



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Sofia dos Santos Raposo

**ESTUDO E CONCEÇÃO DE UM SISTEMA
DOMÉSTICO DE DESSALINIZAÇÃO COM
ENERGIA SOLAR**

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Produção e Projeto orientada pelos Professores Doutores José Joaquim da Costa e Gonçalo Jorge Vieira Nunes Brites e apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Outubro de 2020

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Estudo e conceção de um sistema doméstico de dessalinização com energia solar

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

Study and conception of a domestic solar desalination system

Autor

Sofia dos Santos Raposo

Orientadores

José Joaquim da Costa

Gonçalo Jorge Vieira Nunes Brites

Júri

| | |
|-------------------|--|
| Presidente | Professor Doutor Adélio M. Rodrigues Gaspar Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra |
| Orientador | Professor Doutor José Joaquim da Costa Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra |
| Vogais | Professor Doutor Miguel Rosa Oliveira Panão Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra |

Coimbra, outubro, 2020

Esta tese foi elaborada com o precioso contributo dos meus orientadores
Dr. José Joaquim da Costa e Dr. Gonçalo Brites.

Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

Aos meus orientadores Dr. José Joaquim da Costa e Dr. Gonçalo Brites por toda a paciência e ajuda prestada nos meses passados.

Aos meus amigos e família, em especial aos meus pais, pelo apoio.

Resumo

A procura de água potável está a aumentar constantemente com o crescimento da população mundial. A dessalinização por evaporação promovida por energia solar, que apenas consome energia renovável, é uma abordagem promissora para produzir água com impacto ambiental mínimo. A energia solar é o maior recurso disponível e o seu potencial é muito superior ao consumo energético anual. Neste trabalho é apresentado um estudo teórico de um sistema de dessalinização solar com um coletor solar plano.

O sistema consiste num recipiente de plástico cujo fundo e paredes são pintados de preto para aumentar a absorção de energia solar e cuja base é isolada para diminuir a perda de calor pelo chão. No fundo do recipiente encontra-se um permutador de calor de cobre (serpentina) pintado de preto e submerso em água salgada, ligado através de um tubo também de cobre a um coletor solar plano por onde corre o fluido térmico (água) em escoamento forçado por uma bomba.

Através de modelação matemática, com base em balanços energéticos e em dados para a temperatura ambiente, radiação solar e velocidade do vento, foram obtidos resultados relativos ao desempenho do sistema para um dia em maio e outro em agosto.

Os resultados deste estudo mostram que a produtividade ao fim do dia simulado foi, para as configurações com e sem o coletor solar, respetivamente, de 2,49 kg/ m² e 1,15 kg/ m² em agosto e 0,43 kg/ m² e 0,24 kg/ m² em maio.

Pode-se concluir que a produtividade do sistema depende fortemente da radiação solar, aumentando linearmente com esta, e que o aumento de diferença entre a temperatura do vidro e da água corresponde a uma melhor produção de água destilada. A adição do coletor solar plano corresponde a um aumento percentual de produtividade de 98%.

Palavras-chave: Dessalinização Solar, Coletor Solar, Permutador de Calor, Escoamento Forçado.

Abstract

The demand for fresh water is increasing steadily with the world's growing population. Solar desalination, which only uses renewable energy, is a promising approach to the production of water with minimal environmental impact. Solar energy is the Earth's biggest resource and its potential is much larger than the annual energy consumption. In this work, a theoretical study of a solar desalination system with a flat plate solar collector is presented.

The distiller consists of a plastic basin with glass wool insulation and painted black in order to increase the absorption of solar energy. At the bottom of the still basin, there is a copper serpentine heat exchanger also painted black and submerged in salt water, connected by a copper pipe to a flat plate solar collector, through which runs thermal fluid (water) in forced flow.

By mathematical modeling based on thermal balances and data for ambient temperature, solar irradiation and wind speed, predictions were obtained for the performance of the system during a day in May and another in August.

The results show that the productivity at the end of each of the simulated days, with and without the additional solar collector, respectively, is 2,49 kg/ m² and 1,15 kg/ m² in August and 0,43 kg/ m² and 0,24 kg/ m² in May.

It was concluded that the still output increases with the solar irradiation for a given ambient temperature and that the bigger the difference between the water temperature and the glass temperature, the higher the output of distilled water. The addition of the solar collector provides an average increase in productivity of 98 %.

Keywords Solar Desalination, Solar Collector, Heat Exchanger, Forced Flow.

Índice

| | |
|---|-----|
| Índice de Figuras | ix |
| Índice de Tabelas | xi |
| Simbologia e Siglas | xii |
| Simbologia..... | xii |
| Letras Gregas..... | xiv |
| Siglas | xv |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1. Principais técnicas de dessalinização..... | 2 |
| 1.1.1. Membranas | 2 |
| 1.1.2. Processos térmicos..... | 2 |
| 1.1.3. Sistemas híbridos..... | 3 |
| 1.2. Dessalinização solar – revisão bibliográfica..... | 4 |
| 2. MODELAÇÃO MATEMÁTICA..... | 11 |
| 2.1. Configuração do sistema..... | 11 |
| 2.2. Processo | 12 |
| 2.3. Pressupostos..... | 12 |
| 2.4. Balanços energéticos..... | 13 |
| 2.4.1. Coletor solar plano | 17 |
| 2.4.2. Eficiência do sistema | 19 |
| 2.5. Metodologia | 19 |
| 2.5.1. Dados Meteorológicos | 21 |
| 2.5.2. Metodologia de cálculo | 24 |
| 3. DISCUSSÃO E RESULTADOS | 25 |
| 3.1. Dia de Verão (5 de agosto) | 25 |
| 3.1.1. Coletor solar | 25 |
| 3.1.2. Massa de água salgada..... | 28 |
| 3.1.3. Área do recipiente..... | 28 |
| 3.1.4. Área do coletor solar..... | 29 |
| 3.2. Dia de Primavera (25 de maio) | 30 |
| 3.2.1. Coletor solar | 30 |
| 3.2.2. Massa de água salgada..... | 33 |
| 3.2.3. Área do recipiente..... | 33 |
| 3.2.4. Área do coletor solar..... | 34 |
| 3.3. Impacto da radiação solar, temperatura ambiente e velocidade do vento..... | 35 |
| 4. CONCLUSÕES | 38 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 39 |
| ANEXO A | 43 |
| ANEXO B | 44 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Estimativa das reservas energéticas do planeta em 2015 [7]. | 4 |
| Figura 2. Escassez de água projetada para 2025 [8]. | 5 |
| Figura 3. Fluxo solar normal [9]. | 5 |
| Figura 4. Processo de destilação solar [10]. | 6 |
| Figura 5. Configuração experimental do sistema [27]. | 8 |
| Figura 6. Configuração do sistema [32]. | 9 |
| Figura 7. Configuração do sistema [33]. | 10 |
| Figura 8. Configuração do sistema | 11 |
| Figura 9. Representação dos balanços energéticos. | 15 |
| Figura 10. Energia solar de ondas curtas média que chega ao solo (linha laranja), por metro quadrado, ao longo do ano [43]. | 22 |
| Figura 11. Temperatura máxima (linha vermelha) e mínima (linha azul) médias, ao longo do ano [43]. | 22 |
| Figura 12. Variação da radiação solar, temperatura ambiente e velocidade do vento ao longo do dia 5 de agosto. | 23 |
| Figura 13. Variação da radiação solar, temperatura ambiente e velocidade do vento ao longo do dia 25 de maio | 23 |
| Figura 14. Fluxograma do programa de cálculo. | 24 |
| Figura 15. Variação da temperatura e da radiação solar ao longo do dia 5 de agosto. | 26 |
| Figura 16. Comparação da produção de água em função da hora do dia com e sem o coletor solar plano. | 27 |
| Figura 17. Comparação da eficiência do sistema em função da hora do dia com e sem o coletor solar plano. | 27 |
| Figura 18. Relação entre produtividade e eficiência e a massa de água salgada. | 28 |
| Figura 19. Relação entre produtividade e eficiência e área do recipiente | 29 |
| Figura 20. Relação entre produtividade e eficiência e área do coletor | 30 |
| Figura 21. Variação da temperatura e da radiação solar ao longo do dia 25 de maio. | 31 |
| Figura 22. Comparação da produção de água em função da hora do dia com e sem o coletor solar plano. | 32 |
| Figura 23. Comparação da eficiência do sistema em função da hora do dia com e sem o coletor solar plano. | 32 |
| Figura 24. Relação entre produtividade e eficiência e a massa de água salgada. | 33 |
| Figura 25. Relação entre produtividade e eficiência e área do recipiente | 34 |

| | |
|---|----|
| Figura 26. Relação entre produtividade e eficiência e área do coletor. | 34 |
| Figura 27. Produtividade ao fim do dia em função da radiação solar média e da temperatura ambiente máxima. | 35 |
| Figura 28. Eficiência ao fim do dia em função da radiação solar média e da temperatura ambiente máxima. | 36 |
| Figura 29. Produtividade ao fim do dia em função temperatura ambiente máxima e da velocidade do vento. | 37 |
| Figura 30. Eficiência ao fim do dia em função da temperatura ambiente máxima e da velocidade do vento. | 37 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1. Parâmetros e propriedades dos materiais..... | 20 |
| Tabela 2. Parâmetros do coletor solar | 21 |
| Tabela 3. Parâmetros do Permutador de calor | 21 |
| Tabela 4. Resultados para a configuração com o coletor solar no dia 5 de agosto | 44 |
| Tabela 5. Resultados para a configuração sem o coletor solar no dia 5 de agosto..... | 44 |
| Tabela 6. Resultados para a configuração com o coletor solar no dia 25 de maio..... | 45 |
| Tabela 7. Resultados para a configuração sem o coletor solar no dia 25 de maio | 45 |

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

c_p - Calor específico da água [J/kg.K]

$c_{p,v}$ - Calor específico do vidro [J/kg.K]

D - Diâmetro [m]

dT/dt - Variação da temperatura em função do tempo [K/s]

E - Eficácia térmica

f - Coeficiente de atrito

$F_{(a-v)}$ - Fator de forma entre a água e o vidro

$F_{(v-a)}$ - Fator de forma entre o vidro e a água

g - Aceleração gravítica [m²/s]

h_{ca} - Coeficiente de convecção [W/m² K]

h_{cv} - Coeficiente de transferência de calor por convecção do vidro para a vizinhança
[W/m²K]

h_{ext} - Coeficiente de convecção externo [W/m² °C]

h_{int} - Coeficiente de convecção interno [W/m² °C]

h_{isol} - Condutância [W/m² K]

I - Fluxo de radiação solar incidente [W/ m²]

$I_{médio}$ - Fluxo de radiação solar incidente médio [W/ m²]

I_d - Radiação difusa horizontal [W/ m²]

I_{dif} - Radiação solar difusa [W/ m²]

I_{dir} - Radiação solar direta [W/ m²]

I_n - Radiação direta normal [W/ m²]

L - Comprimento [m]

L_a - Calor latente da evaporação de água [kJ/kg]

m - Caudal mássico da água [kg/s]

m_{total} - Massa total de fluido [kg]

NTU - Número de unidades de transferência

Nu_D - Número de Nusselt

P_0 - Pressão atmosférica [N/ m²]

P_a - Pressão de vapor à temperatura da água [N/ m²]

Pr - Número de Prandtl

P_v - Pressão de vapor à temperatura do vidro [N/ m²]

Q_{acum} - Taxa de acumulação interna de calor [W]

$Q_{c,a-v}$ - Taxa de transferência de calor por convecção entre a água e o vidro [W]

Q_{cv} - Perdas de calor por convecção do vidro [W]

$Q_{evap,a}$ - Taxa de transferência de calor por evaporação [W]

$Q_{perdas,a}$ - Perdas de calor da água [W]

$Q_{perdas,chão}$ - Perdas de calor entre a base do recipiente e o chão [W]

$Q_{perdas,v}$ - Soma das perdas de calor do vidro para a vizinhança [W]

$Q_{r,a-v}$ - Taxa de transferência de calor por radiação entre a água e o vidro [W]

Q_{rv} - Perdas de calor por radiação do vidro [W]

$Q_{v,int}$ - Fluxo de calor líquido que “sai” do vidro para o interior do depósito [W]

Ra_D - Número de Rayleigh

i_b - Fator de conversão

Re_D - Número de Reynolds

$RI_{Horizontal}$ - Radiação Infravermelha Horizontal [W/ m²]

T_o - Temperatura média ambiente [K]

T_a - Temperatura média da água [K]

$T_{céu}$ - Temperatura do céu [°C]

$T_{fluido,in}$ - Temperatura do fluido térmico à entrada do coletor solar [°C]

$T_{fluido,out}$ - Temperatura do fluido térmico à saída do coletor solar [°C]

T_{po} - Temperatura de orvalho [°C]

T_s - Temperatura do tubo [°C]

T_v - Temperatura média do vidro [K]

U - Coeficiente global de transferência de calor [W/m² °C]

W_{dia} - Produção de água destilada ao fim do dia [kg/dia. m²]

W_h - Produção de água destilada [kg/h. m²]

Letras Gregas

α_a - Absortividade térmica da água

α_v - Absortividade do vidro

β - Inclinação da superfície [rad]

β_v - Coeficiente de expansão volumétrica [1/K]

Δt - Intervalo de tempo [s]

Δx_{isol} - Espessura do isolamento [m]

Δx - Espessura do vidro [m]

δ - Inclinação do Sol [rad]

ε_a - Emissividade da água

$\varepsilon_{céu}$ - Emissividade do céu

ε_v - Emissividade do vidro

η - Eficiência

η térmica - Eficiência térmica

θ_z - Ângulo de incidência [rad]

θ_0 - Ângulo de incidência da radiação solar incidente numa superfície inclinada orientada para sul [rad]

k - Condutividade térmica [W/m K]

k_{isol} - Coeficiente de condutividade térmico [W/m K]

ν - Viscosidade cinemática [m^2/s]

$v_{a,e}$ - Velocidade do (escoamento de) ar exterior [m/s]

ρ_a - Densidade da água [kg/ m³]

ρ - Densidade do vidro [kg/ m³]

σ - Constante Stefan-Boltzmann [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$]

τ_v - Transmissividade do vidro

ϕ - Latitude geográfica [rad]

ω - Ângulo horário [rad]

Siglas

IWEC – International Weather for Energy Calculations

VBA – Visual Basic for Applications

MIT- Massachusetts Institute of Technology

1. INTRODUÇÃO

A água é um elemento essencial à sobrevivência do ser humano. Sem água potável a vida humana é inimaginável. No entanto, cerca de 99% de toda a água presente no planeta Terra encontra-se em mares e oceanos, contendo níveis de salinidade elevados, o que a torna impotável. O restante 1% inclui os recursos de água doce provenientes de rios, lagoas, lagos, glaciares e águas subterrâneas, que ou não estão disponíveis para uma significativa parte da população mundial ou nalguns casos são inutilizáveis devido ao avanço da industrialização e consequente poluição.

Portugal está em risco elevado de escassez de água e ocupa a 41.^a posição de uma lista que coloca 17 países, maioritariamente no Médio Oriente e Norte de África, em risco extremamente elevado de escassez de água [1]. Este problema, que se pode considerar global, tem motivado o desenvolvimento de várias tecnologias de dessalinização, através de membranas ou processos térmicos, com o objetivo de produzir água consumível a partir da água salgada.

A dessalinização é o processo de retirar componentes minerais da água salgada, existindo uma grande diversidade de tecnologias utilizadas e/ou investigadas. Independentemente do tipo de técnica, o principal subproduto da dessalinização é a salmoura (solução de água saturada de sal). A investigação publicada indica que, por cada 95 milhões de metros cúbicos de água potável obtida por dia, são produzidos 141,5 milhões de metros cúbicos de salmoura, ou seja, em termos globais, produz-se cerca de 1,5 vezes mais resíduos do que água consumível [2].

O destino destes resíduos é normalmente o oceano. Isto causa um problema ambiental, porque a densidade desta água (a salmoura) é superior à da água do mar, o que a faz descer para o fundo dos oceanos, perturbando o ecossistema com níveis de oxigénio muito baixos e conteúdos de sal muito elevados. A salmoura resultante da dessalinização pode também conter elementos químicos e metais pesados que irão poluir o meio ambiente.

Apresentam-se a seguir as técnicas de dessalinização mais conhecidas.

1.1. Principais técnicas de dessalinização

1.1.1. Membranas

Existem essencialmente três princípios de dessalinização com recurso a membranas [3]:

- Osmose inversa (RO) – um soluto (sal) é separado de um solvente de baixa massa molecular (água) por uma membrana que é permeável ao solvente e impermeável ao soluto. Isto ocorre quando se aplica uma grande pressão sobre o meio aquoso, o que contraria o fluxo natural da osmose. A osmose inversa produz 50% de água consumível sendo o resto resíduos, o que torna este processo mais eficiente que os processos térmicos, pois estes apenas produzem 25% de água potável.
- Eletro-diálise – utiliza um potencial elétrico para mover sais através de pares de membranas carregadas eletricamente, retendo os sais em canais. Não retira substâncias não iônicas da água. No Japão, este processo é utilizado na produção de sal proveniente da água do mar.
- Destilação – uma membrana hidrofóbica constitui uma barreira para a fase líquida, permitindo a passagem da fase gasosa. Utiliza a diferença de temperatura para criar uma diferença de pressão parcial no vapor, transportando os componentes voláteis através dos poros da membrana (com 10 nm de espessura) para o compartimento com pressão mais reduzida, onde são condensados [4].

