



Análise de Viabilidade da Utilização de Coletores Solares na Europa

SÍLVIA ARAÚJO DE OLIVEIRA

Maio de 2019

ANÁLISE DE VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE COLETORES SOLARES NA EUROPA

Sílvia Araújo de Oliveira

1150057

2018-2019

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

ANÁLISE DE VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE COLETORES SOLARES NA EUROPA

1150057

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 José da Silva Ribeiro.

2018-2019

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

JÚRI

Presidente

Orientador

Co-orientador

Arguente

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação não seria possível sem o apoio e orientação do Professor Doutor Leonardo José da Silva Ribeiro, a quem agradeço por todo o conhecimento que transmitiu durante a realização deste trabalho.

Um agradecimento especial ao Engenheiro Joaquim Fernandes Monteiro pela amabilidade, pela paciência e todo o apoio.

Aos meus pais, à minha tia Mi e ao meu irmão por terem sido os meus pilares durante toda a minha vida.

Aos meus amigos, pela amizade e tempo sacrificado durante a realização deste trabalho.

PALAVRAS CHAVE

Energia Renovável; Energia Solar; Método da Fração Solar; Coletores Solares Planos; Coletores Solares Tubos de Vácuo;

RESUMO

Com a contínua dependência energética que se tem vindo a intensificar nas últimas décadas com a evolução da vida do Homem, faz cada vez mais sentido estudar de forma crítica a sustentabilidade dos recursos energéticos utilizados. A energia fóssil tem vindo a ser vastamente utilizada para fins de mobilidade, conforto, produção industrial e várias outras aplicações. Para assegurar um futuro sustentável para as seguintes gerações é necessário repensar a forma de obtenção de energia e procurar alternativas mais limpas e responsáveis.

A energia proveniente de fontes renováveis é uma opção sustentável e apresentam-se como alternativa aos combustíveis fósseis. É considerada fonte renovável quando a energia é aproveitada da natureza de forma inesgotável, exemplos disso são a energia solar, hídrica, eólica, geotérmica e biomassa. Com todas as vantagens que a energia renovável apresenta, na segunda década do século XXI ainda nos encontramos muito dependentes dos recursos fósseis.

Nesta dissertação realizou-se uma análise de viabilidade de custo e ambiental de alguns sistemas de aquecimento de águas sanitárias (AQS). Das opções renováveis incluem-se as de fonte solar com coletores solares planos e coletores de tubos de vácuo, ambos com apoio elétrico. Um terceiro sistema renovável é a biomassa, com recurso a uma caldeira a *pellets*. Quanto às opções não renováveis foi estudada a opção elétrica, gás natural e GPL.

De modo a conhecer melhor a realidade em vários países, cinco países no continente Europeu foram estudados, sendo eles a Espanha, Alemanha, Bélgica, Grécia e Portugal. O método da fração solar foi aplicado de forma a diferenciar a energia solar obtida nos diferentes países.

Deste trabalho verificou-se que em países onde a exposição solar é maior a utilização de coletores solares é uma opção económica e sustentável. Os coletores solares de tubos de vácuo apesar de serem mais dispendiosos fará sentido a sua utilização em zonas de menor exposição solar, por esta solução permitir uma maior absorção de energia térmica.

KEYWORDS

Renewable Energy; Solar Energy; f-chart method; Flat Plane Solar Collectors; Evacuated Tube Solar Collectors

ABSTRACT

With the continuous energy dependence that has been intensifying in the last decades with the evolution of human life, it makes more and more sense to critically study the sustainability of energy resources. Non-renewable energy has come to be widely used for mobility, comfort, industrial production and various other applications. To ensure a sustainable future for the next generations it is necessary to rethink the way to obtain energy and seek cleaner and more responsible alternatives.

Energy from renewable sources is a sustainable option and is an alternative to fossil fuels. It is considered a renewable source when energy is taken from nature in an inexhaustible way, examples are solar, hydro, wind, geothermal and biomass. With all the advantages that renewable energy present, in the second decade of the 21st century we are still very dependent on fossil resources.

In this dissertation a cost and environmental feasibility analysis of domestic hot water systems (DHW) was carried out. Renewable options include solar source with flat solar collectors and evacuated tube collectors, both with electric support. A third renewable system is biomass, using a pellet boiler. Regarding the non-renewable options, an electric, natural gas and LPG systems were studied.

