



Destilação Solar

HELDER QUIRINO SILVA MARIANO

outubro de 2019

ESTUDO DE SISTEMA DE PRODUÇÃO DE ÁGUA POTÁVEL ATRAVÉS DO PROCESSO DE DESTILAÇÃO SOLAR – CABO VERDE

Helder Quirino Silva Mariano
1101342

2019

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica

POLITÉCNICO
DO PORTO

isep

ESTUDO DE SISTEMA DE PRODUÇÃO DE ÁGUA POTÁVEL ATRAVÉS DO PROCESSO DE DESTILAÇÃO SOLAR – CABO VERDE

Helder Quirino Silva Mariano
1101342

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Professor Doutor Leonardo Ribeiro e coorientação do Engenheiro Joaquim Monteiro.

2019

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Mestre, Mário Rui Monteiro Alvim de Castro

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto - DEM

Orientador

Doutor, Leonardo José da Silva Ribeiro

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto - DEM

Coorientador

Mestre, Joaquim Fernandes Monteiro

Técnico Superior, Instituto Superior de Engenharia do Porto - DEM

Arguente

Doutor, Adélio Manuel de Sousa Cavadas

Professor Adjunto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - DEMEGI

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é dedicado à minha mãe, Laura, ao meu pai, Quirino, e ao meu irmão, Rafael, pela sua importância na minha vida e por serem as pessoas que me inspiram em procurar ser melhor, todos os dias.

Começo por agradecer às duas pessoas mais importantes da minha vida, os meus pais, pois, sem o seu incentivo, apoio, compreensão, paciência e amor, não seria possível a concretização de mais um objetivo da minha vida.

Esta dissertação não poderia ter sido realizada sem a contribuição de algumas pessoas, como tal, estou grato a todos aqueles que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, não podendo deixar de salientar:

Ao engenheiro Leonardo Ribeiro, por ter aceitado ser meu orientador e por ter tornado possível realizar uma dissertação na qual revejo-me e tenho muito orgulho de ter realizado, trazendo uma grande satisfação.

Ao engenheiro Joaquim Monteiro, pelo apoio prestado durante a elaboração da dissertação e por todos os conhecimentos adquiridos durante a elaboração desta dissertação.

A todos meus amigos e professores que fizeram parte desta longa jornada académica.

PALAVRAS CHAVE

Dessalinização; Radiação Solar; Destilação Solar; Simulação Computacional; Cabo Verde.

RESUMO

As costas áridas do mundo carecem de fontes naturais de água doce, havendo neste caso alta dependência na dessalinização da água, processo de alto consumo energético e normalmente alimentado a combustíveis fósseis. Esta é uma realidade vivida principalmente nas comunidades isoladas e com baixo rendimento económico.

O aproveitamento da radiação solar como fonte de energia para o processo de dessalinização via destilação solar parece ser uma boa alternativa. Isto porque a destilação solar opera com base em tecnologias relativamente simples, podendo ser operada por mão de obra pouco qualificada.

Com base em equações que expressam as relações básicas de transferência de calor e massa num destilador solar, foi desenvolvido um modelo matemático que permite estimar a quantidade de água produzida por destilação solar, para além de outros parâmetros que caracterizam a sua operação. Os cálculos foram feitos para o período de um ano típico, tendo como base de dados um ficheiro climático. Foi obtido uma produção anual que varia entre 0,51 e 0,56 m³ de água destilada por m² de área de captação solar.

Foram analisadas quatro propostas de construção de destiladores solares, com o objetivo de efetuar um estudo de viabilidade económica dos mesmos, para a realidade de Cabo Verde. Das quatro propostas apresentadas, todas apresentaram valores negativos tanto do VAL, como da TIR e apresentando também um período de retorno do investimento superior ao tempo de vida útil do equipamento. Portanto, nenhuma das soluções mostrou ser viável economicamente. O custo de construção varia entre 15 038,02 ECV e 20 040,77 ECV, o custo da água produzida varia entre 2 199,38 ECV e 2 644,72 ECV, o período de retorno do investimento varia entre 26 e 32 anos, o VAL varia entre -9 779,21 ECV e -15 535,98 ECV, e o TIR varia entre -7% e -10%.

Foi também estimada a quantidade de gases de efeito de estufa (em CO₂e) que a utilização do processo de destilação solar permite poupar em alternativa ao processo de osmose inversa, sendo que foi obtido um valor anual de 28,6 kgCO₂e/m².

KEYWORDS

Desalination; Solar Radiation; Solar Distillation; Computational Simulation; Cape Verde.

ABSTRACT

The arid coasts of the world lack natural sources of fresh water, where there is a high dependence on water desalination, a process of high energy consumption and normally fueled by fossil fuels. This is a reality lived mainly in isolated communities with low economic income.

The use of solar radiation as a source of energy for the desalination process via solar distillation seems a good alternative. This is due to the fact that solar distillation operates on relatively simple technologies and can be operated by unskilled labor.

Based on equations that express the basic heat and mass transfer relations in a solar distiller, a mathematical model was developed to estimate the amount of water produced by solar distillation, in addition to other parameters that characterize its operation. The calculations were made for a typical one-year period using a climatic file as a database. An annual production ranging from 0.51 to 0.56 m³ of distilled water per m² of solar catchment area was obtained.

Four proposals for the construction of solar distillers were analyzed, with the objective of making a study of their economic viability, for the reality of Cape Verde. Of the four proposals presented, all presented negative values of both NPV and IRR and presented payback period longer than the useful life of the equipment. Therefore, none of the solutions proved to be economically viable. The cost of construction ranges from 15 038.02 ECV to 20 040.77 ECV, the cost of water produced varies from ECV 2 199.38 to ECV 2 644.72, the payback period varies from 26 to 32 years, NPV ranges from -9 779.21 ECV to -15 535.98 ECV, and IRR ranges from -7% to -10%.

It was also estimated the amount of greenhouse gases (in CO₂e) that the use of the solar distillation process allows to save as an alternative to the reverse osmosis process, and an annual value of 28.6 kgCO₂e/m² was obtained.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

CCP	Coletor Solar Cilindro Parabólico
Cg	Congelamento
CP	Coletor Solar Plano
CTV	Coletor Solar de Tubo de Vácuo
CVM	Destilação por Compressão de Vapor Mecânico
CVT	Destilação por Compressão de Vapor Térmico
DM	Destilação por Membranas
DME	Destilação por Múltiplos Efeitos
DMS	Destilação por Múltiplos Estágios
DS	Destilação Solar
EAU	Emirados Árabes Unidos
ECV	Escudo cabo-verdiano
ED	Eletrodialise
EDI	Eletrodialise Inversa
EUA	Estados Unidos da América
FH	Formação de Hidratos
GEE	Gases de Efeito de Estufa
GWP	Global Warming Potential
H-D	Humidificação-Desumidificação
LS	Lagoa Solar
PIB	Produto Interno Bruto
PPM	Partes Por Milhão
PV	Painel Fotovoltaico
STD	Sais Totais Dissolvidos
TCO	Total Cost of Ownership
TI	Troca de Iões
TIR	Taxa Interna de Retorno
URSS	União das Repúblicas Socialistas Soviéticas
VAL	Valor Atual Líquido

Lista de Símbolos Gregos – Ordem alfabética

Termo	Designação	Unidade
α	Coeficiente de absorção	-
δ	Declinação	°
ε	Emissibilidade	-
η	Rendimento	-
λ	Comprimento de onda	μm
ρ	Massa volúmica	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
σ	Constante de Stefan - Boltzmann	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$
τ	Transmissibilidade	-
Φ	Latitude	°

Lista de Símbolos Latinos

Termo	Designação	Unidade
A	Área	m^2
C	Calor específico	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
D	Radiação difusa	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
E_{GEE}	Emissão de gases de efeito de estufa	$\text{kg CO}_2\text{e}$
G	Radiação global	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
H_0	Ângulo horário	°
h'_c	Coeficiente de transferência de calor por convecção entre bacia e o ar envolvente	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
h_{fg}	Calor latente de vaporização	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
HR	Humidade relativa	-
h_v	Coeficiente de transferência de calor por convecção entre a cobertura e o ar exterior	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
I	Irradiação	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
K_T	Índice de claridade	-
L	Radiação albedo	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
L_c	Comprimento característico	m
m_D	Massa de destilado	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$
p	Pressão do fluido	mmHg
P	Pressão atmosférica	Pa
$q_{c,b-c}$	Transferência de calor por convecção entre bacia e cobertura	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
$q_{c,c-a}$	Transferência de calor por convecção entre cobertura e o ar	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
q_e	Transferência de calor por evaporação	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
q_k	Transferência de calor por condução	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
$q_{r,b-c}$	Transferência de calor por radiação entre bacia e cobertura	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$

$q_{r,c-a}$	Transferência de calor por radiação entre cobertura e atmosfera	$W.m^{-2}$
S	Radiação direta	$W.m^{-2}$
S_0	Constante solar	$W.m^{-2}$
T_a	Temperatura do ar (Temperatura de bolbo seco)	K
T_b	Temperatura da água na bacia	K
T_c	Temperatura da cobertura	K
$T_{céu}$	Temperatura do céu	K
T_o	Temperatura de ponto de orvalho	K
V	Velocidade do ar	$m.s^{-1}$

GLOSSÁRIO DE TERMOS

Termo	Designação
Água potável	É a água de qualidade suficiente para se beber e preparar alimentos.
Bio-incrustação	Também designado de incrustação biológica, é o acúmulo de micro-organismos ou algas sobre as estruturas húmidas.
Calha	Elemento construtivo composto por um cano, cuja finalidade é recolher a água.
CO ₂ e	Quantidade de gases de efeito de estufa em termos equivalentes da quantidade de dióxido de carbono.
Coeficiente de absorção	É a capacidade de um material ou superfície em absorver energia radiante, que nela incide.
Coeficiente de reflexão	É a capacidade de um material ou superfície em refletir energia radiante, que nela incide.
Condução térmica	Transferência de energia térmica que geralmente ocorre em materiais sólidos, e é caracterizado pela propagação do calor pelo contacto entre as moléculas que constituem o corpo. Está relacionada com o transporte de energia em um meio devido ao gradiente de temperatura.
Convecção térmica	É a transferência de energia térmica entre uma superfície e um fluido em movimento sobre a superfície, devido ao gradiente de temperatura envolvido.
Corpo negro	Objeto hipotético que absorve toda a radiação eletromagnética que nele incide, irradiando essa energia na mesma taxa.
Destilação	Processo de separação misturas homogêneas que apresentam pelo menos um componente no estado líquido.
Emissibilidade	É a capacidade de um material ou superfície em emitir energia por radiação.
Energia radiante	Energia transmitida por ondas eletromagnéticas de um corpo a uma temperatura mais alta para outro corpo de temperatura mais baixa.
Humidade relativa	Quantidade de vapor de água presente no ar, da máxima quantidade de vapor de água que esse ar poderia conter à mesma temperatura, em percentagem (%).
Osmose	Processo na qual a água passa por uma membrana semipermeável de uma solução de baixa concentração para uma solução de alta concentração, ocasionado por diferenças na pressão osmótica.
Potencial de aquecimento global	Do inglês, <i>Global Warming Potential</i> , é uma medida de como uma determinada quantidade de gás de efeito de estufa contribui para o aquecimento global.

Potencial de hidrogénio (pH)	de Escala numérica adimensional utilizada para especificar a acidez ou basicidade de uma solução aquosa.
Radiação	É a propagação de energia de um ponto a outro, através de um meio participante, podendo ser classificada como energia em trânsito, e podendo ser interpretada como uma onda eletromagnética ou partícula.
Salmoura	Solução de água saturada de sal.
Solução salina	Mistura homogénea de água e sal.
Transmissibilidade	É a fração da energia radiante que é transmitida através da superfície.

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - ÓRBITA DA TERRA EM VOLTA DO SOL.	7
FIGURA 2 - FLUXOGRAMA GERAL DO PROCESSO DE DESSALINIZAÇÃO.....	11
FIGURA 3 - ESQUEMA DOS MÉTODOS DE DESSALINIZAÇÃO EXISTENTES DE ACORDO COM O TIPO DE ENERGIA UTILIZADA.	12
FIGURA 4 - ESQUEMA DOS MÉTODOS DE DESSALINIZAÇÃO DE ACORDO COM O MODO DE SEPARAÇÃO DA ÁGUA DO SAL.....	13
FIGURA 5 - PROCESSOS DE DESSALINIZAÇÃO ASSOCIADOS ÀS TECNOLOGIAS DE ENERGIA DE FONTES RENOVÁVEIS	15
FIGURA 6 - PROCESSOS DE DESSALINIZAÇÃO USADOS EM CONJUNTO COM ENERGIA DE FONTES RENOVÁVEIS	16
FIGURA 7 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UM DESTILADOR SOLAR.....	17
FIGURA 8 - ESQUEMA DE UM DESTILADOR SOLAR.....	18
FIGURA 9 - FENÓMENOS DE REFLEXÃO, ABSORÇÃO E TRANSMISSÃO DA RADIAÇÃO SOLAR, NUM DESTILADOR SOLAR.	20
FIGURA 10 - SISTEMAS DE DESTILAÇÃO SOLAR.....	27
FIGURA 11 - DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE DESTILADORES.....	29
FIGURA 12 - MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA NUM DESTILADOR SOLAR.	30
FIGURA 13 - MAPA DO HEMISFÉRIO CENTRADO EM CABO VERDE.....	39
FIGURA 14 - MAPEAMENTO DA RADIAÇÃO GLOBAL ANUAL EM CABO VERDE	40
FIGURA 15 - MAPEAMENTO DA RADIAÇÃO DIRETA ANUAL EM CABO VERDE	41
FIGURA 16 - MAPEAMENTO DA RADIAÇÃO DIFUSA ANUAL EM CABO VERDE	41
FIGURA 17 - EXEMPLO DE CONSTRUÇÃO PARA SOLUÇÃO 1.....	43
FIGURA 18 - EXEMPLO DE CONSTRUÇÃO PARA SOLUÇÃO 2.....	44
FIGURA 19 - ESQUEMA SIMPLIFICADO DOS MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA, NO DESTILADOR SOLAR	46
FIGURA 20 - FLUXOGRAMA DO PROCEDIMENTO DE CÁLCULO.	48
FIGURA 21 - VARIAÇÃO MENSAL DA SOMA DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE.....	49
FIGURA 22 - PRODUÇÃO DE ÁGUA DESTILADA PARA H_v VARIÁVEL E PARA H_v MÍNIMO.....	50
FIGURA 23 - VARIAÇÃO MÉDIA HORÁRIA DO RENDIMENTO DO DESTILADOR.	51
FIGURA 24 - VARIAÇÃO MÉDIA HORÁRIA DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR EVAPORAÇÃO, CONVECÇÃO E RADIAÇÃO NA BACIA.....	52
FIGURA 25 - VARIAÇÃO MÉDIA HORÁRIA DAS TEMPERATURAS DA BACIA E DA COBERTURA.	52
FIGURA 26 - FATURA DO ABASTECIMENTO DE ÁGUA VIA AUTOTANQUE, NA ILHA DE SANTIAGO.....	87
FIGURA 27 - TARIFAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA VIA REDE PÚBLICA, NA ILHA DE SANTIAGO.	88

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - VALORES DIÁRIOS MÉDIOS MENSAIS DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL, EM CABO VERDE.....	10
TABELA 2 - COMPARAÇÃO DOS DIFERENTES MÉTODOS DE DESSALINIZAÇÃO.....	14
TABELA 3 - AS OITO MAIORES INSTALAÇÕES DE DESSALINIZAÇÃO DO MUNDO	14
TABELA 4 - INSTALAÇÕES DE DESSALINIZAÇÃO ASSOCIADAS À ENERGIA SOLAR.	16
TABELA 5 - EFEITO DO ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DA RADIAÇÃO SOLAR NO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO, NA TRANSMISSIBILIDADE E NO COEFICIENTE REFLEXÃO DOS COMPONENTES DO DESTILADOR.	20
TABELA 6 - INSTALAÇÕES DE DESTILAÇÃO SOLAR.....	34
TABELA 7 - COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE RADIAÇÃO SOLAR CALCULADOS E DO FICHEIRO EPW.	49
TABELA 8 - COMPARAÇÃO DOS VALORES MENSAIS DE PRODUÇÃO, COM E SEM PROTEÇÃO CORTA VENTO.	50
TABELA 9 - VALORES MÁXIMOS E MÍNIMOS DAS TEMPERATURAS.	53
TABELA 10 - SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS E OS RESPECTIVOS CUSTOS DE CONSTRUÇÃO.	53
TABELA 11 - CUSTOS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA POTÁVEL.	53
TABELA 12 - VALORES CALCULADOS DO CUSTO TOTAL DE AQUISIÇÃO.	54
TABELA 13 - CUSTOS DE PRODUÇÃO DA ÁGUA.	55
TABELA 14 - VALORES CALCULADOS DO VAL E DA TIR.	56
TABELA 15 - VALORES CALCULADOS DO TEMPO DE AMORTIZAÇÃO.....	57
TABELA 16 - CONSUMO ENERGÉTICO.	58
TABELA 17 - EMISSÃO DE GEE POR M ³ DE ÁGUA PRODUZIDA.....	58
TABELA 18 - EMISSÃO DE GEE POR M ² DE DESTILADOR	59
TABELA 19 - INSTALAÇÕES DE DESTILAÇÃO SOLAR.....	76
TABELA 20 - COMPARAÇÃO DOS VALORES DE RADIAÇÃO SOLAR DIRETA, DIFUSA E ALBEDO.	86
TABELA 21 - COMPARAÇÃO VALORES DE RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL HORIZONTAL.	86
TABELA 22 - FLUXO DE CAIXA PARA A SOLUÇÃO 1.	89
TABELA 23 - FLUXO DE CAIXA PARA A SOLUÇÃO 2.	89
TABELA 24 - FLUXO DE CAIXA PARA A SOLUÇÃO 3.	90
TABELA 25 - FLUXO DE CAIXA PARA A SOLUÇÃO 4.	90

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Estrutura da Dissertação	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1	Energia solar	7
2.1.1	Geometria solar.....	7
2.1.2	Radiação solar	8
2.2	Dessalinização	10
2.2.1	Qualidade da água.....	10
2.2.2	Processos de dessalinização.....	11
2.2.3	Energia de fontes renováveis aplicadas à dessalinização.....	15
2.3	Destilação Solar.....	17
2.3.1	Contextualização histórica	18
2.3.2	Operação de um destilador solar	20
2.3.3	Componentes	22
2.3.3.1	Bacia.....	22
2.3.3.2	Cobertura	23
2.3.3.3	Isolamento térmico.....	24
2.3.3.4	Estrutura de apoio	25
2.3.3.5	Vedante.....	26
2.3.3.6	Canal de recolha do condensado e da chuva.....	26
2.3.3.7	Bomba de circulação, tubagem e acessórios	26
2.3.4	Classificação dos destiladores solares	27
2.3.5	Balanço energético num destilador solar.....	30
2.3.6	Instalações de destilação solar	34
2.3.7	Aspetos económicos.....	35
2.3.8	Vantagens e desvantagens da destilação solar	36
3	DESENVOLVIMENTO	39
3.1	Contextualização da realidade de Cabo Verde	39
3.1.1	Caracterização de Cabo Verde	39

3.1.2	Caracterização do recurso solar de Cabo Verde.....	40
3.1.3	Enquadramento energético de Cabo Verde.....	42
3.1.4	Soluções propostas.....	42
3.2	Cálculo da produtividade do destilador.....	45
3.2.1	Metodologia	45
3.2.2	Apresentação e análise dos resultados	49
3.3	Análise económica	53
3.3.1	Custo total de propriedade (TCO)	54
3.3.2	VAL e TIR.....	55
3.3.3	Período de retorno	56
3.4	Emissões de CO ₂ e.....	57
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	63
4.1	Conclusões	63
4.2	Proposta de trabalhos futuros.....	64
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO	67
6	ANEXOS.....	75
6.1	Instalações de destilação solar	76
6.2	Código VBA	77
6.3	Comparação valores radiação solar.....	77
6.4	Custos de abastecimento de água potável na ilha de Santiago	87
6.4.1	Fatura do abastecimento de água via autotanque	87
6.4.2	Tarifas abastecimento via rede pública.....	88
6.5	Fluxo de caixa para o cálculo do VAL e da TIR	89

1. INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

A energia é essencial para a sobrevivência de qualquer ser vivo. No decorrer da história da humanidade sempre existiu a necessidade de procurar fontes de energia que pudessem ser exploradas em benefício da civilização. Com desenvolvimento científico, as áreas da engenharia especializaram-se na criação de equipamentos que pudessem transformar a energia de acordo com as necessidades do homem.

São várias as fontes de energia disponíveis, podendo ser divididas em dois grandes grupos: as de fontes renováveis; e as de fonte não renováveis. As fontes de energia renováveis são aquelas em que a sua utilização e uso é renovável, como é o caso da energia eólica e solar. Por outro lado, as fontes de energias não renováveis têm recursos teoricamente limitados, como é o caso dos combustíveis fósseis. A utilização dos combustíveis fósseis tem consequências associadas, através da libertação de gases de efeito de estufa para a atmosfera, contribuindo para o fenómeno conhecido como aquecimento global, trazendo graves consequências ambientais, sendo uma dessas consequências as alterações climáticas. Mas para além das consequências ambientais, a utilização dos combustíveis fósseis também traz consequências económicas, isso porque com o tempo a disponibilidade desse recurso tende a diminuir, refletindo na economia mundial. A consciencialização desses impactos (ambientais, económicos e sociais) tem levado a um aumento do interesse em formas alternativas e sustentáveis de melhorar a qualidade de vida no planeta.

Historicamente e atualmente, a água e a energia foram e ainda são dois dos elementos fundamentais mais críticos e interdependentes de importância vital que determinam e impulsionam a economia e, conseqüentemente, a cultura e modo de vida numa sociedade [1].

A água é um bem essencial à vida nos diferentes ecossistemas, destacando-se de forma especial dos outros recursos. Mais de dois terços (66%) da superfície terrestre é coberta por água. A maior parte da água disponível está presente como água salgada (97%), sendo que o resto é água doce. No entanto, a maior parte da água doce (79%) está presente na fase sólida, 20% em forma de água subterrânea e 1% como água superficial, de fácil acesso [2].

As costas áridas do mundo, que totalizam cerca de 34000 quilómetros costeiros, e consistem principalmente nas regiões do Oriente Médio e o Norte de África, bem como em muitas localidades remotas e/ou regiões áridas que abrigam muitas comunidades pequenas ou médias. Essas regiões, carecem totalmente de água ou possuem poços de água salobra. Ao mesmo tempo, estas regiões têm altos valores de radiação solar que, se aproveitada, pode fornecer a energia necessária para a conversão de água salgada

em água potável ou água para uso doméstico. O fácil acesso à água doce pode proporcionar um melhor padrão de vida e ajudar no desenvolvimento da agricultura e na exploração de outros recursos naturais [1].

Neste contexto, este trabalho visa o estudo do processo de dessalinização da água por destilação solar, em Cabo Verde, isto porque é um processo que tem como base energia de fonte renovável, sendo também uma tecnologia de simples operação e manutenção.

1.2 Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo principal o estudo do processo de dessalinização por destilação solar, tendo como objetivos complementares:

- O estudo da energia solar, a fonte energética do processo de destilação solar;
- O estudo dos processos de dessalinização, efetuando a comparação destes com o processo de destilação solar;
- O desenvolvimento de um modelo matemático, que através de simulação computacional determina os vários parâmetros que caracterizam a operação de um destilador solar, para uma dada localização;
- O estudo da viabilidade económica de quatro propostas de construção de destiladores solares, para o abastecimento de comunidades sem acesso à rede de água potável na ilha de Santiago, Cabo Verde;
- A análise do sistema ao nível de emissões de gases de efeito de estufa.

1.3 Estrutura da Dissertação

A dissertação encontra-se dividida em seis capítulos.

No primeiro capítulo, o atual, é feita uma introdução aos temas a serem abordados e os objetivos pretendidos com a realização da dissertação, bem como a estruturação do trabalho.

No segundo capítulo é feita uma abordagem teórica sobre as questões relevantes para a elaboração do terceiro capítulo, neste caso, a energia solar, os processos de dessalinização e a tecnologia de dessalinização por destilação solar.

No terceiro capítulo é feita uma abordagem prática, nomeadamente a contextualização do caso de estudo, as metodologias utilizadas e a análise dos resultados obtidos, podendo ser dividido em duas partes:

- Simulação computacional com o objetivo analisar o desempenho de um destilador solar para o clima de Cabo Verde;
- Análise económica de quatro propostas de construção de destiladores solares, para o mercado de Cabo Verde.

No quarto capítulo são apresentadas as conclusões retiradas do trabalho realizado e dos resultados obtidos, sendo também feitas sugestões para trabalhos futuros.

No quinto capítulo são apresentadas as bibliografias e outras fontes de informação que serviram de base para a realização da dissertação.

No sexto capítulo são apresentados os anexos, que complementam as informações apresentadas no decorrer da dissertação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Energia solar

2.1.1 Geometria solar

A Terra movimenta-se a volta do Sol numa órbita elíptica, completando uma revolução por ano. Além disso, a Terra gira em torno do seu eixo polar, completando uma revolução por dia. O eixo polar da Terra encontra-se inclinado num ângulo de $23,45^\circ$ em relação ao plano normal da sua órbita elíptica. Como pode ser visto na Figura 1, essas rotações e inclinações entre o eixo polar e elíptico são responsáveis pelos ciclos dia/noite e pelas estações do ano [3].