1.1.2. Processos térmicos

- Destilação solar – simula o ciclo natural da água, em que o sol aquece a água dos oceanos suficientemente para ocorrer evaporação, depois da qual se dá a condensação do vapor de água.
- Destilação a vácuo – a pressão do processo é reduzida, de maneira a diminuir a temperatura necessária para a vaporização da água, para depois ser condensada.
- Destilação *multi-stage flash* (MSF) – transforma uma porção de água em vapor em várias etapas através de permutadores de calor em contracorrente. Atualmente, é o método mais usado, a seguir à osmose inversa, constituindo 18% do número de centrais existentes no mundo, o que corresponde aproximadamente a 11,6 milhões de m³/dia de água [5].

- Destilação *multiple-effect* (MED) – consiste em várias etapas ou “efeitos”. Em cada etapa, a água é aquecida por vapor que circula em tubos, pulverizando água do mar sobre os tubos. Uma parte da água vaporiza e o vapor produzido entra nos tubos da etapa seguinte, por sua vez aquecendo e vaporizando mais água. Cada etapa reutiliza energia da etapa anterior, com temperaturas e pressões sucessivamente mais reduzidas.
- Destilação por compressão de vapor – Como a compressão do vapor aumenta a pressão e a temperatura do vapor, é possível usar o calor latente rejeitado durante a condensação para gerar vapor adicional. Neste método é utilizado um compressor mecânico ou um jato para comprimir o vapor presente acima do líquido. Este vapor comprimido é então usado para proporcionar o calor necessário para a vaporização do resto da água salgada. Embora tendo uma eficiência elevada e um baixo consumo de energia, requer pré-tratamento parcial da água e manutenção da iminente corrosão do compressor.

1.1.3. Sistemas híbridos

Os sistemas híbridos baseiam-se em processos térmicos e membranas. Esta combinação pode ser usada para reduzir a necessidade de energia e os custos de operação para produção de água e geração de eletricidade. No processo híbrido de MSF ou MED e osmose inversa, existem várias vantagens, inclusive a extensão da vida da membrana adicionando água purificada proveniente do processo térmico. O custo de operação pode ser reduzido fornecendo parte da água resultante da dessalinização térmica à unidade de osmose inversa. Isto permite o aumento de temperatura da sua água de entrada e o consequente aumento do desempenho da instalação. O vapor a pressão reduzida do processo térmico pode ser usado para desgaseificar a água de entrada da RO para minimizar a corrosão e reduzir a quantidade de cloro residual. O resíduo resultante da instalação de osmose inversa pode também ser combinado com o da unidade térmica com o objetivo de o diluir [6].

1.2. Dessalinização solar – revisão bibliográfica

A dessalinização por evaporação acionada por energia solar, que apenas consome energia renovável, é uma abordagem promissora para produzir água potável com impacto ambiental mínimo.

Na Figura 1 pode-se verificar que a energia solar é o maior recurso disponível e o seu potencial é muito superior ao consumo energético anual. Mesmo tendo em conta condições climáticas, uma baixa eficiência e apenas 4% da área da Terra, a energia solar é a solução esmagadora para o futuro do planeta [7].

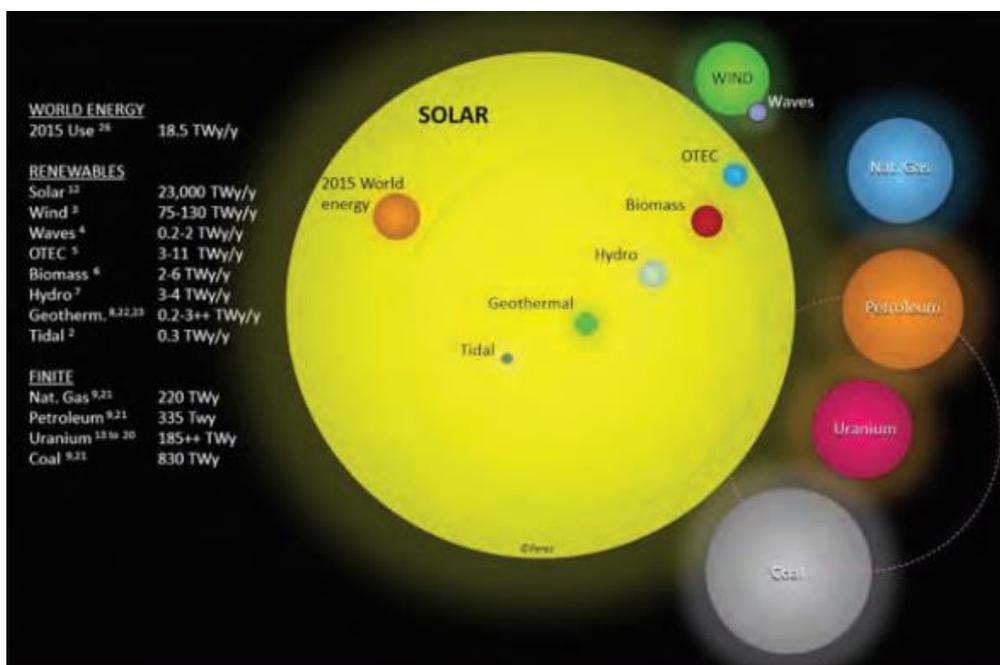


Figura 1. Estimativa das reservas energéticas do planeta em 2015 [7].

Como se pode constatar comparando as Figuras 2 e 3, nas regiões onde se prevê maior escassez de água em 2025, como por exemplo o Norte de África e o Médio Oriente (zonas costeiras com fácil acesso a mares e oceanos), também se observa uma incidência de fluxo solar considerável, onde a dessalinização pode ter um papel relevante.

Projected Global Water Scarcity, 2025

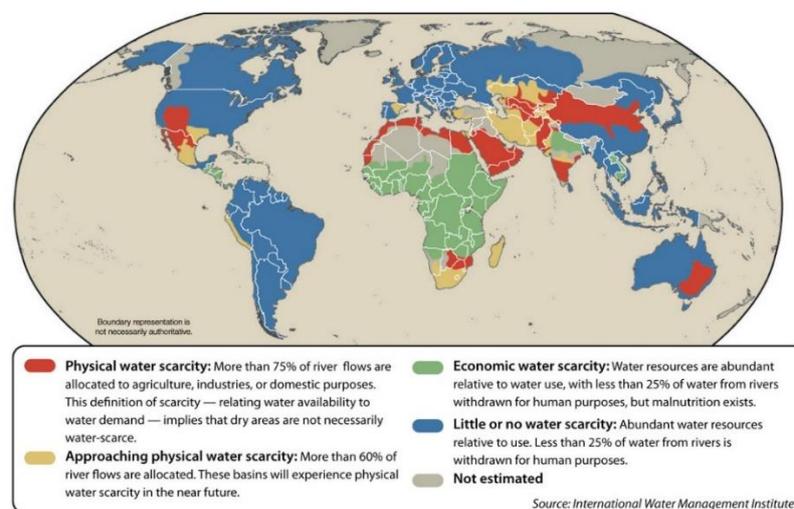


Figura 2. Escassez de água projetada para 2025 [8].

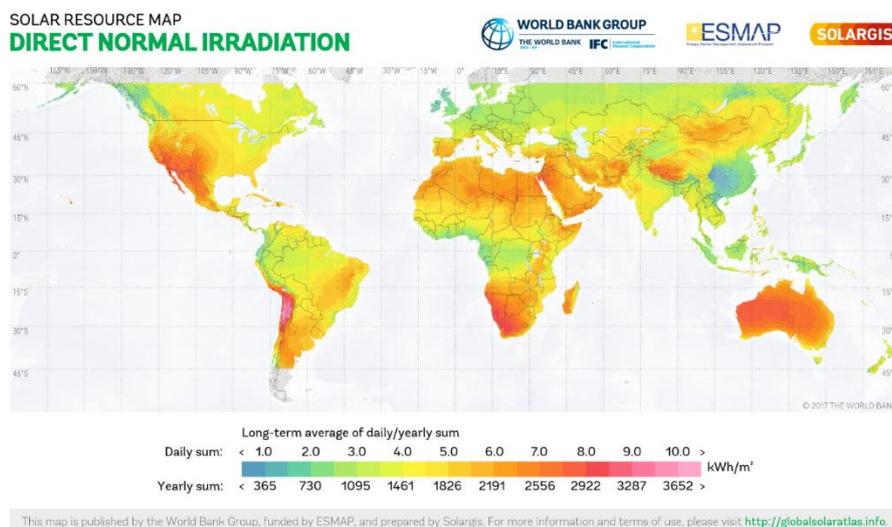


Figura 3. Fluxo solar normal [9].

A ideia básica do funcionamento de um destilador consiste em aquecer a água salgada (ou salobra) através de energia solar, dentro de um recipiente hermeticamente fechado, causando a sua evaporação. O vapor de água condensa na parte superior do recipiente, normalmente num vidro inclinado, de maneira a permitir que a água destilada seja coletada numa unidade separada. A água evapora e as impurezas ficam no fundo do

recipiente. Na Figura 4 ilustra-se esquematicamente o processo de dessalinização por destilação solar.

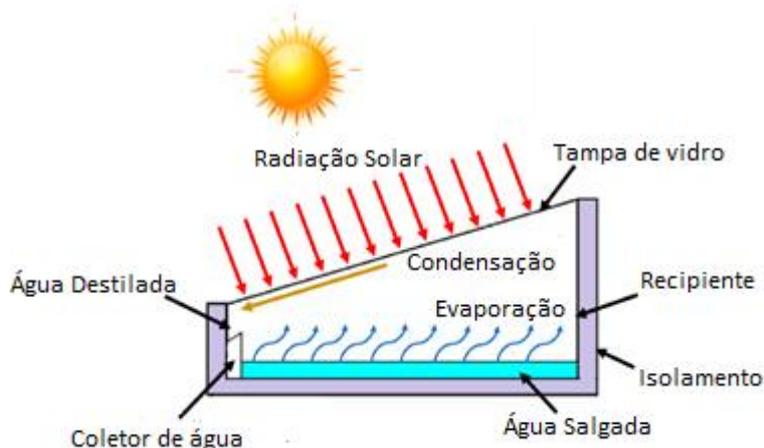


Figura 4. Processo de destilação solar [10].

Comparativamente aos processos tradicionais, a destilação solar é normalmente implementada em pequena escala, requerendo assim menor investimento de capital e mais baixos custos de operação. No entanto, a eficiência térmica e o caudal de água potável produzido são ainda muito reduzidos, causando dificuldades na adoção desta técnica.

De maneira a aumentar a eficiência do sistema, várias estratégias têm sido propostas. Uma abordagem utilizada é adicionar materiais à água salobra do reservatório. O efeito na absorção de luz solar por nanofluidos – soluções de água com uma concentração otimizada (0,25%) de nanopartículas metálicas – foi estudado, resultando em aumentos significativos da eficiência de absorção de energia térmica para diferentes materiais das nanopartículas, comparativamente à do fluido de base (37,78%): 50,34% (Al_2O_3); 46,10% (TiO_2) e 43,81% (CuO) [11].

Foi também estudada a adição de materiais de mudança de fase (PCM) no fundo do reservatório (rendimento de 4,30 kg/dia.m² de água destilada, do qual cerca de 40% foi produzido após o pôr do Sol) [12], ou no interior de um concentrador tubular térmico (5,78 kg/dia.m²) [13], usados para armazenar como calor latente parte da energia solar térmica coletada pelo sistema durante o dia, e fornecer calor durante a noite continuando assim o processo 24 horas por dia.

Um outro estudo foi dedicado à utilização de uma estrutura com duas camadas (espuma de carbono sobreposta por grafite exfoliada) para concentrar a energia térmica e o fluxo do fluido onde são necessários para alimentar a mudança de fase, diminuindo a energia dissipada, tendo alcançado assim uma eficiência térmica de 85% [14]. Outra técnica estudada foi a utilização de madeira natural com um tratamento superficial com uma chama para absorção solar e posterior concentração na superfície de evaporação; com esta abordagem redimensionável, robusta e de custo reduzido, foi reportada uma eficiência térmica de 72% [15].

Com inspiração no fenómeno natural de transpiração das plantas, foi criada uma bomba consistindo num disco de NiO poroso e hidrofílico modificado e num canal de abastecimento de água, que pode ser usada para geração de vapor, através de energia solar, de maneira a aumentar a eficiência [16]. Outros investigadores criaram e estudaram um dispositivo tridimensional (3D) de transpiração artificial com componentes de perda de calor e de dependência de absorção de luz, que permite mais de 85% de eficiência térmica [17].

Foi também investigada a utilização de uma película de óxido de grafeno flexível para absorver a energia solar, suportada por um isolante térmico, com abastecimento permanente de água e com baixa dissipação de calor, que permitiu alcançar uma eficiência de 80% [18]. Experiências realizadas com o objetivo de obter energia adicional do ambiente vizinho e reabsorver radiação térmica e reflexão difusa através de estruturas 3D foto-térmicas em forma de copo resultaram numa eficiência extremamente elevada, de aproximadamente 100%, na geração de vapor [19].

Foi proposto também um design de recetor solar flutuante capaz de gerar vapor a temperaturas até aos 100 °C através de concentração térmica reduzindo as perdas térmicas convectivas, condutivas e radiativas [20].

Num outro trabalho [21], foi obtida uma eficiência térmica elevada através da concentração de energia solar na superfície da água, minimizando perdas de calor. Porém, foram identificados desafios adicionais, devidos ao entupimento da estrutura. Foi então criada, com sucesso, uma estrutura resistente, barata e flexível com um esqueleto poroso de polímero e incorporado com fibras de carbono e grafite para realizar a dessalinização de maneira a impedir a acumulação de sal. Num ensaio de longa duração, não foram registadas alterações no desempenho.

A utilização de processos de recuperação de calor *multi-effect* através do uso de um tubo de vidro como um coletor de calor, em que não é usada nenhuma bomba e os fluxos de água e de vapor são apenas guiados pela diferença de pressão, resultou num caudal de água de 4,23 kg/dia.m² [22].

Num outro trabalho [23], foram utilizados coletores solares em forma de tubo e um condensador melhorado para aumentar a taxa de produção de água destilada. Aproveitando um design especial, pode ser colocada água no reservatório e/ou no condensador. Quando ambos contêm água, foi obtido um caudal máximo de 16,98 kg/dia.m².

Com um destilador com 10 etapas, cada uma com 2 camadas hidrofílicas (uma funciona como condensador e a outra como evaporador) separadas por uma camada hidrofóbica, foi conseguida uma produtividade de 2,95 kg/h.m² (17,7 kg/dia.m²) de água destilada [24].

Em [25] foi proposto e estudado um sistema de duas etapas de destilação solar compacto com aquecimento localizado, arrefecimento eficaz e reciclagem de calor latente, recorrendo a membranas, tendo alcançado um caudal de 3,67 kg/m² num dia nublado.

A utilização de uma camada de bolas de vidro para armazenamento de calor no fundo do recipiente e de um veio rotativo na superfície da água com o objetivo de interromper a fronteira entre a água e o vapor, de maneira a aumentar a evaporação e condensação, mostrou um aumento de eficiência de até 7,5 % [26].

O uso de um concentrador de energia solar parabólico (1) com um permutador de calor (serpentina) cujo fluido térmico é um óleo (5) e uma bomba (6) representado na Figura 5, resultou num aumento de produção de água destilada de 18% [27].

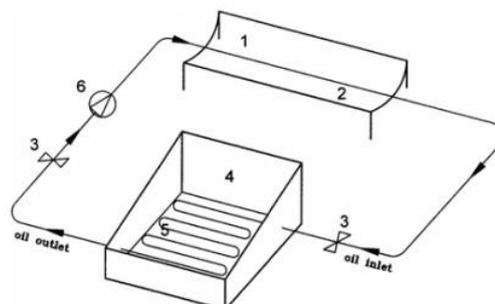


Figura 5. Configuração experimental do sistema [27].

Em [28], Lin e Yingling demonstraram também a influência de uma membrana porosa tridimensional, constituída por nanopartículas de alumínio, que flutua naturalmente na superfície da água, e que absorve um vasto espectro de luz solar ($> 96\%$) e foca a energia absorvida de maneira a obter dessalinização eficiente ($\sim 90\%$).