In order to understand the reality in several countries, five countries in the European continent were studied. These countries are Spain, Germany, Belgium, Greece and Portugal. The f-chart method was applied in a way to differentiate the solar energy obtained in these countries.

From this work it was verified that in countries where solar exposure is greater, the use of solar collectors is an economic and sustainable option. The evacuated tube solar collectors, although more expensive, will make sense to use in areas with less sun exposure, because this solution allows a greater absorption of thermal energy.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

AQS	Águas Quentes Sanitárias
RCCTE	Reglamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
TIR	Taxa interna de retorno
VAL	Valor Atual Líquido
WRC	<i>World Radiation Center</i>
GPL	Gás de Petróleo Liquefeito

Lista de Unidades

€	Euro
°C	Grau Celsius
J	Joule
K	Kelvin
L	Litro
m	Metro
min	Minuto
kg	Quilograma
kWh	Quilowatt-hora
s	Segundo
W	Watt

Símbolos latinos

Termo	Designação	Unidade
$^{\circ}$	Ângulo	grau
A	Área da superfície	m^2
A_z	Azimute	-
AR	Ascensão reta	-
B_{anual}	Balanço económico anual	€/ano
$c_{\text{água}}$	Calor específico da água	$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$
DD	Declinação do dia	-
$E_{poupada\ anual}$	Energia poupada anual	kWh
f	Fração solar	-
F_r	Fator de remoção do calor do coletor	-
F'_R	Fator de remoção de calor modificado	-
G	Radiação global incidente numa superfície	$J\ m^{-2}\ dia$
G_h	Radiação global incidente sobre uma superfície horizontal	$J\ m^{-2}\ dia$
G_h^d	Radiação global diária sobre uma superfície horizontal	$J\ m^{-2}\ dia$
G_h^{dm}	Radiação global diária média mensal sobre uma superfície horizontal	$J\ m^{-2}\ dia$
H_o^{min}	Ângulo horário mínimo	-
H_o	Ângulo horário	-
h_a	Altura angular	-
INV	Investimento inicial	€
I	Irradiação de uma superfície	$J\ m^{-2}\ dia$
I_{β}	Radiação total incidente sobre uma superfície inclinada	$J\ m^{-2}\ dia$
K_t	Índice de claridade	-
$\dot{m}$	Caudal mássico	Kgs^{-1}
M_{AQS}	Consumo médio diário de referência	l / pessoa
n	Dia do ano	-
n_d	Número de dias mensais	dias
P	Potência total emitida	W
Q_{AQS}	Necessidades de aquecimento AQS	KWh /ano
Q_{inc}	Potência total incidente num coletor	W
Q_{per}	Potência dissipada num coletor	W
Q_{req}	Carga térmica requerida	J
Q_{sol}	Energia captada pelos coletores solares	J
$Q_{\text{útil}}$	Potência útil	W
R^d	Radiação diária	$J\ m^{-2}\ dia$
R^{dm}	Radiação diária média mensal	$J\ m^{-2}\ dia$
R^{hm}	Radiação horária média	$J\ m^{-2}\ dia$

R^i	Radiação instantânea	J m ⁻² dia
R^{dif}	Radiação difusa que atinge superfície terrestre	J m ⁻² dia
R^{dif}_β	Radiação difusa sobre uma superfície inclinada	J m ⁻² dia
R^{dif}_h	Radiação difusa diária sobre uma superfície horizontal	J m ⁻² dia
$R^{dif}_{h^{dm}}$	Radiação difusa diária média mensal sobre uma superfície horizontal	J m ⁻² dia
R^{dir}	Radiação direta que atinge superfície terrestre	J m ⁻² dia
R^{dir}_β	Radiação direta sobre uma superfície inclinada	J m ⁻² dia
S_0	Constante solar	W m ⁻²
S_n	Potência solar por unidade de área fora da atmosfera	W m ⁻²
S_{oh}	Radiação solar sobre uma superfície horizontal extraterrestre	W m ⁻²
S_{oh}^d	Radiação solar diária sobre uma superfície horizontal extraterrestre	W m ⁻²
T	Temperatura da superfície	K
T_a	Temperatura do ambiente média mensal	K ou °C
T_{amb}	Temperatura ambiente	K ou °C
T_{ar}	Temperatura ambiente média mensal de cada país	K ou °C
T_{col}	Temperatura do coletor	K ou °C
T_{ent}	Temperatura de entrada	K ou °C
TIR	Taxa interna de retorno	-
T_{min}	Temperatura mínima de água aquecida	K ou °C
t_r	Tempo de retorno	anos
T_{rede}	Temperatura diária mensal de água de rede	K ou °C
T_{ref}	Temperatura de referência	K ou °C
T_{sai}	Temperatura de saída	K ou °C
U_L	Coeficiente de transferência de calor do coletor	W m ⁻² °C
$V_{manutenção}$	Custo de manutenção anual do equipamento	€
C_{kwh}	Custo do kWh do referente ano	kWh
$V_{poupado\ anual}$	Valor poupado anual	Euros
X ; Y	Parâmetros adimensionais	-