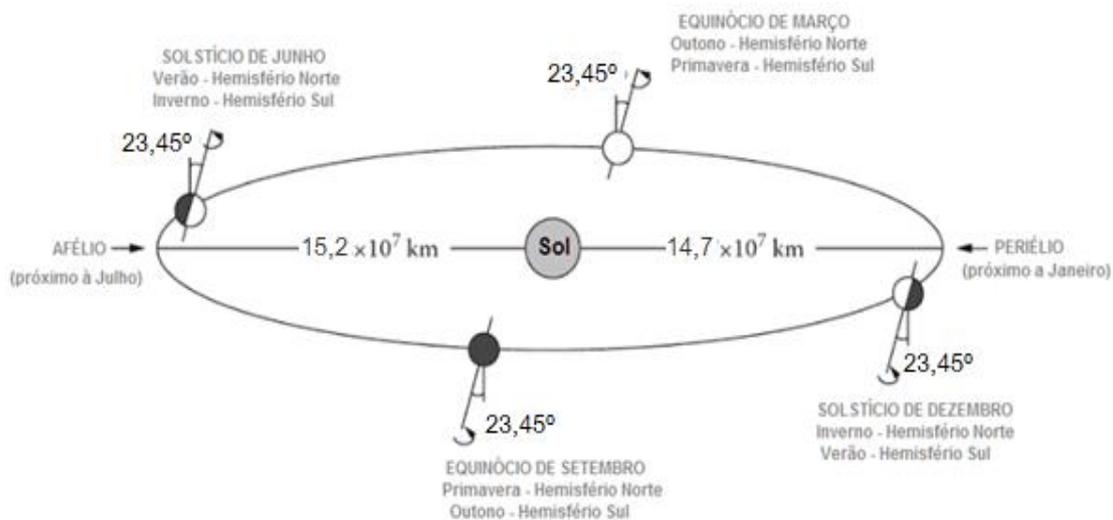


Figura 1 - Órbita da Terra em volta do Sol [4] – adaptado.

De acordo com o sistema heliocêntrico o Sol ocupa o centro do nosso sistema planetário, onde todos os corpos giram ao seu redor. No entanto, para o estudo subsequente irá considerar-se o nosso sistema planetário como geocêntrico, onde a Terra ocupa uma posição fixa e o Sol gira à sua volta. A declinação do Sol (δ) pode ser determinada para qualquer dia do ano, através da Equação 1, em graus ($^\circ$) [5]:

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left(360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad (1)$$

Em que n representa o dia do ano, sendo que $n=1$ refere-se ao dia 1 de janeiro, $n=2$ dia 2 de janeiro e assim sucessivamente, para um ano bissexto ($1 \leq n \leq 366$).

O valor do ângulo horário (H_0), pode ser calculado através da Equação 2, em graus ($^\circ$).

$$H_0 = \arccos[-\operatorname{tg}(\delta) \operatorname{tg}(\Phi)] \quad (2)$$

Onde:

Φ – Latitude ($^\circ$);

δ – Declinação ($^\circ$).

2.1.2 Radiação solar

O Sol tal como outras estrelas, é uma esfera que emite energia radiante em forma de radiação eletromagnética, sendo que cerca de metade dessa energia é emitida como luz visível e o resto como radiação infravermelha e como radiação ultravioleta. A radiação global (G) é a potência de radiação que incide na superfície da Terra, em W/m^2 , sendo composto pela radiação direta (S) e pela radiação difusa (D). A radiação direta é a parcela da radiação global que atinge a superfície da Terra sem ser difundida pela atmosfera. A radiação difusa é a parcela da radiação global que atinge a superfície da Terra após a sua difusão pela atmosfera. A radiação refletida (também denominado de albedo) (L), é a parcela da radiação solar que resulta da reflexão por edifícios, pela vegetação e pelo solo, da radiação direta e difusa. Sendo assim, a radiação global emitida pelo Sol é dada pela Equação 3.

$$G = S + D \quad (3)$$

Em que os valores de G , S e D podem ser instantâneos, horários médios, diários ou diários médios mensais.

A irradiação de uma superfície (I), é a taxa em que a potência de radiação que incide numa superfície, por unidade de área (W/m^2). A irradiação de uma superfície pode ser calculada através da Equação 4.

$$I = S + D + L \quad (4)$$

Em que os valores de I , S , D e L podem ser instantâneos, horários médios, diários ou diários médios mensais.

A constante solar (S_0), é definida como a potência térmica emitida pelo Sol por unidade de área perpendicular aos raios solares e que chegam ao exterior da atmosfera terrestre. O valor da constante solar pode ser assumido como constante, com o valor de 1367 W/m^2 [6]. No entanto, o seu valor varia com a posição do Sol em relação à Terra, podendo ser calculado em função do dia do ano, através da Equação 5 [7]:

$$S_n = S_0 \left(1 + 0,033 \cos \frac{360 n}{365} \right) \quad (5)$$

Em que n representa o dia do ano, sendo que $n=1$ refere-se ao dia 1 de janeiro, $n=2$ dia 2 de janeiro e assim sucessivamente.

A radiação média diária que incide numa superfície horizontal (tangente à superfície terrestre) situada fora da atmosfera terrestre (S_{oh}^d), pode ser determinada em função ao dia do ano, através da Equação 6, em W/m^2 [6]:

$$S_{oh}^d = \frac{24 \cdot 3600 \cdot S_0}{\pi} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \left[\cos(\Phi) \cos(\delta) \sin(H_0) + \frac{2\pi \left(\frac{H_0\pi}{180} \right)}{360} \sin(\Phi) \sin(\delta) \right] \quad (6)$$

Em que n representa o dia do ano e sendo que os valores de Φ , δ e H_0 são dados em radianos e o valor de S_0 , em J/m^2 . O valor diário médio mensal da radiação extraterrestre incidente numa superfície horizontal (S_{oh}^{dm}), é obtido através do cálculo das médias aritméticas dos valores médios diários da radiação solar (S_{oh}^d).

O índice de claridade permite avaliar a permeabilidade da atmosfera à radiação solar, podendo ser definido como o quociente entre a radiação global que atinge a superfície da Terra e a radiação que atinge a superfície exterior da atmosfera [8]. Sendo assim, o índice de claridade pode ser calculado através de Equação 7.

$$K_T = \frac{G_h}{S_{oh}} \quad (7)$$

Os valores de G , S_{oh}^d e K_T podem ser instantâneos, horários médios, diários ou diários médios mensais.

A radiação solar global diária média mensal, incidente numa superfície pousada na Terra pode ser determinada através de Equação 8, em J/m^2 :

$$G_h^{dm} = K_T^{dm} * S_{oh}^{dm} \quad (8)$$

Na Tabela 1 estão apresentados os valores diários médios mensais da radiação solar incidente em Cabo Verde ($\Phi=15^\circ$), bem como os valores da declinação do sol, do ângulo horário, da radiação solar extraterrestre e do índice de claridade [9].

Tabela 1 - Valores diários médios mensais da radiação solar global, em Cabo Verde.

Mês	Declinação (δ)	H_0	S_{oh}^{dm}	Índice de claridade (K_T)	G^{dm_h}	G^{dm_h}
	Radianos	Graus	$J.m^{-2}.dia^{-1}$	-	$J.m^{-2}.dia^{-1}$	$kWh.m^{-2}$
Janeiro	-0,364	84,18	29 613 415	0,80	23 690 732	204
Fevereiro	-0,233	86,38	32 627 297	0,83	27 080 657	233
Março	-0,042	89,36	35 920 273	0,90	32 328 246	278
Abril	0,166	92,56	38 012 785	0,92	34 971 763	301
Mai	0,328	95,21	38 508 076	0,99	38 122 995	328
Junho	0,403	96,51	38 346 554	0,90	34 511 899	297
Julho	0,368	95,90	38 278 992	0,80	30 623 193	264
Agosto	0,232	93,62	37 972 315	0,80	30 377 852	262
Setembro	0,035	90,53	36 461 101	0,79	28 804 270	248
Outubro	-0,172	87,34	33 462 707	0,80	26 770 166	231
Novembro	-0,332	84,72	30 193 534	0,79	23 852 892	205
Dezembro	-0,403	83,48	28 549 979	0,79	22 554 483	194

Os valores da declinação solar (δ), do ângulo horário (H_0), da radiação solar extraterrestre (S_{oh}) e da radiação solar incidente na superfície da Terra (G_h), foram calculados recorrendo às expressões 1, 2, 6 e 8, respetivamente.

2.2 Dessalinização

A dessalinização refere-se a vários processos utilizados para a separação da água dos sais e outros minerais. É um método muito utilizado em regiões onde a água doce é escassa ou de difícil acesso.

2.2.1 Qualidade da água

A qualidade da água doce é fundamental para muitas das atividades dos seres humanos, que englobam: o consumo e o abastecimento público; a agricultura e aquacultura; a indústria; a geração de energia elétrica; etc. No entanto, a qualidade necessária para cada tipo de aplicação tem critérios de avaliação diferentes. A qualidade da água não se refere apenas ao seu estado de pureza, mas também às suas características físicas, químicas e biológicas. A água pode conter muitos dos organismos vivos que fazem parte dos ciclos geoquímicos dos ecossistemas aquáticos como bactérias, parasitas, fungos ou vírus, presentes em fontes naturais, que podem ser prejudiciais para a saúde do consumidor [10]. Portanto, é necessário garantir que a água a ser consumida cumpre os requisitos mínimos de qualidade, de acordo com a sua

aplicação. A água pode ser classificada segundo o grau de salinidade, que pode ser dividido em três tipos distintos [11]: a água salgada, a água doce e a água salobra.

- **Água salgada** é a que apresenta alta concentração de sal, possuindo salinidade igual ou superior a 30%. É a água mais abundante na Terra, representando cerca de 97% do total;
- **Água doce** é a que apresenta salinidade igual ou inferior a 0,5%, portanto, pouca quantidade de sal. É a água própria para consumo, seja para atividades domésticas como beber, cozinhar, tomar banho, ou para outras atividades do dia-a-dia, como indústrias, agropecuária, etc.;
- **Água salobra** é a que apresenta nível de salinidade intermediário (0,5% a 30%) entre a da água doce e a da água salgada.

2.2.2 Processos de dessalinização

A dessalinização separa a solução (água salina) em dois fluxos: o fluxo de água doce, contendo baixa concentração de sais dissolvidos; e o fluxo de salmoura, água saturada em sal. O processo requer alguma forma de energia e utiliza diferentes tipos de tecnologias para efetuar essa separação. Na Figura 2 é apresentado um fluxograma geral do princípio de funcionamento do processo de dessalinização.

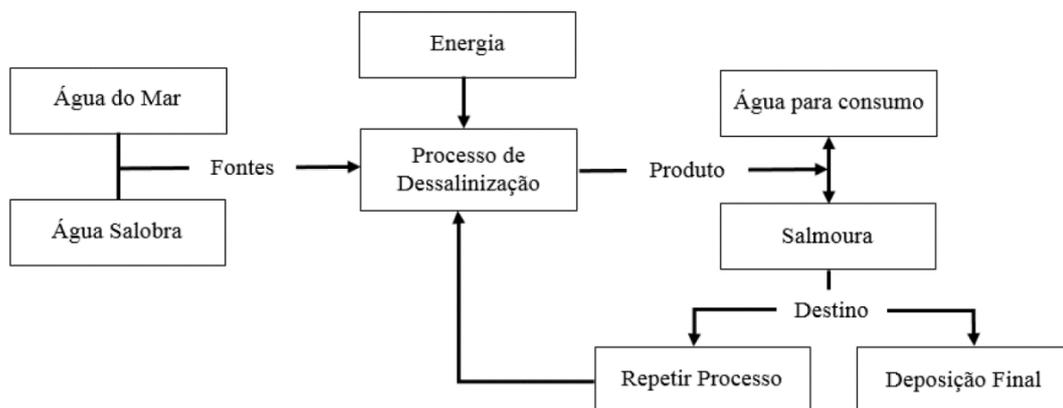


Figura 2 - Fluxograma geral do processo de dessalinização [12] – adaptado.

A dessalinização da água pode ser feita recorrendo a diferentes processos, sendo que os mais utilizados são [13]:

- Osmose Inversa (OI);
- Destilação por Múltiplos Estágios (DMS);
- Destilação por Múltiplos Efeitos (DME);
- Destilação por Compressão de Vapor Térmico (CVT);
- Destilação por Compressão de Vapor Mecânico (CVM);
- Eletrodialise (ED) / Eletrodialise Inversa (EDI);

- Troca de Iões (TI);
- Destilação por Membranas (DM);
- Humidificação-Desumidificação (H-D);
- Congelamento (Cg);
- Formação de Hidratos (FH);
- Destilação Solar (DS).

Os métodos de dessalinização podem ser classificados segundo a fonte de energia utilizada ou segundo o processo de separação da água do sal. De acordo com a fonte de energia utilizada, os processos de dessalinização podem ser classificados como: térmicos; ou não térmicos. Na Figura 3 é apresentado um esquema referente aos métodos de dessalinização existentes, segundo a fonte de energia utilizada.

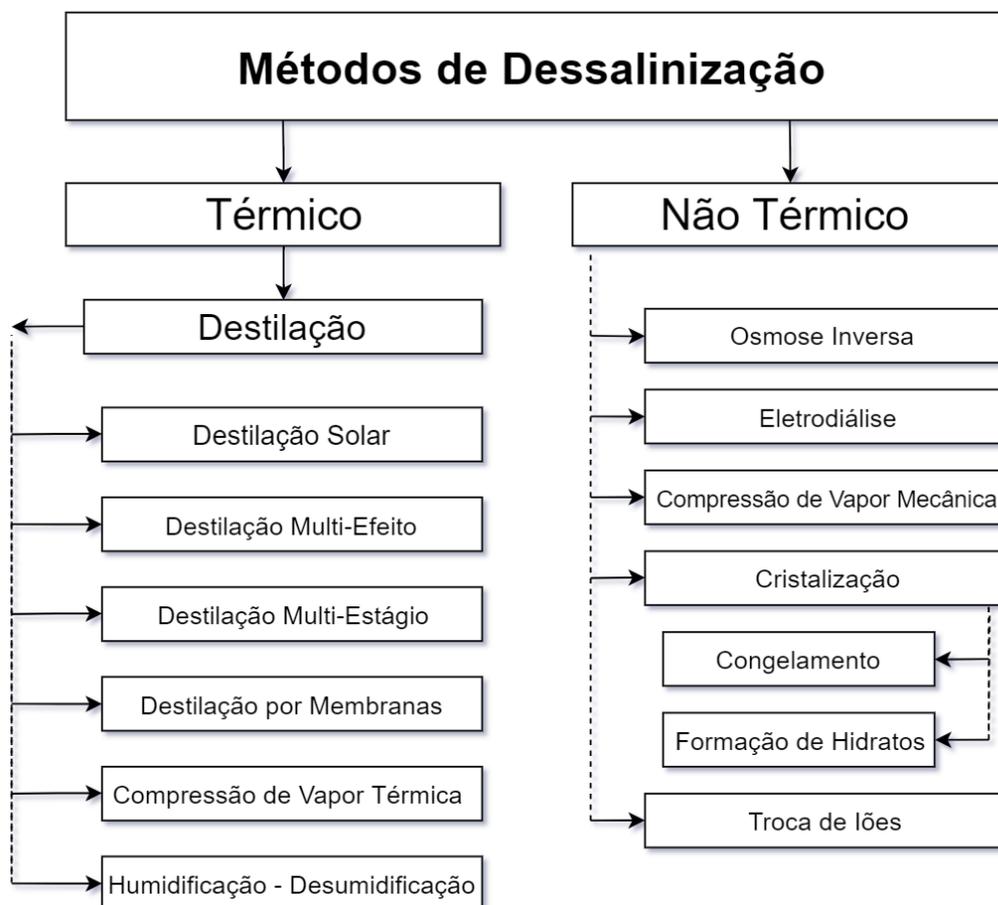


Figura 3 - Esquema dos métodos de dessalinização existentes de acordo com o tipo de energia utilizada [13] – adaptado.

De acordo com o método de separação da água do sal, os processos de dessalinização podem ser classificados como: por separação da água; por separação do sal. Na Figura 4 é apresentado um esquema referente aos métodos de dessalinização existentes, segundo o método de separação da água do sal.

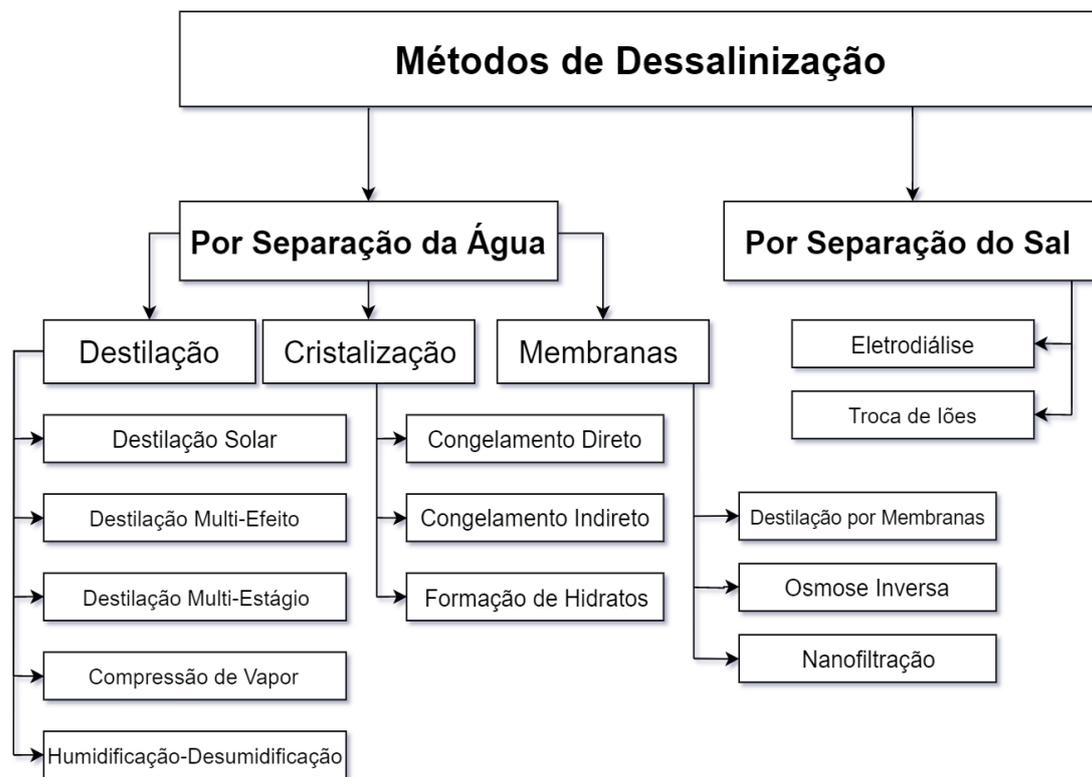


Figura 4 - Esquema dos métodos de dessalinização de acordo com o modo de separação da água do sal [13] – adaptado.

Dos métodos acima apresentados, OI, DMS, DME, CV e ED são processos tecnologicamente maduros. A maioria dos seus problemas operacionais já foram resolvidos e os esforços hoje em dia têm sido na redução do consumo de energia, no aumento da eficiência energética, na construção de unidades mais compactas, na redução do custo de instalação e, conseqüentemente, na redução do custo final da água produzida. Cada processo de dessalinização apresenta as suas vantagens e desvantagens, sendo que a melhor escolha depende de vários fatores, a serem considerados. Na Tabela 2 estão apresentados os diferentes métodos de dessalinização, e os aspectos que os caracterizam/diferenciam.

Tabela 2 - Comparação dos diferentes métodos de dessalinização. [14] – adaptado.

Propriedades	Processo de dessalinização						
	DMS	DME	CVM	CVT	OI ^(a)	OI ^(b)	ED
Capacidade (m ³ /dia)	50000 - 70000	5000 - 15000	100 - 3000	10000 - 30000	< 128000	< 98000	2 - 145000
Consumo energia elétrica (kWh/m ³)	2,5 - 5	2 - 2,5	7 - 12	1,6 - 1,8	4 - 6	1,5 - 2,5	2,6 - 5,5
Consumo de energia térmica (MJ/m ³)	190 - 282	145 - 230	-	227	-	-	-
Energia térmica equivalente a energia elétrica (kWh/m ³)	15,8 - 23,5	12,2 - 19,1	-	14,5	-	-	-
Consumo total de eletricidade (kWh/m ³)	19,6 - 27,3	14,5 - 21,4	7 - 12	16,3	4 - 6	1,5 - 2,5	2,6 - 5,5
Grau de salinidade da água produzida (ppm)	≈ 10	≈ 10	≈ 10	≈ 10	400 - 500	200 - 500	150 - 500

(a) água do mar

(b) água salobra

Na Tabela 3 estão apresentadas as oito maiores instalações de dessalinização no mundo, a nível de capacidade produção, e os processos através da qual operam.

Tabela 3 - As oito maiores instalações de dessalinização do mundo [15] – adaptado.

Pais	Localização	Capacidade (m ³ /dia)	Início operação (Ano)	Processo
Arábia Saudita	Ras Al-Khair	1025000	2013	DMS/OI
	Shuaiba	880000	2007	DMS
	Al Jubail	800000	2007	DME
Emirados Árabes Unidos	Jebel Ali	636440	2007	DMS
	Jebel Ali	600000	2011	DMS
Israel	Sorek	627000	2015	OI
Kuwait	Al Zour Norte	567000	2007	DME
Argélia	Magtaa	500000	2009	OI

2.2.3 Energia de fontes renováveis aplicadas à dessalinização

Energia de fontes renováveis associadas à dessalinização oferecem uma perspectiva promissora para suprir as necessidades fundamentais de energia e água potável em regiões remotas onde a conexão à rede pública não é viável e onde a escassez de água doce é severa. Sistemas autónomos para o fornecimento de eletricidade em locais isolados são tecnologias comprovadas, e a correspondência correta entre estes e os sistemas de dessalinização foi reconhecida como sendo fundamental para que haja o fornecimento de energia e produção de água doce a um custo razoável [16]. A seleção da tecnologia adequada, associada a fontes de energia renovável para a dessalinização depende de vários fatores como: a dimensão da instalação; o grau de salinidade da água a processar; a localização da instalação; a disponibilidade de eletricidade na rede; a infraestrutura técnica; o tipo e potencial do recurso local da fonte de energia renovável. Na Figura 5 apresenta-se um esquema referente aos processos de dessalinização utilizadas em associação com energia de fontes renováveis.

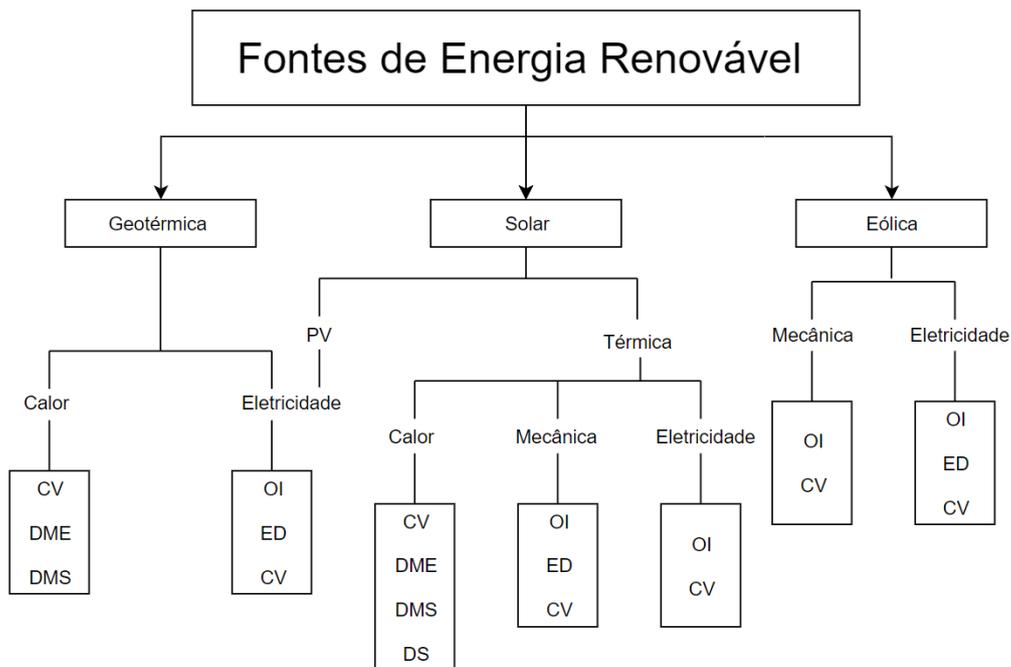


Figura 5 - Processos de dessalinização associados às tecnologias de energia de fontes renováveis [17] – adaptado.