No trabalho [29] foi estudado o uso de membranas nanofotónicas em que o aquecimento foto térmico localizado é o motor do processo, eliminando assim a necessidade de aquecer a água antes de entrar no recipiente. Estas técnicas, combinadas com recuperação de calor dinâmica resultaram em ganhos elevados e numa produção superior a 20 kg/dia.m^2 de água destilada [30].

Uma eficiência de 385% na conversão de energia solar para vapor, que corresponde a uma produção de cerca de $4,34 \text{ kg/h.m}^2$ ($26,01 \text{ kg/dia.m}^2$) de água destilada, foi conseguida através duma arquitetura termicamente localizada que impede a acumulação de sal e da otimização de transferência de calor e massa numa configuração com várias etapas reciclando a entalpia da vaporização, ou seja, transferindo a energia térmica libertada na condensação para guiar a evaporação na etapa seguinte. [31].

A combinação de um design de concentrador térmico e uma estrutura de recuperação de calor latente com 6 etapas, permitiu obter um caudal de $3,9 \text{ kg/dia.m}^2$ [32].

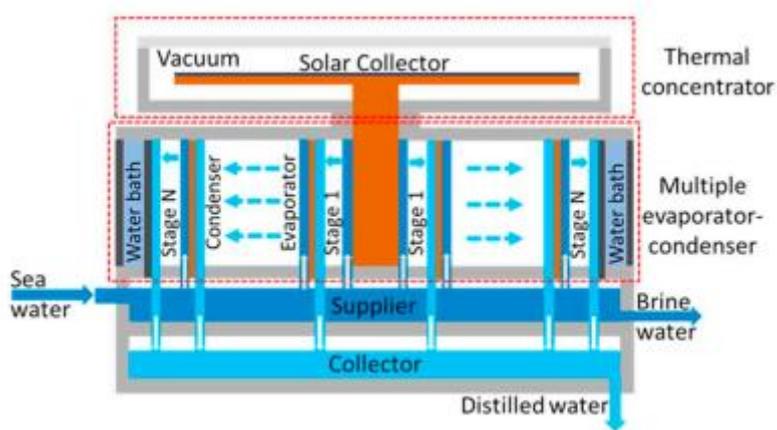


Figura 6. Configuração do sistema [32]

Um outro estudo apresenta uma destilação solar tubular em várias etapas e em vácuo. É usado um design em cascata com 3 câmaras, cada uma com um canal de água e

uma casca tubular com uma produtividade máxima de 7,056 kg de água destilada por dia [33].

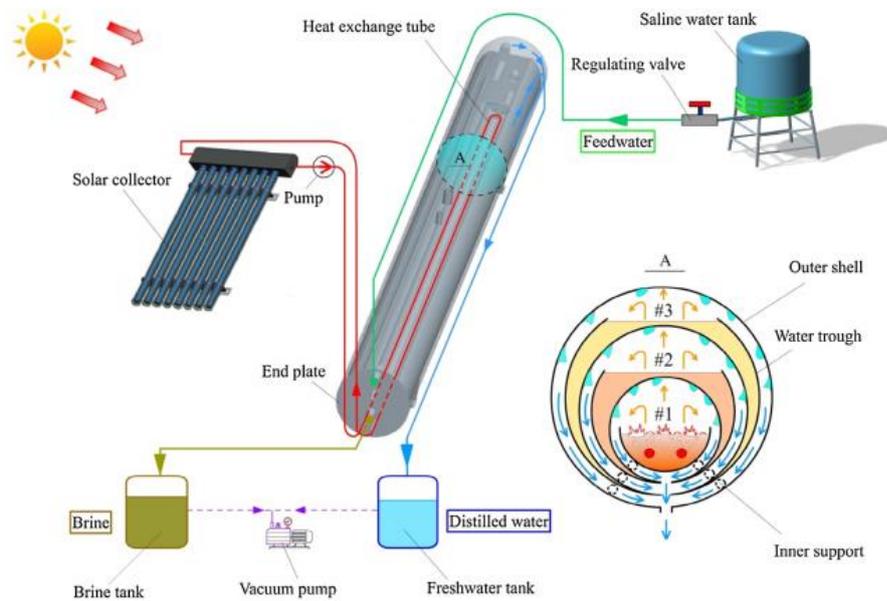


Figura 7. Configuração do sistema [33].

Uma abordagem interessante na resolução dos problemas de eficiência encontrados na dessalinização térmica solar foi identificar 3 passos fundamentais: conversão de luz solar para calor, geração de vapor e conversão de vapor para água através da condensação. Ao usar a produção de água destilada como quantificador de eficiência energética, foi mostrado que a recuperação do calor latente de condensação é crítica, porque a geração de vapor através de energia solar já foi otimizada até ao limite [34].

2. MODELAÇÃO MATEMÁTICA

A modelação matemática consiste em descrever matematicamente um processo ou fenómeno através de equações. O modelo matemático desenvolvido neste trabalho permite obter uma estimativa para os valores das temperaturas da água e do vidro, e a produção de água destilada, de um sistema de dessalinização solar com um coletor plano, ao longo de um dia.

2.1. Configuração do sistema

A configuração do sistema usado neste trabalho, representado na Figura 8, consiste num recipiente de metal cujo fundo e paredes são pintados de preto (comportamento de corpo negro) para aumentar a absorção de energia solar; a base quadrada com 1 m^2 e as paredes são isoladas com 5 cm de lã de vidro para diminuir as perdas de calor; e a tampa de vidro, com 4 mm de espessura, tem uma inclinação de 35° , de maneira a que a máxima radiação solar atinja a água. No fundo do recipiente encontra-se um permutador de calor com tubo de cobre (disposto em serpentina) com 20 m de comprimento, pintado de preto e submerso em 2 cm de água salgada, ligado através de um tubo, também de cobre, a um coletor solar plano, por onde circula o fluido térmico (água) em escoamento forçado por uma bomba.

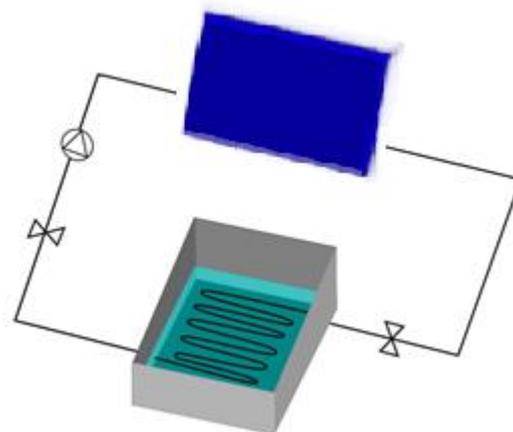


Figura 8. Configuração do sistema

2.2. Processo

A radiação solar transmite-se pela chapa de vidro do sistema de dessalinização solar, sendo absorvida pelo fundo preto, serpentina e pela água, aquecendo cada componente. A água é também aquecida através da potência transmitida pelo permutador de calor (serpentina). Dá-se a sua evaporação na interface entre a superfície da água e o ar dentro do recipiente. O vapor de água do ar húmido saturado resultante deste fenómeno é transportado por difusão, devido à diferença de pressão parcial e à convecção natural, condensando na superfície interior do vidro, devido ao facto de este estar a uma temperatura inferior (T_v). O calor da condensação aquece o vidro, assim como a potência de convecção e radiação da água e parte da radiação solar incidente no vidro. A água resultante da condensação é coletada na parte mais baixa do vidro através de um funil e transportada por um tubo para ser armazenada.

De maneira a manter o nível de água salgada, assume-se o uso de um controlo de caudal automático com flutuador que permite a entrada de água à temperatura ambiente.

O coletor solar plano transforma a radiação solar em energia térmica. Esta energia é absorvida pelo fluido térmico (água) para depois ser transmitida à água salgada através do permutador de calor (serpentina).

2.3. Pressupostos

Com o objetivo de simplificar o estudo deste sistema de dessalinização, foram tidos em conta os seguintes pressupostos:

- As temperaturas das faces interior e exterior do vidro são iguais.
- As temperaturas são constantes em cada intervalo de tempo.
- As propriedades termodinâmicas dos materiais são constantes.
- A condensação da água no interior do vidro é uniforme.
- Desprezam-se as perdas de calor pelas paredes do recipiente.
- A concentração de sal no fundo do recipiente não interfere nas transferências de calor e massa.

2.4. Balanços energéticos

Todas as trocas de energia que ocorrem no sistema de dessalinização estão representadas na Figura 9. O balanço de energia do vidro é dado pela seguinte equação:

$$Q_v = \alpha_v I A_v - Q_{perdas,v} = Q_{abs,v} + Q_{v,int} \quad [W] \quad (1)$$

em que:

$$Q_{perdas,v} = Q_{cv} + Q_{rv} \quad (2)$$

O cálculo da radiação é feito através das seguintes equações [35]; a radiação incidente total é dada por:

$$I = I_{dif} + I_{dir} \quad (3)$$

e, tendo em conta o modelo isotrópico, em que a radiação difusa provém com igual intensidade de todas as direções da cúpula celeste, esta é dada por:

$$I_{dif} = I_d \dot{i}_b \quad (4)$$

Em que I_d é a radiação difusa horizontal.

A radiação direta é dada por:

$$I_{dir} = I_n \cos \theta_0 \quad (5)$$

Em que I_n é a radiação direta normal e:

$$\dot{i}_b \approx \frac{\cos \theta_0}{\cos \theta_z} \quad (6)$$

$$\cos \theta_z = \sin \delta \times \sin \phi + \cos \delta \times \cos \phi \times \cos \omega \quad (7)$$

$$\cos \theta_0 = \sin \delta \times \sin(\phi - \beta) + \cos \delta \times \cos(\phi - \beta) \times \cos \omega \quad (8)$$

As perdas de calor por convecção do vidro para o ambiente são dadas por:

$$Q_{cv} = [h_{cv} (T_v - T_0)] A_v \quad (9)$$

em que h_{cv} pode ser calculado através de $h_{cv} = 5,7 + 3,8v_{a,e}$ [35].

Por seu turno, as perdas de calor por radiação do vidro para o céu são dadas por:

$$Q_{rv} = \varepsilon_v \sigma [T_v^4 - (T_{céu} + 273)^4] A_v \quad (10)$$

em que T_v está em K e $T_{céu}$ está em °C e σ tem o valor de $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$.

A temperatura de céu (em °C) é calculada através da seguinte equação [36]:

$$T_{céu} = \left(\frac{RI_Horizontal}{\sigma} \right)^{0,25} - 273 \quad (11)$$

em que a radiação infravermelha horizontal é dada por:

$$RI_Horizontal = \varepsilon_{céu} \sigma T_0^4 \quad (12)$$

A emissividade do céu, num dia de céu limpo (N=0) em função da temperatura de orvalho T_{po} é dada por:

$$\varepsilon_{céu} = 0,787 + 0,764 \times \ln \left(\frac{T_{po} + 273}{273} \right) \quad (13)$$

A acumulação interna de calor do vidro é dada pela seguinte equação:

$$Q_{abs,v} = \rho \cdot \Delta x \cdot c_{p,v} (dT / dt) A_v \quad (14)$$

O fluxo de calor transmitido do vidro para o interior do depósito, $Q_{v,int}$, tem em conta todas as trocas de calor do vidro: a radiação transmitida para o interior, os ganhos da radiação que é perdida pela água, os ganhos convectivos do calor de condensação e a taxa de transferência de calor por evaporação:

$$Q_{v,int} = (\tau\alpha)_v I A_v - Q_{r,a-v} - Q_{c,a-v} - Q_{evap,a} \quad (15)$$

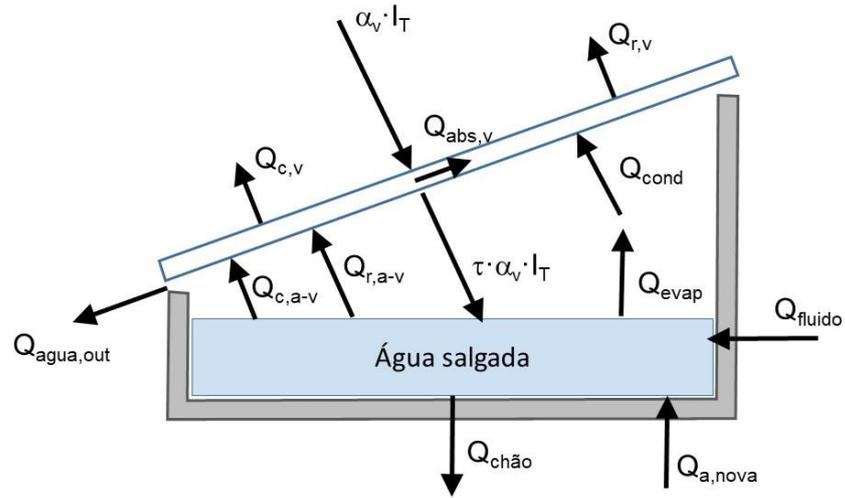


Figura 9. Representação dos balanços energéticos

O balanço energético da água salgada é dado pela seguinte equação:

$$\left[mc_p (dT / dt) \right]_a = \tau_v \alpha_a F_{(v-a)} I A_a + Q_{fluido} - Q_{perdas,a} \quad [\text{W}] \quad (16)$$

As perdas de calor da água são dadas por:

$$Q_{perdas,a} = Q_{evap,a} + Q_{r,a-v} + Q_{c,a-v} + Q_{perdas,chão} + Q_{a,nova} \quad (17)$$

A taxa de transferência de calor por evaporação na superfície da água é dada por [37]:

$$Q_{evap,a} = 2,34 \times 10^{-5} \times h_{ca} A L_a (P_a - P_v) \quad (18)$$

em que as pressões de vapor à temperatura da água e do vidro são dadas por [38]:

$$P_a = 610,94 \times e^{\frac{17,625(T_a - 273)}{(T_a - 273) + 243,04}} \quad (19)$$

$$P_v = 610,94 \times e^{\frac{17,625(T_v - 273)}{(T_v - 273) + 243,04}} \quad (20)$$

A transferência de calor por radiação entre a água e a superfície interior do vidro é dada por:

$$Q_{r,a-v} = \sigma F_{(a-v)} [\varepsilon_a T_a^4 - \varepsilon_v T_v^4] A_a \quad (21)$$

A transferência de calor por convecção entre a água e a superfície interior do vidro é dada por:

$$Q_{c,a-v} = h_{ca} (T_a - T_v) A_a \quad (22)$$

em que h_{ca} é calculado por [39]

$$h_{ca} = 8,84 \times 10^{-4} \times (T_a - T_v) \times \left\{ (T_a - T_v) + \left[\frac{P_a - P_v}{2,65 \times (P_0 - P_a)} \right] \times T_a \right\}^{1/3} \quad (23)$$

As perdas de calor entre a base do recipiente e o chão são dadas por:

$$Q_{perdas,ch\tilde{a}o} = h_{isol} (T_a - T_0) A_a \quad (24)$$

onde $h_{isol} = k_{isol} / \Delta x_{isol}$.

As perdas de calor resultantes da entrada de água nova à temperatura ambiente são dadas por:

$$Q_{a,nova} = \frac{W_h A}{3600} C_p (T_a - T_0) \quad (25)$$

A produtividade, em kg/h. m², é calculada através da seguinte equação:

$$W_h = \frac{Q_{evap,a} \times 1000 \times 3600}{A L_a} \quad (26)$$

2.4.1. Coletor solar plano

Segundo o método ε -NTU [40], a potência térmica transferida num permutador de calor (pc) é dada por $Q_{pc} = \varepsilon Q_{\max} = \varepsilon (C_{\min} \Delta T_{\max})$, onde ε é a efetividade, Q_{\max} é a máxima potência térmica possível, C_{\min} é a menor das taxas de transporte de capacidade calorífica, entre fluido quente (q) e fluido frio (f), e ΔT_{\max} é a máxima diferença de temperatura que ocorre no permutador – geralmente, a diferença entre as temperaturas de entrada dos fluidos quente e frio. Admitindo, para simplificar, que em cada intervalo de tempo da simulação a temperatura da água salgada (fluido frio) se mantém praticamente constante, então isto equivale a $C_f \gg C_q$, ou seja, pode ser tratado como um dos “casos especiais de funcionamento” dos permutadores de calor, em que $C_{\max} \rightarrow \infty$, $C_{\min} = C_q = C_{fluido}$ e a chamada razão de capacidades $C_r = C_{\min}/C_{\max}$ tende para zero, sendo. Deste modo, a transferência de calor do fluido térmico para a água salgada, através do permutador de calor (serpentina), é dada por:

$$Q_{fluido} = \varepsilon \cdot [\dot{m} c_p (T_{fluido,in(pc)} - T_a)] \quad (27)$$

em que a temperatura do fluido à entrada do permutador de calor, $T_{fluido,in(pc)}$ é considerada igual à sua temperatura de saída do coletor, $T_{fluido,out}$.

