–63. ISSN: 19443986. DOI: [10.5004/dwt.2020.25073](https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25073) (ver p. 8).

- [17] V. Dimri, B. Sarkar, U. Singh e G. Tiwari. «Effect of condensing cover material on yield of an active solar still: an experimental validation». Em: *Desalination* 227.1 (2008). Issue 1 First Oxford and Nottingham Water and Membranes Research Event 2–4 July 2006, Oxford, UK, pp. 178–189. ISSN: 0011-9164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.06.024>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916408002002> (ver p. 8).
- [18] M. Bhargva e A. Yadav. «Factors affecting the performance of a solar still and productivity enhancement methods: A review». Em: *Environmental Science and Pollution Research* 28.39 (2021-10), pp. 54383–54402. ISSN: 1614-7499. DOI: [10.1007/s11356-021-15983-z](https://doi.org/10.1007/s11356-021-15983-z). URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15983-z> (ver pp. 8, 9, 12).
- [19] M. Shatat e S. B. Riffat. «Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources». Em: *International Journal of Low-Carbon Technologies* 9.1 (2012-04), pp. 1–19. ISSN: 1748-1317. DOI: [10.1093/ijlct/cts025](https://doi.org/10.1093/ijlct/cts025). eprint: <https://academic.oup.com/ijlct/article-pdf/9/1/1/1914183/cts025.pdf>. URL: <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts025> (ver p. 9).
- [20] A. El-Sebaei e E. El-Bialy. «Advanced designs of solar desalination systems: A review». Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49 (2015), pp. 1198–1212. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.161>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115004311> (ver pp. 9–11, 13–16).
- [21] G. Peng e S. W. Sharshir. «Progress and performance of multi-stage solar still – A review». Em: *Desalination* 565 (2023), p. 116829. ISSN: 0011-9164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116829>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916423004617> (ver pp. 10, 11, 13).
- [22] P. K. Chaurasiya, U. Rajak, S. K. Singh, T. Nath Verma, V. K. Sharma, A. Kumar e V. Shende. «A review of techniques for increasing the productivity of passive solar stills». Em: *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 52 (2022), p. 102033. ISSN: 2213-1388. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102033>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138822000856> (ver p. 12).
- [23] M. Edalatpour, K. Aryana, A. Kianifar, G. Tiwari, O. Mahian e S. Wongwises. «Solar stills: A review of the latest developments in numerical simulations». Em: *Solar Energy* 135 (2016), pp. 897–922. ISSN: 0038-092X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.03.005>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X16001791> (ver pp. 12, 14, 15).
- [24] D. Dsilva Winfred Rufuss, S. Iniyan, L. Suganthi e P. Davies. «Solar stills: A comprehensive review of designs, performance and material advances». Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 63 (2016), pp. 464–496. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.005>.