Entre as várias combinações possíveis entre os processos de dessalinização e as tecnologias alimentadas a energia de fonte renovável, algumas parecem ser mais promissoras em termos de viabilidade económica e tecnológica do que outras [16]. No entanto, a sua aplicabilidade depende fortemente da disponibilidade local de recursos energéticos renováveis e da qualidade final da água a ser dessalinizada. Além disso, algumas combinações são mais adequadas para aplicações de grande escala, enquanto outras são mais adequadas para aplicações de pequena escala. Na Figura 6 apresenta-

se o gráfico referente aos métodos de dessalinização mais utilizados, associados às tecnologias de energia de fontes renováveis. A dessalinização por osmose inversa é, por uma grande margem o processo mais utilizado, seguido dos processos de destilação por múltiplos efeitos e múltiplos estágios, representando em conjunto mais de 80% dos processos de dessalinização.

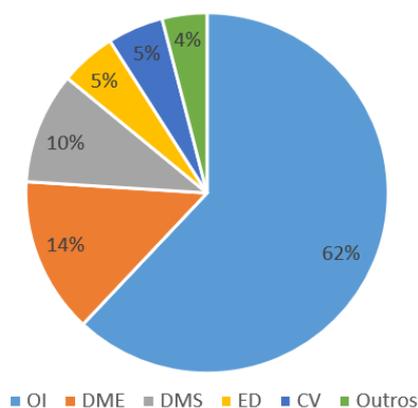


Figura 6 - Processos de dessalinização usados em conjunto com energia de fontes renováveis [18].

Na Tabela 4 estão apresentadas algumas instalações de dessalinização associadas à energia solar.

Tabela 4 - Instalações de dessalinização associadas à energia solar.

Local	Capacidade (m³/dia)	Processo	Apoio	Referência
Abu Dhabi (E.A.U.)	120	DME-18	CTV	[19]
Al Azhar (Gaza)	0,2	DMS-4	CP + PV	[20]
Al-Ain (E.A.U.)	500	DME-55 + DMS-75	CCP	[21]
Almeria (Espanha)	72	DME-14	CCP	[15]
Ancona (Itália)	30	DME + CVT	LS	[22]
Canárias (Espanha)	10	DMS	CP	[23]
Caraíbas Francesas	40	DME-14	CTV	[24]
El Paso (E.U.A)	19	DMS	LS	[22]
Golfo Árábico	6000	DME	CCP	[25]
Hzag (Tunísia)	0,1 - 0,35	-	CP	[26]
Margarita de Savoya (Itália)	55	DMS	LS	[22]
Kuwait	100	DMS	CCP	[25]
La Paz (México)	10	DMS-10	CP + CCP	[27]
Lampedusa (Itália)	0,3	DMS	CP	[28]
Safat (Kuwait)	10	DMS-10	CP	[26]
Takami (Japão)	16	DME-16	CP	[25]

PV – Painel fotovoltaico

CP – Coletor solar plano

CTV – Coletor solar de tubo de vácuo

CCP – Coletor solar cilindro parabólico

LS – Lagoa solar

2.3 Destilação Solar

A destilação solar é um processo de dessalinização que usa a radiação solar para promover a evaporação da água. A radiação incidente na superfície do destilador é convertida em energia térmica, provocando a evaporação da água da solução salina contida no seu interior. O vapor de água gerado (em condições de saturação) eleva-se, e ao entrar em contacto com a parte interna da superfície da cobertura, que está a uma temperatura inferior, condensa. A cobertura é inclinada de maneira que o condensado escorra por gravidade para a extremidade inferior da cobertura onde existe um canal de recolha do condensado. A Figura 7 mostra o esquema do princípio de funcionamento de um destilador solar.

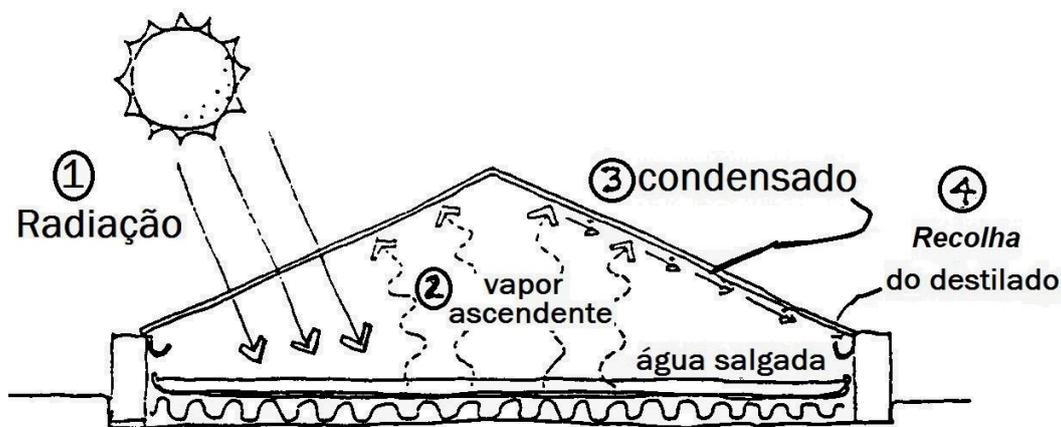


Figura 7 - Princípio de funcionamento de um destilador solar. [29] – adaptado.

A destilação solar apresenta uma alternativa promissora para a dessalinização de água salgada, podendo suprir parcialmente as necessidades da humanidade em produzir água fresca, com recurso a tecnologias relativamente simples, podendo ser operado por indivíduos não qualificados, necessitando de pouca manutenção não apresentando, portanto, muitos problemas de operação. A destilação solar é classificada como um processo de baixa capacidade, sendo vista como o processo de dessalinização mais apropriado para regiões áridas e remotas, com elevados valores de insolação. Devido à sua baixa eficiência térmica a destilação solar é um processo que necessita maior área de instalação do que outros processos de dessalinização. No entanto, o desenvolvimento das tecnologias de destilação solar já demonstrou a sua adequabilidade para os processos de dessalinização quando as condições climáticas são favoráveis e a procura de água fresca não é muito elevada ($< 200 \text{ m}^3/\text{dia}$) [30].

Como pode ser observado na Figura 8, um destilador solar convencional é constituído por:

- Bacia;
- Revestimento seletivo;

- Cobertura transparente;
- Calha de recolha do condensado;
- Estrutura de apoio;
- Isolamento térmico;
- Vedante/adensivo;
- Tubagem.

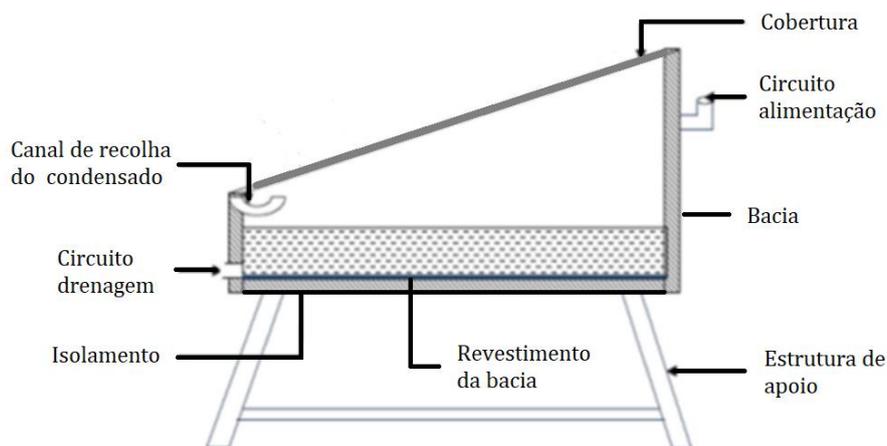


Figura 8 - Esquema de um destilador solar. [31] – adaptado.

2.3.1 Contextualização histórica

A separação do sal da água é um processo muito antigo, quando o sal era um bem precioso. A necessidade de água doce em alto mar durante as explorações marítimas, levou ao desenvolvimento de processos de dessalinização da água do mar. Relatos de Richard Hawkins (1662), referem que, durante as suas viagens pelos mares do sul conseguiu produzir água fresca a bordo por meio de destilação [32].

Em 1872 foi construída a primeira grande instalação de destilação solar, em Las Salinas, Chile [33]. A instalação foi construída com o objetivo fornecer água potável para os trabalhadores de uma mina de salitre e uma mina de prata, sendo que a solução a destilar foram os efluentes da mina de salitre. A instalação consistia em 64 compartimentos (ou baías) com uma área total de cerca de 4459 m², produzindo cerca de 14,76 m³ de água doce por dia. A instalação esteve em operação durante cerca de 40 anos, até o encerramento das minas.

Até à Segunda Guerra Mundial existem poucas referências sobre desenvolvimentos na área, tal como o trabalho feito no desenvolvimento de um destilador solar nos EUA [34] e algumas pesquisas realizadas na URSS [35] [36].

Durante os anos 30, a seca na Califórnia despertou novo interesse na dessalinização de água salina, e alguns projetos foram iniciados, mas a economia (em depressão) na época não permitiu a continuação das pesquisas ou aplicações.

Com o início da Segunda Guerra Mundial o interesse cresceu, quando soldados das tropas aliadas sofreram de escassez de água potável enquanto estacionados no norte da África, nas ilhas do Oceano Pacífico e em outras regiões isoladas. Já nos anos 40, uma equipa do Massachusetts Institute of Technology (MIT) iniciou experiências com destiladores solares [37]. Ao mesmo tempo o Comité Nacional de Defesa da Pesquisa (NRDC) dos EUA financiou pesquisas com o objetivo de desenvolver destiladores solares para necessidades militares no mar. Estes dispositivos projetados para flutuar na água, foram amplamente utilizados pela marinha dos EUA [38] [39] [40]. Foram feitas pesquisas e testes de várias configurações de destiladores solares, com cobertura vidro e de múltiplos efeitos [41] [42] [43].

Nos EUA, após a Segunda Guerra Mundial, com a explosão demográfica da população urbana e o enorme crescimento da indústria, vários projetos de pesquisa e desenvolvimento foram financiados com o objetivo de encontrar a solução para o problema de escassez da água, sendo que foram construídas cinco instalações de demonstração. Entre essas instalações havia uma de destilação solar, em Daytona Beach, onde foram testadas varias tipologias e configurações de destiladores solares [44] [45] [46].

Na Austrália, a *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation* (CSIRO), em Melbourne, realizou vários estudos sobre destilação solar. Em 1963, foi desenvolvido um protótipo, com cobertura de vidro e revestido com folha de polietileno preta. Com base nesse protótipo foram construídas instalações de destilação solar no deserto australiano, fornecendo água para pessoas e animais. A maior dessas instalações de destilação solar foi instalada em Coober Pedy [47].

Na URSS foram feitos estudos e experiências com destiladores solares como, por exemplo, em Asgabate (Turquemenistão), foi construída uma instalação de destilação solar para fornecer água fresca para ovelhas. A instalação foi alimentada com água salobra de poços, em que um gerador fotovoltaico experimental fornecia energia elétrica para bombear a água para os destiladores [48] [49] [50] [51].

Entre os anos 1965 e 1970, foram construídas instalações de destilação solar nas ilhas gregas, com o objetivo de fornecer água doce a pequenas comunidades [25] [52] [53] [54].

No entanto, hoje em dia a maioria das instalações acima referenciadas não se encontram em operação. Muitas pesquisas estão sendo realizadas sobre destiladores solares, mas nenhuma instalação de destilação solar de grande capacidade foi construída nos últimos anos. Por outro lado, uma atividade considerável começou na área de energia renovável associada a unidades de dessalinização convencionais de pequena capacidade para fornecer água potável às pequenas comunidades, especialmente durante o verão. Estas são principalmente conectadas a instalações de dessalinização por osmose inversa com capacidades acima de 1,0 m³/dia. A maioria destas instalações de tamanho piloto são para fins experimentais.

2.3.2 Operação de um destilador solar

Um destilador solar consiste essencialmente numa bacia que contém no seu interior a solução a destilar (água salina), sendo que o núcleo da operação do destilador é o espaço entre a bacia e a cobertura. A radiação solar, ao incidir na superfície da cobertura sofre os efeitos de reflexão, absorção e transmissão. Depois de refletida e absorvida pela cobertura, a parcela restante da radiação solar é transmitida através da cobertura, para a água, sofrendo novamente os efeitos de reflexão, absorção e transmissão, pela camada de água e, reflexão e absorção pela superfície seletiva do fundo da bacia. Na Figura 9 é apresentado um esquema dos fenómenos de absorção, reflexão e transmissão da radiação solar, num destilador solar.

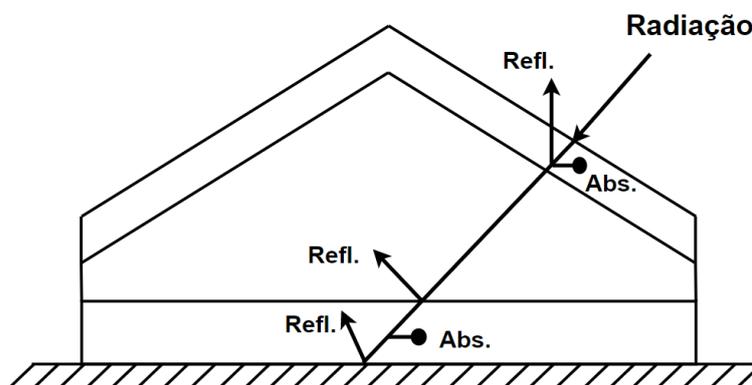


Figura 9 - Fenómenos de reflexão, absorção e transmissão da radiação solar, num destilador solar. [5] - adaptado.

Como pode ser visto na Tabela 5, o ângulo de incidência da radiação solar na cobertura tem influência na quantidade de radiação solar que entra no destilador, sendo que quanto mais perpendicular à superfície, menor a transmissibilidade e maior é o coeficiente de reflexão.

Tabela 5 - Efeito do ângulo de incidência da radiação solar no coeficiente de absorção, na transmissibilidade e no coeficiente de reflexão dos componentes do destilador [55]- adaptado.

Ângulo de Incidência θ	0	30	45	60
Cobertura				
α – Coeficiente de absorção	5%	5%	5%	5%
τ - Transmissibilidade	90%	90%	89%	85%
ρ – Coeficiente de reflexão	5%	5%	6%	10%
Água				
α – Coeficiente de absorção	30%	30%	30%	30%
τ - Transmissibilidade	68%	68%	67%	64%
ρ – Coeficiente de reflexão	2%	2%	3%	6%
Bacia				
α – Coeficiente de absorção	95%	95%	95%	95%
τ - Transmissibilidade	0%	0%	0%	0%
ρ – Coeficiente de reflexão	5%	5%	5%	5%

Após a absorção da radiação solar pela água e pelo fundo da bacia, parte da energia é transferida para a cobertura por radiação, convecção e transferência simultânea de calor e massa devido à evaporação da água.

A quantidade de energia térmica que chega à cobertura proveniente da água, juntamente com a porção de energia solar que é absorvida pela cobertura, é dissipada para a atmosfera por convecção com o ar circundante e por radiação com o céu.

No entanto, também ocorre a transferência de calor para o ambiente via condução térmica, através do fundo e das paredes da bacia, que são perdas indesejáveis. De maneira a minimizar essas perdas, o destilador é isolado termicamente. Estudos efetuados sobre as perdas por condução num destilador solar demonstraram que existe aumento na eficiência do equipamento se este estiver isolado [56].

Devido à evaporação da água, a solução contida na bacia torna-se cada vez mais saturada em sal (o concentrado), sendo necessário efetuar a drenagem do mesmo de maneira evitar a sua cristalização.

Com o objetivo de maximizar a produtividade do destilador solar, os processos de transferência de calor e massa da bacia para a cobertura, e da cobertura para o exterior devem ser otimizados. A variação destes processos de transferência de calor depende de vários fatores como [6]:

- A variação da intensidade de radiação solar;
- A variação da temperatura e da humidade ao longo do dia;
- A latitude e a longitude do local;
- A velocidade do ar incidente na superfície do destilador;
- A espessura da cobertura;
- A orientação e a inclinação da cobertura;
- A profundidade da água na bacia;
- As características dos materiais constituintes do destilador.

Um destilador solar pode operar em dois regimes de produção: produção contínua; ou produção em lotes. No modo de operação por lotes, a água salgada é introduzida no destilador todas as manhãs, ao nascer do sol. Devido à inércia térmica durante as primeiras horas da manhã a produtividade é baixa, até que a temperatura adequada seja alcançada. Durante a sua operação, a água na bacia evapora-se, ocorrendo a diminuição da quantidade de massa. A cada segundo ou terceiro dia, a salmoura na bacia deve ser totalmente removida, e a bacia limpa, de maneira a evitar a formação de incrustações ou de algas. A profundidade da água na bacia pode ser de camada fina ou de camada profunda. A camada fina de água tem maior produção diária durante as horas de sol, mas a destilação cessa após o pôr-do-sol. Ao contrário, as bacias de camada profunda atuam como unidades de armazenamento de calor sensível, continuando a produzir destilado durante a noite, embora em ritmo decrescente, até o nascer do Sol [13]. No modo de operação contínua a água de alimentação flui continuamente, com recurso a uma bomba de circulação, de maneira que se possa manter a profundidade da água na bacia praticamente estável.

2.3.3 Componentes

A escolha de materiais apropriados é um dos desafios mais importantes na construção de destiladores solares. O sucesso no projeto de desenvolvimento de um destilador solar está dependente da estratégia de construção, envolvendo o conhecimento prático das características térmicas e de operação do equipamento. Essa filosofia de desenvolvimento levou ao estabelecimento de critérios energéticos e de custo para a seleção de materiais e para o projeto dos componentes. Para a construção de destiladores solares é usada uma variedade de materiais, desde os mais baratos e de baixa qualidade até aos mais caros e eficazes (melhorando o desempenho e a durabilidade). Como os destiladores solares são destinados às pequenas comunidades formadas por indivíduos com baixo poder de compra, o objetivo é construir um sistema usando materiais baratos e resistentes. Portanto, as características gerais dos materiais de construção do destilador são [13]:

- Devem ser de fácil montagem, no local a instalar;
- Devem ser baratos e de fácil manutenção/reparação. O uso de materiais de baixa qualidade deve ser evitado, sendo que reduz o tempo de vida do equipamento;
- Devem resistir às condições meteorológicas como ventos fortes, granizo e tempestades de areia;
- Devem ser resistentes à corrosão devido ao contacto com a solução salina ou com o destilado;
- Se existirem períodos de ocorrência de chuva na região, deve-se instalar calhas de captação da água da chuva, aumentando assim a produção.

2.3.3.1 Bacia

A bacia é a base do destilador, contendo no seu interior a solução a destilar. O material usado na construção da bacia deve ser resistente à água salgada, sendo que vários materiais podem ser usados para a sua construção, nomeadamente [44]:

- Tijolo;
- Betão, montado no local da instalação em moldes pré-fabricados;
- Madeira, impregnada em resina epóxi;
- Plástico, duro e resistente aos raios UV;
- Plástico reforçado por fibras;
- Alumínio;
- Liga de magnésio;
- Aço inoxidável;
- Ferro galvanizado.

O fundo da bacia deve absorver o máximo de radiação solar possível. Para tal, é aplicado um revestimento de comportamento seletivo, de cor preta, proporcionando o comportamento próximo ao de um corpo negro. Os materiais usados na construção do fundo da bacia são [44] [56]:

- Para construções mais baratas, o fundo da bacia é pintado de cor preta;
- Uma placa de plástico, resistente a altas temperaturas e aos raios solares, embutida no fundo da bacia (por exemplo, polietileno preto);
- Borracha butílica;
- Asfalto.

Em alguns casos, a superfície negra absorvedora e a bacia funcionam como um único elemento. Qualquer material de cor preta pode ser usado na construção do fundo da bacia, desde que tenha as seguintes propriedades [13] [57]:

- Deve ser à prova de água;
- Deve resistir a altas temperaturas operacionais (≈ 90 °C), sem se deteriorar;
- Deve ter alto coeficiente de absorção da radiação solar ($\geq 0,95$);
- Deve ser não tóxico;
- A superfície deve ser lisa, de modo a não proporcionar superfícies ideais para a deposição das partículas sólidas, e tornar mais fácil o processo de limpeza do equipamento;
- Como o revestimento as vezes é colocado diretamente no solo, o material não deve deteriorar nessa situação.

2.3.3.2 Cobertura

O destilador é delimitado na parte superior pela cobertura, transparente à radiação que nela incide e opaca à radiação emitida pelas suas superfícies interiores, com o propósito de provocar o efeito de estufa no interior do destilador. Para além das funções acima mencionadas, a superfície interior da cobertura também funciona como superfície de condensação do vapor de água. De maneira a garantir a melhor escolha na seleção do material para a cobertura, convém satisfazer os seguintes requisitos [57]:

- Resistir às condições climáticas;
- Deve ter transmissibilidade de radiação solar igual ou superior a 85%;
- Deve ser praticamente opaca à radiação com comprimento de onda superior a 3 μm , emitido pela superfície negra do fundo da bacia, permitindo assim armazenar mais calor no interior do destilador;
- O coeficiente de reflexão da radiação solar, num ângulo de incidência normal, não deve exceder os 10%;
- O coeficiente de absorção da radiação solar deve ser baixa, especialmente quando a cobertura estiver a ser utilizada como superfície condensadora;
- Não deve ter uma alta absorvidade de água, tanto como uma superfície de captação de chuva na superfície exterior, como condensador na superfície interior;

- A capacidade térmica deve ser alta de maneira a dissipar facilmente o calor, mantendo assim temperaturas baixas;
- As propriedades do material não se devem alterar ao longo do tempo;
- O material não deve possuir propriedades electrostáticas que concentrem partículas de poeira na superfície externa;
- Deve resistir a velocidades de vento de até 45 m/s.

A maior parte dos destiladores solares usam o vidro como o material da cobertura. Os materiais em vidro têm maior tempo de vida que outros materiais, sendo que uma desvantagem é serem quebráveis. Normalmente, vidro temperado ou comum, fino e com baixo teor de ferro (0,01% Fe₂O₃) é o mais adequado [13].

A cobertura de plástico tem menor eficiência e um tempo de vida mais curto (< 15 anos) do que o vidro, apesar de ser mais flexível, permitindo escolhas geométricas mais amplas para a configuração do destilador, possuindo também maior coeficiente de expansão do que o vidro. Foi efetuado um estudo comparativo do comportamento da cobertura de vidro e de plástico em destiladores solares, e verificou-se que a cobertura de vidro proporciona 30 - 35% mais produtividade do que os destiladores com cobertura de plástico [58]. Para a construção da cobertura, os plásticos comercializados são [13] [44] [58]:

- Polietileno (PE);
- Polietileno Tereftalato (PET);
- Policloreto de Vinila (PVC);
- Acrílico (PMMA);
- Politetrafluoretileno (PTFE);
- Fluoreto de Polivinila (*Tedlar*[®]).

Alguns materiais de plástico devem ser tratados na superfície interior de maneira que o destilado possa escorrer para as calhas de recolha do condensado.

A inclinação da cobertura tem pouca influência no desempenho térmico do destilador, para inclinações até 60°. No entanto, o valor da inclinação deve ser o mínimo possível, proporcionando uma maior estabilidade estrutural. Para um adequado escoamento do condensado, a inclinação deve ser no mínimo de 10°, mas em regiões onde existe alta ocorrência de ventos fortes, o valor da inclinação deverá ser ligeiramente superior [56].

2.3.3.3 *Isolamento térmico*

O material isolante é colocado no fundo da bacia, reduzindo assim as perdas de calor para o ambiente exterior. As paredes laterais da bacia devem ser também isoladas. Para o isolamento térmico pode-se recorrer a qualquer material, desde que atenda às seguintes características [13]:

- Ser à prova de água;
- De fácil aplicabilidade e remoção (se necessário);
- Leve e resistente;

- Baixa condutibilidade térmica;
- Resistente a altas temperaturas ($\approx 90^{\circ}\text{C}$), sem se deformar;
- Fácil encaixe no fundo e nas paredes do destilador.

Os materiais normalmente empregues no fabrico do isolamento térmico são [44] [56]:

- Borracha butílica;
- Polietileno preto;
- Poliuretano;
- Poliestireno;
- Espuma.

A utilização do isolamento térmico aumenta os custos de materiais em cerca de 16%, mas o aumento real no custo total da instalação é inferior a 10%. A justificação económica para o uso do isolamento está no facto de que apesar do aumento no valor do custo inicial, acaba por ser compensado pelo aumento da produtividade do destilador. Foi efetuado um estudo em que se obteve uma produtividade 15% superior, em média, quando comparada a uma unidade idêntica sem isolamento [56].

2.3.3.4 Estrutura de apoio

A estrutura de apoio deve ser de preferência do mesmo material que a bacia e deve proporcionar um encaixe perfeito com a cobertura. Por razões de segurança, de manutenção e de operação do sistema, os seguintes aspetos têm de ser considerados [44]:

- O material de construção deve resistir às condições extremas do clima, como ventos fortes ou tempestades de areia. Em regiões afetadas por fortes tempestades, as estruturas de apoio devem ser ancoradas umas às outras, mantendo todo o sistema seguro;
- A estrutura deve ter alta resistência aos efeitos da atmosfera e da solução salina;
- A estrutura deve ser construída em material de fácil processamento;
- Algumas partes devem ser de fácil remoção, permitindo o fácil acesso ao interior do destilador para operações de limpeza e manutenção;
- A estrutura, no caso de estar em contacto com a área de evaporação, deve ser provida de um revestimento de proteção.

Os materiais normalmente empregues na construção da estrutura de apoio são [44][56]:

- Tijolos;
- Betão;
- Blocos de cimento;
- Alumínio;
- Metal galvanizado;
- Madeira (tempo de vida relativamente curto).