Assim:

$$\varepsilon = 1 - \exp(-NTU) \quad (28)$$

$$NTU = \frac{UA_s}{C_{\min}} = \frac{UA_s}{(\dot{m}c_p)_{\min}} \quad (29)$$

$$U = \left(\frac{1}{h_{ext}} + \frac{1}{h_{int}} \right)^{-1} \quad (30)$$

O calor transferido pelo coletor plano para o fluido térmico, para $I > 0$, é dado por [41]:

$$Q_{coletor} = AI\left(\eta_0 - \frac{a_1(T_{fluido} - T_0)}{I} - \frac{a_2(T_{fluido} - T_0)^2}{I}\right) \quad (31)$$

O cálculo da temperatura do fluido à entrada do coletor solar é dado por:

$$T_{fluido,in} = T_{fluido,out} - \frac{Q_{fluido}}{\dot{m}C_p} \quad (32)$$

O cálculo da temperatura do fluido à saída do coletor solar é dado por:

$$T_{fluido,out} = T_{fluido,in} + \frac{Q_{coletor}}{\dot{m}C_p} \quad (33)$$

$$T_{fluido} = \frac{T_{fluido,in} + T_{fluido,out}}{2} \quad (34)$$

Quando $T_{fluido} < T_a$, a bomba estará desligada, de maneira a que não haja perdas de calor.

O cálculo do coeficiente de convecção forçada no interior do tubo do permutador de calor [39] é desenvolvido do seguinte modo:

- Para o regime laminar ($Re < 2300$):

$$Nu_D = 3,66 + \frac{0,065 \times \frac{D}{L} Re_D Pr}{1 + 0,04 \times \left[\frac{D}{L} Re_D Pr \right]^{2/3}} \quad (35)$$

- Para o regime turbulento ($Re > 2300$):

$$Nu_D = \frac{(f/8)(Re_D - 1000)Pr}{1 + 12,7 \times (f/8)^{1/2} (Pr^{2/3} - 1)} \quad (36)$$

$$h_{int} = \frac{Nu_D k}{D} \quad (37)$$

Como simplificação, admitiu-se que T_s é equivalente à média entre T_a e T_{fluido} .

O cálculo do coeficiente de convecção natural no exterior do tubo do permutador de calor é dado por [42]:

$$Ra_D = \frac{g\beta_v(T_s - T_a)D^3}{\nu^2} Pr \quad (38)$$

$$Nu_D = \left[0,6 + \frac{0,387 \times Ra_D^{1/6}}{\left(1 + \left(\frac{0,559}{Pr}\right)^{9/16}\right)^{8/27}} \right]^2 \quad (39)$$

$$h_{ext} = \frac{Nu_D k}{D} \quad (40)$$

2.4.2. Eficiência do sistema

A eficiência do sistema é calcula pela razão entre a energia de evaporação e a radiação solar. A eficiência instantânea é dada por:

$$\eta = \frac{W_h \times L_a \times 1000}{3600 \times I} \quad (41)$$

A eficiência ao fim do dia é dada por:

$$\eta = \frac{W_{dia} \times L_a \times 1000}{24 \times 3600 \times I_{m\u00e9dio}} \quad (42)$$

2.5. Metodologia

Dos balanços anteriores resultou o seguinte sistema de equações (ver Anexo A):

$$\begin{cases} AT_v^4 + BT_v + CT_a^4 + DT_a + Ke^{\frac{17,625(T_a-273)}{(T_a-273)+243,04}} - Ke^{\frac{17,625(T_v-273)}{(T_v-273)+243,04}} + E = 0 \\ FT_v^4 + GT_v + HT_a^4 + IT_a + Ke^{\frac{17,625(T_a-273)}{(T_a-273)+243,04}} - Ke^{\frac{17,625(T_v-273)}{(T_v-273)+243,04}} + J = 0 \end{cases} \quad (43)$$

As propriedades dos materiais e os parâmetros do coletor solar e do permutador de calor utilizados para o cálculo das temperaturas do vidro e da água em cada intervalo de tempo (5 minutos) encontram-se nas Tabelas 1, 2 e 3.

As propriedades usadas para o cálculo do coeficiente de convecção do permutador de calor provieram da “Seawater Thermophysical Properties Library, MIT”.

Foi então utilizado o método Newton-Raphson para obter a solução do sistema de equações (43).

Tabela 1. Parâmetros e propriedades dos materiais

| | |
|--|-----------|
| m (água) [kg] | 20 |
| cp (água) [J/kg.K] | 4200 |
| τ (água) | 0,6 |
| α (água) | 0,92 |
| ρ (água) [kg/ m ³] | 1000 |
| L (água) [kJ/kg] | 2350 |
| \mathcal{E} (água) | 0,96 |
| A (água) [m ²] | 1 |
| Salinidade [g/kg] | 30 |
| $F(a-v)$ | 0,9 |
| $F(v-a)$ | 0,7372368 |
| ρ (vidro) [kg/ m ³] | 2500 |
| Δx [m] | 0,004 |
| cp,v [J/kg.K] | 672 |
| A (vidro) [m ²] | 1,2207746 |
| τ (vidro) | 0,81 |
| α (vidro) | 0,08 |
| \mathcal{E} (vidro) | 0,89 |
| σ [W/ m ² K ⁴] | 5,67E-08 |
| k (isolamento) [W/m°C] | 0,065 |
| X (isolamento) [m] | 0,05 |
| β (rad) | 0,6109 |
| δ agosto (rad) | 0,2962 |
| δ maio (rad) | 0,3545 |
| ϕ (rad) | 0,7017 |

Tabela 2. Parâmetros do coletor solar

| Coletor solar | |
|-----------------------|-------|
| A [m ²] | 2,85 |
| $a1$ | 7,5 |
| $a2$ | 0,014 |
| $\eta0$ | 0,69 |

Tabela 3. Parâmetros do Permutador de calor

| Serpentina | |
|-----------------|-------------|
| Número de tubos | 6 |
| m [kg/s] | 0,015016667 |
| D [m] | 0,012 |

2.5.1. Dados Meteorológicos

A Figueira da Foz (40°9'3'' Norte, 8°51'4'' Oeste) é uma cidade portuguesa do distrito de Coimbra, na província da Beira Litoral, e situada na foz do rio Mondego com o Oceano Atlântico.

O clima é mediterrânico. Os verões são quentes e secos e no inverno as temperaturas são baixas. A temperatura média anual na Figueira da Foz é de 21 °C. Não chove durante 236 dias por ano.

Na Figura 10 está representada a média diária de energia solar de ondas curtas (luz visível e radiação ultravioleta) incidente ao longo do ano na Figueira da Foz [43].

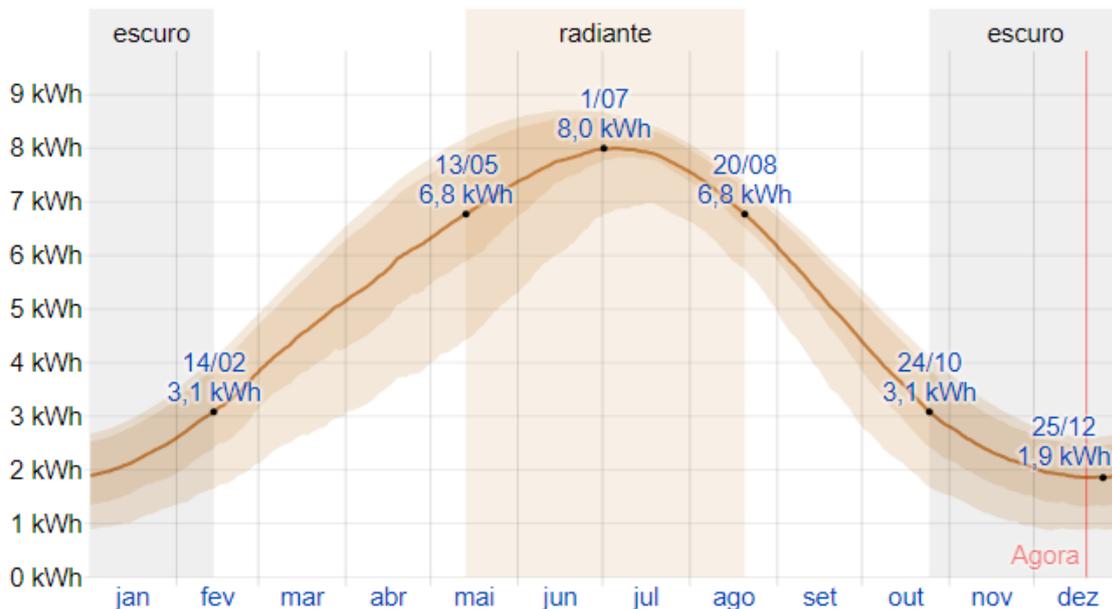


Figura 10. Energia solar de ondas curtas média que chega ao solo (linha laranja), por metro quadrado, ao longo do ano [43]

Na Figura 11 estão representadas as temperaturas máximas e mínimas médias ao longo do ano na Figueira da Foz [43].

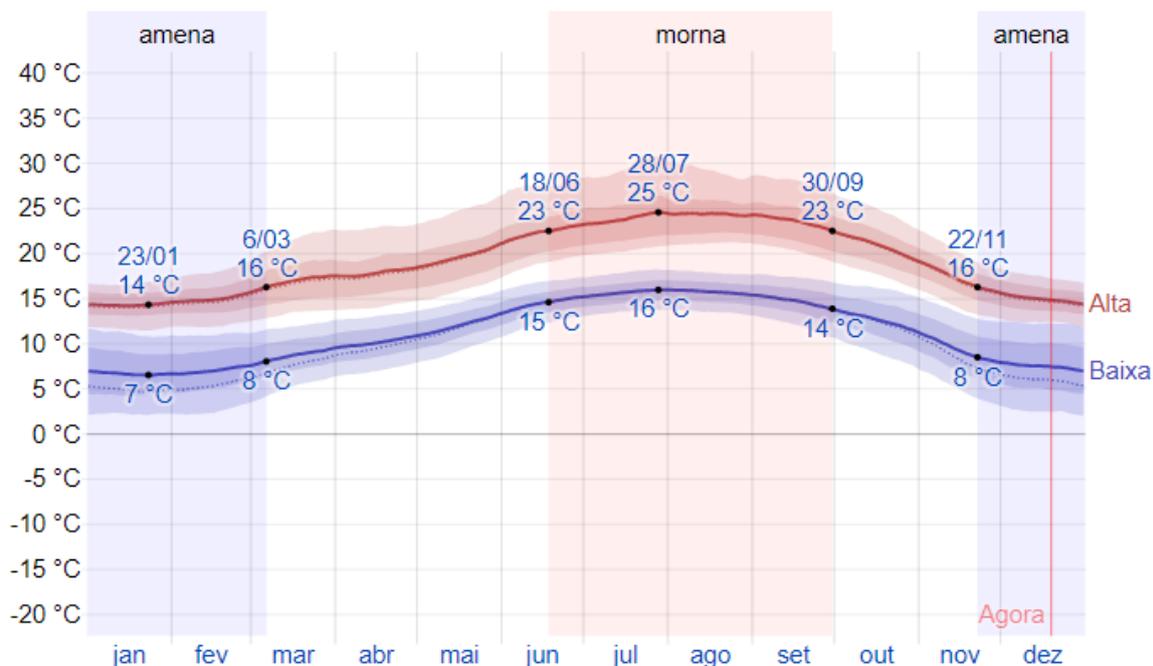


Figura 11. Temperatura máxima (linha vermelha) e mínima (linha azul) médias, ao longo do ano [43].

A variação da radiação solar e da temperatura ambiente e a velocidade do tempo para cada hora ao longo dos dois dias estão representadas nas Figuras 12 e 13. Os dados utilizados foram retirados do ficheiro de dados climáticos IWECC para a localização de Figueira da Foz, Portugal [44].

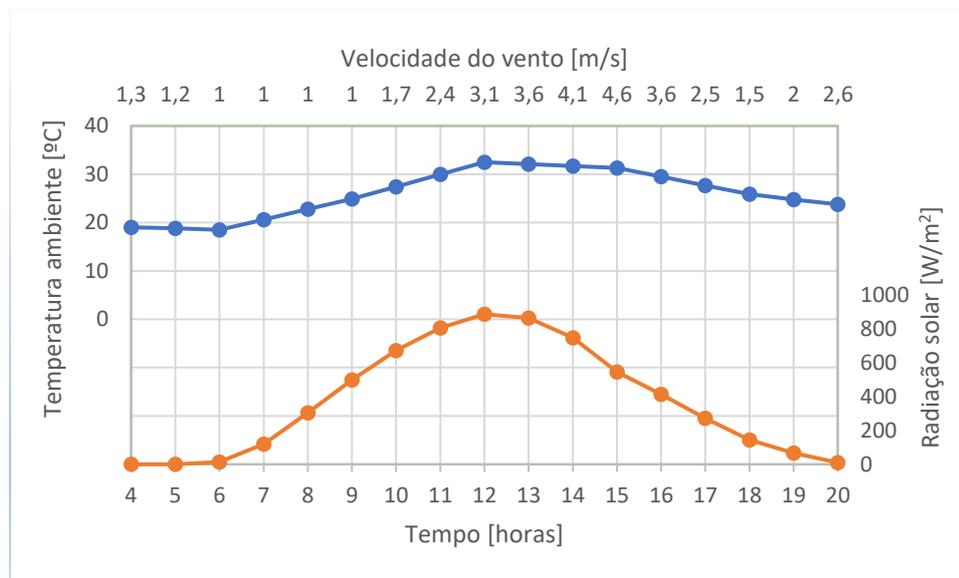


Figura 12. Variação da radiação solar, temperatura ambiente e velocidade do vento ao longo do dia 5 de agosto

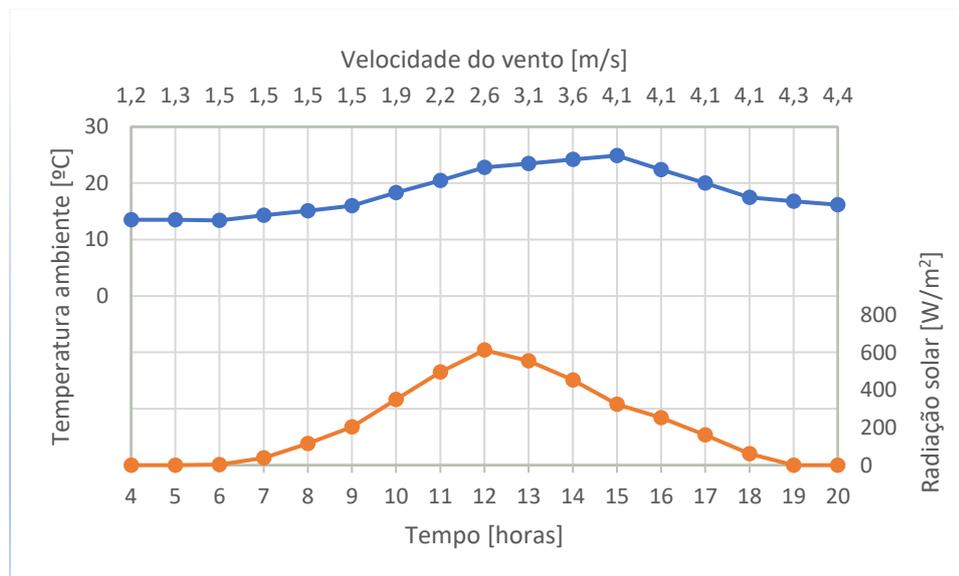


Figura 13. Variação da radiação solar, temperatura ambiente e velocidade do vento ao longo do dia 25 de maio

2.5.2. Metodologia de cálculo

Como está representado na Figura 14, depois de obtidas as funções f_1 e f_2 (44) e as suas respectivas derivadas e com o auxílio do Excel VBA recorreu-se ao método Newton-Raphson de maneira a encontrar os valores de T_v e T_a que verificam o sistema de equações (43).