- [//doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.068](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.068). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116301800> (ver pp. 13, 16).
- [25] R. Dev e G. Tiwari. «Characteristic equation of a passive solar still». Em: *Desalination* 245.1 (2009). Engineering with Membranes 2008, pp. 246–265. ISSN: 0011-9164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.07.011>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916409003415> (ver p. 15).
- [26] A. K. Hussein, F. L. Rashid, A. M. Abed, M. Al-Khaleel, H. Togun, B. Ali, N. Akkurt, E. H. Malekshah, U. Biswal, M. A. Al-Obaidi, O. Younis e A. Abderrahmane. «Inverted Solar Stills: A Comprehensive Review of Designs, Mathematical Models, Performance, and Modern Combinations». Em: *Sustainability* 14.21 (2022). ISSN: 2071-1050. DOI: 10.3390/su142113766. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/21/13766> (ver pp. 15, 91).
- [27] M. Edalatpour, A. Kianifar e S. Ghiami. «Effect of blade installation on heat transfer and fluid flow within a single slope solar still». Em: *International Communications in Heat and Mass Transfer* 66 (2015), pp. 63–70. ISSN: 0735-1933. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2015.05.015>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0735193315000937> (ver pp. 17, 18, 30, 35).
- [28] M. Feilizadeh, M. Soltanieh, M. Karimi Estahbanati, K. Jafarpur e S.-S. Ashrafmansouri. «Optimization of geometrical dimensions of single-slope basin-type solar stills». Em: *Desalination* 424 (2017), pp. 159–168. ISSN: 0011-9164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.08.005>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916416321270> (ver pp. 18, 54, 55).
- [29] S. Rashidi, S. Akar, M. Bovand e R. Ellahi. «Volume of fluid model to simulate the nanofluid flow and entropy generation in a single slope solar still». Em: *Renewable Energy* 115 (2018), pp. 400–410. ISSN: 0960-1481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.08.059>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148117308170> (ver pp. 19, 20).
- [30] T. Yan, G. Xie, H. Liu, Z. Wu e L. Sun. «CFD investigation of vapor transportation in a tubular solar still operating under vacuum». Em: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 156 (2020), p. 119917. ISSN: 0017-9310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119917>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931020308954> (ver pp. 19, 21, 22, 30).
- [31] A. R. Nadgire, S. B. Barve e P. K. Ithape. «Experimental Investigation and Performance Analysis of Double-Basin Solar Still Using CFD Techniques». Em: *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C* 101.3 (2020-06), pp. 531–539. ISSN: 2250-0553. DOI: 10.1007/s40032-020-00561-y. URL: <https://doi.org/10.1007/s40032-020-00561-y> (ver pp. 21, 85).

- [32] M. Keshtkar, M. Eslami e K. Jafarpur. «Effect of design parameters on performance of passive basin solar stills considering instantaneous ambient conditions: A transient CFD modeling». Em: *Solar Energy* 201 (2020), pp. 884–907. ISSN: 0038-092X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.03.068>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X20303145> (ver pp. 22, 23, 31, 37–39, 41, 54, 68, 73, 79, 85).
- [33] M. M. Ahmed, F. Alshammari, A. Abdullah e M. Elashmawy. «Enhancing tubular solar still performance using double effect with direct sunrays concentration». Em: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 230 (2021), p. 111214. ISSN: 0927-0248. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111214>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024821002579> (ver pp. 23, 24).
- [34] E. B. Moustafa, A. H. Hammad e A. H. Elsheikh. «A new optimized artificial neural network model to predict thermal efficiency and water yield of tubular solar still». Em: *Case Studies in Thermal Engineering* 30 (2022), p. 101750. ISSN: 2214-157X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101750>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X21009138> (ver pp. 24, 25, 47).
- [35] H. G. Hameed, H. A. N. Diabil e M. Al-Moussawi. «A numerical investigation of the enhancement of single-slope single-basin solar still productivity». Em: *Energy Reports* 9 (2023), pp. 484–500. ISSN: 2352-4847. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.11.199>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484722025860> (ver pp. 25, 26).
- [36] D. Purnachandrakumar, G. Mittal, R. K. Sharma, D. B. Singh, S. Tiwari e H. Sinhar. «Review on performance assessment of solar stills using computational fluid dynamics (CFD)». Em: *Environmental Science and Pollution Research* 29.26 (2022-03), pp. 38673–38714. ISSN: 1614-7499. DOI: [10.1007/s11356-022-18952-2](https://doi.org/10.1007/s11356-022-18952-2). URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-022-18952-2> (ver pp. 29–31).
- [37] A. E. Kabeel, E. M. El-Said e M. Abdulaziz. «Computational fluid dynamic as a tool for solar still performance analysis and design development: A review». Em: *Desalination and Water Treatment* 159 (2019-08), pp. 200–213. ISSN: 19443986. DOI: [10.5004/dwt.2019.24150](https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24150) (ver p. 29).
- [38] S. S. AlSaleem, E. Al-Qadami, H. Z. Korany, M. Shafiquzzaman, H. Haider, A. Ahsan, M. Alresheedi, A. AlGhafis e A. AlHarbi. «Computational Fluid Dynamic Applications for Solar Stills Efficiency Assessment: A Review». Em: *Sustainability* 14.17 (2022). ISSN: 2071-1050. DOI: [10.3390/su141710700](https://doi.org/10.3390/su141710700). URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/17/10700> (ver p. 29).
- [39] M. S. El-Sebaey, A. Ellman, A. Hegazy e T. Ghonim. «Experimental Analysis and CFD Modeling for Conventional Basin-Type Solar Still». Em: *Energies* 13.21 (2020).

- ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en13215734. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/21/5734> (ver p. 29).
- [40] N. Rahbar e J. A. Esfahani. «Estimation of convective heat transfer coefficient in a single-slope solar still: a numerical study». Em: *Desalination and Water Treatment* 50.1-3 (2012), pp. 387–396. DOI: 10.1080/19443994.2012.720442. eprint: <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.720442>. URL: <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.720442> (ver pp. 30, 35).
- [41] N. Rahbar e J. Esfahani. «Productivity estimation of a single-slope solar still: Theoretical and numerical analysis». Em: *Energy* 49 (2013), pp. 289–297. ISSN: 0360-5442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.10.023>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544212007852> (ver pp. 30, 31, 35, 36, 49–53, 57).
- [42] S. Rashidi e J. A. Esfahani. «Spatial entropy generation analysis for the design improvement of a single slope solar still». Em: *Environmental Progress and Sustainable Energy* 37 (3 2018-05), pp. 1112–1120. ISSN: 19447450. DOI: 10.1002/ep.12719 (ver pp. 30, 35).
- [43] S. Rashidi, M. Bovand e J. A. Esfahani. «Optimization of partitioning inside a single slope solar still for performance improvement». Em: *Desalination* 395 (2016), pp. 79–91. ISSN: 0011-9164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.05.026>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916416304568> (ver pp. 30, 35).
- [44] S. Rashidi, J. Abolfazli Esfahani e N. Rahbar. «Partitioning of solar still for performance recovery: Experimental and numerical investigations with cost analysis». Em: *Solar Energy* 153 (2017), pp. 41–50. ISSN: 0038-092X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.05.041>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X1730419X> (ver pp. 30, 35).
- [45] S. Shoeibi, N. Rahbar, A. A. Esfahlani e H. Kargarsharifabad. «Energy matrices, exergoeconomic and enviroeconomic analysis of air-cooled and water-cooled solar still: Experimental investigation and numerical simulation». Em: *Renewable Energy* 171 (2021), pp. 227–244. ISSN: 0960-1481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.081>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148121002561> (ver pp. 30, 35).
- [46] K. B. Saleem, L. Koufi, A. K. Alshara e L. Kolsi. «Double-diffusive natural convection in a solar distiller with external fluid stream cooling». Em: *International Journal of Mechanical Sciences* 181 (2020), p. 105728. ISSN: 0020-7403. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105728>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020740320306974> (ver pp. 30, 35).

- [47] N. Rahbar, A. Asadi e E. Fotouhi-Bafghi. «Performance evaluation of two solar stills of different geometries: Tubular versus triangular: Experimental study, numerical simulation, and second law analysis». Em: *Desalination* 443 (2018), pp. 44–55. ISSN: 0011-9164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.05.015>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916418307458> (ver pp. 30, 35).
- [48] N. Rahbar, J. A. Esfahani e E. Fotouhi-Bafghi. «Estimation of convective heat transfer coefficient and water-productivity in a tubular solar still – CFD simulation and theoretical analysis». Em: *Solar Energy* 113 (2015), pp. 313–323. ISSN: 0038-092X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.12.032>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X14006239> (ver pp. 30, 35).
- [49] H. Aghakhani, S. Ayatollahi e M. Hajmohammadi. «Proposing novel approaches for solar still performance enhancement by basin water heating, glass cooling, and vacuum creation». Em: *Desalination* 567 (2023), p. 117011. ISSN: 0011-9164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.117011>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916423006434> (ver pp. 31, 32, 37–41, 44, 54–56).
- [50] M. Keshtkar, M. Eslami e K. Jafarpur. «A novel procedure for transient CFD modeling of basin solar stills: Coupling of species and energy equations». Em: *Desalination* 481 (2020), p. 114350. ISSN: 0011-9164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114350>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916419320338> (ver pp. 31, 37–39, 41, 46, 54).
- [51] S. Moreno, C. Álvarez, J. Hinojosa e V. Maytorena. «Numerical analysis of a solar still with phase change material under the basin». Em: *Journal of Energy Storage* 55 (2022), p. 105427. ISSN: 2352-152X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105427>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X22014190> (ver pp. 31, 37, 38, 41, 54–56).
- [52] S. Moreno, J. Hinojosa e G. Dévora-Isiordia. «Exploring water desalination in an arid climate: An experimental and numerical analysis of a compact solar chimney». Em: *Desalination* 583 (2024), p. 117671. ISSN: 0011-9164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117671>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916424003825> (ver pp. 31, 37, 38, 41).
- [53] H. Aghakhani, S. Ayatollahi e M. Hajmohammadi. «A novel numerical model for solar still combined with collector and reflector». Em: *Applied Thermal Engineering* 248 (2024), p. 123123. ISSN: 1359-4311. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123123>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431124007919> (ver pp. 31, 32, 37, 38, 41).
- [54] P. Talukdar, C. R. Iskra e C. J. Simonson. «Combined heat and mass transfer for laminar flow of moist air in a 3D rectangular duct: CFD simulation and validation with experimental data». Em: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 51.11