2.3.3.5 *Vedante*

O material vedante tem como objetivo garantir a estanquidade do destilador, e deve ter as seguintes características [13] [57]:

- Não deve ser afetado pela exposição ao clima ou pela exposição à água, na face interna;
- Deve ser facilmente aplicável sob condições extremas do local, pois, é provável que seja usado durante a ereção da instalação;
- Deve ser de fácil aplicação e de fácil substituição, para efeitos de manutenção;
- Deve ser de baixa absorção da radiação solar;
- Deve ser à prova de água;
- Deve ser não tóxico;
- Não deve ter impactos no odor e no sabor da água destilada.

Os materiais normalmente utilizados como vedante são [13] [44] [56]:

- Silicone;
- Borrachas sintéticas;
- Compostos butílicos;
- Plástico de alcatrão;
- Látex.

2.3.3.6 *Canal de recolha do condensado e da chuva*

O canal de recolha do condensado tem de ter revestimento de proteção, isto porque a água destilada ou a água da chuva é corrosiva. Os materiais normalmente empregues na construção das calhas de recolha do destilado são [13] [44] [56]:

- Aço inoxidável;
- Liga de alumínio;
- Ferro galvanizado;
- Plástico;
- Outros materiais com revestimento de borracha butílica ou de polietileno preto.

É recomendado a utilização do aço inoxidável para a construção das calhas. O plástico não é adequado devido às tensões térmicas associadas ao alto coeficiente de expansão térmica deste tipo de material. Quaisquer juntas nos canais são fontes potenciais de fuga [57].

2.3.3.7 *Bomba de circulação, tubagem e acessórios*

No caso do regime de operação ser em contínuo, existe a necessidade de efetuar a instalação de tubagens para a alimentação da solução salina e para a extração do concentrado, mas também de uma bomba de circulação que permita a introdução da solução no destilador. As tubagens e os respetivos acessórios devem ser de preferência do mesmo material. Os materiais normalmente usados são plásticos como PVC,

polietileno preto ou qualquer outro plástico que não se degrade facilmente quando exposto aos raios solares e a altas temperaturas de trabalho. Tubagens metálicas podem ser também usadas, mas apenas para o circuito de alimentação da solução salina [13]. De maneira que o sistema possa funcionar corretamente é necessário atender aos seguintes requisitos [57]:

- Todas as peças em contacto com água devem ter uma camada protetora de material inerte, evitando contaminação ou danos ao sistema;
- Todas as calhas internas ou sistemas de tubagem devem ser de construção contínua (peça única), evitando juntas internas, facilitando assim o processo de manutenção;
- Onde não existem fontes de energia convencionais, as bombas de circulação devem ser operadas recorrendo a tecnologias de energia de fontes renováveis;
- O reservatório de destilado deve exceder a capacidade máxima de produção diária por um fator de três, pelo menos.

2.3.4 Classificação dos destiladores solares

De acordo com algumas modificações e modos de operação, os destiladores solares convencionais podem ser classificados de diferentes formas. Na Figura 10 é apresentado um esquema geral dos diferentes sistemas de destilação solar.

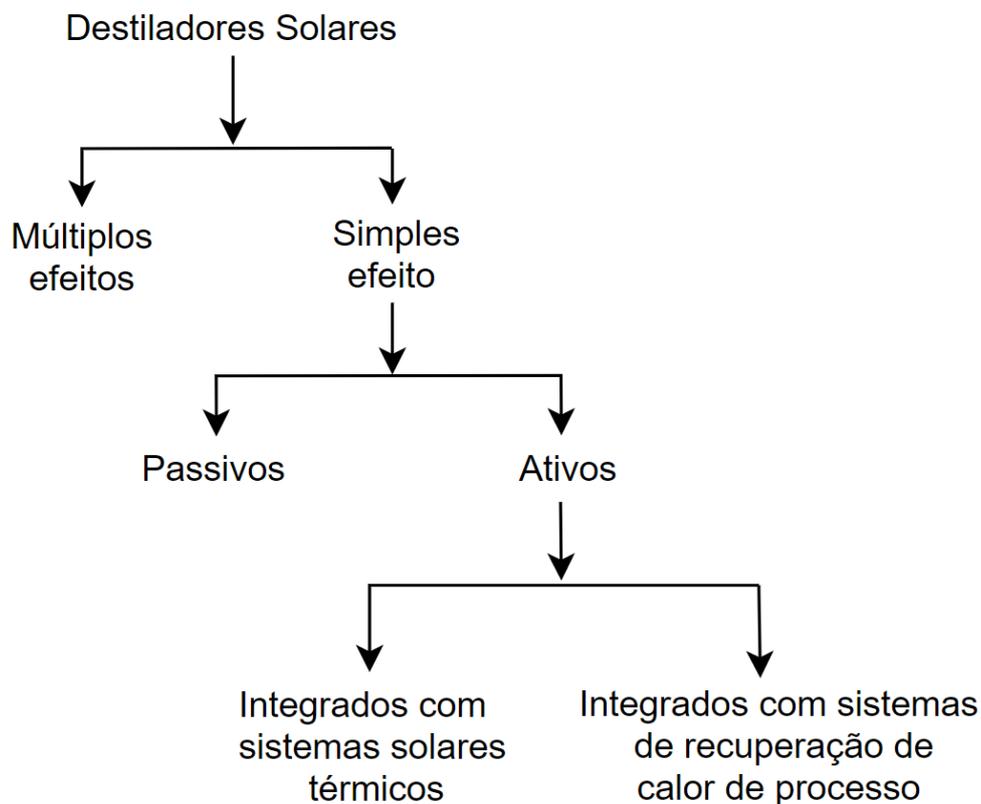


Figura 10 - Sistemas de destilação solar. [30] - adaptado.

A eficiência térmica de uma unidade de destilação solar pode ser aumentada através do aproveitamento do calor latente de condensação, geralmente classificado como sistema de destilação por múltiplos efeitos. Este tipo de configuração é caracterizado por múltiplas bacias montadas umas em cima das outras ou paralelamente, permitindo que a superfície de condensação do estágio anterior funcione como superfície de aquecimento para o estágio seguinte. A produção adicional resultante dos destiladores de múltiplos efeitos, em comparação com os do simples efeito, implica o custo adicional incorrido na sua construção, mais complexa.

Os destiladores solares podem ser também classificados de acordo com a fonte de energia, como ativos ou passivos. Se não existe uma fonte externa de energia, o sistema é classificado como passivo [52] [59] [60] [61] [62] [63]. No caso do sistema ativo, com o objetivo de aumentar a taxa de evaporação e obter uma maior produtividade, é necessário aumentar a diferença de temperaturas entre a cobertura e a água na bacia. A temperatura da água na bacia pode ser aumentada através do fornecimento adicional de energia, recorrendo a uma fonte externa de calor. Essa fonte de energia pode ser um coletor solar [64] [65] [66] [67] ou através da recuperação de calor de processo residual [68]. Quando comparado com o sistema passivo, o sistema ativo tem uma produtividade superior, embora seja menos eficiente termicamente [69].

Existem diferentes configurações de destiladores solares, sendo que a maior diferença entre eles reside no projeto da cobertura, que pode ser em vidro ou em plástico, de inclinação simples ou de dupla inclinação. As configurações mais comuns estão ilustradas na Figura 11. Na ilustração A é apresentado o projeto destilador de dupla inclinação e com cobertura de vidro, instalada em Daytona Beach [59]. Nas ilustrações B, C e D são apresentados os destiladores solares com cobertura de plástico, instalados na Grécia. Na ilustração B é apresentado a configuração de cobertura de plástico insuflado, instalado na ilha de Symi. O desempenho da cobertura não foi satisfatório, sendo substituída pela configuração de cobertura de plástico em forma de V, apresentado na ilustração C, também instalado na ilha de Aegina [70]. A estabilidade dessas configurações não foi satisfatória, em relação às condições climáticas, sendo substituídos em Aegina pela configuração da cobertura de plástico esticado, apresentado na ilustração D [57]. Na ilustração E é apresentado a configuração australiana com cobertura de vidro. Nas ilustrações F e G, são apresentados as configurações de bacias gêmeas, como aplicado nas Ilhas gregas, e de bacias simples, como as instaladas em Gwadar (Paquistão), numa ilha no Japão e em Porto Santo (Portugal) [70].

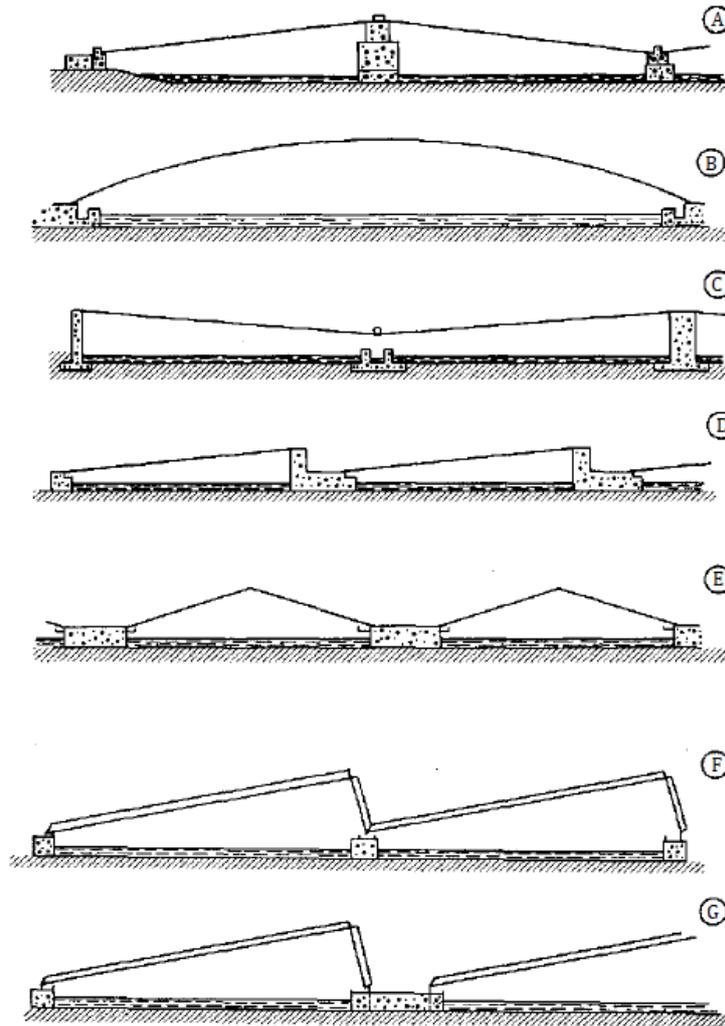


Figura 11 - Diferentes configurações de destiladores solares. (A) – Cobertura de vidro; (B) – Cobertura de plástico Insuflado; (C) – Cobertura de plástico em forma de V; (D) - Cobertura de plástico esticado; (E) - Configuração australiana com cobertura de vidro; (F) – Bacias gémeas; (G) - Inclinação simples. [70] – adaptado.

A comparação entre as duas configurações da cobertura (inclinação simples ou inclinação dupla), mostra que o desempenho do destilador pode ser condicionado pelo movimento do sol ou pelos diferentes climas e locais do planeta. Com base em dados anuais de desempenho das condições climáticas, concluiu-se que o destilador de inclinação simples oferece melhor desempenho do que o de inclinação dupla em climas frios. Para condições climáticas de verão, a inclinação dupla proporciona melhor desempenho [30]. Nas estações ou regiões quentes a radiação máxima pode ser maior em destiladores de inclinação dupla, devido a uma maior área de exposição à radiação solar ao longo do dia, resultando num melhor desempenho quando comparado com destiladores de inclinação simples. Por outro lado, nas estações ou regiões frias os destiladores de inclinação simples apresentam melhor desempenho, isto devido ao facto de ter menos perdas por convecção e radiação, devido a uma menor área de exposição ao ambiente exterior.

2.3.5 Balanço energético num destilador solar

Uma unidade de destilação solar deve maximizar a quantidade de água evaporada, que é diretamente proporcional à taxa de produção do destilado. Por outro lado, todas as outras formas de transferência de energia para o meio exterior devem ser suprimidas o máximo possível. De maneira a poder quantificar a produtividade e o rendimento do destilador, é necessário efetuar o balanço energético do mesmo. Para tal, recorre-se às equações que expressam as relações energéticas nos diferentes elementos que o constituem. Na Figura 12 podem ser observados os diversos mecanismos de transferência de energia num destilador solar.

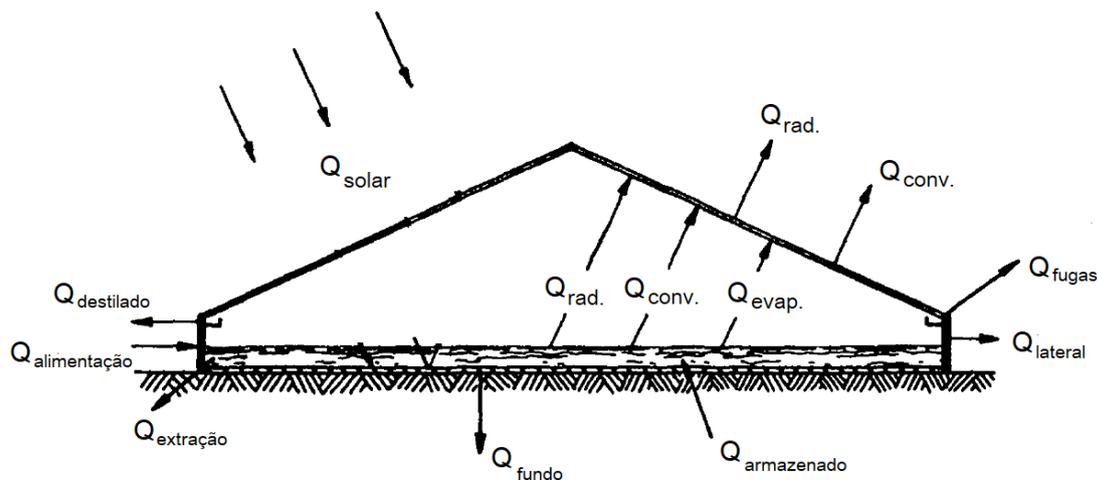


Figura 12 - Mecanismos de transferência de energia num destilador solar. [44] – adaptado.

A seguir serão expostas algumas equações que expressam as relações básicas de transferência de calor e massa, num destilador solar [71].

O balanço de energético da água na bacia, por unidade de área da bacia, é dado pela Equação 9.

$$G_0 \tau \alpha A = q_e + q_{c,b-c} + q_{r,b-c} + q_k + (m C)_b \frac{dT_b}{dt} \quad (9)$$

Onde:

A – Área (m²);

G₀ – Radiação solar incidente na cobertura (W.m⁻²);

τ – Transmissibilidade da cobertura;

α – Coeficiente de absorção da água na bacia;

q_e – Transferência de calor por evaporação (W.m⁻²);

q_{c,b-c} – Transferência de calor por convecção entre a bacia e a cobertura (W.m⁻²);

q_{r,b-c} – Transferência de calor por radiação entre a bacia e a cobertura (W.m⁻²);

q_k – Transferência de calor por condução (W.m⁻²);

m – Massa de água (kg);
 C – Calor específico ($J.kg^{-1}.K^{-1}$);
 T_b – Temperatura da água na bacia (K).

Sendo que a parcela referente à transferência de calor por evaporação na bacia pode ser calculada através da Fórmula 10.

$$q_e = 9,15 * 10^{-7} * h'_c (p_b - p_c) h_{fg} \quad (10)$$

Onde:

h'_c – Coeficiente de convecção da água na bacia ($W.m^{-2}.K^{-1}$);
 p_b – Pressão de saturação da água na bacia (mmHg);
 p_c – Pressão de saturação da água na cobertura (mmHg);
 h_{fg} – Calor latente de vaporização ($J.kg^{-1}$).

Sendo que a pressão de saturação da água, a uma dada temperatura (em K), pode ser calculada através da Equação 11 [72].

$$p_x = \exp\left(25,317 - \frac{5144}{T_x}\right) * 7,5006 \quad (11)$$

A parcela referente à transferência de calor por convecção da bacia para a cobertura é calculada através da Equação 12.

$$q_{c,b-c} = h'_c (T_b - T_c) \quad (12)$$

Onde:

T_c – Temperatura da água na cobertura (K).

A parcela referente à transferência de calor por radiação da bacia para a cobertura é calculada através da Equação 13.

$$q_{r,b-c} = 0,9 \sigma (T_b^4 - T_c^4) \quad (13)$$

O coeficiente de convecção entre a bacia e a cobertura é calculado através da Equação 14.

$$h'_c = 0,884 \left[(T_b - T_c) + \left(\frac{p_b - p_c}{2016 - p_b} \right) T_b \right]^{1/3} \quad (14)$$

O balanço de energia na cobertura, por unidade de área da bacia, é dado pela Equação 15, assumindo que está em regime estacionário.

$$q_e + q_{r,b-c} + q_{c,b-c} = q_{c,c-a} + q_{r,c-céu} \quad (15)$$

Onde:

$q_{c,c-a}$ – Transferência de calor por convecção entre a cobertura e o ar ($W.m^{-2}$);

$q_{r,c-céu}$ – Transferência de calor por radiação entre a cobertura e o céu ($W.m^{-2}$).

A parcela referente à transferência de calor por convecção entre a cobertura e o ar exterior é calculada através da Equação 16.

$$q_{c,c-a} = h_v (T_c - T_a) \quad (16)$$

Sendo que h_v é o coeficiente de transferência de calor por convecção entre a cobertura e o ar exterior, em $W.m^{-2}.K^{-1}$, e é calculado através da seguinte condição:

$$h_v = \text{máximo} \left[5, \frac{8,6 V^{0,6}}{L_c^{0,4}} \right] \quad (17)$$

Onde:

V – Velocidade do ar ($m.s^{-1}$);

L_c – Comprimento característico (m).

Sendo que o comprimento característico (L_c) é igual à raiz cúbica do volume do destilador solar.

A parcela referente à transferência de calor por radiação entre a cobertura e o céu é calculada através da Equação 18.

$$q_{r,c-céu} = \varepsilon \sigma (T_c^4 - T_{céu}^4) \quad (18)$$

Onde:

ε – Emissibilidade do vidro;

σ – Constante de Stefan-Boltzman ($W.m^{-2}.K^{-4}$);

T_c – Temperatura na cobertura (K);

$T_{céu}$ – Temperatura do céu (K).

Sendo que a temperatura do céu é calculada através da Equação 19 [6].

$$T_{céu} = T_{ar} [0,711 + 0,0056 T_{bh} + 0,000073 T_{bh}^2 + 0,013 \cos(15t)]^{1/4} \quad (19)$$

Onde:

T_{ar} – Temperatura do ar exterior (K);

T_{bh} – Temperatura do bolbo húmido ($^{\circ}C$);

t – Hora do dia (1 - 24h).

A massa de vapor de água condensada, em $kg.s^{-1}.m^{-2}$, é calculada através da Equação 20.

$$m_D = 9,15 * 10^{-7} h'_c (p_b - p_c) \quad (20)$$

O rendimento do destilador é assumido como o quociente entre a energia utilizada na evaporação da água e a radiação global incidente na superfície da cobertura, e é calculado através da Equação 21.

$$\eta = \frac{q_e}{G} \quad (21)$$

2.3.6 Instalações de destilação solar

Na Tabela 6 estão apresentadas algumas instalações de destilação solar, construídas ao longo dos anos. Algumas tinham como propósito a produção comercial, e outras apenas para testes e experiências. No Anexo 6.1 pode ser consultada uma tabela mais detalhada das instalações de destilação solar.

Tabela 6 - Instalações de destilação solar.

País	Local	Início da operação	Área (m ²)	Produção (litros/dia)	(l/m ² /dia)	Fonte
Austrália	Muresk I	1963	372	833	2,24	[73][74][75]
	Muresk II	1966	372	833	2,24	[73][75][76][77]
	Coober Pedy	1966	3159	6359	2,01	[73]
	Caiguna	1966	372	776	2,09	[57]
	Hamelin Pool	1966	557	1211	2,17	[44] [57]
	Griffith	1967	413	908	2,20	[44] [57]
Cabo Verde	Santa Maria	1965	743	2120	2,85	[44] [57]
Caraíbas	Petit St. Vincente	1967	1709	4921	2,88	[78]
	Haiti	1969	223	757	3,40	[44] [57]
Chile	Las Salinas	1872	4459	14763	3,31	[33] [79]
	Quillagua	1968	100	401	4,01	[80]
Espanha	Las Marinas	1966	869	2574	2,96	[81]
E.U.A	Daytona Beach 1	1959	228	530	2,33	[82]
	Daytona Beach 2	1959	216	379	1,75	[82][83]
	Daytona Beach 3	1961	246	568	2,31	[83]
	Daytona Beach 4	1963	149	606	4,07	[44] [57]
Grécia	Symi	1964	2687	7571	2,82	[54] [84][85]
	Aegina	1965	1490	4240	2,85	[86]
	Salamis	1965	388	1098	2,83	[57]
	Patmos	1967	8640	26119	3,02	[53] [87]
	Kimolos	1968	2508	7571	3,02	[57]
	Nisiros	1969	2044	6057	2,96	[57]
Índia	Bhavnagar	1965	377	833	2,21	[88][89]
México	Baixa Califórnia	1969	95	379	3,98	[57]
Tunísia	Chakmou	1967	439	530	1,21	[57]
	Mahdia	1968	1301	4164	3,20	[57]
URSS	Turquemenistão	1969	599	1628	2,72	[50]

2.3.7 Aspetos económicos

O sistema de destilação solar tem como objetivo produzir água destilada para vários fins. O custo da água produzida depende do custo do investimento, do custo de operação e do custo de manutenção. O custo da energia é uma fração muito pequena do total, uma vez que apenas é necessária energia elétrica para operar as bombas de circulação e os sistemas de controlo, isto é, se o projeto incluir esses equipamentos. Sendo assim, a maior parte do custo da água na destilação solar é referente à amortização do custo de investimento e ao custo de operação. A taxa de produção de água é proporcional à área do destilador solar, o que significa que o custo por unidade de água produzida é praticamente o mesmo, independentemente do tamanho da instalação. Isto está em contraste com outros processos de dessalinização, onde o custo de capital do equipamento por unidade de capacidade diminui à medida que a capacidade aumenta. Isso significa que a destilação solar pode ser mais atraente do que outros processos, para instalações de pequenas dimensões [2]. A destilação solar apresenta algumas características económicas particulares que diferem de outros processos de dessalinização [59]:

- O custo de construção da instalação não é muito afetado pela sua dimensão;
- Os requisitos de energia são praticamente insignificantes;
- As unidades de destilação são construídas no local, não necessitando de mão de obra especializada;
- A operação e a manutenção podem ser feitas por indivíduos com pouca experiência técnica;
- Os materiais de construção são duráveis e de fácil acesso;
- O projeto do destilador é essencialmente modular, sendo que a capacidade existente pode ser aumentada, praticamente sem penalização no custo.

A destilação solar apresenta excelentes possibilidades em situações onde essas características são consideradas, onde a necessidade de água fresca é relativamente baixa e onde exista incidência de radiação solar adequada. Muitas regiões do mundo apresentam essas condições, incluindo os países em desenvolvimento onde em muitos casos os custos de energia são altos, os custos de mão de obra são baixos e as populações estão dispersas.

2.3.8 Vantagens e desvantagens da destilação solar

O processo de destilação solar apresenta as seguintes vantagens [90]:

- A água é produzida no local de consumo;
- A purificação da água é feita através de uma tecnologia muito simples, sem a necessidade de instrumentos complexos, nem partes eletrônicas ou mecanicamente móveis;
- É a tecnologia mais adequada econômica e tecnicamente para localidades pobres e desprovidas de rede elétrica, que têm pouca disponibilidade de água fresca, pouca precipitação, com grande disponibilidade de água salgada e altos índices de radiação solar;
- A operação destes destiladores é bastante simples, não requerendo altos custos de manutenção, nem de mão de obra qualificada;
- Podem ser usados materiais e mão de obra local, gerando empregos e desenvolvimento socioeconômico;
- A destilação solar geralmente utiliza menos energia para purificar a água que os outros métodos de destilação;
- A energia utilizada é gratuita, o processo silencioso e não poluente, e geralmente há pouca necessidade de eletricidade, que pode ocorrer apenas no caso de haver necessidade de bombear a água, mas não no processo em si;
- Com o destilador operando adequadamente, a água produzida será livre de contaminação microbológica, melhorando assim os padrões de saúde dos consumidores;
- Se construído com bom isolamento térmico, durante a noite também haverá produção de água destilada, devido ao calor armazenado na massa de água;
- Destiladores pequenos e portáteis são de simples construção, e podem ser usados em situações de desastres como catástrofes naturais ou conflitos, nas quais o suprimento de água potável é um dos primeiros e maiores necessidades.

O processo de destilação solar apresenta as seguintes desvantagens [90]:

- A taxa de produção baixa, com valores típicos na ordem de um a quatro litros por metro quadrado, por dia. Quando a produção desejada ficar acima dos 200 m³/dia, outros tipos de sistemas devem ser considerados;
- Devido à baixa produção por unidade de área, esse tipo de tecnologia requer uma grande área de instalação para produzir grandes quantidades de água. Em locais nos quais essas áreas não estão disponíveis, ou são muito caras, a escolha recairá em tecnologias de destilação mais eficientes;
- É necessário haver um sistema para manter o nível da água constante, ou dentro dos limites para um ótimo desempenho, no caso de destiladores de grandes dimensões;
- A produção de água é dependente das condições meteorológicas;
- Pequenas fugas de calor e de vapor podem diminuir significativamente a produtividade do destilador.