Para cada intervalo de tempo de 5 minutos são feitas até 1000 iterações ou até que o erro seja inferior a 0,000001. É então obtida a produtividade, assim como o valor do coeficiente de convecção do permutador de calor e posteriormente a potência de fluido a ser transferida à água salgada no intervalo de tempo seguinte.

$$\begin{cases} f_1 = AT_v^4 + BT_v + CT_a^4 + DT_a + Ke \frac{17,625(T_a-273)}{(T_a-273)+243,04} - Ke \frac{17,625(T_v-273)}{(T_v-273)+243,04} + E \\ f_2 = FT_v^4 + GT_v + HT_a^4 + IT_a + Ke \frac{17,625(T_a-273)}{(T_a-273)+243,04} - Ke \frac{17,625(T_v-273)}{(T_v-273)+243,04} + J \end{cases} \quad (44)$$

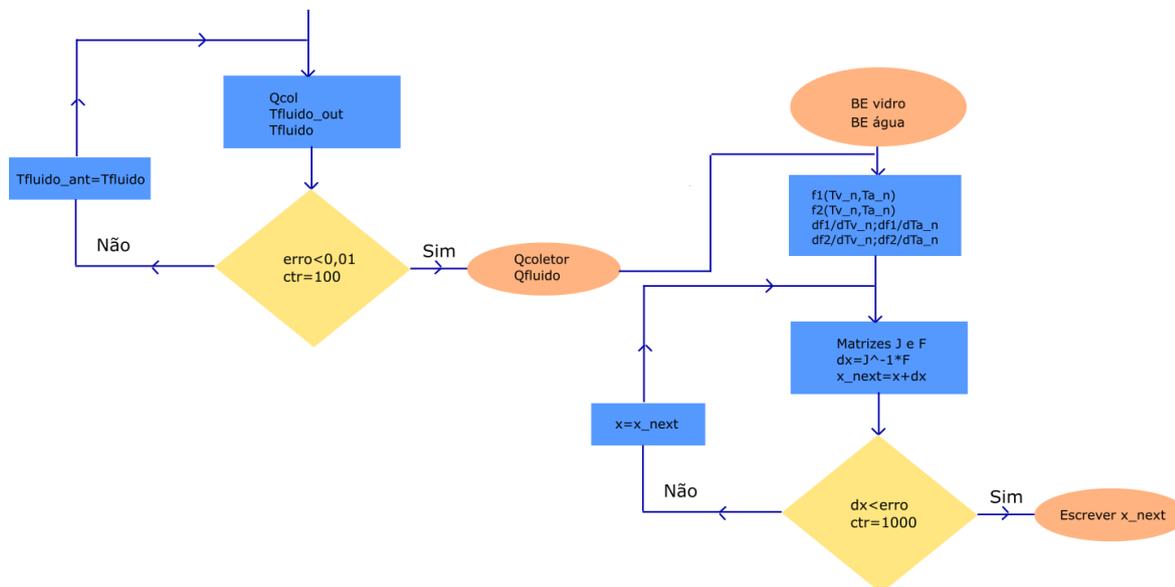


Figura 14. Fluxograma do programa de cálculo

3. DISCUSSÃO E RESULTADOS

Com os dados meteorológicos apresentados anteriormente, foi estudada a variação da temperatura do vidro e da água, a produção de água destilada e a eficiência do sistema para a configuração com e sem o coletor solar. Foi também analisada a influência da massa de água salgada e da área do recipiente e do coletor para os dois dias, para além do impacto da radiação solar incidente, da temperatura ambiente e da velocidade do vento. Estes resultados são também apresentados, sob a forma de tabelas, no Anexo B.

3.1. Dia de Verão (5 de agosto)

3.1.1. Coletor solar

As variações de temperatura do vidro, da água e da temperatura, apresentadas na Figura 15, mostram que os valores mais altos são atingidos entre as 10h e as 14h, como seria de esperar. A temperatura máxima do vidro (49,6°C) e da água (82,7°C) verificam-se, respetivamente, às 13h25 e 13h35 na configuração com o coletor solar. Na configuração sem o coletor solar, às 13h10 a temperatura do vidro (42,40°C) e às 13h25 a temperatura da água (71,94°C) apresentam o valor máximo. As temperaturas máximas são atingidas algum tempo depois do pico da radiação solar devido à elevada capacidade calorífica da água.

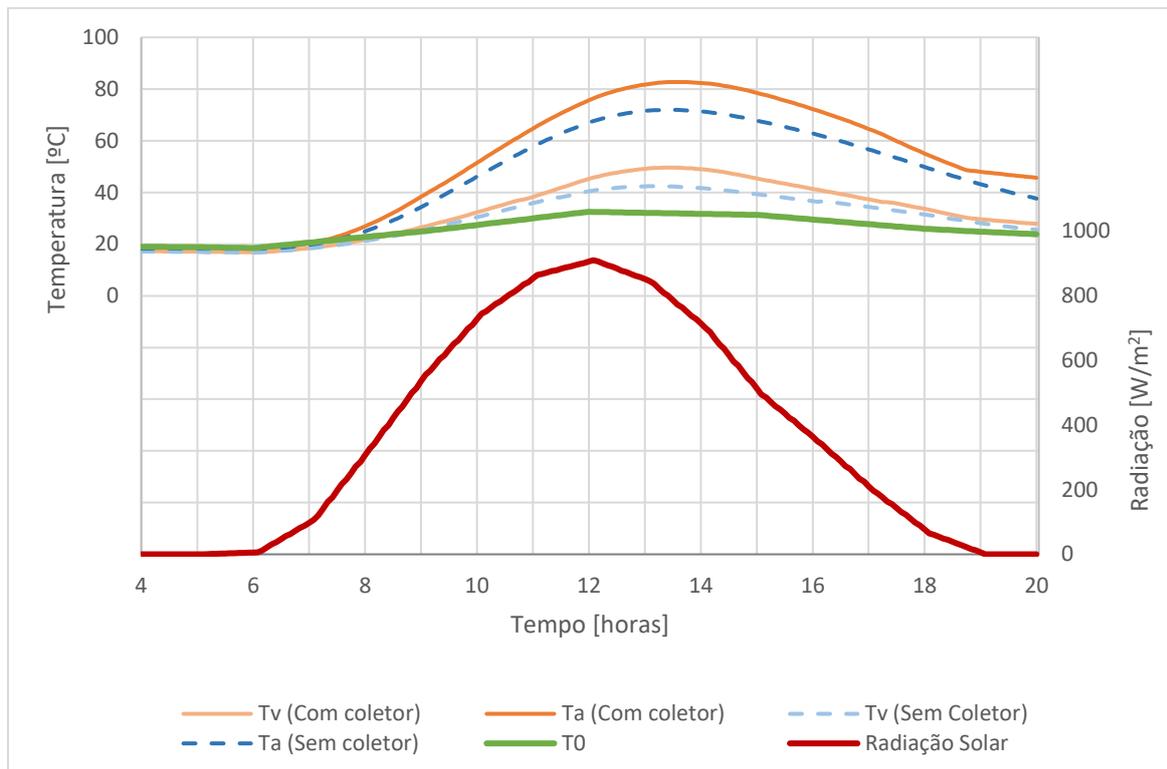


Figura 15. Variação da temperatura e da radiação solar ao longo do dia 5 de agosto.

A comparação entre as configurações com e sem o coletor solar, em termos de produtividade, está representada na Figura 16. A produtividade máxima aumentou cerca de 0,3 kg/h. m² com a introdução do coletor plano. Ao fim do dia verificou-se uma produtividade de 2,49 kg/ m² para o sistema com o coletor solar e 1,15 kg/ m² sem o coletor solar, o que corresponde a um aumento de 1,34 kg/ m² de água destilada.

A utilização do coletor solar plano corresponde a um aumento percentual de produtividade de:

$$\frac{1,34}{1,15} \times 100 = 116,5\%$$

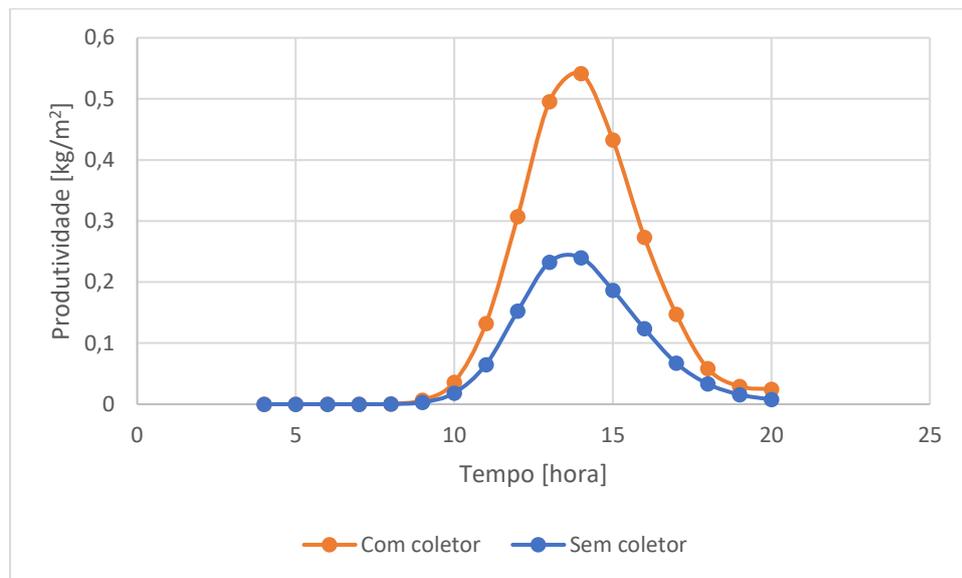


Figura 16. Comparação da produção de água em função da hora do dia com e sem o coletor solar plano.

A influência do coletor solar plano na configuração em termos de melhoria da eficiência está representada na Figura 17. A eficiência ao fim do dia do sistema com e sem o coletor solar plano foi de 0,26 e 0,12, respectivamente.

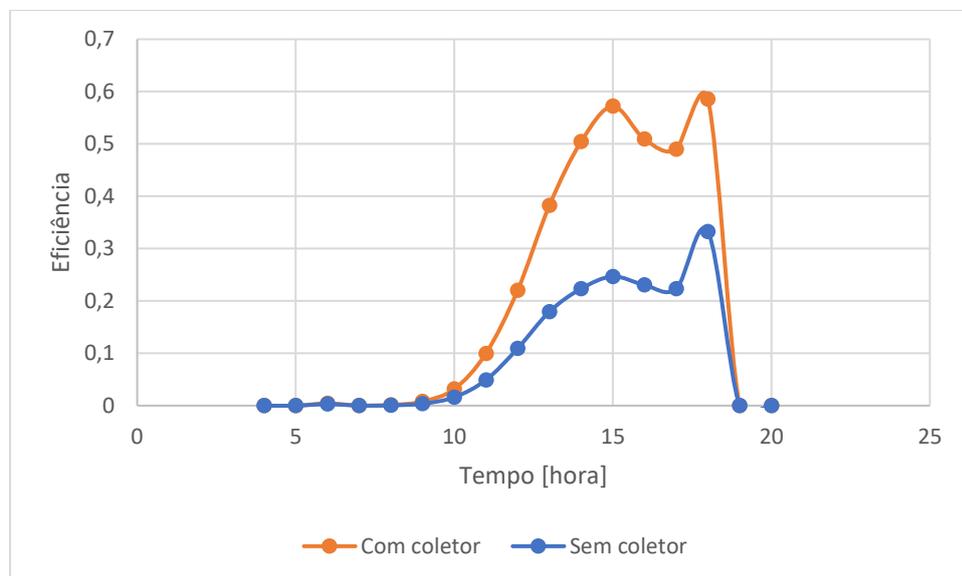


Figura 17. Comparação da eficiência do sistema em função da hora do dia com e sem o coletor solar plano.

3.1.2. Massa de água salgada

A influência da massa de água salgada, a partir de 2 cm de altura de água no recipiente do sistema de dessalinização, com o coletor solar, na produtividade e na eficiência ao fim do dia estão representadas na Figuras 18.

Quanto mais alta a massa de água presente no sistema, menor a produtividade e consequentemente mais baixa a eficiência. Quanto menor a quantidade de água no recipiente, desde que suficiente para que o permutador de calor se mantenha submerso, melhor a produtividade.

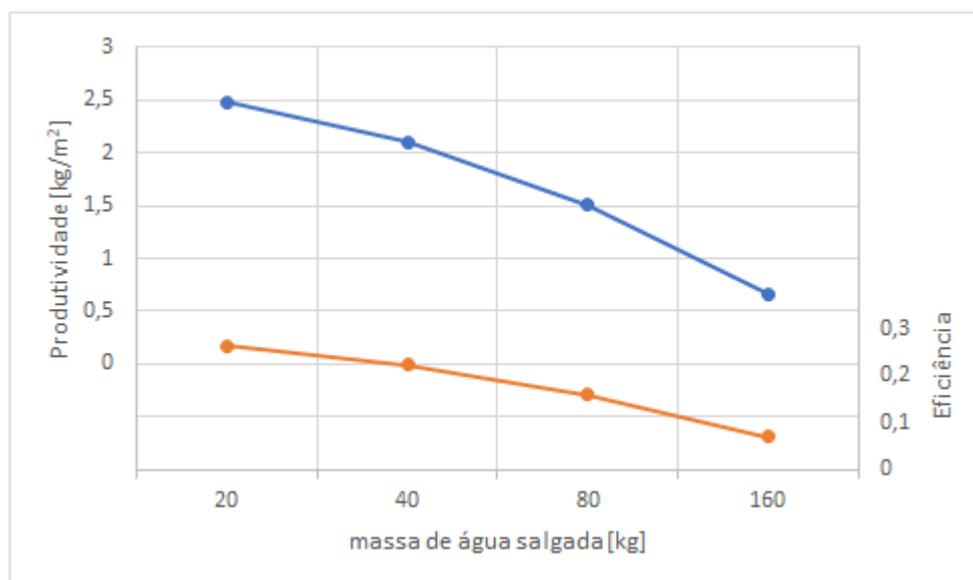


Figura 18. Relação entre produtividade e eficiência e a massa de água salgada

3.1.3. Área do recipiente

A influência da área do recipiente do sistema de dessalinização com o coletor solar, com uma massa de água constante de 150 kg para que o nível de água não desça abaixo dos 2 cm, na produtividade e na eficiência ao fim do dia, estão representadas na Figura 19.

Quanto maior a área do recipiente, maior a área de captação de radiação solar, logo maior a produtividade e consequentemente mais alta a eficiência.

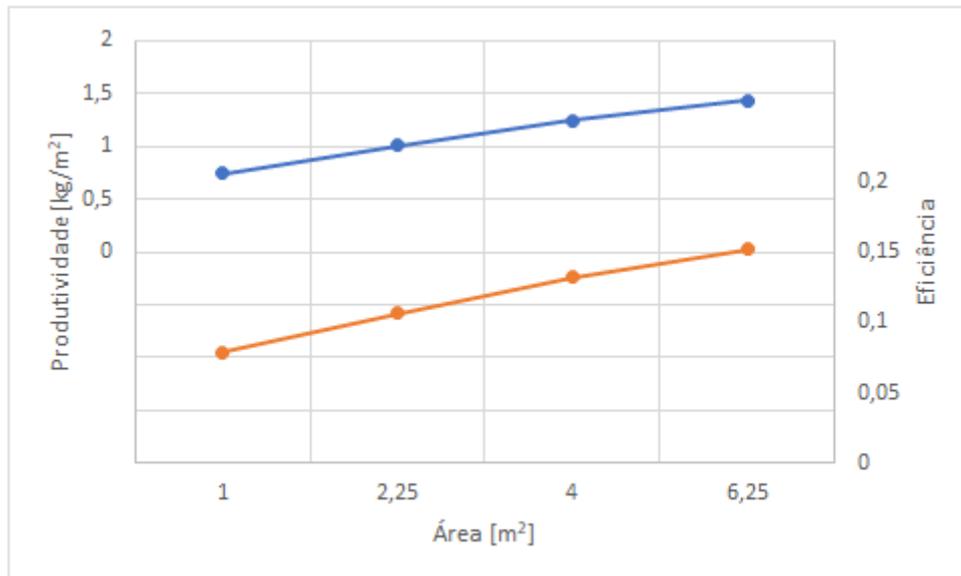


Figura 19. Relação entre produtividade e eficiência e área do recipiente

3.1.4. Área do coletor solar

A influência da área do coletor solar do sistema de dessalinização na produtividade e na eficiência ao fim do dia estão representadas na Figuras 20.

Quanto maior a área do coletor solar plano, maior a quantidade de calor transferida para a água, logo mais alta a produtividade e mais alta a eficiência do sistema.

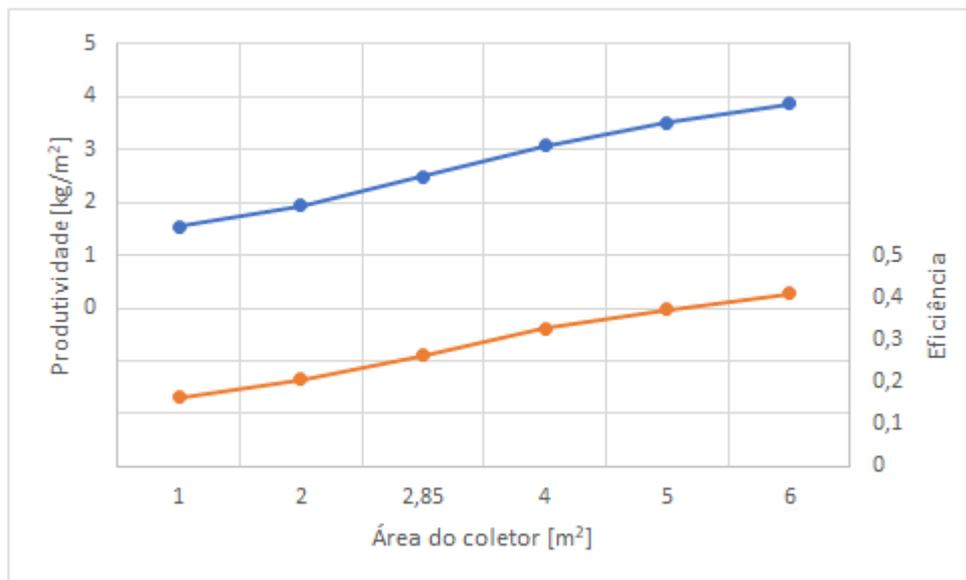


Figura 20. Relação entre produtividade e eficiência e área do coletor

3.2. Dia de Primavera (25 de maio)

3.2.1. Coletor solar

As variações de temperatura do vidro, da água e da temperatura, apresentadas na Figura 21, mostram que os valores mais altos são atingidos entre as 10h e as 14h, como seria de esperar. A temperatura máxima do vidro (31,4°C) e da água (57,3°C) verificam-se, respetivamente, às 14h25 e 14h15 na configuração com o coletor solar. Na configuração sem o coletor solar, às 14h30 a temperatura do vidro (29,4°C) e às 14h15 a temperatura da água (51,5°C) apresentam o valor máximo. As temperaturas máximas são atingidas algum tempo depois do pico da radiação solar devido à elevada capacidade calorífica da água.