Símbolos gregos

α	Coeficiente de absorção da placa	-
ρ	Coeficiente de reflexão total hemisférica	-
τ	Coeficiente de transmissão	-
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	W m ⁻² K ⁻⁴
δ	Declinação	°
ε	Emissividade	-
ϕ	Latitude	°
γ	Ponto Vernal	-
η	Rendimento do coletor	-

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – PODER EMISSIVO ESPETRAL HEMISFÉRICO DE UM CORPO NEGRO A VÁRIAS TEMPERATURAS (ADAPTADO).	31
FIGURA 2 – SISTEMA DE COORDENADAS EQUATORIAL.	33
FIGURA 3 – SISTEMA DE COORDENADAS HORIZONTAL.	34
FIGURA 4 – LATITUDE E LONGITUDE.	35
FIGURA 5 – MOVIMENTO TERRA-SOL (ADAPTADO).	35
FIGURA 6 – ÂNGULO HORÁRIO AO LONGO DO DIA	36
FIGURA 7 - TIPOS DE RADIAÇÃO SOLAR (ADAPTADO).	37
FIGURA 8 – CURVA DE COLLARES PEREIRA E RABL (ADAPTADO).	38
FIGURA 9 – ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DO FEIXE	39
FIGURA 10 – COLETOR SOLAR PLANO (ADAPTADO).	41
FIGURA 11 – ESQUEMA DE COLETOR SOLAR TUBO DE VÁCUO (ADAPTADO).	42
FIGURA 12 – BALANÇO ENERGÉTICO TÍPICO DE UM COLETOR SOLAR.	42
FIGURA 13 – CARTA DE FRAÇÃO SOLAR.	46
FIGURA 14 - CORREÇÃO DE ARMAZENAMENTO PARA SISTEMAS LÍQUIDOS.	46
FIGURA 15 – CONSUMO DIÁRIO DE REFERÊNCIA.	47
FIGURA 16 – COLETOR SOLAR PLANO ARISTON KAIROS XP 2.5	53
FIGURA 17 – COLETOR SOLAR DE TUBOS DE VÁCUO KINGSPAN SOLAR THERMOMAX HP400	53
FIGURA 18 – TERMOACUMULADOR ELÉTRICO ARISTON	54
FIGURA 19 – CALDEIRA ALTEAS A GÁS NATURAL E GPL	55
FIGURA 20 – CALDEIRA A <i>PELLETS</i>	55
FIGURA 21 – ÂNGULOS HORÁRIOS DE POR DO SOL EM CADA CIDADE.	56
FIGURA 22 – RADIAÇÃO INCIDENTE NO EXTERIOR DA ATMOSFERA.	57
FIGURA 23 – RADIAÇÃO GLOBAL MÉDIA MENSAL INCIDENTE NUMA SUPERFÍCIE POUSADA HORIZONTALMENTE NO SOLO.	57