3. DESENVOLVIMENTO

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Contextualização da realidade de Cabo Verde

3.1.1 Caracterização de Cabo Verde

A República de Cabo Verde é um arquipélago formado por dez ilhas, localizado a 455 quilómetros da costa ocidental africana, entre as latitudes 14° 23' e 17° 12' Norte e as longitudes 22° 40' e 25° 22' Oeste, com uma área total de 4033 Km². Devido à sua situação geográfica, Cabo Verde integra-se no grupo dos países do Sahel, apresentando assim um clima árido e semiárido, quente e seco, com escassa pluviometria e uma temperatura média anual de 25°C. A época das chuvas situa-se normalmente entre julho e outubro, muitas vezes com alguma irregularidade e períodos consideráveis entre uma chuva e outra [91]. A Figura 13 mostra a localização geográfica de Cabo Verde.

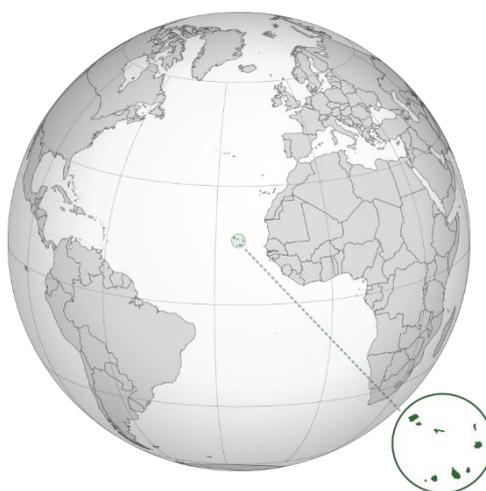


Figura 13 - Mapa do hemisfério centrado em Cabo Verde [92]

Com a inexistência de fontes de energia não renováveis, e com uma posição estratégica entre os três continentes, Cabo Verde definiu o turismo e a prestação de serviços (com particular destaque para os serviços portuários e aeroportuários), como pilares essenciais do seu desenvolvimento. País altamente dependente das importações, incluindo dos produtos petrolíferos, Cabo Verde tem desenvolvido a sua agricultura, essencialmente para consumo interno, apesar dos efeitos da seca. A exploração dos recursos marinhos constitui também uma forte componente da economia cabo-verdiana. Assim sendo, os serviços constituem 80% do PIB, a agricultura 11% e a indústria e energia 9% [91].

3.1.2 Caracterização do recurso solar de Cabo Verde

Cabo Verde é um país onde abunda o Sol, chegando a registar mais de 3750 horas de Sol por ano, o que equivale a uma média anual superior a 10 horas por dia. Em termos de valores de radiação solar, grande parte do território apresenta valores de radiação global entre os 1800 e os 2200 kWh/m²/ano [9]. Na Figura 14 é apresentado o mapeamento da radiação solar global no arquipélago Cabo Verde. Como pode ser observado, as ilhas situadas mais a sul apresentam valores de radiação global ligeiramente superiores aos das ilhas situadas mais a norte.

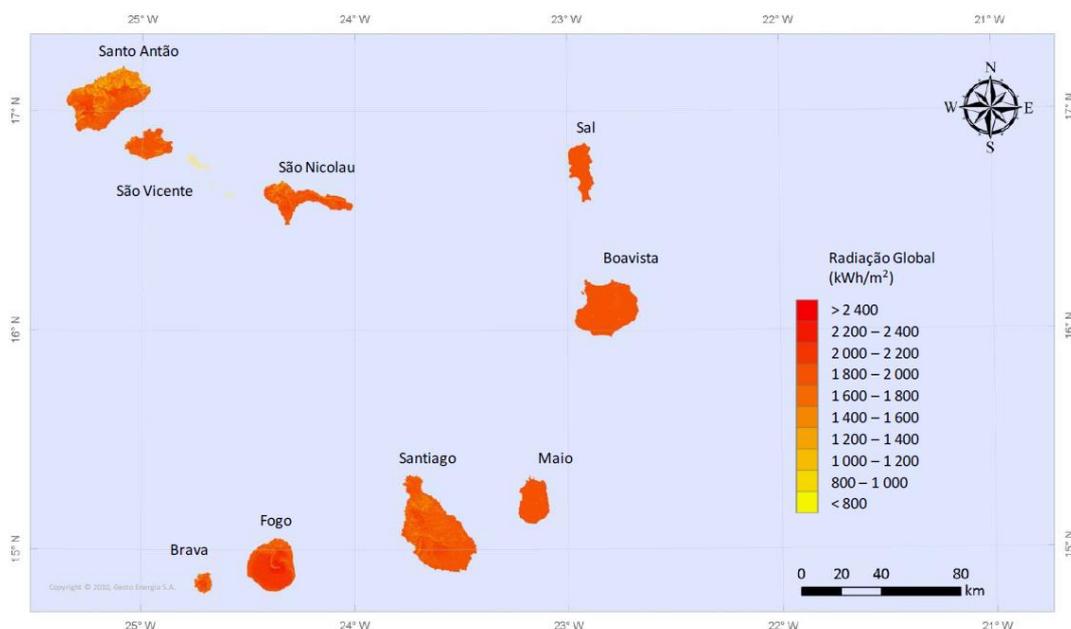


Figura 14 - Mapeamento da radiação global anual em Cabo Verde. [9]

Na Figura 15 é apresentado o mapeamento da radiação solar direta no arquipélago Cabo Verde. Como pode ser observado, as ilhas situadas mais a este apresentam valores de radiação direta ligeiramente superiores aos das ilhas situadas mais a oeste.

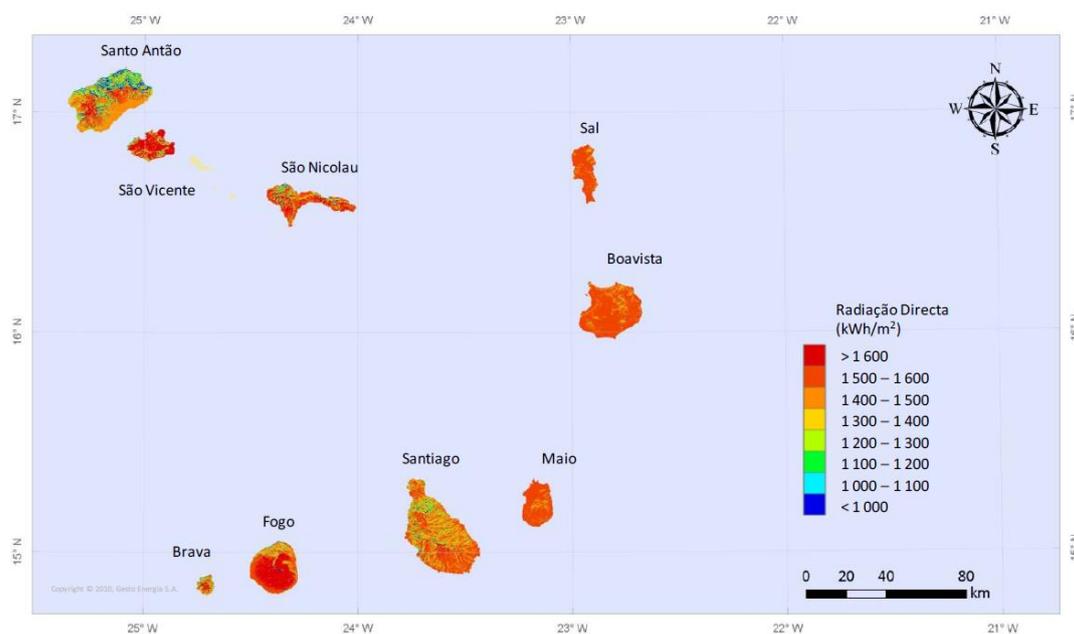


Figura 15 - Mapeamento da radiação direta anual em Cabo Verde. [9]

Na Figura 16 é apresentado o mapeamento da radiação solar difusa no arquipélago Cabo Verde. Como pode ser observado, as ilhas situadas mais a este apresentam valores de radiação difusa ligeiramente superiores aos das ilhas situadas mais a oeste.

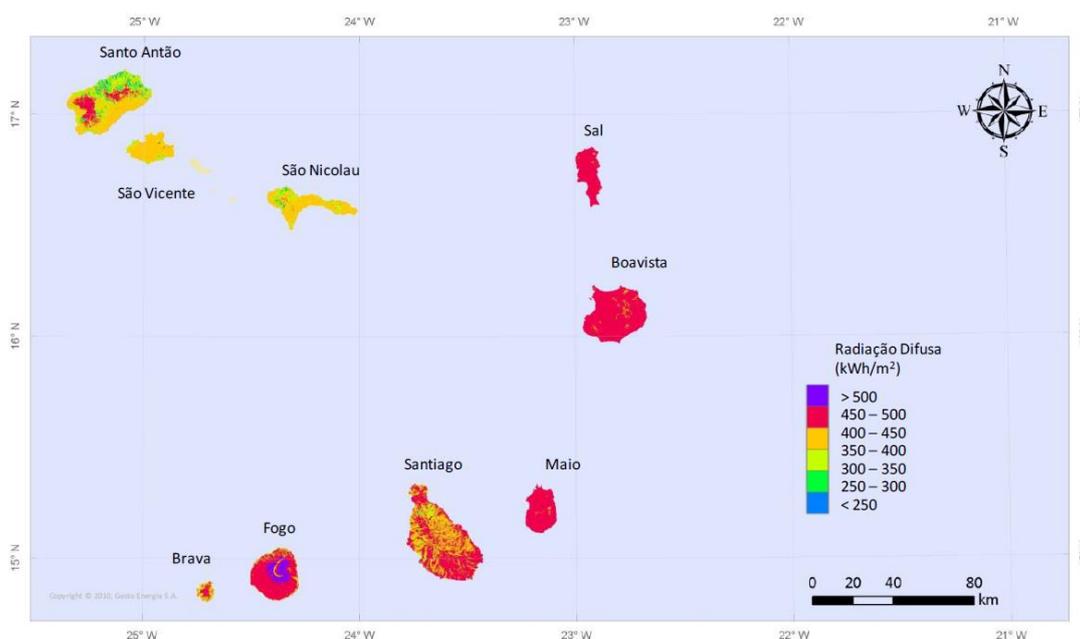


Figura 16 - Mapeamento da radiação difusa anual em Cabo Verde. [9]

3.1.3 Enquadramento energético de Cabo Verde

O abastecimento do sector energético de Cabo Verde assenta essencialmente em combustíveis fósseis, sendo que maior parte da energia elétrica é gerada com recurso a geradores termoelétricos alimentados a fuelóleo e a gasóleo. Esta situação faz com que a economia energética do país esteja fortemente dependente dos mercados petrolíferos, ficando sujeita às constantes oscilações do preço dos combustíveis nos mercados internacionais.

A potência disponível do parque produtor da ELECTRA totalizava, no final do ano de 2018, 132,1 MW repartida pelas centrais termoelétricas a diesel (94,4 %), centrais eólicas (0,5%) e centrais solares 6,8 (5,1%). A produção de eletricidade em 2018 atingiu o valor de 429,6 GWh, sendo 79,2% de origem térmica, 18,7% de origem eólica e 2,1% de origem solar [93].

Devido à sua posição geográfica, Cabo Verde enfrenta problemas de seca, sendo que algumas ilhas são dependentes de água dessalinizada, processo de tratamento com alto consumo energético. A dessalinização da água representa um peso importante na procura total de energia, com mais de 90% da água potável produzida por dessalinização, sendo que o processo utilizado é o de osmose inversa. Do total de eletricidade produzida, 89,1% foi distribuída à rede e 2,8% foi consumida no processo de produção de energia. Os restantes 8,1% foram consumidos nos processos de dessalinização (7,4%) e de bombagem de água produzida (0,7%) [93].

3.1.4 Soluções propostas

Para este trabalho foram propostas e analisadas quatro soluções construtivas:

- **1ª solução:** optou-se por uma configuração mais robusta e permanente (não móvel), semelhante ao apresentado na Figura 17. A bacia é construída diretamente no solo, que funciona como um isolamento térmico natural. A construção da base e das paredes é toda em betão e feita no local da instalação. Primeiramente é construída a fundação (a base da bacia), sobre a qual irão ser construídas as paredes da bacia. A cobertura é de vidro, e de dupla inclinação. O fundo da bacia é impermeabilizado com revestimento de borracha butílica. As calhas de recolha de condensado são em alumínio, encontrando-se na parte inferior da cobertura.



Figura 17 – Exemplo de construção para solução 1. [61]

- **2ª solução:** optou-se por uma configuração que possibilita a mobilidade do equipamento, semelhante ao apresentado na Figura 18. Este projeto é o ideal em situações em que a necessidade de água destilada num dado local é apenas temporária. Neste caso, seria apenas necessário efetuar a montagem do equipamento, sem a necessidade de trabalhos de construção necessários para a solução da Figura 17. A bacia é construída toda em alumínio anodizado. As paredes e o fundo da bacia são isolados termicamente com poliestireno. Este projeto integra estrutura de apoio para a bacia e para a cobertura de vidro, de dupla inclinação. As calhas de recolha de condensado são em alumínio, encontrando-se na parte inferior da cobertura;

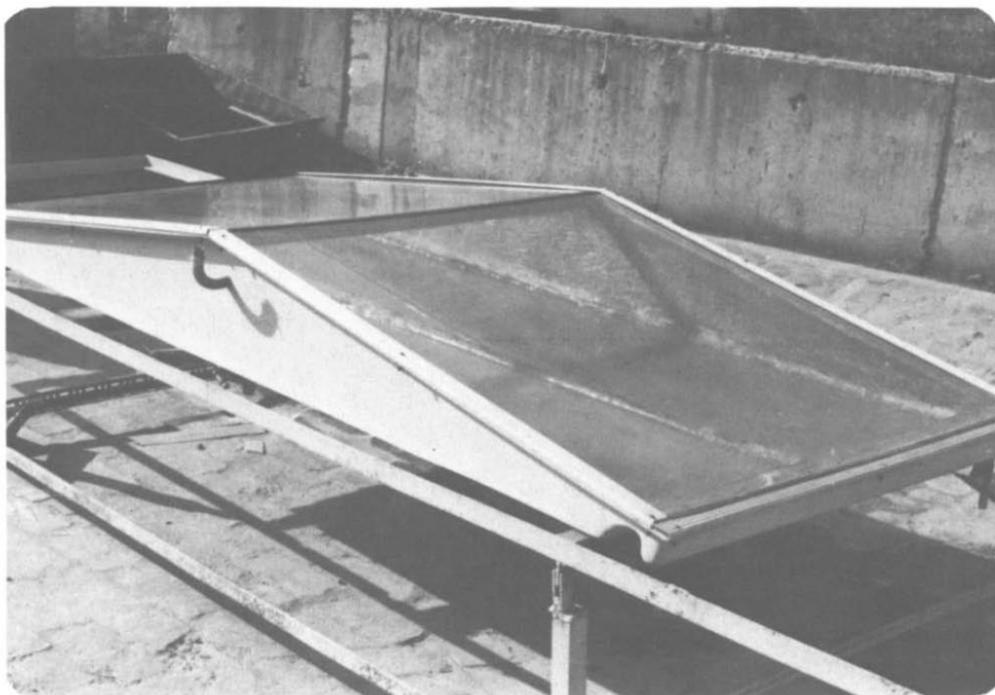


Figura 18 - Exemplo de construção para solução 2. [61]

- **3ª solução:** o projeto da terceira solução é idêntico ao da primeira solução, exceto no facto de possuir uma proteção contra ventos;
- **4ª solução:** o projeto da quarta solução é idêntico ao da segunda solução, exceto no facto de possuir uma proteção contra ventos.

O coeficiente de convecção entre a cobertura e o ar exterior (h_v) pode ser controlado/minimizado recorrendo a estruturas (naturais ou artificiais) que minimizem incidência de correntes de ar sobre a superfície do equipamento como, por exemplo, as vegetações, edifícios ou estruturas concebidas para o efeito. A proteção contra vento, tem como o objetivo melhorar o desempenho do destilador. Para as soluções que possuem proteção contra vento irá admitir-se que o coeficiente de transferência de calor por convecção (h_v) assume o valor mínimo, de $5 \text{ W/m}^2\text{K}$.

3.2 Cálculo da produtividade do destilador

Um dos propósitos deste trabalho consistiu em desenvolver um método de cálculo cujo objetivo principal é quantificar a massa de água destilada, por unidade de área de evaporação do destilador solar, para além de outros parâmetros que caracterizam a sua operação, para o período de um ano típico. Para tal, recorreu-se ao programa Microsoft Excel[®], através do qual foi desenvolvido um modelo matemático em VBA (*Visual Basic for Applications*).

3.2.1 Metodologia

O modelo matemático desenvolvido pode ser caracterizado por duas etapas: a criação da folha de cálculo; e a simulação computacional.

Primeiramente, é feito o processamento, a filtração e a formatação da base de dados, criando assim uma folha de cálculo. Como base de dados foi usado um ficheiro climático, de extensão EPW (*Energy Plus Weather*). O ficheiro EPW contém uma base de dados climáticos para uma dada localidade, na qual encontram-se valores horários de diversos parâmetros meteorológicos, para um ano típico (8760 horas). Essa base de dados foi criada através de medições feitas pelas estações meteorológicas locais, ao longo de vários anos. A base de dados do ficheiro climático utilizado (cidade da Praia, Cabo Verde), corresponde ao período de registo de 44 anos (1973 - 2017) [94]. Dos vários parâmetros contidos na base de dados, são usados no modelo matemático que desenvolvido, os seguintes:

- Mês;
- Dia;
- Hora;
- Temperatura de bolbo seco;
- Temperatura de ponto de orvalho;
- Humidade relativa;
- Pressão atmosférica;
- Radiação solar global horizontal;
- Velocidade do vento.

Para o cálculo das propriedades que caracterizam o fluido em causa (água), foi utilizado a extensão do *CoolProp*. O *CoolProp* é uma base de dados em código aberto, das propriedades de fluidos, desenvolvido com base nas formulações da literatura aberta e validado com base nos dados disponíveis nas referências relevantes [95].

Após a criação da folha de cálculo, procede-se à simulação computacional onde são calculadas as temperaturas da cobertura e da água na bacia, bem como outros parâmetros que estão em função dessas temperaturas, utilizando o *Solver*. O *Solver* é um suplemento do Microsoft Excel[®] utilizado para realizar análise de hipóteses. Através do *Solver* é calculado um valor otimizado para uma fórmula contida numa célula, denominada de célula de objetivo, sujeita a restrições ou limites. Neste caso, o *Solver* é

utilizado para o cálculo das temperaturas da cobertura (T_c) e da água na bacia (T_b), e dos outros parâmetros que estão em função dessas temperaturas.

Existem diferentes métodos *Solver* disponibilizados pelo Excel, como: o GRG Não linear; o LP Simplex; e o Evolutionary. Neste caso o método utilizado foi o GRG Nonlinear. O método do *Solver* GRG Não Linear (GRG do inglês, *Generalized Reduced Gradient*), avalia o gradiente ou declive da função objetivo à medida que os valores de entrada (ou variáveis de decisão) mudam, e determina que atingiu uma solução ótima quando as derivadas parciais são iguais a zero.

De maneira a escrever as equações de balanço energético para o modelo matemático, foram feitas as seguintes suposições:

- A absorção da radiação solar pelo vapor de água entre a bacia e a cobertura, não é considerada;
- A massa de água contida na bacia encontra-se a temperatura uniforme;
- As superfícies de evaporação (bacia) e de condensação (cobertura) são consideradas como duas placas paralelas infinitas;
- As capacidades térmicas do vidro, da água e do fundo da bacia não são consideradas;
- A radiação solar refletida pela superfície da água não é considerada;
- O destilador é considerado estanque e à prova de fugas de vapor;
- As perdas pelo fundo e pelas paredes laterais da bacia, não são consideradas.

Na Figura 19 é apresentado um esquema simplificado dos mecanismos de transferência de energia no destilador.

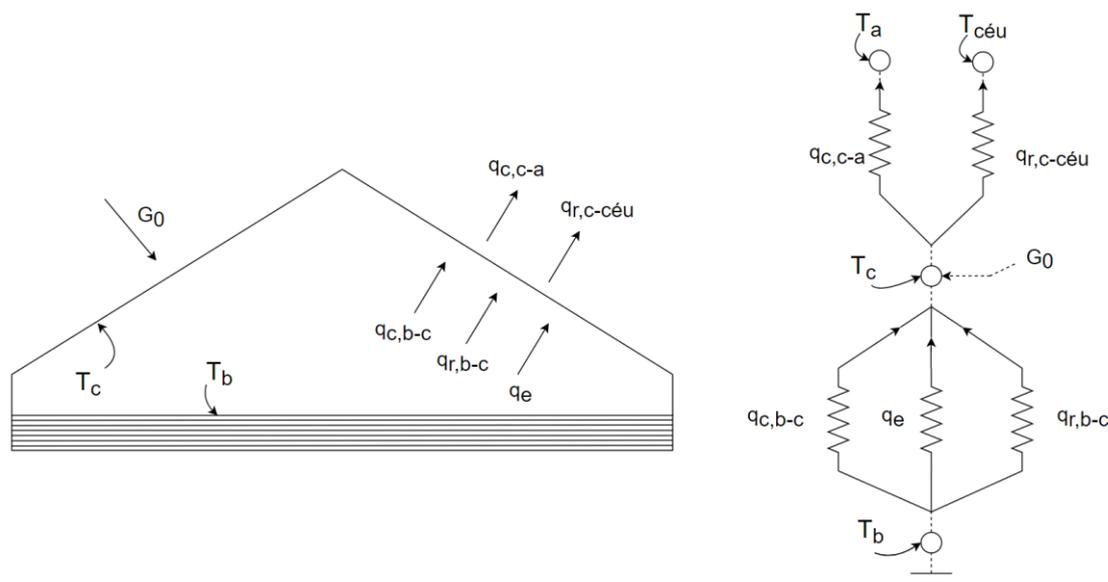


Figura 19 – Esquema simplificado dos mecanismos de transferência de energia, no destilador solar. [71]

A partir destas simplificações, é possível escrever sistemas de equações de balanço energético para a cobertura e para a bacia, e calcular os diferentes parâmetros que caracterizam a operação do destilador.

G_0 representa o valor da radiação solar incidente na cobertura, num dado intervalo de tempo. O valor da radiação solar incidente no fundo da bacia, G_1 , é calculado através da Equação 22.

$$G_1 = G_0 \tau \alpha \quad (22)$$

Foi assumido o valor de 0,90 para a transmissibilidade (τ) da cobertura e o valor de 0,30 para o coeficiente de absorção (α) da água na bacia, de acordo com a Tabela 5.

A transferência de calor por evaporação da água contida na bacia (q_e), é calculada através da equação 10. Para o cálculo do valor da entalpia latente de vaporização (h_{fg}), foi utilizado o *CoolProp*, tendo como valor de entrada a temperatura da cobertura (T_c). O coeficiente de convecção no interior da bacia (h'_c), é calculado através da Equação 14.

A transferência de calor por convecção entre a bacia e a cobertura ($q_{c,b-c}$), é calculada através da Equação 12.

A transferência de calor por radiação entre a bacia e a cobertura ($q_{r,b-c}$), é calculada através da Equação 13.

A transferência de calor por radiação entre a superfície exterior da cobertura e o céu ($q_{r,c-céu}$), é calculado através da Equação 18. Sendo que foi assumido o valor de 0,92 para a emissibilidade (ε) da cobertura de vidro [96]. A temperatura do céu é calculada através de Equação 19. Para o cálculo da temperatura do bolbo húmido foi utilizado o suplemento *CoolProp*, tendo como dados de entrada a temperatura de bolbo seco (T_{ar}), a pressão atmosférica (P_{atm}) e a humidade relativa (HR).

A transferência de calor por convecção entre a superfície exterior da cobertura e o ar ($q_{c,c-a}$), é calculado através da Equação 16. O coeficiente de transferência de calor por convecção entre a parte exterior da cobertura e o ar (h_v), é calculado através da Equação 17.

A massa de destilado (m_D) é calculada através da Equação 20, e o rendimento do destilador solar (η) é calculado através da Equação 21.

Na Figura 20 é apresentado o fluxograma referente ao procedimento de cálculo dos parâmetros.