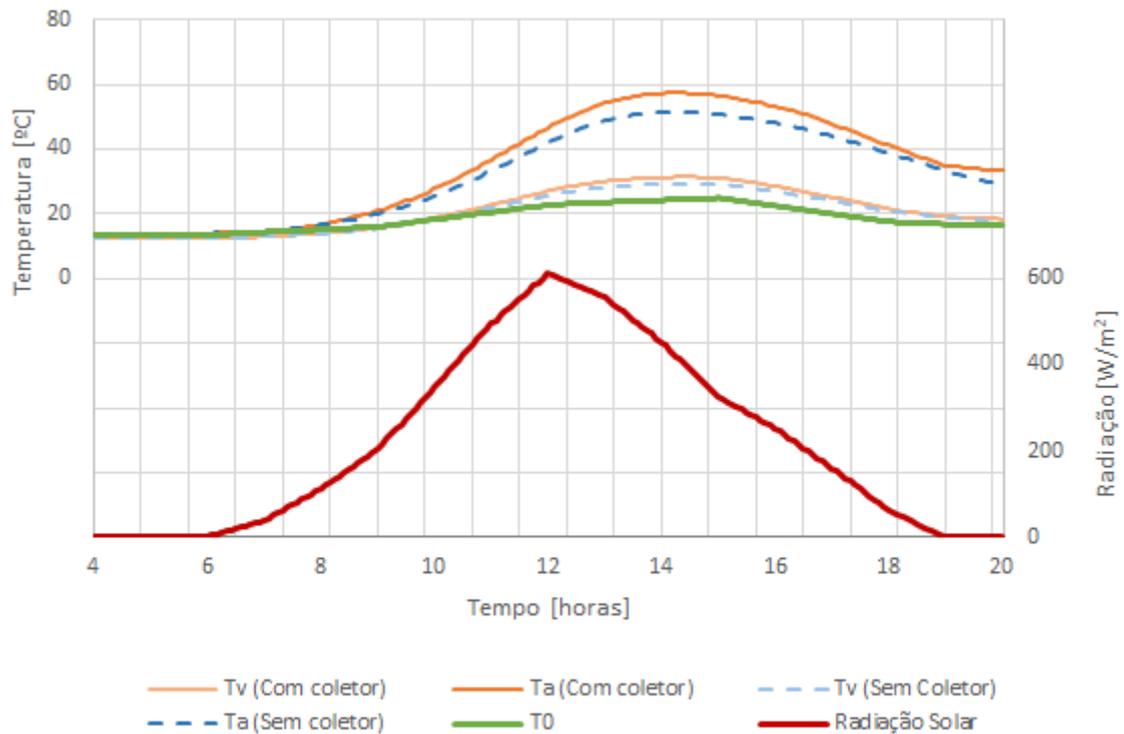


Figura 21. Variação da temperatura e da radiação solar ao longo do dia 25 de maio.

A comparação entre as configurações com e sem o coletor solar, em termos de produtividade, está representada na Figura 22. A produtividade máxima aumentou cerca de 0,043 kg/h. m² com a introdução do coletor plano. Ao fim do dia verificou-se uma produtividade de 0,43 kg/ m² para o sistema com o coletor solar e 0,24 kg/ m² sem o coletor solar, o que corresponde a um aumento de 0,19 kg/ m² de água destilada.

A utilização do coletor solar plano corresponde a um aumento percentual de produtividade de:

$$\frac{0,19}{0,24} \times 100 = 79,2\%$$

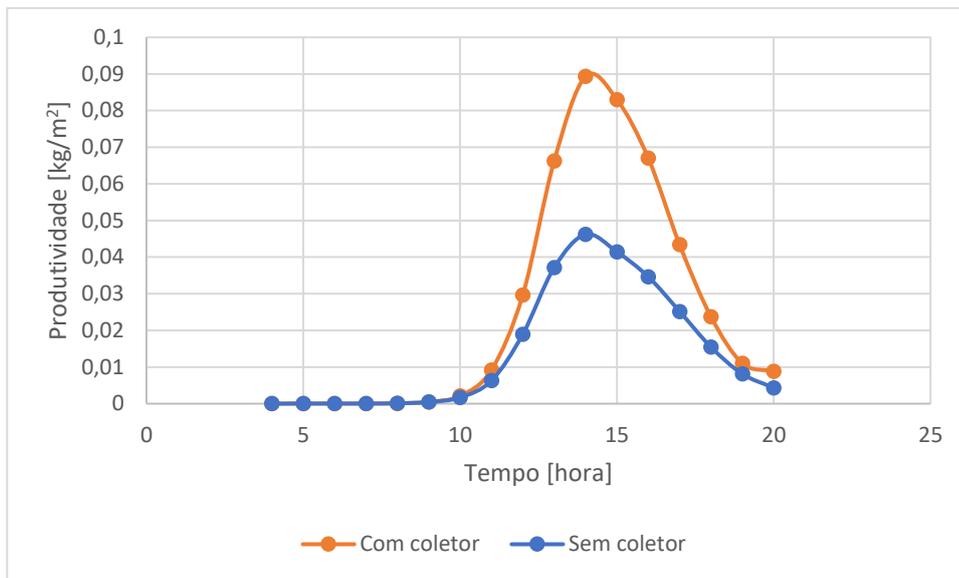


Figura 22. Comparação da produção de água em função da hora do dia com e sem o coletor solar plano.

A influência do coletor solar plano na configuração em termos de melhoria da eficiência está representada na Figura 23. A eficiência ao fim do dia do sistema com e sem o coletor solar plano foi de 0,07 e 0,04, respectivamente.

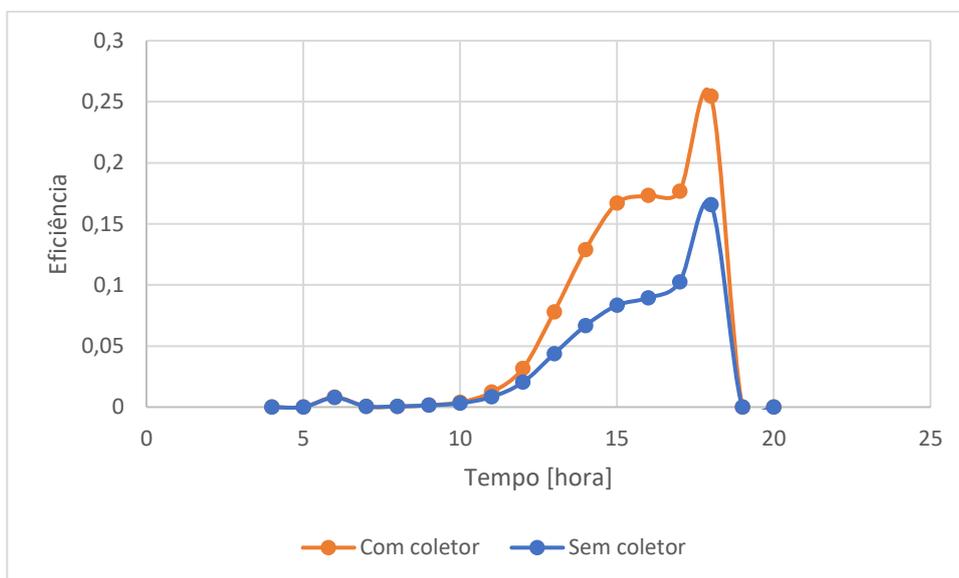


Figura 23. Comparação da eficiência do sistema em função da hora do dia com e sem o coletor solar plano.

3.2.2. Massa de água salgada

A influência da massa de água salgada, a partir de 2 cm de altura de água no recipiente do sistema de dessalinização, com o coletor solar, na produtividade e na eficiência ao fim do dia estão representadas na Figuras 24.

Quanto mais alta a massa de água presente no sistema, menor a produtividade e consequentemente mais baixa a eficiência. Quanto menor a quantidade de água no recipiente, desde que suficiente para que o permutador de calor se mantenha submerso, maior a produtividade.

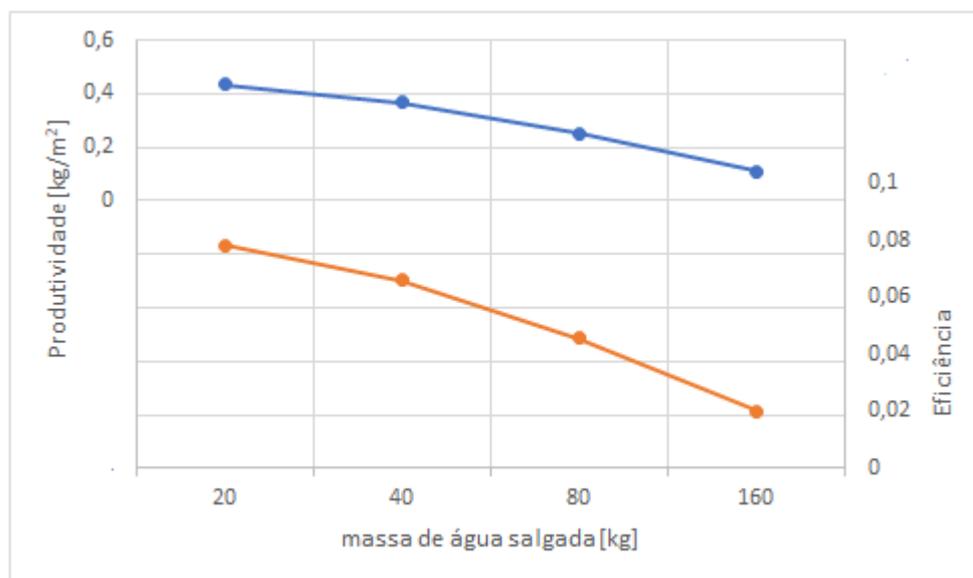


Figura 24. Relação entre produtividade e eficiência e a massa de água salgada

3.2.3. Área do recipiente

A influência da área do recipiente do sistema de dessalinização com o coletor solar, com uma massa de água constante de 150 kg para que o nível de água não desça abaixo dos 2 cm, na produtividade e na eficiência ao fim do dia, estão representadas na Figura 25.

Quanto maior a área do recipiente, maior a área de captação de radiação solar, logo maior a produtividade e consequentemente mais alta a eficiência.

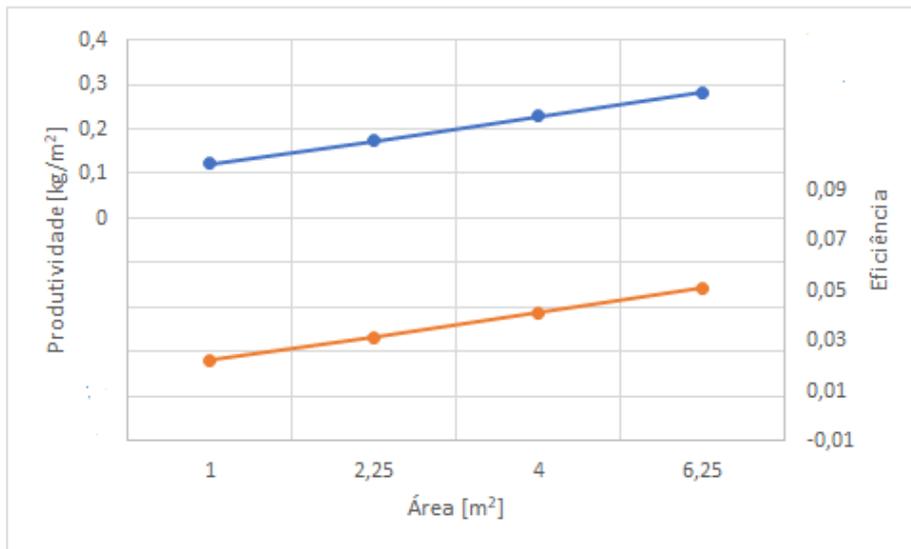


Figura 25. Relação entre produtividade e eficiência e área do recipiente

3.2.4. Área do coletor solar

A influência da área do coletor solar do sistema de dessalinização na produtividade e na eficiência ao fim do dia estão representadas na Figuras 26.

Quanto maior a área do coletor solar plano, maior a quantidade de calor transferida para a água, logo mais alta a produtividade e mais alta a eficiência do sistema.

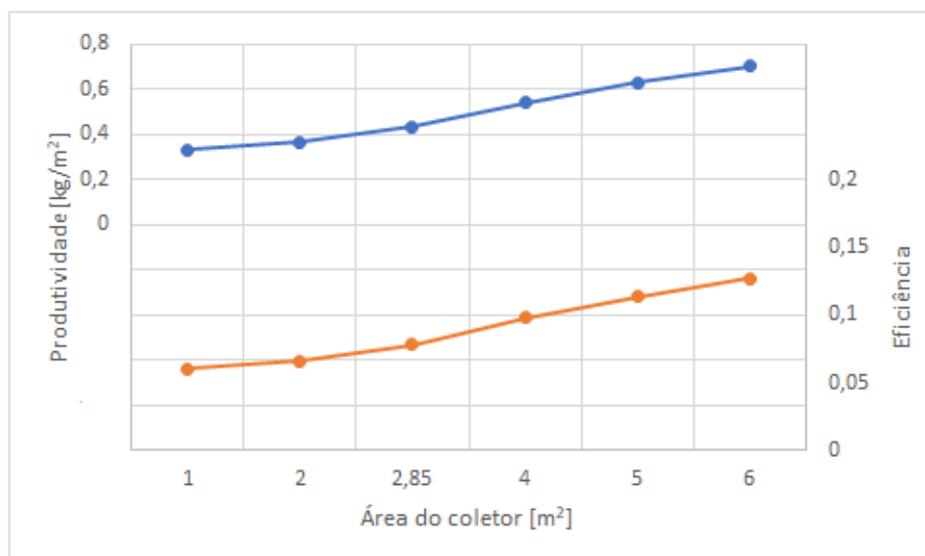


Figura 26. Relação entre produtividade e eficiência e área do coletor.

3.3. Impacto da radiação solar, temperatura ambiente e velocidade do vento

De maneira a estudar a influência da radiação solar média e da temperatura ambiente máxima na produtividade e na eficiência foram tidos em conta 4 perfis de temperatura ambiente e 4 de radiação solar no mês de maio. Os valores obtidos estão representados nas Figuras 27 e 28.

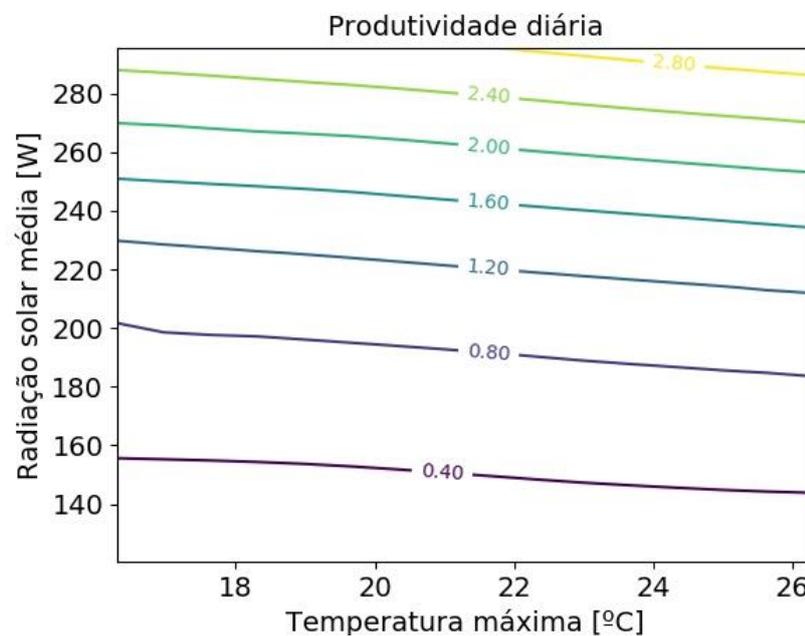


Figura 27. Produtividade ao fim do dia em função da radiação solar média e da temperatura ambiente máxima.