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – RÁCIO DE RADIAÇÃO ENTRE SUPERFÍCIE INCLINADA E HORIZONTAL	40
TABELA 2 – COORDENADAS GEOGRÁFICAS DAS ESTAÇÕES EM ESTUDO.	55
TABELA 3 – ÍNDICES DE CLARIDADE RELATIVOS A CADA PAÍS NOS RESPECTIVOS MESES DO ANO.	56
TABELA 4 - IRRADIAÇÃO INCIDENTE ALMERIA, ESPANHA.	58
TABELA 5 – IRRADIAÇÃO INCIDENTE ESTUGARDA, ALEMANHA.	59
TABELA 6 – IRRADIAÇÃO INCIDENTE BRUXELAS, BÉLGICA.	59
TABELA 7 – IRRADIAÇÃO INCIDENTE ATENAS, GRÉCIA.	60
TABELA 8 – IRRADIAÇÃO INCIDENTE EM PORTO, PORTUGAL.	60
TABELA 9 – IRRADIAÇÃO INCIDENTE COM ÂNGULOS ÓTIMOS.	61
TABELA 10 - VALORES UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DA FRAÇÃO SOLAR	61
TABELA 11 - TEMPERATURA DA ÁGUA DE REDE DE CADA PAÍS, EM GRAUS	62
TABELA 12 - VALORES DAS NECESSIDADES AQS, EM KWH	62
TABELA 13 – FRAÇÃO SOLAR EM ALMERIA, ESPANHA.	63
TABELA 14 – FRAÇÃO SOLAR EM ESTUGARDA, ALEMANHA.	63
TABELA 15 – FRAÇÃO SOLAR EM BRUXELAS, BÉLGICA.	64
TABELA 16 – FRAÇÃO SOLAR EM ATENAS, GRÉCIA.	64
TABELA 17 – FRAÇÃO SOLAR EM PORTO, PORTUGAL.	65
TABELA 18 – NECESSIDADES AQS E ENERGIA ÚTIL ANUAL DOS COLETORES SOLARES.	65
TABELA 19 - ANÁLISE ECONÓMICA TERMOACUMULADOR ELÉTRICO	66
TABELA 20 – ANÁLISE ECONÓMICA COM COLETOR SOLAR.	67
TABELA 21 - ANÁLISE ECONÓMICA COM COLETOR SOLAR TUBO DE VÁCUO.	67
TABELA 22 – ANÁLISE ECONÓMICA GÁS NATURAL.	67
TABELA 23 – ANÁLISE ECONÓMICA GPL.	68
TABELA 24 – ANÁLISE ECONÓMICA <i>PELLETS</i> .	68
TABELA 25 – SÍNTESE DA ANÁLISE ECONÓMICA, EM EUROS.	69
TABELA 26 – COLETORES PLANOS VS. TUBOS DE VÁCUO.	69
TABELA 27 – COMPARATIVO DE CUSTO COM E SEM APOIO SOLAR.	69
TABELA 28 – ANÁLISE DE INVESTIMENTO PELO VAL.	70
TABELA 29 – TAXA INTERNA DE RETORNO EM PORTUGAL PARA COLETORES SOLARES PLANOS E VÁCUO.	71
TABELA 30 – EMISSÕES ANUAIS DE CO ₂ EM SISTEMAS COM COLETOR PLANO E TUBOS DE VÁCUO.	71
TABELA 31 – EMISSÕES ANUAIS DE CO ₂ DE GÁS NATURAL E GPL NOS PAÍSES EUROPEUS EM ESTUDO	72
TABELA 32 – EMISSÕES CO ₂ DOS VÁRIOS SISTEMAS NOS DIFERENTES PAÍSES, EM KG/CO ₂ ANO	72

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	27
1.1	Objetivos.....	28
1.2	Estrutura	28
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1	Radiação Solar Incidente	31
2.1.1	O sol	31
2.1.2	Posição terra-sol	32
2.1.3	Radiação solar incidente numa superfície horizontal.....	37
2.1.4	Quocientes entre radiação difusa e global	38
2.1.5	Radiação incidente numa superfície inclinada e horizontal.....	39
2.2	Coletores Solares.....	40
2.2.1	Coletores Solares Planos.....	41
2.2.2	Coletores solares de tubos de vácuo.....	41
2.2.3	Balanço energético em coletores solares	42
2.2.4	Radiação solar absorvida por um coletor inclinado relativamente à horizontal.....	44
2.3	Método da fração solar	44
2.3.1	Cálculo das necessidades de aquecimento AQS	47
2.4	Estimativa económica de retorno do investimento.....	48
2.4.1	Poupança económica estimada	49
2.4.2	Balanço económico anual	49
2.4.3	Tempo de retorno de investimento	49
2.4.4	Valor atual líquido (VAL)	50
2.4.5	Taxa interna de retorno (TIR).....	50
3	DESENVOLVIMENTO.....	53
3.1	Características dos equipamentos em estudo.....	53
3.1.1	Coletor solar plano	53
3.1.2	Coletor solar tubos de vácuo	53
3.1.3	Termoacumulador elétrico	54