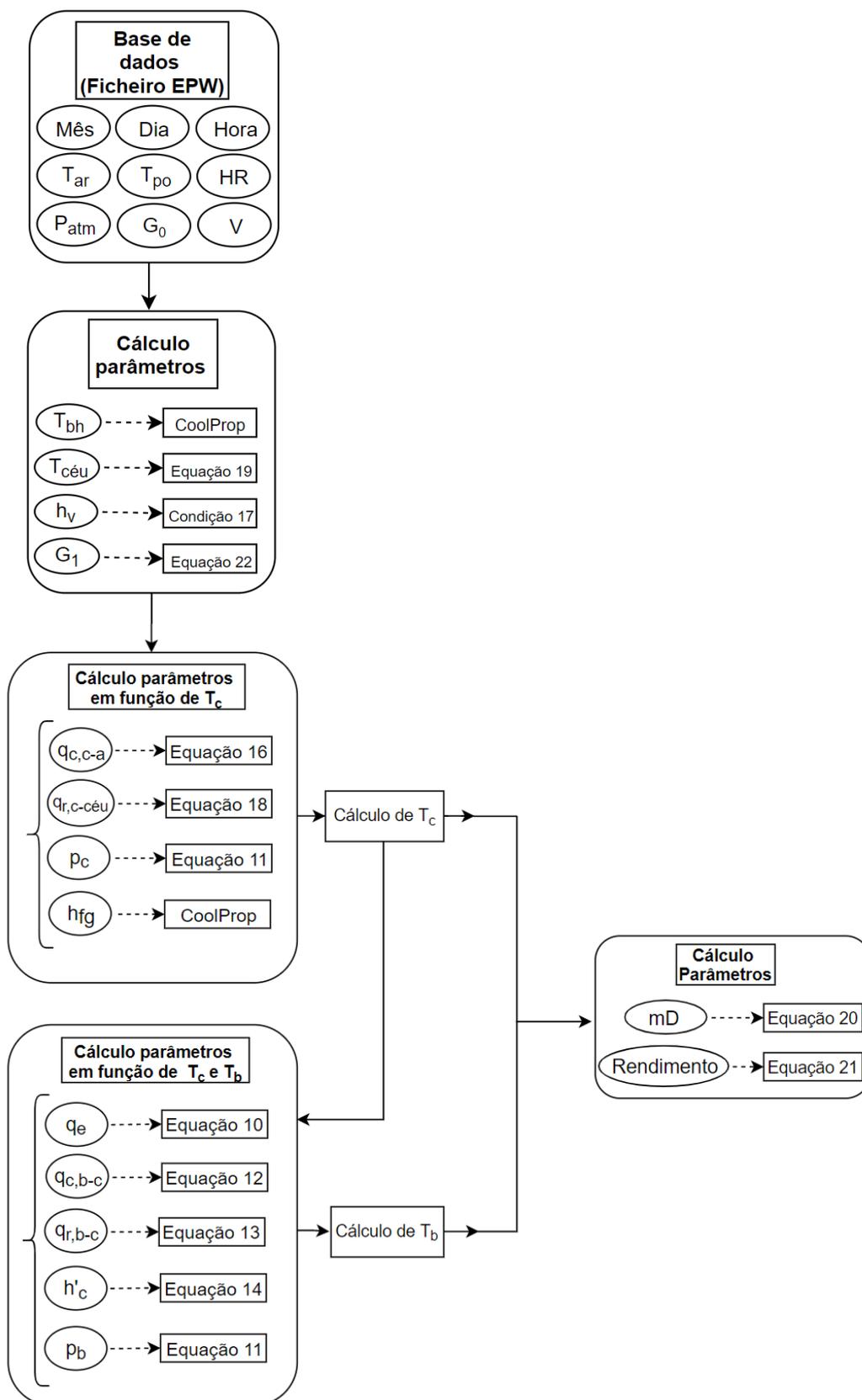


Figura 20 – Fluxograma do procedimento de cálculo.

3.2.2 Apresentação e análise dos resultados

Nesta secção serão apresentados e analisados os resultados obtidos, através da simulação computacional, para a ilha de Santiago.

De maneira a validar os valores de radiação solar da base de dados do ficheiro EPW, foi feita uma comparação destes com os valores calculados através das equações apresentadas na secção 2.1. Na Figura 21 é apresentado o gráfico referente à comparação dos valores da radiação solar da base de dados do ficheiro EPW, com os valores de radiação solar calculados com base nas equações apresentadas no subcapítulo 2.1, e apresentados na 5ª coluna da Tabela 1.

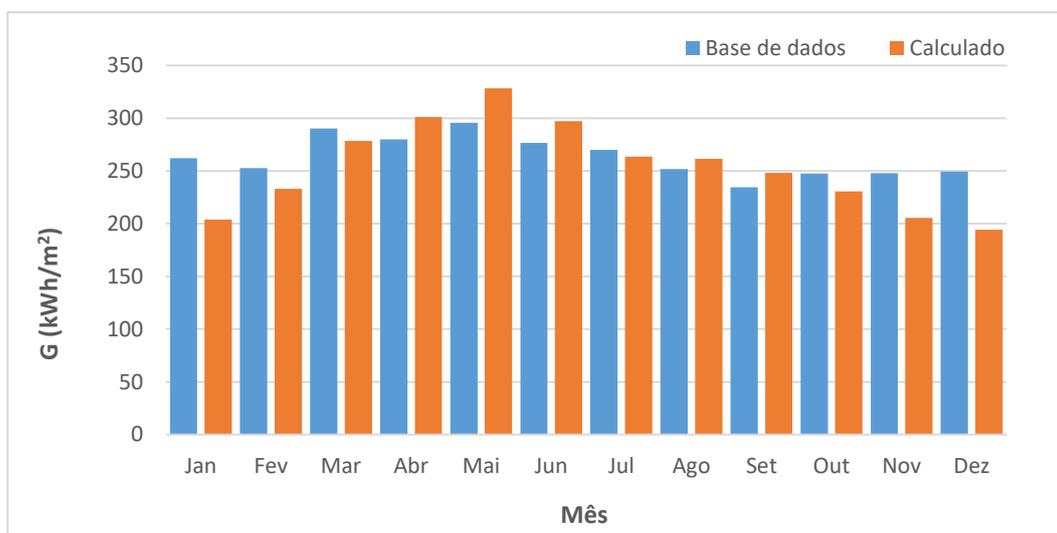


Figura 21 - Variação mensal da soma da radiação solar incidente.

Na Tabela 7 são apresentados os erros associados às diferenças entre os valores de radiação solar calculados e os valores de radiação solar da base de dados do ficheiro EPW. A diferença global é de 13,3%, com variações dos 1,2% aos 21,3%. No Anexo 6.3 pode ser consultada a tabela completa, referente à comparação dos valores de radiação solar.

Tabela 7 – Comparação entre os valores de radiação solar calculados e do ficheiro EPW.

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Diferença (%)	9,5	8,5	10,3	-4,8	1,2	-7,2	20,1	-20,1	-18,6	20,9	19,4	21,3	13,3

Na Figura 22 é apresentado o gráfico referente à produção mensal de destilado, para valores do coeficiente de transferência de calor por convecção (h_v) variável e mínimo ($h_v=5 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$). Pode verificar-se que existe um aumento de produção para o cenário em que o coeficiente de transferência de calor assume o valor mínimo, isto porque quanto menor o valor de h_v , menor é a dissipação de energia térmica na cobertura, pelo ar exterior.

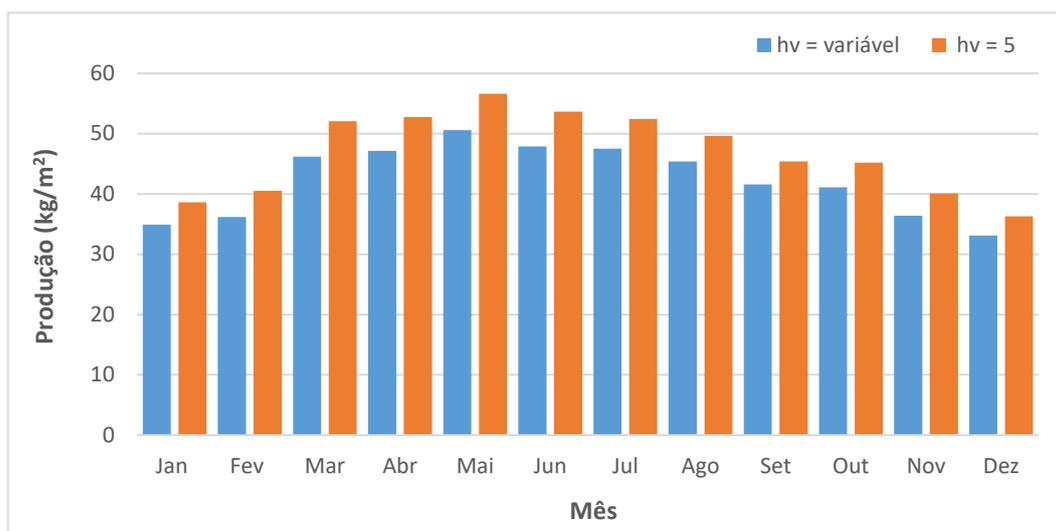


Figura 22 - Produção de água destilada para h_v variável e para h_v mínimo.

Para este trabalho admitiu-se que enquanto existe incidência de radiação solar o equipamento está em operação, cessando imediatamente a seguir ao pôr-do-sol, ou seja, trata-se de um destilador de bacia rasa.

Na Tabela 8 são apresentados os valores da produção mensal de destilado, para h_v variável (entre 5 e $41,7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$) e para h_v mínimo, bem como a diferença percentual. Pode concluir-se que para o cenário de h_v mínimo, existe um aumento global na produção, de 9,8%.

Tabela 8 – Comparação dos valores mensais de produção, com e sem proteção corta vento.

Mês	Produção (litros/m ² /mês)		Diferença %
	h_v = variável	h_v = mínimo	
Janeiro	34,9	38,6	9,6
Fevereiro	36,2	40,5	10,6
Março	46,2	52,1	11,4
Abril	47,1	52,7	10,6
Mai	50,6	56,6	10,7
Junho	47,9	53,7	10,8
Julho	47,5	52,5	9,4
Agosto	45,4	49,6	8,5
Setembro	41,6	45,4	8,4
Outubro	41,1	45,2	9,1
Novembro	36,4	40,1	9,3
Dezembro	33,1	36,3	8,8
Total	507,9	563,3	9,8

Para o cenário de h_v variável a produção anual média diária foi de 1,39 litros/m²/dia, com uma produção média horária de 0,127 litros/m²/h, registando o valor horário mínimo e máximo de 0,01 litros/m²/h e 0,29 litros/m²/h, respetivamente.

Para o cenário de h_v mínimo a produção anual média diária foi de 1,54 litros/m²/dia, com uma produção média horária de 0,14 litros/m², registando o valor horário mínimo e máximo de 0,01 litros/m² e 0,32 litros/m², respetivamente.

Na Figura 23 é apresentado o gráfico referente à variação média horária anual do rendimento do destilador solar e da radiação solar incidente. Como pode ser observado, a variação do rendimento está em fase com a variação da radiação solar, e apresenta o valor máximo horário de 18,3%.

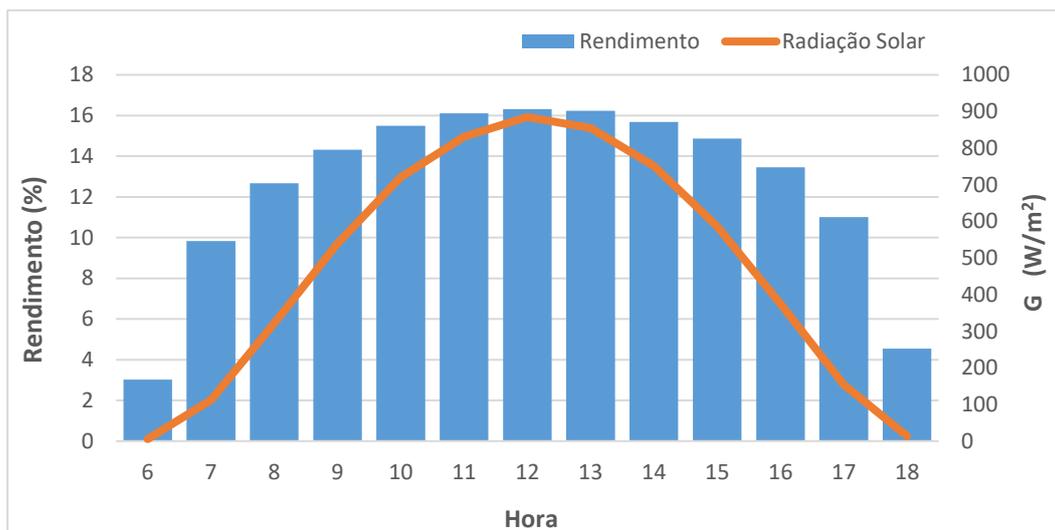


Figura 23 - Variação média horária do rendimento do destilador.

Na Figura 24 é apresentado o gráfico referente à variação média horária anual da transferência de calor por evaporação, por convecção e por radiação entre a bacia e a cobertura. Como pode ser observado, a parcela referente à transferência de calor por evaporação é a que apresenta valores superiores, que é o que se pretende num destilador solar.

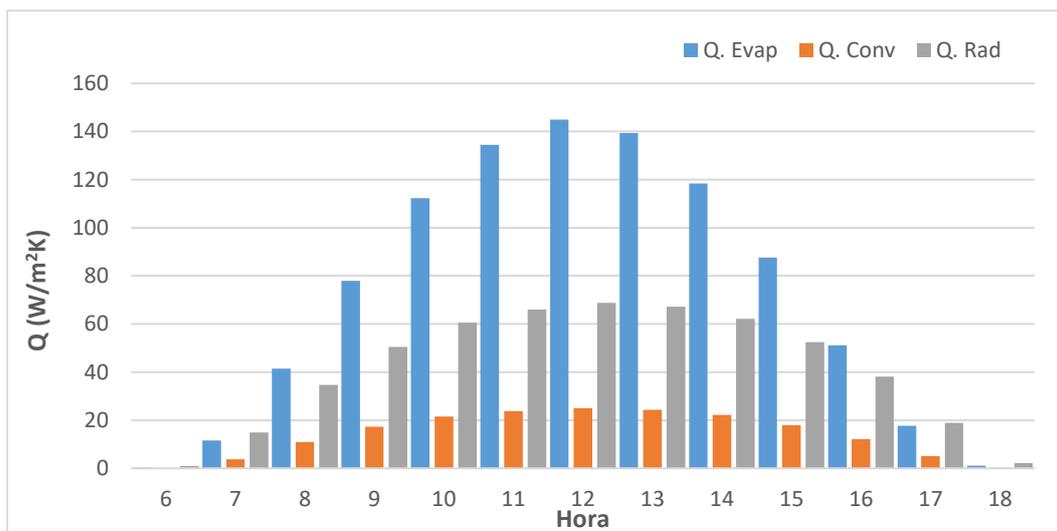


Figura 24 - Variação média horária da transferência de calor por evaporação, convecção e radiação na bacia.

Na Figura 25 é apresentado o gráfico referente à variação média horária anual das temperaturas da cobertura, da bacia e do ar exterior. Como pode ser observado, a temperatura na cobertura é sempre inferior à temperatura na bacia, sendo essa a condição necessária para que ocorra a condensação do vapor de água, ao atingir a superfície interna da cobertura.

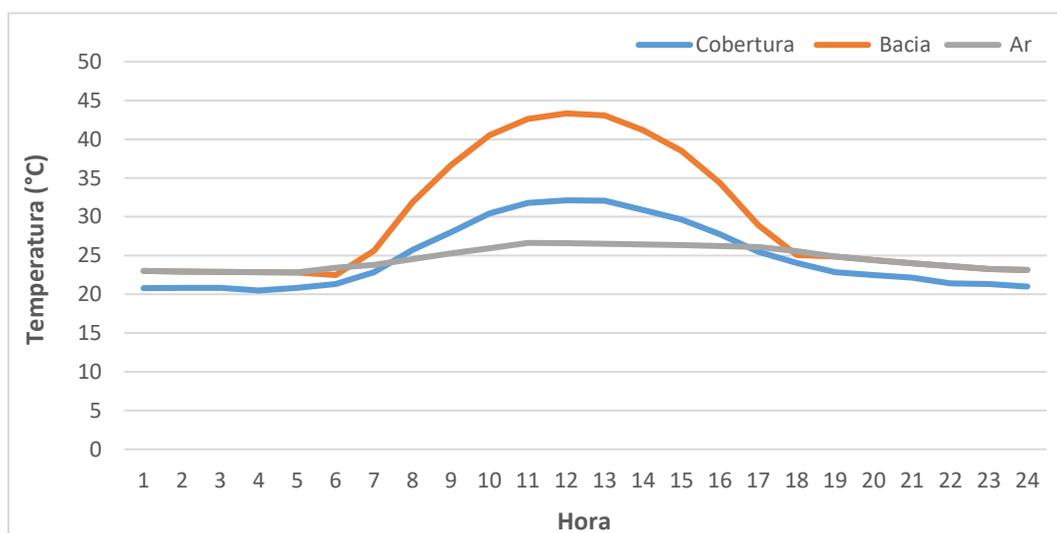


Figura 25 - Variação média horária das temperaturas da bacia e da cobertura.

Na Tabela 9 são apresentadas a temperaturas máximas, mínimas e médias da bacia e da cobertura, calculadas através da simulação computacional, e do ar, contido na base de dados do ficheiro EPW, para um ano típico.

Tabela 9 – Valores máximos e mínimos das temperaturas.

Componente	Temperatura (°C)		
	Mínimo	Máximo	Média
Bacia	9,1	51,3	29,7
Cobertura	8,8	41,6	24,9
Ar	10,2	35,5	24,7

3.3 Análise económica

De modo a efetuar o estudo da viabilidade de um projeto, é de grande importância realizar uma análise económica do mesmo. Para tal, é necessário projetar os gastos (investimentos, custos e despesas) e o retorno (receitas), e analisar alguns indicadores económicos (TCO, VAL, TIR e período de retorno).

Na Tabela 10 são apresentadas as quatro soluções construtivas, os seus respetivos componentes e o custo final (em Escudo cabo-verdiano) de cada uma delas, em que os custos considerados são por metro quadrado de instalação. Os custos dos componentes foram obtidos através da plataforma digital “Gerador de preços para construção civil. Cabo Verde. CYPE Ingenieros, S.A.” [97].

Tabela 10 - Soluções construtivas e os respetivos custos de construção.

Solução 1	Solução 2	Solução 3	Solução 4
Cobertura	Cobertura	Cobertura	Cobertura
Paredes	Paredes	Paredes	Paredes
Fundação	Base	Fundação	Base
Impermeabilização	Isolamento	Impermeabilização	Isolamento
Calha Condensado	Calha Condensado	Calha Condensado	Calha Condensado
Vedante/Adesivo	Estrutura apoio e fixação	Vedante/Adesivo	Estrutura apoio e fixação
		Proteção Vento	Proteção Vento
15 038,02 ECV	18 050,77 ECV	17 028,02 ECV	20 040,77 ECV

1€ ≈ 110 ECV

O acesso à água potável em Cabo Verde pode ser feito via rede pública de abastecimento ou através do abastecimento via autotanque, para as situações em que não existe a possibilidade de conexão à rede pública de abastecimento. Os custos de abastecimento de água em Cabo Verde estão apresentados na Tabela 11, sendo que é possível consultar as faturas referentes a cada tarifa, no Anexo 6.4. Para o presente estudo, partiu-se do princípio que os destiladores têm como propósito abastecer indivíduos sem acesso à rede pública, portanto, o preço considerado na análise económica é referente ao abastecimento via autotanque.

Tabela 11 - Custos de abastecimento de água potável.

Tarifa (Custo/m ³)	Rede	200,00 ECV
	Auto tanque	1120,00 ECV

Para a análise económica foram calculados os valores do custo total de propriedade, TCO (do inglês, *Total Cost of Ownership*), do valor atual líquido (VAL), da taxa interna de retorno (TIR) e do período de retorno do investimento. O valor referente o retorno engloba o valor poupado em água produzida, considerando o preço de abastecimento via autotanque. O valor referente aos gastos inclui os custos de construção, de manutenção e de operação do equipamento.

3.3.1 Custo total de propriedade (TCO)

O custo total de propriedade (TCO) é uma estimativa financeira projetada para avaliar os custos diretos e indiretos relacionados com a compra e investimentos importantes (CAPEX), para além dos gastos inerentes à operação e manutenção (OPEX), podendo ser expressa através da equação 25.

$$TCO = CAPEX + OPEX \quad (25)$$

O CAPEX (do inglês, *Capital Expenditure*) designa o montante de dinheiro aplicado na aquisição (ou introdução de melhorias) de bens de capital. O OPEX (do inglês, *Operational Expenditure*), designa o montante utilizado para manter ou melhorar os bens. Para uma proposta CAPEX é usado um valor estimado do equipamento e para uma proposta OPEX é usado um valor estimado da operação e manutenção. Na Tabela 12 estão apresentados os valores calculados do TCO, para as quatro soluções construtivas. O CAPEX engloba apenas o custo de construção da instalação. O OPEX engloba os custos de manutenção e de operação e, neste caso, admitindo que corresponde a 1% do custo de construção do equipamento, e considerando uma taxa de inflação anual de 2%.

Tabela 12 – Valores calculados do custo total de aquisição.

Solução 1	TCO	22 345,71 ECV
	CAPEX	15 038,02 ECV
	OPEX	7 307,69 ECV
Solução 2	TCO	26 822,50 ECV
	CAPEX	18 050,77 ECV
	OPEX	8 771,73 ECV
Solução 3	TCO	25 302,75 ECV
	CAPEX	17 028,02 ECV
	OPEX	8 274,72 ECV
Solução 4	TCO	29 779,53 ECV
	CAPEX	20 040,77 ECV
	OPEX	9 738,76 ECV

Considerando que o equipamento tem uma vida útil de 20 anos, o custo da água por m³ é dado pela Equação 26. Na Tabela 13, são apresentados os custos por m³ de água produzida para as quatro soluções construtivas, bem como a sua diferença a nível percentual, em relação ao abastecimento via autotanque.

$$\frac{\text{Custo}}{m^3} = \frac{\text{TCO}}{m_D * n} \quad (26)$$

Onde:

m_D – Quantidade de água produzida (m³);

n – Anos de operação.

Tabela 13 – Custos de produção da água.

Solução	Custo/m ³	Diferença
1	2 199,38 ECV	96%
2	2 640,01 ECV	136%
3	2 247,14 ECV	101%
4	2 644,72 ECV	136%

A solução 1 é a que apresenta o menor custo por metro cúbico de água produzida, sendo então a melhor opção a nível de custo. No entanto, a solução 3 apesar de apresentar um custo superior (em 2,1%), tem a vantagem de ter uma produção superior (em 9,8%) à solução 1.

3.3.2 VAL e TIR

O Valor Atual Líquido (VAL), é o balanço de todas as entradas e saídas de dinheiro durante a vida útil (estimado) de um projeto, atualizada para o momento presente, sendo também considerada uma taxa de inflação para o período estipulado. O VAL pode ser calculado através da Equação 27.

$$VAL = \sum_{n=0}^n Fa_n R_n - \sum_{n=0}^n Fa_n G_n \quad (27)$$

Onde:

Fa_n – Fator de atualização para o período n ;

R_n – Retornos para o período n ;

G_n – Gastos para o período n .

Sendo que Fa_n é calculado através da Equação 28.

$$Fa_n = \frac{1}{(1+t)^n} \quad (28)$$

Onde:

t – Taxa de inflação;

n – Anos de operação.

A taxa interna de retorno (TIR), representa a rentabilidade de um investimento, expressa na forma de uma taxa percentual. A TIR pode ser vista como a taxa necessária para o VAL ser igual a zero. A TIR pode ser calculada através da equação 29.

$$VAL = 0 = Investimento\ inicial + \sum_{t=1}^n \frac{F_n}{(1+TIR)^n} \quad (29)$$

Sendo:

F_n – Fluxo de caixa referente ao período n;

n – Anos de operação.

Na Tabela 14 estão apresentados os valores do VAL e da TIR, para as quatro soluções construtivas. Foi assumido uma taxa de inflação de 2% tanto para as despesas como para o retorno, para um período de 20 anos.

Tabela 14 – Valores calculados do VAL e da TIR.

Solução 1	VAL	- 9 779,21 ECV
	TIR	-7%
Solução 2	VAL	- 13 973,43 ECV
	TIR	-10%
Solução 3	VAL	- 11 341,76 ECV
	TIR	-7%
Solução 4	VAL	- 15 535,98 ECV
	TIR	-10%

Após a análise da Tabela 14, pode concluir-se que nenhuma das soluções são economicamente viáveis, sendo que todas apresentam valores negativos tanto do VAL como da TIR.

3.3.3 Período de retorno

O Período de retorno, representa o tempo em que um projeto levará para gerar retornos que igualem o investimento, sendo calculado através da Equação 30. O retorno neste caso, corresponde ao valor poupado anualmente em água produzida via destilação solar, que seria adquirida através do abastecimento via autotanque.

$$\text{Período de retorno} = \frac{\text{Investimento (€)}}{\text{Retorno} \left(\frac{\text{€}}{\text{Ano}} \right)} \quad (30)$$

Na Tabela 15 estão apresentados os valores referentes à análise do período de retorno do investimento.

Tabela 15 – Valores calculados do tempo de amortização.

Solução 1	Investimento (ECV)	15 038,02
	Retorno (ECV/ano)	568,96
	Período de retorno (Anos)	26
Solução 2	Investimento (ECV)	18 050,77
	Retorno (ECV/ano)	568,96
	Período de retorno (Anos)	32
Solução 3	Investimento (ECV)	17 028,02
	Retorno (ECV/ano)	630,56
	Período de retorno (Anos)	27
Solução 4	Investimento (ECV)	20 040,77
	Retorno (ECV/ano)	630,56
	Período de retorno (Anos)	32

Após a análise da Tabela 15, pode concluir-se que a solução 1 é a que apresenta o menor tempo de retorno do investimento, e a solução 4 é a que apresenta maior tempo de retorno do investimento.