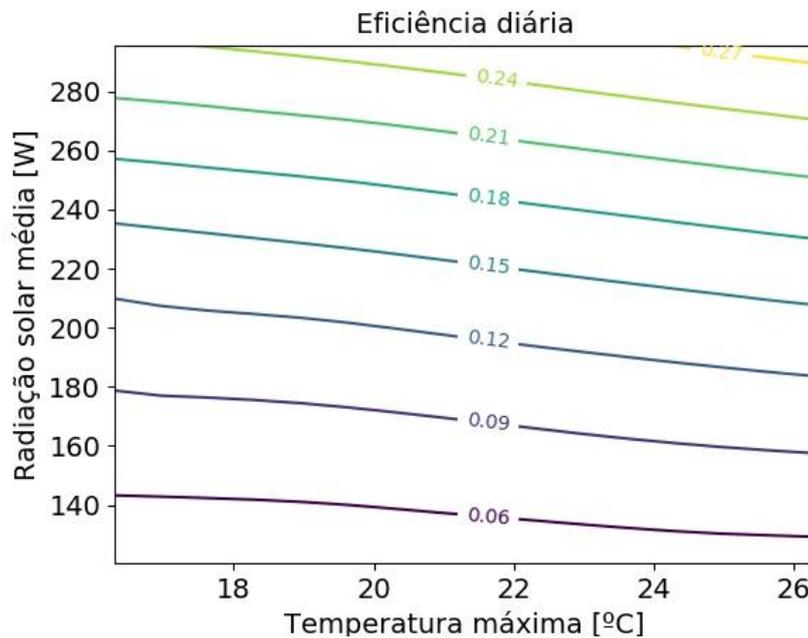


Figura 28. Eficiência ao fim do dia em função da radiação solar média e da temperatura ambiente máxima.

Comparativamente à temperatura ambiente, a radiação solar tem um impacto muito superior, sendo assim o principal fator no aumento de produtividade e eficiência.

De maneira a estudar a influência da velocidade do vento e da temperatura ambiente máxima na produtividade e na eficiência foram tidos em conta 4 perfis de temperatura ambiente e 4 de velocidade do vento no mês de maio. Os valores obtidos estão representados nas Figuras 29 e 30.

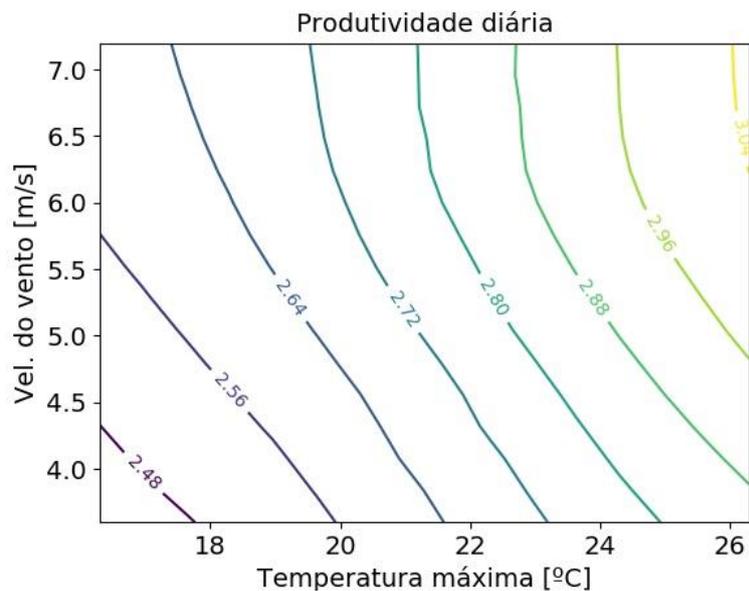


Figura 29. Produtividade ao fim do dia em função temperatura ambiente máxima e da velocidade do vento.

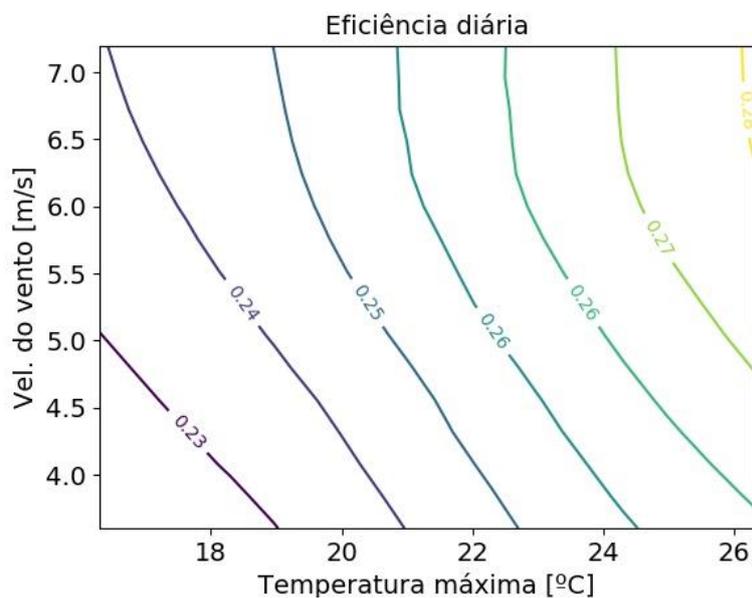


Figura 30. Eficiência ao fim do dia em função da temperatura ambiente máxima e da velocidade do vento.

Para valores altos da velocidade do vento, o seu impacto diminui com o aumento da temperatura ambiente.

Comparativamente à velocidade do vento, a temperatura ambiente tem um impacto superior na produtividade e eficiência.

4. CONCLUSÕES

Um sistema de dessalinização solar com um coletor solar plano foi modelado matematicamente neste estudo. Com base nos resultados anteriores, podemos tirar as seguintes conclusões:

- A produtividade do sistema depende, fortemente, da radiação solar e aumenta linearmente com esta.
- O aumento de diferença entre a temperatura do vidro e da água corresponde a uma melhor produção de água destilada.
- Quando maior a velocidade do vento, maior a diferença entre a temperatura do vidro e da água.
- O aumento da temperatura ambiente traz menos perdas de calor ao sistema, o que resulta numa melhor produtividade.
- O uso do coletor solar plano corresponde a um aumento percentual de produtividade, em média, de 98%.

Comparativamente aos resultados onde as condições utilizadas são idênticas, a produtividade obtida em [27] é semelhante. Em [12] a produtividade é quase 2 vezes maior devido ao recurso a PCM de maneira a armazenar energia solar e, assim, proporcionar calor durante a noite.

De maneira a melhorar os resultados obtidos a diferença entre as temperaturas da água e do vidro pode ser aumentada arrefecendo o vidro através do uso de uma ventoinha ou da passagem da água salgada pelo vidro antes da sua entrada no recipiente.

É também possível aumentar a produtividade através do uso de um coletor solar com sensores, que tem a capacidade de acompanhar o sol ao longo do dia, absorvendo assim maior radiação solar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Expresso (2019-08-07), “Portugal está em risco elevado de escassez de água”, <https://expresso.pt/sociedade/2019-08-07-Portugal-esta-em-risco-elevado-de-escassez-de-agua>, acesso em 2020-03-18.
- [2] Wired (2019-01-14), “Desalination Is Booming. But What About All That Toxic Brine?”, <https://www.wired.com/story/desalination-is-booming-but-what-about-all-that-toxic-brine/>, acesso em 2020-03-18.
- [3] Bijan Rahimi, Hui Tong Chua (2017), “Introduction to Desalination”, in *Low Grade Heat Driven Multi-Effect Distillation and Desalination*, pp. 1-17, Elsevier Inc., 2017, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805124-5.00001-2>
- [4] Energie en Milieu InformatieSysteem (Fevereiro 2010), “Membrane distillation”, <https://emis.vito.be/en/bat/tools-overview/sheets/membrane-distillation?language=nl> , acesso em 2020-03-18
- [5] Edward Jones, Manzoor Qadir (2019), The state of desalination and brine production: A global outlook. *Science of the Total Environment* 657 (2019) 1343–1356
- [6] Water World (2014-11-24), “Hybrid Desalination: The Best of Both Worlds?”, <https://www.waterworld.com/international/desalination/article/16200955/hybrid-desalination-the-best-of-both-worlds> , acesso em 2020-03-18.
- [7] David Renné, Perez R., Perez M. (2015-11), A Fundamental Look at Supply Side Energy Reserves For The Planet. *The International Energy Agency SHC Programme Solar Update*, Volume 50, pp. 2-3.
- [8] Gifex, “Projected World Water Scarcity” https://www.gifex.com/fullsize-en/2009-09-18-7108/Projected_world_water_scarcity.html , acesso em 2020-03-25
- [9] Global Solar Atlas (Outubro 2019), <https://globalsolaratlas.info/download/world> ,acesso em 2020-03-25
- [10] Johnson A, Mu L, Park YH, Valles DJ, Wang H, Xu P, Kota K, Kuravi S. A Thermal Model for Predicting the Performance of a Solar Still with Fresnel Lens. *Water*. 2019 Sep;11(9):1860.
- [11] Sahota L., Tiwari G.N. (2016), Effect of nanofluids on the performance of passive double slope solar still: A comparative study using characteristic curve. *Desalination* 2016; 388:9–21.
- [12] Mohammad Al-harashseh, Mousa Abu-Arabi, Hasan Mousa, Zobaidah Alzghoul (2017), Solar desalination using solar still enhanced by external solar collector and PCM, *Applied Thermal Engineering* 2017

- [13] Arunkumar T, Kabeel AE. Effect of phase change material on concentric circular tubular solar still – Integration meets enhancement. *Desalination* 2017; 414:46–50
- [14] H. Ghasemi, G. Ni, A.M. Marconnet, J. Loomis, S. Yerci, N. Miljkovic, et al., Solar steam generation by heat localization, *Nat. Commun.* 5 (2014) 4449.
- [15] G. Xue, K. Liu, Q. Chen, P. Yang, J. Li, T. Ding, et al., Robust and low-cost flametreated wood for high-performance solar steam generation, *ACS Appl Mater Inter* 9 (2017) 15052.
- [16] H. Liu, X. Zhang, Z. Hong, Z. Pu, Q. Yao, J. Shi, et al., A bioinspired capillary-driven pump for solar vapor generation, *Nano Energy* 42 (2017) 115–121.
- [17] X. Li, R. Lin, G. Ni, N. Xu, X. Hu, B. Zhu, et al., Three-dimensional artificial transpiration for efficient solar waste-water treatment, *Natl. Sci. Rev.* 5 (2018) 70–77
- [18] X. Li, W. Xu, M. Tang, L. Zhou, B. Zhu, S. Zhu, et al., Graphene oxide-based efficient and scalable solar desalination under one sun with a confined 2D water path, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 113 (2016) 13953.
- [19] Y. Shi, R. Li, Y. Jin, S. Zhuo, L. Shi, J. Chang, et al., A 3D photothermal structure toward improved energy efficiency in solar steam generation, *Joule* 2 (2018) 1171–1186
- [20] G. Ni, G. Li, V. Boriskina Svetlana, H. Li, W. Yang, T. Zhang, et al., Steam generation under one sun enabled by a floating structure with thermal concentration, *Nat. Energy* 1 (2016) 16126.
- [21] V. Kashyap, A. Al-Bayati, S.M. Sajadi, P. Irajizad, S.H. Wang, H. Ghasemi, A flexible anti-clogging graphite film for scalable solar desalination by heat localization, *J. Mater. Chem. A* 5 (2017) 15227–15234
- [22] S.F. Li, Z.H. Liu, Z.X. Shao, H.S. Xiao, N. Xia, Performance study on a passive solar seawater desalination system using multi-effect heat recovery, *Appl Energ* 213 (2018) 343–352.
- [23] M.R.K. Estahbanati, M. Feilizadeh, K. Jafarpur, M. Feilizadeh, M.R. Rahimpour, Experimental investigation of a multi-effect active solar still: the effect of the number of stages, *Appl Energ* 137 (2015) 46–55
- [24] E. Chiavazzo, M. Morciano, F. Viglino, M. Fasano, P. Asinari, Passive solar high-yield seawater desalination by modular and low-cost distillation, *Nature Sustainability* 1 (2018) 763–772.
- [25] G. Xue, Q. Chen, S. Lin, J. Duan, P. Yang, K. Liu, et al., Highly efficient water harvesting with optimized solar thermal membrane distillation device, *Global Chall.* 2 (2018) 1800001.
- [26] Zeinab S. Abdel-Rehim, Ashraf Lasheen, Improving the performance of solar desalination systems, *Renewable Energy* 30 (2005) 1955–1971

- [27] Zeinab S. Abdel-Rehim, Ashraf Lasheen, Experimental and theoretical study of a solar desalination system located in Cairo, Egypt, *Desalination* 217 (2007) 52–64
- [28] Lin Zhou, Yingling Tan, Jingyang Wang, Weichao Xu, Ye Yuan, Wenshan Cai, Shining Zhu, Jia Zhu, 3D self-assembly of aluminium nanoparticles for plasmon-enhanced solar desalination, 2016
- [29] Dongare PD, Alabastri A, Pedersen S, Zodrow KR, Hogan NJ, Neumann O, Wu J, Wang T, Deshmukh A, Elimelech M, Li Q, Nordlander P, Halas NJ, Nanophotonics-enabled solar membrane distillation for off-grid water purification, 2017
- [30] Alessandro Alabastri, Pratiksha D. Dongare, Oara Neumann, Jordin Metz, Ifeoluwa Adebisi, Peter Nordlander, Naomi J. Halas, Resonant Energy Transfer Enhances Solar Thermal Desalination, 2020
- [31] Zhenyuan Xu, Lenan Zhang, Lin Zhao, Bangjun Li, Bikram Bhatia, Chenxi Wang, Kyle L. Wilke, Youngsup Song, Omar Labban, John H. Lienhard, Ruzhu Wang, Evelyn N. Wang, Ultrahigh-efficiency desalination via a thermally-localized multistage solar Still, 2020
- [32] Lu Huang, Haifeng Jiang, Yipu Wang, Ziqiang Ouyang, Wenting Wang, Bing Yang, Huidong Liu, Xuejiao Hu, Enhanced water yield of solar desalination by thermal concentrated multistage distiller, 2019
- [33] Guo Xie, Wenlong Chen, Tiantong Yan, Jiguo Tang, Hongtao Liu, Shunze Cao, Three-effect tubular solar desalination system with vacuum operation under actual weather conditions, 2019
- [34] Zhangxin Wang, Thomas Horseman, Anthony P. Straub, Ngai Yin Yip, Deyu Li5, Menachem Elimelech, Shihong Lin1, Pathways and challenges for efficient solar-thermal desalination, 2019
- [35] J.A. Duffie and W.A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2nd ed., Wiley, New York, 1991.
- [36] Energy Plus, https://www.energyplus.net/sites/default/files/docs/site_v8.3.0/EngineeringReference/05-Climate/index.html , acesso em 2020-08-30
- [37] R.V. Dunkle, *Solar water distillation: the roof type still and a multiple effect diffusion still*, Victoria, Australia, 1961.
- [38] Alduchov, O.A.; Eskridge, R.E. (1996). "Improved Magnus form approximation of saturation vapor pressure". *Journal of Applied Meteorology*. 35 (4): 601–9.
- [39] Rai GD. *Solar energy utilization. A text book for engineering students. Some additional methods of solar energy utilization*. Delhi: Khanna; 1980, p. 194–97 [chapter 12]
- [40] Incropera, F.P e DeWitt, D.P, “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, 2nd ed., Wiley, 1985.
- [41] QAISt (Maio 2012), “Understanding and Using Collector Test Standard EN 12975”

[42] Latif M. Jiji (2009), "Heat Convection", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, p. 404.