- (2008), pp. 3091–3102. ISSN: 0017-9310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.08.034>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931007005972> (ver p. 35).
- [55] Y. Sarray, N. Hidouri, A. Mchirgui e A. B. Brahim. «Study of heat and mass transfer phenomena and entropy rate of humid air inside a passive solar still». Em: *Desalination* 409 (2017), pp. 80–95. ISSN: 0011-9164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.01.009>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916416304118> (ver p. 36).
- [56] A. K. Coker. «CHAPTER 2 - Physical Property of Liquids and Gases». Em: *Fortran Programs for Chemical Process Design, Analysis, and Simulation*. Ed. por A. K. Coker. Houston: Gulf Professional Publishing, 1995, pp. 103–149. ISBN: 978-0-88415-280-4. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-088415280-4/50003-0>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780884152804500030> (ver p. 37).
- [57] T. L. Bergman. *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons, 2011 (ver p. 43).
- [58] S. Ghiaasiaan. *Convective Heat and Mass Transfer (2nd ed.)*. Boca Raton: CRC Press, 2018 (ver p. 45).
- [59] A. Kabeel, Z. Omara e F. Essa. «Numerical investigation of modified solar still using nanofluids and external condenser». Em: *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 75 (2017), pp. 77–86. ISSN: 1876-1070. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2017.01.017>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876107017300305> (ver p. 47).
- [60] V. C. Corporation. *Weather Data Services*. <https://www.visualcrossing.com/weather/weather-data-services> [Acedido a: 11/07/2024] (ver pp. 48, 49).
- [61] C. UE. *Copernicus Climate Data Store*. <https://ads.atmosphere.copernicus.eu> [Acedido a: 11/07/2024] (ver p. 49).
- [62] T. Rajaseenivasan, T. Elango e K. Kalidasa Murugavel. «Comparative study of double basin and single basin solar stills». Em: *Desalination* 309 (2013), pp. 27–31. ISSN: 0011-9164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.09.014>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916412005188> (ver p. 85).
- [63] E. C. Nwosu, G. N. Nwaji, C. Ononogbo, I. Ofong, P. C. Nwadinobi, N. V. Ogueke e E. E. Anyanwu. «Numerical and experimental study of a single-slope double-effect solar still integrated with paraffin wax». Em: *Energy Nexus* 8 (2022), p. 100155. ISSN: 2772-4271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100155>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772427122001103> (ver pp. 85, 86).

- [64] T. Abderachid e K. Abdenacer. «Effect of orientation on the performance of a symmetric solar still with a double effect solar still (comparison study)». Em: *Desalination* 329 (2013), pp. 68–77. ISSN: 0011-9164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.09.011>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916413004219> (ver p. 85).



2024 Modelação e simulação de sistemas solares de desalinização passiva de água Ana Helio