3.4 Emissões de CO₂e

Também pode ser feita a análise do sistema de dessalinização ao nível de emissão de gases de efeito de estufa (GEE), e neste caso a nível de emissão de dióxido de carbono equivalente. A equivalência em dióxido de carbono (CO₂e ou CO₂eq), é uma medida que expressa a quantidade de gases de efeito de estufa em termos equivalentes da quantidade de dióxido de carbono (CO₂). A equivalência considera o potencial de aquecimento global (GWP) dos gases envolvidos e calcula a quantidade de CO₂ que seria emitido, se todos os GEE fossem emitidos como tal.

A destilação solar é um processo de dessalinização que tem como fonte de energia o Sol, que é considerada uma fonte de energia não poluente, não havendo a emissão de GEE. Como referido anteriormente, Cabo Verde é dependente de água dessalinizada, sendo que o processo de dessalinização utilizado é o de osmose inversa, alimentado a geradores a combustível fóssil. Sendo assim, a quantidade de água produzida por destilação solar, pode ser considerada a quantidade de água que não será produzida por osmose inversa, não havendo emissão de GEE referente à produção dessa quantidade de água.

Segundo relatório e contas da ELECTRA.SA, no ano 2018 foram produzidas cerca de 429,6 GWh de energia elétrica em Cabo Verde. Da energia elétrica produzida, cerca de 7,4% (31,7 GWh) foram utilizados para o processo de dessalinização, e cerca de 0,7% (3,1 GWh) foram utilizados para a bombagem da água dessalinizada para a rede de distribuição [93]. Os 31,7 GWh de energia elétrica consumidas no processo de dessalinização, correspondem à produção de 8 062 087 m³ de água dessalinizada [93]. Sendo assim, o consumo energético dos processos de dessalinização e de bombagem da água podem ser calculados através da Equação 31.

$$\text{Consumo energético} = \frac{\text{Energia Consumida}}{\text{Produção de água}} \quad (31)$$

Na Tabela 16 são apresentados os valores do consumo energético, considerando apenas o processo de dessalinização, e considerando os processos de dessalinização e de bombagem da água.

Tabela 16 – Consumo energético.

Consumo energético (kWh/m³)	
Dessalinização	3,93
Dessalinização + Bombagem	4,31

A produção de 1 kWh de energia elétrica com recurso a geradores diesel, equivale a 0,49 Kg CO₂e em emissão de GEE [98]. Sendo assim, a quantidade de CO₂e emitido por cada m³ de água dessalinizada pode ser calculada pela Equação 32.

$$\frac{\text{Emissão GEE}}{\text{Produção}} = \text{Consumo energético} * \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{kWh}} \quad (32)$$

Na Tabela 16 são apresentados os valores da emissão de GEE por metro cúbico de água dessalinizada via osmose inversa, em Cabo Verde.

Tabela 17 – Emissão de GEE por m³ de água produzida.

Emissão (Kg CO₂e/m³)	
Dessalinização	1,93
Dessalinização + Bombagem	2,11

Admitindo que a instalação tem uma produção anual mínima de 0,51 m³/m², a redução na emissão anual pode ser calculada através da equação 33.

$$E_{GEE} = \frac{\text{Emissão GEE}}{\text{Produção}} * \frac{\text{Produção}}{\text{Área}} \quad (33)$$

Tabela 18 - Emissão de GEE por m² de destilador

E_{GEE} (Kg CO₂e/m²)	
Dessalinização	0,98
Dessalinização + Bombagem	1,07

Se for considerado um período de 20 anos, correspondente ao tempo de vida útil da instalação, a poupança ao nível de emissões de GEE é de 21,4 kg CO₂e/m², considerando o processo de dessalinização e a bombagem da água.

4. CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4.1 Conclusões

Esta dissertação visou o estudo do processo de destilação solar como processo de produção de água dessalinizada.

Primeiramente foi feito o estudo da energia solar e da metodologia que permite quantificar a radiação solar incidente numa superfície pousada na Terra, em que os valores obtidos serviram como base para a validação dos valores da base de dados do ficheiro EPW. Com base no ficheiro EPW foi realizada uma simulação computacional, com o objetivo de estimar a produtividade de um destilador solar para o clima de Cabo Verde, através da qual obteve-se uma produção anual mínima de 0,51 m³/m² (ou 510 litros/m²), para a ilha de Santiago, Cabo Verde.

Foram feitas quatro propostas de construção de destiladores solares para Cabo Verde, com o objetivo de analisar a sua viabilidade económica. De uma forma geral, os indicadores económicos analisados (VAL e TIR) para as quatro soluções apresentaram valores negativos, não sendo, portanto, viáveis economicamente. Em relação ao período de retorno do investimento todas as soluções apresentam valores superiores ao período de vida útil (estimado) dos equipamentos. Das quatro soluções propostas, a solução 1 é a que apresenta valores mais baixos de custo de construção, de custo da água produzida e dos indicadores económicos (período de retorno, VAL e TIR). No entanto, apesar de dos resultados obtidos, convém realçar que os destiladores projetados têm como propósito principal o abastecimento de comunidades de baixo rendimento financeiro e, portanto, se os encargos da construção forem assumidos por entidades que têm como propósito o apoio a comunidades carenciadas, os aspetos sociais do investimento prevalecem sobre os aspetos económicos.

Também foi feita uma análise do sistema em relação à emissão de GEE (a nível de CO₂e), sendo que o processo de destilação solar permite poupar 21,4 kg CO₂e/m², quando comparado com o processo de dessalinização por osmose inversa, em Cabo Verde.

Após a realização desta dissertação é possível concluir que o processo de destilação solar apresenta uma boa alternativa para a produção de água dessalinizada, para situações em que a demanda de água não é elevada (< 200 m³/dia), e onde existe alta incidência de radiação solar.

4.2 Proposta de trabalhos futuros

Para trabalhos futuros propõem-se:

- o desenvolvimento de um modelo matemático, que permite determinar outros parâmetros que caracterizam a operação de um destilador solar, que não foram considerados para este trabalho como: perdas por condução para o ambiente exterior; a capacidade calorífica dos elementos que constituem o destilador;
- efetuar o estudo da influência da contabilização da capacidade calorífica da cobertura e da água e da bacia, na produtividade do destilador solar;
- efetuar o estudo sobre a influência da profundidade da água contida na bacia, no desempenho do destilador;
- o estudo das diferentes configurações de destiladores solares e de estratégias que permitam aumentar o seu rendimento;
- a construção de um protótipo de destilador solar, para a validação das simulações computacionais realizadas.

5. BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- [1] E. Delyannis and E. Stefanakos, "Guest Editorial," *Sol. Energy*, vol. 75, no. 5, p. 355, 2003.
- [2] G. N. Tiwari, H. N. Singh, and R. Tripathi, "Present status of solar distillation," *Sol. Energy*, vol. 75, no. 5, pp. 367–373, 2003.
- [3] A. Rabl, *Active Solar Collectors and Their Applications*. Oxford University Press, 1985.
- [4] R. Foster, M. Ghassemi, and A. Cota, "Solar energy: renewable energy and the environment," *Choice Rev. Online*, vol. 47, no. 10, pp. 47-5672-47-5672, 2013.
- [5] P. I. Cooper, "The absorption of radiation in solar stills," *Sol. Energy*, vol. 12, no. 3, pp. 333–346, Jan. 1969.
- [6] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes: Fourth Edition*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [7] G. Menzies, "Solar thermal and biomass energy," *Int. J. Sustain. Eng.*, vol. 4, no. 1, pp. 93–93, 2011.
- [8] R. Perez, P. Ineichen, R. Seals, and A. Zelenka, "Making full use of the clearness index for parameterizing hourly insolation conditions," *Sol. Energy*, vol. 45, no. 2, pp. 111–114, Jan. 1990.
- [9] Gesto Energy - Energy Solutions and Governo de Cabo Verde, "Atlas e projectos de Energias renováveis de Cabo Verde," *Rel. Tec. Gesto Energy*, p. 448, 2011.
- [10] G. M. Carr and J. P. Neary, *Water quality for ecosystem and human health*. UNEP/Earthprint, 2008.
- [11] "Classificação da água. Formas de classificação da água." [Online]. Available: <https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/biologia/classificacao-agua.htm>. [Accessed: 17-Sep-2019].
- [12] J. de Q. Levy, "Novas Fontes de Abastecimento: Reutilização e Dessalinização." Lisboa: Ecoserviços, 2008.
- [13] V. Belessiotis, S. Kalogirou, and E. Delyannis, *Thermal Solar Desalination: Methods and Systems*. 2016.
- [14] A. Al-Karaghoul and L. L. Kazmerski, "Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 24. Pergamon, pp. 343–356, 01-Aug-2013.

- [15] E. Z. Moya, "Solar thermal desalination project: first phase and results and second phase description," *Ciemat, Madrid*, 1991.
- [16] E. Tzen and R. Morris, "Renewable energy sources for desalination," *Sol. Energy*, vol. 75, no. 5, pp. 375–379, 2003.
- [17] M. A. Eltawil, Z. Zhengming, and L. Yuan, "A review of renewable energy technologies integrated with desalination systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 9. Pergamon, pp. 2245–2262, 01-Dec-2009.
- [18] N. Ghaffour, J. Bundschuh, H. Mahmoudi, and M. F. A. Goosen, "Renewable energy-driven desalination technologies: A comprehensive review on challenges and potential applications of integrated systems," *Desalination*, vol. 356, pp. 94–114, Jan. 2015.
- [19] A. M. El-Nashar and K. Ishii, "Abu Dhabi solar distillation plant," *Desalination*, vol. 52, no. 3, pp. 217–234, Jan. 1985.
- [20] M. S. Abu-Jabal, I. Kamiya, and Y. Narasaki, "Proving test for a solar-powered desalination system in Gaza-Palestine," *Desalination*, vol. 137, no. 1–3, pp. 1–6, May 2001.
- [21] A. Hanafi, "Design and performance of solar MSF desalination systems," *Desalination*, vol. 82, no. 1–3, pp. 175–185, Aug. 1991.
- [22] L. García-Rodríguez, "Seawater desalination driven by renewable energies: A review," *Desalination*, vol. 143, no. 2, pp. 103–113, May 2002.
- [23] V. Valverde Muela, "Planta Desaladora con Energía Solar de Arinaga (Las Palmas de Gran Canaria)," *Dep. Investig. y Nuevas Fuentes. Cent. Estud. la Energia*, 1982.
- [24] A. A. Madani, "Economics of desalination for three plant sizes," *Desalination*, vol. 78, no. 2, pp. 187–200, Aug. 1990.
- [25] E. E. Delyannis, "Status of solar assisted desalination: A review," *Desalination*, vol. 67, no. C, pp. 3–19, 1987.
- [26] "Desalination Guide Using Renewable Energies," *Eur. Comm.*, 1998.
- [27] R. Manjarrez and M. Galván, "Solar multistage flash evaporation (SMSF) as a solar energy application on desalination processes. Description of one demonstration project," *Desalination*, vol. 31, no. 1–3, pp. 545–554, Oct. 1979.
- [28] F. Palma, "Seminar on new technologies for the use of renewable energies in water desalination," *Athens, Comm. Eur. Communities, DG XVII Energy, CRES (Centre Renew. Energy Sources)*, 1991.
- [29] "Faça seu próprio dessalinizador e destilador solar | Notícias Alternativas." [Online]. Available: <http://noticias-alternativas.blogspot.com/2014/07/faca-seu-proprio-dessalinizador-e.html>. [Accessed: 19-Jul-2019].
- [30] H. E. S. Fath, "Solar distillation: a promising alternative for water provision with free energy, simple technology and a clean environment," *Desalination*, vol. 116, no. 1, pp. 45–56, Sep. 1998.

- [31] P. Kalita, A. Dewan, and S. Borah, "A review on recent developments in solar distillation units," *Sadhana - Acad. Proc. Eng. Sci.*, vol. 41, no. 2, pp. 203–223, Feb. 2016.
- [32] National Research Council (U.S.). Committee on Advancing Desalination Technology., *Desalination : a national perspective*. National Academies Press, 2008.
- [33] J. HARDING, "APPARATUS FOR SOLAR DISTILLATION.," *Minutes Proc. Inst. Civ. Eng.*, vol. 73, no. 1883, pp. 284–288, Jan. 2007.
- [34] C. G. Abbot, "Solar distilling apparatus," *US Pat.*, no. 2,141.330, p. 27, 1938.
- [35] A. N. Tekutchev, "Physical basis for the construction and calculation of a solar still with fluted surface," *Trans Uzb. State Univ Samarkand*, vol. 2, 1938.
- [36] K. G. Trofimov, "The use of solar energy in the national economy," *Uzb. SSR State Press. Tashkent*, 1930.
- [37] M. Telkes, *Distilling water with solar energy*. 1943.
- [38] W. R. P. Delano, "Process and apparatus for distilling liquids." Google Patents, 1946.
- [39] W. R. P. Delano and W. E. Meissner, "Solar distillation apparatus." Google Patents, 1946.
- [40] M. Telkes, "Solar distiller for life rafts," 1945.
- [41] M. Telkes, "Solar distillation produces fresh water from seawater," *MIT Sol. Energy Convers Proj.*, vol. 22, p. 24, 1951.
- [42] M. Telkes, "Fresh water from sea water by solar distillation," *Ind. Eng. Chem.*, vol. 45, no. 5, pp. 1108–1114, 1953.
- [43] M. Telkes, "Research on methods for solar distillation," New York Univ., NY (USA), 1956.
- [44] G. O. G. L. S.G. Talbert, J.A. Eibling, "Manual on Solar Distillation od Saline Water," Apr. 1970.
- [45] G. O. G. Löf, "Solar distillation of sea water in the Virgin Islands," 1955.
- [46] G. O. G. Lof, "Design and cost factors of large basin-type solar stills," in *Proc. Symp. Saline Water Conversion*, 1957, pp. 157–174.
- [47] B. W. Wilson, "Solar distillation research and its applications in Australia," 1958.
- [48] V. A. Baum, "Technical characteristics of solar stills of the greenhouse type," *Therm. power Eng. Util. Sol. energy*, vol. 2, pp. 122–132, 1960.
- [49] V. A. Baum, "Solar distillers," in *Solar Energy*, 2003, vol. 7, no. 1, p. 28.
- [50] V. A. Baum and R. Bairamov, "Prospects of solar stills in Turkmenia," *Sol. Energy*, vol. 10, no. 1, pp. 38–40, 1966.

- [51] V. A. Baum and R. Bairamov, "Heat and mass transfer processes in solar stills of hotbox type," *Sol. Energy*, vol. 8, no. 3, pp. 78–82, 1964.
- [52] A. Delyannis and E. Delyannis, "Recent solar distillation developments," *Desalination*, vol. 45, no. 1–3, pp. 361–369, Jan. 1983.
- [53] A. Delyannis and E. Piperoglou, "The Patmos solar distillation plant," *Sol. Energy*, vol. 12, no. 1, pp. 113–115, 1968.
- [54] R. Eckstrom, "Design and construction of the Symi still," *Sun Work.*, vol. 10, 1965.
- [55] P. I. Cooper, "The maximum efficiency of single-effect solar stills," *Sol. Energy*, vol. 15, no. 3, pp. 205–217, Jan. 1973.
- [56] P. I. Cooper and W. R. W. Read, "Design philosophy and operating experience for Australian solar stills," *Sol. Energy*, vol. 16, no. 1, pp. 1–8, Aug. 1974.
- [57] T. A. Lawand, "Systems for solar distillation," *Approp. Technol. Semiarid Areas Wind Sol. Energy Water Supply*, p. 201, 1975.
- [58] M. K. Phadatare and S. K. Verma, "Effect of cover materials on heat and mass transfer coefficients in a plastic solar still," *Desalin. Water Treat.*, vol. 2, no. 1–3, pp. 254–259, Feb. 2009.
- [59] J. W. Bloemer, J. A. Eibling, J. R. Irwin, and G. O. G. Löf, "A practical basin-type solar still," *Sol. Energy*, vol. 9, no. 4, pp. 197–200, Oct. 1965.
- [60] A. I. Kudish, J. Gale, and Y. Zarmi, "A low cost design solar desalination unit," *Energy Convers. Manag.*, vol. 22, no. 3, pp. 269–274, Jan. 1982.
- [61] G. N. Tiwari, K. Mukherjee, K. R. Ashok, and Y. P. Yadav, "Comparison of various designs of solar stills," *Desalination*, vol. 60, no. 2, pp. 191–202, Jan. 1986.
- [62] Y. P. Yadav and G. N. Tiwari, "Monthly comparative performance of solar stills of various designs," *Desalination*, vol. 67, no. C, pp. 565–578, Dec. 1987.
- [63] J. A. Clark, "The steady-state performance of a solar still," *Sol. Energy*, vol. 44, no. 1, pp. 43–49, Jan. 1990.
- [64] S. N. Rai and G. N. Tiwari, "Single basin solar still coupled with flat plate collector," *Energy Convers. Manag.*, vol. 23, no. 3, pp. 145–149, Jan. 1983.
- [65] J. L. Fernández and N. Chargoy, "Multi-stage, indirectly heated solar still," *Sol. Energy*, vol. 44, no. 4, pp. 215–223, Jan. 1990.
- [66] S. A. Lawrence and G. N. Tiwari, "Theoretical evaluation of solar distillation under natural circulation with heat exchanger," *Energy Convers. Manag.*, vol. 30, no. 3, pp. 205–213, Jan. 1990.
- [67] A. I. Kudish, E. G. Evseev, G. Walter, and T. Priebe, "Simulation study on a solar desalination system utilizing an evaporator/condenser chamber," *Energy Convers. Manag.*, vol. 44, no. 10, pp. 1653–1670, Jun. 2003.
- [68] B. W. Tleimat and E. D. Howe, "Nocturnal production of solar distillers," *Sol. Energy*, vol. 10, no. 2, pp. 61–66, Apr. 1966.

- [69] G. N. Tiwari, V. Dimri, and A. Chel, "Parametric study of an active and passive solar distillation system: Energy and exergy analysis," *Desalination*, vol. 242, no. 1–3, pp. 1–18, Jun. 2009.
- [70] E. E. Delyannis and A. Delyannis, "Economics of solar stills," *Desalination*, vol. 52, no. 2, pp. 167–176, Jan. 1985.
- [71] R. V Dunkle, "Solar water distillation: the roof type still and a multiple effect diffusion still," in *Proc. International Heat Transfer Conference, University of Colorado, USA, 1961*, vol. 5, p. 895.
- [72] G. Slimane, "Modelling of temperature for Simple Solar Still hybrid with Heat Pump," no. March, 2017.
- [73] R. N. Morse, "The construction and installation of solar stills in Australia," *Desalination*, vol. 5, no. 1, pp. 82–89, Jan. 1968.
- [74] R. N. Morse, *The development of a solar still for Australian conditions*. Institution of Engineers, Australia, 1967.
- [75] R. N. Morse and W. R. W. Read, "A rational basis for the engineering development of a solar still," *Sol. Energy*, vol. 12, no. 1, pp. 5–17, Sep. 1968.
- [76] R. N. Morse, W. R. W. Read, and R. S. Trayford, "Operating experiences with solar stills for water supply in Australia," *Sol. Energy*, vol. 13, no. 1, pp. 99–103, Apr. 1970.
- [77] R. N. Morse, "The Theory of Solar Still Operation," in *Chapter prepared for the UN Solar Distillation Panel Meeting*, 1968.
- [78] T. Lawand, *Engineering and economic evaluation of solar distillation for small communities*. Brace Research Institute of McGill University, 1968.
- [79] M. Telkes, "Solar stills," in *Proceedings of world symposium on applied solar energy*, 1956, pp. 73–79.
- [80] J. Hirschmann, "Evaporación solar y su aplicación práctica en Chile," *Scientia*, vol. 136, p. 16, 1968.
- [81] B. G. O. G. Lof and S. L. Udall, "Technical Cooperation on the Solar Distillation Development Program of Spain," no. 397, 1968.
- [82] J. W. Bloemer, R. A. Collins, and J. A. Eibling, "Study and field evaluation of solar sea-water stills," *Available from Natl. Tech. Inf. Serv. Springf. VA 22161 as PB-171 934, Price codes A 07 Pap. copy, A 01 Microfich. OSW Res. Dev. Prog. Rep.*, no. 50, 1961.
- [83] J. W. Bloemer, J. R. Irwin, and J. A. Eibling, "Second Two-Years' Progress on Study and Field Evaluation of Solar Sea-Water Stills," *Battelle Meml. Institute, Columbus, Ohio*, 1964.
- [84] A. A. Delyannis, "Solar stills provide an island's inhabitants with water," *Sun Work*, vol. 10, no. 1, p. 6, 1965.
- [85] E. F. Edward, "Air supported solar still." Google Patents, 1965.

- [86] R. M. Eckstrom, "New solar stills on Greek islands," *Sun Work*, vol. 11, no. 2, 1966.
- [87] A. Delyannis, E. Delyannis, and E. Piperoglou, "Solar distillation developments in Greece," *Sun Work.*, vol. 1, 1967.
- [88] R. L. Datta, S. D. Gomkale, S. Y. Ahmed, D. S. Datar, and T. X. S. R. Intensity, "Evaporation of Sea Water in Solar Stills and Its Development for," in *Proceedings of the First International Symposium on Water Desalination: Washington, DC October 3-9, 1965*, 1965, vol. 2, p. 193.
- [89] S. Y. Ahmed, S. D. Gomkale, R. L. Datta, and D. S. Datar, "Scope and development of solar stills for water desalination in India," *Desalination*, vol. 5, no. 1, pp. 64–74, Jan. 1968.
- [90] A. P. Maluf, "Destiladores solares no Brasil," *Monogr. para a obtenção do título Espec. em Fontes Altern. Energ. (39 páginas). Minas-Gerais–Brasil*, 2005.
- [91] "United Nations in Cape Verde," 2010. [Online]. Available: <https://www.un.cv/sobrecv.php>. [Accessed: 29-Apr-2019].
- [92] "File:CPV orthographic NaturalEarth.svg - Wikimedia Commons." [Online]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CPV_orthographic_NaturalEarth.svg. [Accessed: 23-May-2019].
- [93] Electra, "Electra - Empresa de Electricidade e Água, SARL," 2018. [Online]. Available: <http://www.electra.cv/>. [Accessed: 23-May-2019].
- [94] "climate.onebuilding.org." [Online]. Available: <http://climate.onebuilding.org/default.html>. [Accessed: 09-Aug-2019].
- [95] I. H. Bell, J. Wronski, S. Quoilin, and V. Lemort, "Pure and pseudo-pure fluid thermophysical property evaluation and the open-source thermophysical property library coolprop," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 53, no. 6, pp. 2498–2508, Feb. 2014.
- [96] H. Sato and I. M. L. Ramos, *Física para Edificações: Eixo: Infraestrutura - Série Tekne*. Bookman Editora, 2014.
- [97] "Gerador de preços para construção civil. Cabo Verde. CYPE Ingenieros, S.A." [Online]. Available: <http://www.caboverde.geradordeprecos.info/>. [Accessed: 17-Jul-2019].
- [98] "Projecto Eficiencia Energetica em Edificios - Home." [Online]. Available: <http://www.peee.cv/#>. [Accessed: 06-Sep-2019].

6. ANEXOS

6 ANEXOS

6.1 Instalações de destilação solar

Tabela 19 – Instalações de destilação solar.