[43] Weather Spark, <https://pt.weatherspark.com/y/32323/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Figueira-da-Foz-Portugal-durante-o-ano> , acesso em 2020-12-05

[44] Energy Plus Weather Files, <https://www.energyplus.net/weather> , acesso em 2020-10-15

ANEXO A

$$\begin{cases}
\alpha_v IA_v - Q_{cv} - Q_{rv} = Q_{acum} + (\tau\alpha)_v IA_v - Q_{r,a-v} - Q_{c,a-v} - Q_{evap,a} \\
\left[mc_p (dT/dt) \right]_a = \tau_v \alpha_a F_{(v-a)} IA_a + Q_{fluido} - Q_{evap,a} - Q_{r,a-v} - Q_{c,a-v} - Q_{perdas.chão} - Q_{a,nova} \\
\alpha_v IA_v - [h_{cv}(T_v - T_0)] A_v - \varepsilon_v \sigma [T_v^4 - (T_{c\acute{e}u} + 273)^4] A_v = \rho \cdot \Delta x \cdot c_p (dT/dt) A_v + (\tau\alpha)_v IA_v - \sigma F_{(a-v)} [\varepsilon_a T_a^4 - \varepsilon_v T_v^4] A_a - h_{ca} (T_a - T_v) A_a - 2,34 \times 10^{-5} \times h_{ca} AL_a (P_a - P_v) \\
\left[mc_p (dT/dt) \right]_a = \tau_v \alpha_a F_{(v-a)} IA_a + Q_{fluido} - \sigma F_{(a-v)} [\varepsilon_a T_a^4 - \varepsilon_v T_v^4] A_a - h_{ca} (T_a - T_v) A_a - 2,34 \times 10^{-5} \times h_{ca} AL_a (P_a - P_v) - h_{isol} (T_a - T_0) A_a - Q_{a,nova} \\
\alpha_v IA_v - h_{cv} A_v T_v + h_{cv} A_v T_0 - \varepsilon_v \sigma A_v T_v^4 + \varepsilon_v \sigma A_v (T_{c\acute{e}u} + 273)^4 - \rho \cdot \Delta x \cdot c_p (dT/dt) A_v - (\tau\alpha)_v IA_v + \sigma F_{(a-v)} A_a \varepsilon_a T_a^4 - \sigma F_{(a-v)} A_a \varepsilon_v T_v^4 + h_{ca} A_a T_a - h_{ca} A_a T_v + 2,34 \times 10^{-5} \times h_{ca} AL_a (P_a - P_v) = 0 \\
\left[mc_p (dT/dt) \right]_a - \tau_v \alpha_a F_{(v-a)} IA_a - Q_{fluido} + \sigma F_{(a-v)} A_a \varepsilon_a T_a^4 - \sigma F_{(a-v)} A_a \varepsilon_v T_v^4 + h_{ca} A_a T_a - h_{ca} A_a T_v + 2,34 \times 10^{-5} \times h_{ca} AL_a (P_a - P_v) + h_{isol} A_a T_a - h_{isol} A_a T_0 + Q_{a,nova} = 0 \\
-(A_v + F_{(a-v)} A_a) \varepsilon_v \sigma T_v^4 - (h_{cv} A_v + h_{ca} A_a) T_v + \sigma F_{(a-v)} A_a \varepsilon_a T_a^4 + h_{ca} A_a T_a + \alpha_v IA_v + h_{cv} A_v T_0 + \varepsilon_v \sigma A_v (T_{c\acute{e}u} + 273)^4 - \rho \cdot \Delta x \cdot c_p (dT/dt) A_v - (\tau\alpha)_v IA_v + 2,34 \times 10^{-5} \times h_{ca} AL_a (P_a - P_v) = 0 \\
-\sigma F_{(a-v)} A_a \varepsilon_v T_v^4 - h_{ca} A_a T_v + \sigma F_{(a-v)} A_a \varepsilon_a T_a^4 + (h_{ca} + h_{isol}) A_a T_a + \left[mc_p (dT/dt) \right]_a - \tau_v \alpha_a F_{(v-a)} IA_a - Q_{fluido} + 2,34 \times 10^{-5} \times h_{ca} AL_a (P_a - P_v) - h_{isol} A_a T_0 + Q_{a,nova} = 0 \\
-(A_v + F_{(a-v)} A_a) \varepsilon_v \sigma T_v^4 - (h_{cv} A_v + h_{ca} A_a) T_v + \sigma F_{(a-v)} A_a \varepsilon_a T_a^4 + h_{ca} A_a T_a + \alpha_v IA_v + h_{cv} A_v T_0 + \varepsilon_v \sigma A_v (T_{c\acute{e}u} + 273)^4 \\
- \rho \cdot \Delta x \cdot c_p \frac{T_v - T_{v,anterior}}{dt} A_v - (\tau\alpha)_v IA_v + 2,34 \times 10^{-5} \times h_{ca} AL_a (610,94 \times e^{\frac{17,625(T_a-273)}{(T_a-273)+243,04}} - 610,94 \times e^{\frac{17,625(T_v-273)}{(T_v-273)+243,04}}) = 0 \\
-\sigma F_{(a-v)} A_a \varepsilon_v T_v^4 - h_{ca} A_a T_v + \sigma F_{(a-v)} A_a \varepsilon_a T_a^4 + (h_{ca} + h_{isol}) A_a T_a + \left[mc_p \frac{T - T_{anterior}}{dt} \right]_a - \tau_v \alpha_a F_{(v-a)} IA_a - \varepsilon m_{fluido} c_{p,fluido} (T_{fluido,out} - T_a) + \frac{W_h A}{3600} C_p (T_a - T_0) \\
+ 2,34 \times 10^{-5} \times h_{ca} AL_a (610,94 \times e^{\frac{17,625(T_a-273)}{(T_a-273)+243,04}} - 610,94 \times e^{\frac{17,625(T_v-273)}{(T_v-273)+243,04}}) - h_{isol} A_a T_0 = 0 \\
-(A_v + F_{(a-v)} A_a) \varepsilon_v \sigma T_v^4 - (h_{cv} A_v + h_{ca} A_a + \rho \cdot \Delta x \cdot c_p \frac{1}{dt}) T_v + \sigma F_{(a-v)} A_a \varepsilon_a T_a^4 + h_{ca} A_a T_a + 2,34 \times 10^{-5} \times h_{ca} AL_a \times 610,94 \times e^{\frac{17,625(T_a-273)}{(T_a-273)+243,04}} \\
- 2,34 \times 10^{-5} \times h_{ca} AL_a \times 610,94 \times e^{\frac{17,625(T_v-273)}{(T_v-273)+243,04}} + \alpha_v IA_v + h_{cv} A_v T_0 + \varepsilon_v \sigma A_v (T_{c\acute{e}u} + 273)^4 + \rho \cdot \Delta x \cdot c_p \frac{T_{v,anterior}}{dt} A_v - (\tau\alpha)_v IA_v = 0 \\
-\sigma F_{(a-v)} A_a \varepsilon_v T_v^4 - h_{ca} A_a T_v + \sigma F_{(a-v)} A_a \varepsilon_a T_a^4 + (h_{ca} + h_{isol}) A_a + m_a c_{p,a} \frac{1}{dt} + \varepsilon m_{fluido} c_{p,fluido} + \frac{W_h A}{3600} C_p T_a + 2,34 \times 10^{-5} \times h_{ca} AL_a \times 610,94 \times e^{\frac{17,625(T_a-273)}{(T_a-273)+243,04}} \\
- 2,34 \times 10^{-5} \times h_{ca} AL_a \times 610,94 \times e^{\frac{17,625(T_v-273)}{(T_v-273)+243,04}} - m_a c_{p,a} \frac{T_{a,anterior}}{dt} - \tau_v \alpha_a F_{(v-a)} IA_a - \varepsilon m_{fluido} c_{p,fluido} T_{fluido,out} - h_{isol} A_a T_0 - \frac{W_h A}{3600} C_p T_0 = 0 \\
AT_v^4 + BT_v + CT_a^4 + DT_a + Ke^{\frac{17,625(T_a-273)}{(T_a-273)+243,04}} - Ke^{\frac{17,625(T_v-273)}{(T_v-273)+243,04}} + E = 0 \\
FT_v^4 + GT_v + HT_a^4 + IT_a + Ke^{\frac{17,625(T_a-273)}{(T_a-273)+243,04}} - Ke^{\frac{17,625(T_v-273)}{(T_v-273)+243,04}} + J = 0
\end{cases}$$

ANEXO B

Tabela 4. Resultados para a configuração com o coletor solar no dia 5 de agosto

| hora | T0 | I | Va,e | Tv | Ta | Wh | η |
|------|------|----------|------|----------|------------|-----------|----------|
| 4 | 19 | 0 | 1,3 | 17,15997 | 18,2029891 | 0 | 0 |
| 5 | 18,8 | 0 | 1,2 | 17,06068 | 18,6028715 | 2,713E-05 | 0 |
| 6 | 18,5 | 5,905367 | 1 | 16,78178 | 18,5760123 | 3,806E-05 | 0,004207 |
| 7 | 20,6 | 107,0171 | 1 | 18,47766 | 20,2849361 | 4,059E-05 | 0,000248 |
| 8 | 22,8 | 327,5909 | 1 | 21,69427 | 26,8886413 | 0,0006021 | 0,0012 |
| 9 | 24,9 | 556,9025 | 1 | 26,45165 | 38,3238979 | 0,0067711 | 0,007937 |
| 10 | 27,4 | 744,9186 | 1,7 | 32,28279 | 51,4630665 | 0,0361042 | 0,031638 |
| 11 | 30 | 864,9221 | 2,4 | 38,2708 | 64,6975731 | 0,1321951 | 0,099771 |
| 12 | 32,5 | 910,145 | 3,1 | 45,24227 | 75,6178706 | 0,3071434 | 0,220291 |
| 13 | 32,1 | 845,9729 | 3,6 | 49,13779 | 81,7414961 | 0,4954479 | 0,382302 |
| 14 | 31,7 | 700,8135 | 4,1 | 48,96823 | 82,3572252 | 0,5412888 | 0,504187 |
| 15 | 31,3 | 494,1288 | 4,6 | 45,36729 | 78,5265084 | 0,4329033 | 0,571895 |
| 16 | 29,5 | 350,1564 | 3,6 | 41,3766 | 72,2454365 | 0,2730778 | 0,509084 |
| 17 | 27,7 | 196,5383 | 2,5 | 37,32613 | 64,5849858 | 0,1473929 | 0,489547 |
| 18 | 25,9 | 65,02908 | 1,5 | 33,64038 | 55,0637382 | 0,0583465 | 0,585696 |
| 19 | 24,8 | 0 | 2 | 29,61092 | 47,9578461 | 0,0291324 | 0 |
| 20 | 23,8 | 0 | 2,6 | 27,8139 | 45,6772854 | 0,0245357 | 0 |

Tabela 5. Resultados para a configuração sem o coletor solar no dia 5 de agosto

| hora | T0 | I | Va,e | Tv | Ta | Wh | η |
|------|------|----------|------|----------|------------|-----------|----------|
| 4 | 19 | 0 | 1,3 | 17,15997 | 18,2029891 | 0 | 0 |
| 5 | 18,8 | 0 | 1,2 | 16,96215 | 18,2036961 | 1,605E-05 | 0 |
| 6 | 18,5 | 5,905367 | 1 | 16,69043 | 18,220395 | 2,572E-05 | 0,002843 |
| 7 | 20,6 | 107,0171 | 1 | 18,34306 | 19,6981337 | 2,098E-05 | 0,000128 |
| 8 | 22,8 | 327,5909 | 1 | 21,21805 | 24,9472518 | 0,0002581 | 0,000514 |
| 9 | 24,9 | 556,9025 | 1 | 25,27715 | 34,32142 | 0,0030947 | 0,003627 |
| 10 | 27,4 | 744,9186 | 1,7 | 30,43246 | 46,0928556 | 0,0183239 | 0,016057 |
| 11 | 30 | 864,9221 | 2,4 | 35,86088 | 57,7046569 | 0,0649194 | 0,048996 |
| 12 | 32,5 | 910,145 | 3,1 | 40,45108 | 66,955699 | 0,1522808 | 0,109219 |
| 13 | 32,1 | 845,9729 | 3,6 | 42,34235 | 71,530082 | 0,232493 | 0,179399 |
| 14 | 31,7 | 700,8135 | 4,1 | 41,63808 | 71,3373903 | 0,2397749 | 0,22334 |
| 15 | 31,3 | 494,1288 | 4,6 | 39,2891 | 67,8038117 | 0,1867608 | 0,246724 |
| 16 | 29,5 | 350,1564 | 3,6 | 36,60399 | 62,778691 | 0,12364 | 0,230495 |
| 17 | 27,7 | 196,5383 | 2,5 | 34,40286 | 56,6433816 | 0,0672426 | 0,223338 |

| | | | | | | | |
|----|------|----------|-----|----------|------------|-----------|----------|
| 18 | 25,9 | 65,02908 | 1,5 | 31,46172 | 49,8559797 | 0,0331246 | 0,332513 |
| 19 | 24,8 | 0 | 2 | 28,0901 | 43,1604835 | 0,0157616 | 0 |
| 20 | 23,8 | 0 | 2,6 | 25,54317 | 37,6573116 | 0,0075562 | 0 |

Tabela 6. Resultados para a configuração com o coletor solar no dia 25 de maio

| hora | T0 | I | Va,e | Tv | Ta | Wh | η |
|------|------|----------|------|----------|------------|-----------|----------|
| 4 | 14 | 0 | 1,2 | 12,23544 | 13,8996341 | 0 | 0 |
| 5 | 13,9 | 0 | 1,3 | 12,20714 | 13,9489327 | 2,759E-05 | 0 |
| 6 | 13,9 | 2,415414 | 1,5 | 12,20226 | 14,0131769 | 3,012E-05 | 0,00814 |
| 7 | 14,3 | 38,25392 | 1,5 | 12,91116 | 14,6063486 | 2,68E-05 | 0,000457 |
| 8 | 14,7 | 114,5415 | 1,5 | 13,96423 | 16,7133641 | 8,452E-05 | 0,000482 |
| 9 | 15,1 | 204,0184 | 1,5 | 15,59507 | 20,9653246 | 0,0004858 | 0,001554 |
| 10 | 16,3 | 348,8176 | 1,9 | 18,77081 | 27,6578167 | 0,0021168 | 0,003961 |
| 11 | 17,5 | 495,2073 | 2,2 | 22,71632 | 36,8649116 | 0,0092007 | 0,012128 |
| 12 | 18,7 | 611,8062 | 2,6 | 27,13438 | 46,7075212 | 0,0296899 | 0,031678 |
| 13 | 20 | 554,9478 | 3,1 | 29,9855 | 54,1849534 | 0,0662824 | 0,077967 |
| 14 | 21,4 | 452,2557 | 3,6 | 31,24779 | 57,199812 | 0,089321 | 0,128924 |
| 15 | 22,7 | 324,6934 | 4,1 | 31,15925 | 56,4560744 | 0,0830213 | 0,16691 |
| 16 | 20,9 | 252,7475 | 4,1 | 28,47918 | 53,2049909 | 0,0670446 | 0,173158 |
| 17 | 19,1 | 160,3931 | 4,1 | 25,1383 | 47,7936101 | 0,0434042 | 0,176649 |
| 18 | 17,3 | 60,86844 | 4,1 | 21,47008 | 41,2116039 | 0,0237284 | 0,254473 |
| 19 | 16,8 | 0 | 4,3 | 19,21922 | 34,9439342 | 0,0110204 | 0 |
| 20 | 16,2 | 0 | 4,4 | 18,29188 | 33,2199084 | 0,0088491 | 0 |

Tabela 7. Resultados para a configuração sem o coletor solar no dia 25 de maio

| hora | T0 | I | Va,e | Tv | Ta | Wh | η |
|------|------|----------|------|----------|------------|-----------|----------|
| 4 | 14 | 0 | 1,2 | 12,65364 | 14,2700183 | 0 | 0 |
| 5 | 13,9 | 0 | 1,3 | 12,56985 | 14,3090001 | 2,799E-05 | 0 |
| 6 | 13,9 | 2,415414 | 1,5 | 12,62066 | 14,366413 | 2,842E-05 | 0,00768 |
| 7 | 14,3 | 38,25392 | 1,5 | 13,00107 | 14,91724 | 3,545E-05 | 0,000605 |
| 8 | 14,7 | 114,5415 | 1,5 | 13,69272 | 16,7083179 | 0,000106 | 0,000604 |
| 9 | 15,1 | 204,0184 | 1,5 | 14,74566 | 20,0080884 | 0,0004433 | 0,001418 |
| 10 | 16,3 | 348,8176 | 1,9 | 16,82906 | 25,3122292 | 0,001687 | 0,003157 |
| 11 | 17,5 | 495,2073 | 2,2 | 19,51388 | 32,6322104 | 0,0062918 | 0,008294 |
| 12 | 18,7 | 611,8062 | 2,6 | 22,55338 | 40,7976932 | 0,0189642 | 0,020234 |
| 13 | 20 | 554,9478 | 3,1 | 25,13728 | 46,8586635 | 0,03713 | 0,043676 |
| 14 | 21,4 | 452,2557 | 3,6 | 26,63017 | 49,2784734 | 0,0462031 | 0,066689 |
| 15 | 22,7 | 324,6934 | 4,1 | 27,13501 | 48,7110547 | 0,0414348 | 0,083302 |
| 16 | 20,9 | 252,7475 | 4,1 | 25,25038 | 46,2999947 | 0,0346434 | 0,089474 |

| | | | | | | | |
|-----------|------|----------|-----|----------|------------|-----------|----------|
| 17 | 19,1 | 160,3931 | 4,1 | 22,91065 | 42,5818385 | 0,0251755 | 0,102461 |
| 18 | 17,3 | 60,86844 | 4,1 | 20,31089 | 37,7217591 | 0,0154528 | 0,165722 |
| 19 | 16,8 | 0 | 4,3 | 18,00655 | 32,47141 | 0,0081173 | 0 |
| 20 | 16,2 | 0 | 4,4 | 15,95623 | 27,9721078 | 0,0043345 | 0 |