País	Local	Início (Ano)	Fim (Ano)	Design *	Área Bacia (m ²)	Produção (litros/dia)	Inclinação cobertura (°)	Tipo de água	Cobertura	litros/m ²	Fonte
Austrália	Muresk I	1963	1966	E	372	833	15	Salobra	Vidro	2,2	[73-75]
	Muresk II	1966	-	E	372	833	15	Salobra	Vidro	2,2	[73-77]
	Coober Pedy	1966	-	E	3159	6359	18	Salobra	Vidro	2,0	[73]
	Caiguna	1966	-	E	372	776	-	Salobra	Vidro	2,1	[57]
	Hamilin pool	1966	-	E	557	1211	-	Salobra	Vidro	2,2	[44] [57]
	Griffith	1967	-	E	413	908	-	Salobra	Vidro	2,2	[44] [57]
Cabo Verde	Santa Maria	1965	-	C	743	2120	-	Mar	Plástico	2,9	[44] [57]
Caraibas	Petit St. Vincente	1967	-	B	1709	4921	-	Mar	Plástico	2,9	[78]
	Haiti	1969	-	D	223	757	15	Mar	Vidro	3,4	[44] [57]
Chile	Las Salinas	1872	1908	E	4459	14763	9	Salobra	Vidro	3,3	[32] [79]
	Quillagua	1968	1968	E	100	401	-	Mar	Vidro	4,0	[80]
Espanha	Las Marinas	1966	-	A	869	2574	10	Mar	Vidro	3,0	[81]
	Daytona Beach 1	1959	1965	A	228	530	15	Mar	Vidro	2,3	[82]
EUA	Daytona Beach 2	1959	1960	B	216	379	-	Mar	Plástico	1,7	[82-83]
	Daytona Beach 3	1961	1965	A	246	568	10	Mar	Vidro	2,3	[83]
	Daytona Beach 4	1963	1964	B	149	606	-	Mar	Plástico	4,1	[44] [57]
	Symi I	1964	1968	B	2687	7571	-	Mar	Plástico	2,8	[53] [84-85]
	Symi II	1968	1969	D	2600		-	Mar	Plástico	2,9	[53] [84-85]
	Aegina I	1965	1967	C	1490	4240	5	Mar	Plástico	2,8	[86]
Grecia	Aegina II	1967	1969	D	1486		-	Mar	Plástico	2,9	[86]
	Salamis	1965	-	C	388	1098	-	Mar	Plástico	2,8	[57]
	Patmos	1967	-	F	8640	26119	12	Mar	Vidro	3,0	[53] [87]
	Kimolos	1968	-	F	2508	7571	-	Mar	Vidro	3,0	[57]
	Nisiros	1969	-	F	2044	6057	-	Mar	Vidro	3,0	[57]
	Bhavnagar	1965	1978	E	377	833	10 a 40	Mar	Vidro	2,2	[88-89]
India	Baixa California	1969	-	D	95	379	6	Mar	Vidro	4,0	[57]
Mexico	Gwadar I	1969	-	F	306	-	-	Mar	Vidro	-	[57]
	Gwadar II	1972	-	G	9072	-	-	Mar	Vidro	-	[57]
Paquistão	Chakmo u	1967	-	D	439	530	10	Salobra	Vidro	1,2	[57]
	Mahdia	1968	-	D	1301	4164	10	Salobra	Vidro	3,2	[57]
Turquemenistão	Asgabate	1969	-	E	599	1628	305 e 60N	Salobra	Vidro	2,7	[50]

* Tendo em conta as configurações apresentadas na Figura 11

6.2 Código VBA

Sub FORMATAÇÃO()

'1º-Filtração de dados

```

Range("A1:CA8").Select
    Selection.Delete Shift:=xlUp

Range("A:A,E:E,F:F,K:K,L:L,M:M,O:O,P:P,Q:Q,R:R,S:S,T:T,U:U,W:W,X:X,Y:Y,Z:Z,AA:AA,AB
:AB,AC:AC,AD:AD,AE:AE,AF:AF,AG:AG,AH:AH,AI:AI").Select
    Selection.Delete Shift:=xlToLeft
    ActiveSheet.ListObjects.Add(xlSrcRange, Range("$A$1:$I$8760"), , xlNo).Name =
    "Tabela1"

Range("D2:I8761").Select
    Selection.Replace What:=".", Replacement:=",", LookAt:=xlPart,
    SearchOrder:=xlByRows, MatchCase:=False, SearchFormat:=False,
    ReplaceFormat:=False

```

'2º-Cabeçalhos

```

Range("A1") = "Mês"
Range("B1") = "Dia"
Range("C1") = "Hora"
Range("D1") = "T Ar (°C)"
Range("E1") = "T Orv (°C)"
Range("F1") = "HR (%)"
Range("G1") = "P atm (Pa)"
Range("H1") = "G0 (W/m2)"
Range("I1") = "V (m/s)"
Range("J1") = "h (W/m2K)"
Range("K1") = "T BH (°C)"
Range("L1") = "T Céu (°C)"
Range("M1") = "T Céu (K)"
Range("N1") = "T Vidro (°C)"
Range("O1") = "T Vidro (K)"
Range("P1") = "P Vidro (mmHg)"
Range("Q1") = "hfg (J/Kg)"
Range("R1") = "Q conv. V (W/m2)"
Range("S1") = "Q rad. V (W/m2)"

```

```

Range("T1") = "Q Tot1 (W/m2)"
Range("U1") = "Delta Q"
Range("V1") = "T Bacia (°C)"
Range("W1") = "T Bacia (K)"
Range("X1") = "P Bacia (mmHg)"
Range("Y1") = "hc (W/m2K)"
Range("Z1") = "Q evap. (W/m2)"
Range("AA1") = "Q conv. B (W/m2)"
Range("AB1") = "Q rad. B (W/m2)"
Range("AC1") = "Q Tot2 (W/m2)"
Range("AD1") = "Delta Q"
Range("AE1") = "mD (Kg/m2h)"
Range("AF1") = "Performance (%)"

```

'3º-Novas colunas

```

Columns("E:E").Select
    Selection.Insert Shift:=xlToRight, CopyOrigin:=xlFormatFromLeftOrAbove

```

```

Range("E1") = "T Ar (K)"

```

```

Columns("J:J").Select
    Selection.Insert Shift:=xlToRight, CopyOrigin:=xlFormatFromLeftOrAbove

```

```

Range("J1") = "G1 (W/m2)"

```

'4º-Inserir Formulas

```

Range("E2").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=[@ [T Ar (°C)]]+273.15"

```

```

Range("J2").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=[@[G0 (W/m2)]]*0.9*0.3"

```

```

Range("L2").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(8.6*([@[V (m/s)]]^(0.6))/(1*1*1) >5,8.6*([@[V (m/s)]]^(0.6))/(1*1*1),5)"

```

```

Range("M2").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=HAPropsSI("B","T",[@ [T Ar (K)]], "P",[@ [P atm (Pa)]], "R",[@ [HR (%)]*0.01]-273.15"

```

Range("N2").Select

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=(([@ [T Ar (°C)]]+273.15)*(0.711+0.0056*[@ [T BH (°C)]]+0.000073*([@ [T BH (°C)]]^2) +0.013*COS(15*[@ Hora]))^0.25)-273.15"

Range("O2").Select

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=[@ [T Céu (°C)]]+273.15"

Range("P2").Select

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=[@ [T Vidro (K)]]-273.15"

Range("R2").Select

ActiveCell.FormulaR1C1 = "(EXP(25.317-(5144/[@ [T Vidro (K)]])))/1000*7.5006"

Range("S2").Select

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=(PropsSI("H", "T", [@[T Vidro (K)]], "Q", 1, "water") - PropsSI("H", "T", [@[T Vidro (K)]], "Q", 0, "water"))"

Range("T2").Select

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=[@ [h (W/m2K)]]*([@ [T Vidro (K)]]-[@ [T Ar (K)]])"

Range("U2").Select

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=0.92*5.67E-08*([@ [T Vidro (K)]]^4)-([@ [T Céu (K)]]^4)"

Range("V2").Select

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=[@ [Q conv. V (W/m2)]]+[@ [Q rad. V (W/m2)]]"

Range("W2").Select

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=[@ [G1 (W/m2)]]-[@ [Q Tot1 (W/m2)]]"

Range("X2").Select

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=[@ [T Bacia (K)]]-273.15"

Range("Y2").Select

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF([@ [G0 (W/m2)]]>0,[@ [T Ar (K)]],325.15)"

Range("Z2").Select

ActiveCell.FormulaR1C1 = "(EXP(25.317-(5144/[@ [T Bacia (K)]])))/1000*7.5006"

Range("AA2").Select

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF([@[G0 (W/m2)]]=0,0,0.884*([@[T Bacia (K)]]-[@[T Vidro (K)]])+ ((@[P Bacia (mmHg)]]-[@[P Vidro (mmHg)]])/(2016-[@[P Bacia (mmHg)]]))*[@[T Bacia (K)]]^(1/3))"

Range("AB2").Select

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF([@[G0 (W/m2)]]=0,0,0.000000915*[@[hc (W/m2K)]]*([@[P Bacia (mmHg)]]-[@[P Vidro (mmHg)]])*[@[hfg (J/Kg)]])"

Range("AC2").Select

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF([@[G0 (W/m2)]]=0,0,[@[hc (W/m2K)]]*([@[T Bacia (K)]]-[@[T Vidro (K)]]))"

Range("AD2").Select

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF([@[G0 (W/m2)]]=0,0,0.9*5.67E-08*([@[T Bacia (K)]]^4)-([@[T Vidro (K)]]^4))"

Range("AE2").Select

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=([@[Q rad. B (W/m2)]]+[@[Q conv. B (W/m2)]]+[@[Q evap. (W/m2)]])"

Range("AF2").Select

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=([@[G1 (W/m2)]]-[@[Q Tot2 (W/m2)]])"

Range("AG2").Select

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF([@[G0 (W/m2)]]=0,0,0.000000915*[@[hc (W/m2K)]]*([@[P Bacia (mmHg)]]-[@[P Vidro (mmHg)]])*3600)"

Range("AH2").Select

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IFERROR([@[Q evap. (W/m2)]]/[@[G0 (W/m2)]]*100,0)"

'5º-(Delimitação e centragem)

```
Range("A1:AH8761").Select
```

```
With Selection
```

```
.HorizontalAlignment = xlCenter  
.VerticalAlignment = xlBottom  
.WrapText = False  
.Orientation = 0  
.AddIndent = False  
.IndentLevel = 0  
.ShrinkToFit = False  
.ReadingOrder = xlContext  
.MergeCells = False
```

```
End With
```

```
With Selection.Borders(xlEdgeLeft)
```

```
.LineStyle = xlContinuous  
.ColorIndex = 0  
.TintAndShade = 0  
.Weight = xlThin
```

```
End With
```

```
With Selection.Borders(xlEdgeTop)
```

```
.LineStyle = xlContinuous  
.ColorIndex = 0  
.TintAndShade = 0  
.Weight = xlThin
```

```
End With
```

```
With Selection.Borders(xlEdgeBottom)
```

```
.LineStyle = xlContinuous  
.ColorIndex = 0  
.TintAndShade = 0  
.Weight = xlThin
```

```
End With
```

```
With Selection.Borders(xlEdgeRight)
```

```
.LineStyle = xlContinuous  
.ColorIndex = 0  
.TintAndShade = 0  
.Weight = xlThin
```

```
End With
```

```
With Selection.Borders(xlInsideVertical)
```

```
    .LineStyle = xlContinuous
```

```
    .ColorIndex = 0
```

```
    .TintAndShade = 0
```

```
    .Weight = xlThin
```

```
End With
```

```
With Selection.Borders(xlInsideHorizontal)
```

```
    .LineStyle = xlContinuous
```

```
    .ColorIndex = 0
```

```
    .TintAndShade = 0
```

```
    .Weight = xlThin
```

```
End With
```

'6º-(Ajuste número de casas decimais)

```
Range("E2").Select
```

```
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
```

```
    Selection.NumberFormat = "0.0"
```

```
Range("J2").Select
```

```
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
```

```
    Selection.NumberFormat = "0"
```

```
Range("L2").Select
```

```
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
```

```
    Selection.NumberFormat = "0.0"
```

```
Range("M2").Select
```

```
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
```

```
    Selection.NumberFormat = "0.0"
```

```
Range("N2").Select
```

```
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
```

```
    Selection.NumberFormat = "0.0"
```

```
Range("O2").Select
```

```
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
```

```
    Selection.NumberFormat = "0.0"
```

```
Range("P2").Select  
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select  
    Selection.NumberFormat = "0.0"
```

```
Range("Q2").Select  
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select  
    Selection.NumberFormat = "0.0"
```

```
Range("R2").Select  
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select  
    Selection.NumberFormat = "0.0"
```

```
Range("S2").Select  
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select  
    Selection.NumberFormat = "0"
```

```
Range("T2").Select  
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select  
    Selection.NumberFormat = "0"
```

```
Range("U2").Select  
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select  
    Selection.NumberFormat = "0"
```

```
Range("V2").Select  
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select  
    Selection.NumberFormat = "0"
```

```
Range("W2").Select  
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select  
    Selection.NumberFormat = "0"
```

```
Range("X2").Select  
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select  
    Selection.NumberFormat = "0.0"
```

```
Range("Y2").Select  
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select  
    Selection.NumberFormat = "0.0"
```

```
Range("Z2").Select  
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select  
    Selection.NumberFormat = "0.0"
```

```
Range("AA2").Select  
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select  
    Selection.NumberFormat = "0.00"
```

```
Range("AB2").Select  
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select  
    Selection.NumberFormat = "0"
```

```
Range("AC2").Select  
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select  
    Selection.NumberFormat = "0"
```

```
Range("AD2").Select  
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select  
    Selection.NumberFormat = "0"
```

```
Range("AE2").Select  
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select  
    Selection.NumberFormat = "0"
```

```
Range("AF2").Select  
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select  
    Selection.NumberFormat = "0"
```

```
Range("AG2").Select  
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select  
    Selection.NumberFormat = "0.00"
```

```
Range("AH2").Select  
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select  
    Selection.NumberFormat = "0.0"
```

End Sub

Sub SOLVER()

'7º-Solver (T.Vidro)

Dim i As Integer

 ActiveWorkbook.ActiveSheet.Activate

For i = 2 To 8761

 SolverReset

 SolverOptions precision:=0.1

 SolverOk SetCell:="\$W\$" & i, MaxMinVal:=3, ValueOf:=0, ByChange:="\$Q\$" & i,
 Engine:=1, EngineDesc:="GRG Nonlinear"

 SolverAdd CellRef:="\$Q\$" & i, Relation:=3, FormulaText:="[@[T Ar (K)])"

 SolverSolve True

'8º-Solver (T.Água)

 SolverOk SetCell:="\$AF\$" & i, MaxMinVal:=3, ValueOf:=0, ByChange:="\$Y\$" & i,
 Engine:=1, EngineDesc:="GRG Nonlinear"

 SolverAdd CellRef:="\$AA\$" & i, Relation:=3, FormulaText:="0"

 SolverAdd CellRef:="\$AB\$" & i, Relation:=3, FormulaText:="0"

 SolverAdd CellRef:="\$AC\$" & i, Relation:=3, FormulaText:="0"

 SolverAdd CellRef:="\$AD\$" & i, Relation:=3, FormulaText:="0"

 SolverAdd CellRef:="\$Y\$" & i, Relation:=3, FormulaText:="[@[T Ar (K)])"

 SolverSolve True

 Range("AJ1").Value = i

Next i

End Sub

6.3 Comparação valores radiação solar

Tabela 20 - Comparação dos valores de radiação solar direta, difusa e albedo.

Mês	EPW (kWh/m ² mês)				Calculado (kWh/m ² mês)				Diferença (%)
	Direta	Difusa	Albedo	Total	Direta	Difusa	Albedo	Total	
Janeiro	188	48	26	262	155	50	4	208	20,5
Fevereiro	179	49	25	253	173	57	4	233	7,7
Março	194	65	31	290	199	68	5	272	6,2
Abril	181	68	32	280	207	76	5	288	2,8
Maio	195	68	33	296	217	87	6	309	4,4
Junho	173	71	32	277	196	76	5	278	0,5
Julho	155	81	33	270	173	70	5	247	8,3
Agosto	131	88	33	252	176	68	5	249	1,2
Setembro	123	81	30	234	172	64	4	240	2,4
Outubro	149	69	29	248	167	57	4	229	7,6
Novembro	172	50	25	248	154	51	4	209	15,8
Dezembro	178	47	25	249	149	47	4	200	19,9
Total	2 019	786	354	3 159	2 138	770	55	2 963	6,2

Tabela 21 – Comparação valores de radiação solar global horizontal.

Mês	G _H EPW (kWh/m ² mês)	G _H Calculado (kWh/m ² mês)	Diferença (%)
Janeiro	226	204	9,5
Fevereiro	255	233	8,5
Março	310	278	10,3
Abril	316	301	4,8
Maio	332	328	1,2
Junho	320	297	7,2
Julho	330	264	20,1
Agosto	327	262	20,1
Setembro	305	248	18,6
Outubro	291	231	20,9
Novembro	255	205	19,4
Dezembro	247	194	21,3
Total	3 515	3 046	13,3

6.4 Custos de abastecimento de água potável na ilha de Santiago

6.4.1 Fatura do abastecimento de água via autotanque

ATI Transportes, S.A.
 NIF: 77005055
 Tel: 2629597 - 9914283
 Cxa Postal 743
 Palmareto - Praia

Factura/Recibo Nº 00362
 Data: 05/12/2018

Cliente: ADAV Morada: Praia Localidade: Praia

Quantidade	Descrição	Preço Unitário	Total
17	toneladas de Água fornecidas	1.120	19.040
Subtotal			19.040
TEU (-4%)			768
TOTAL			18.272

Importa esta Quantidade em:
 Dezoito mil, duzentos e setenta e oito escudos

File group por meio de Guia GPS
 Cx Postal 743 - Praia - NIF: 77005055
 Autorização Ministerial - Despacho de 19/12/2005

Figura 26 – Fatura do abastecimento de água via autotanque, na ilha de Santiago.

6.4.2 Tarifas abastecimento via rede pública

Entrada em Vigor em 1 de Julho de 2017											
TARIFA	ADS	s/ IVA	SCA	SSM	SLO	Tarrafal	CSM	SCZ	Praia	SDO	RGS
ÁGUA											
Tarifa variável (ECV/m³)											
Doméstico											
1º Escalão - até 5 m³/30 dias			200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00
2º Escalão - de 6 a 10 m³/30 dias			300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00
3º Escalão - mais de 10 m³/30 dias			475.00	475.00	475.00	475.00	475.00	475.00	475.00	475.00	475.00
Doméstico fora da rede											
Distribuição por fontanários			200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00
Distribuição por Veículos Autotranques - Uso Serviços Públicos			300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00
Distribuição por Veículos Autotranques - Outros Usos			475.00	475.00	475.00	475.00	475.00	475.00	475.00	475.00	475.00
Não doméstico											
Comércio e Serviços											
1º Escalão - até 20 m³/30 dias			300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00
2º Escalão - mais de 20 m³/30 dias			475.00	475.00	475.00	475.00	475.00	475.00	475.00	475.00	475.00
Aut. Localis, Estado, Institutos público, Empresas Públicas, ONGs, Escolas			300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00
Turismo			475.00	475.00	475.00	475.00	475.00	475.00	475.00	475.00	475.00
Indústria			475.00	475.00	475.00	475.00	475.00	475.00	475.00	475.00	475.00
Tarifa fixa (ECV/30 dias)											
≤ 20 mm			240.00	240.00	240.00	240.00	240.00	240.00	240.00	240.00	240.00
25 a 40mm			480.00	480.00	480.00	480.00	480.00	480.00	480.00	480.00	480.00
50 mm			960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00
> 50 mm			1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00
Outras Prestações de Serviços											
Ligação à rede - por novo contrato			736.52	736.52	736.52	736.52	736.52	736.52	736.52	736.52	736.52
Ligação à rede - por corte por falta de pagamento			1256.52	1256.52	1256.52	1256.52	1256.52	1256.52	1256.52	1256.52	1256.52
Visitação das instalações			736.52	736.52	736.52	736.52	736.52	736.52	736.52	736.52	736.52
Calibração de contadores - pedido com fundamento não confirmado			736.52	736.52	736.52	736.52	736.52	736.52	736.52	736.52	736.52
SANEAMENTO											
Tarifa variável (ECV/m³/30 dias)											
20% T. variável Água											
Tarifa fixa (ECV/30 dias)											
20% T. Fixa Água											

Figura 27 - Tarifas de abastecimento de água via rede pública, na ilha de Santiago.

6.5 Fluxo de caixa para o cálculo do VAL e da TIR

Tabela 22 – Fluxo de caixa para a solução 1.

Solução 1				
Ano	n	Gastos	Retorno	Fluxo de Caixa
2019	0	15 038,02 ECV	-	15 038,02 ECV
2020	1	300,76 ECV	568,96 ECV	268,20 ECV
2021	2	306,78 ECV	580,34 ECV	273,56 ECV
2022	3	312,91 ECV	591,95 ECV	279,03 ECV
2023	4	319,17 ECV	603,78 ECV	284,62 ECV
2024	5	325,55 ECV	615,86 ECV	290,31 ECV
2025	6	332,06 ECV	628,18 ECV	296,11 ECV
2026	7	338,71 ECV	640,74 ECV	302,04 ECV
2027	8	345,48 ECV	653,56 ECV	308,08 ECV
2028	9	352,39 ECV	666,63 ECV	314,24 ECV
2029	10	359,44 ECV	679,96 ECV	320,52 ECV
2030	11	366,63 ECV	693,56 ECV	326,93 ECV
2031	12	373,96 ECV	707,43 ECV	333,47 ECV
2032	13	381,44 ECV	721,58 ECV	340,14 ECV
2033	14	389,07 ECV	736,01 ECV	346,94 ECV
2034	15	396,85 ECV	750,73 ECV	353,88 ECV
2035	16	404,78 ECV	765,75 ECV	360,96 ECV
2036	17	412,88 ECV	781,06 ECV	368,18 ECV
2037	18	421,14 ECV	796,68 ECV	375,54 ECV
2038	19	429,56 ECV	812,61 ECV	383,05 ECV
2039	20	438,15 ECV	828,87 ECV	390,72 ECV

Tabela 23 - Fluxo de caixa para a solução 2.

Solução 2				
Ano	n	Gastos	Retorno	Fluxo de Caixa
2019	0	18 050,77 ECV	-	18 050,77 ECV
2020	1	361,02 ECV	568,96 ECV	207,94 ECV
2021	2	368,24 ECV	580,34 ECV	212,10 ECV
2022	3	375,60 ECV	591,95 ECV	216,35 ECV
2023	4	383,11 ECV	603,78 ECV	220,67 ECV
2024	5	390,77 ECV	615,86 ECV	225,09 ECV
2025	6	398,59 ECV	628,18 ECV	229,59 ECV
2026	7	406,56 ECV	640,74 ECV	234,18 ECV
2027	8	414,69 ECV	653,56 ECV	238,86 ECV
2028	9	422,99 ECV	666,63 ECV	243,64 ECV
2029	10	431,45 ECV	679,96 ECV	248,51 ECV
2030	11	440,08 ECV	693,56 ECV	253,48 ECV
2031	12	448,88 ECV	707,43 ECV	258,55 ECV
2032	13	457,85 ECV	721,58 ECV	263,72 ECV
2033	14	467,01 ECV	736,01 ECV	269,00 ECV
2034	15	476,35 ECV	750,73 ECV	274,38 ECV
2035	16	485,88 ECV	765,75 ECV	279,87 ECV
2036	17	495,60 ECV	781,06 ECV	285,46 ECV
2037	18	505,51 ECV	796,68 ECV	291,17 ECV
2038	19	515,62 ECV	812,61 ECV	297,00 ECV
2039	20	525,93 ECV	828,87 ECV	302,94 ECV

Tabela 24 - Fluxo de caixa para a solução 3.

Solução 3				
Ano	n	Gastos	Retorno	Fluxo de Caixa
2019	0	17 028,02 ECV	-	17 028,02 ECV
2020	1	340,56 ECV	630,56 ECV	290,00 ECV
2021	2	347,37 ECV	643,17 ECV	295,80 ECV
2022	3	354,32 ECV	656,03 ECV	301,72 ECV
2023	4	361,41 ECV	669,16 ECV	307,75 ECV
2024	5	368,63 ECV	682,54 ECV	313,90 ECV
2025	6	376,01 ECV	696,19 ECV	320,18 ECV
2026	7	383,53 ECV	710,11 ECV	326,59 ECV
2027	8	391,20 ECV	724,32 ECV	333,12 ECV
2028	9	399,02 ECV	738,80 ECV	339,78 ECV
2029	10	407,00 ECV	753,58 ECV	346,58 ECV
2030	11	415,14 ECV	768,65 ECV	353,51 ECV
2031	12	423,44 ECV	784,02 ECV	360,58 ECV
2032	13	431,91 ECV	799,70 ECV	367,79 ECV
2033	14	440,55 ECV	815,70 ECV	375,15 ECV
2034	15	449,36 ECV	832,01 ECV	382,65 ECV
2035	16	458,35 ECV	848,65 ECV	390,30 ECV
2036	17	467,52 ECV	865,62 ECV	398,11 ECV
2037	18	476,87 ECV	882,94 ECV	406,07 ECV
2038	19	486,40 ECV	900,59 ECV	414,19 ECV
2039	20	496,13 ECV	918,61 ECV	422,47 ECV

Tabela 25 - Fluxo de caixa para a solução 4.

Solução 4				
Ano	n	Gastos	Retorno	Fluxo de Caixa
2019	0	20 040,77 ECV	-	20 040,77 ECV
2020	1	400,82 ECV	630,56 ECV	229,74 ECV
2021	2	408,83 ECV	643,17 ECV	234,34 ECV
2022	3	417,01 ECV	656,03 ECV	239,03 ECV
2023	4	425,35 ECV	669,16 ECV	243,81 ECV
2024	5	433,86 ECV	682,54 ECV	248,68 ECV
2025	6	442,53 ECV	696,19 ECV	253,66 ECV
2026	7	451,38 ECV	710,11 ECV	258,73 ECV
2027	8	460,41 ECV	724,32 ECV	263,90 ECV
2028	9	469,62 ECV	738,80 ECV	269,18 ECV
2029	10	479,01 ECV	753,58 ECV	274,57 ECV
2030	11	488,59 ECV	768,65 ECV	280,06 ECV
2031	12	498,36 ECV	784,02 ECV	285,66 ECV
2032	13	508,33 ECV	799,70 ECV	291,37 ECV
2033	14	518,50 ECV	815,70 ECV	297,20 ECV
2034	15	528,87 ECV	832,01 ECV	303,14 ECV
2035	16	539,44 ECV	848,65 ECV	309,21 ECV
2036	17	550,23 ECV	865,62 ECV	315,39 ECV
2037	18	561,24 ECV	882,94 ECV	321,70 ECV
2038	19	572,46 ECV	900,59 ECV	328,13 ECV
2039	20	583,91 ECV	918,61 ECV	334,69 ECV