3.1.4	Esquentador a gás natural e GPL.....	54
3.1.5	Caldeira a pellets.....	55
3.2	Dados relevantes acerca das cidades em estudo	55
3.3	Análise da irradiação nas cidades em estudo.....	58
3.3.1	Almeria, Espanha	58
3.3.1	Estugarda, Alemanha	58
3.3.2	Bruxelas, Bélgica	59
3.3.3	Atenas, Grécia.....	60
3.3.4	Porto, Portugal.....	60
3.3.5	Irradiação incidente nos vários países com ângulo ótimo	61
3.4	Fração solar.....	61
3.4.1	Cálculo das necessidades AQS	62
3.4.2	Almeria, Espanha	63
3.4.1	Estugarda, Alemanha	63
3.4.2	Bruxelas, Bélgica	64
3.4.3	Atenas, Grécia.....	64
3.4.4	Porto, Portugal.....	65
3.4.5	Energia útil anual dos coletores solares	65
3.5	Análise económica e ambiental	65
3.5.1	Análise económica dos sistemas.....	66
3.5.2	Síntese da análise económica	68
3.5.3	Análise de retorno de investimento.....	69
3.5.4	Análise ambiental.....	71
3.5.5	Síntese da análise ambiental	72
4	CONCLUSÕES E SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS.....	75
4.1	Conclusões	75
4.2	Trabalhos futuros	76
5	BIBLIOGRAFIA	79
6	ANEXOS	85
6.1	Anexo A.....	85
6.2	Anexo B.....	86

6.3	Anexo C.....	87
6.4	Anexo D.....	88
6.5	Anexo D.....	89

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

O recurso às energias renováveis é cada vez mais importante para o desenvolvimento tecnológico que nos torna mais dependentes de energia. Por esse motivo, é importante estudar e conhecer as energias renováveis para aumentar a utilização destas em detrimento da energia proveniente de recursos fósseis.

A energia solar tem vindo a ser cada vez mais utilizada para sistemas de aquecimento de águas sanitárias (AQS) em edifícios residenciais. Esta evolução é particularmente importante pois aproximadamente 40% da energia gasta na Europa tem como destino edifícios [1], onde por motivos económicos, de sensibilização ambiental e legislativos a opção de aquecimento de águas AQS por coletor solar tem sido uma opção adotada. De forma a ir de encontro com as necessidades em residências, este estudo focou-se no exemplo de uma habitação com 4 habitantes.

Nesta dissertação foi estudada a viabilidade de utilização de coletores com tubos de vácuo, tecnologia que poderá ser opção aos coletores solares planos [2]. Além da solução solar, fez-se um comparativo com as soluções mais utilizadas de momento como é o caso do gás natural, o gás de petróleo liquefeito (GPL) e a energia elétrica. Também se fez uma análise com um tipo de combustível mais recente que são os *pellets*. O comparativo entre estas soluções de energia será realizado recorrendo a uma análise económica e ambiental.

A localização geográfica é um fator importante para conhecer a disponibilidade solar em diferentes países, portanto neste trabalho cinco cidades do continente Europeu foram objeto de estudo, sendo elas o Porto (Portugal), Almeria (Espanha), Estugarda (Alemanha), Bruxelas (Bélgica) e Atenas (Grécia).

Além da questão ambiental, o preço das diferentes fontes de energia em cada país pode definir a escolha do consumidor, motivo pelo qual durante este trabalho utilizou-se os preços energéticos de cada país para estimar o custo. Além disso, pelo facto da energia elétrica em diferentes países ter origens distintas, o impacto ambiental dos mesmos também será diferente, algo que também foi tomado em conta.

De forma a avaliar o investimento económico de forma mais realista, aplicou-se o critério do VAL e TIR para Portugal, de forma a considerar no balanço económico não só a poupança, mas também fatores como o custo da manutenção dos equipamentos e também a inflação da moeda.

1.1 Objetivos

A análise económica e ambiental da utilização de sistemas com painéis solares é importante para avaliar o retorno do investimento ao longo do tempo e questões de sustentabilidade. Além disso, torna-se importante comparar este sistema com outros de aquecimento AQS tradicionalmente usados e novas alternativas presentes no mercado.

A viabilidade de um sistema para aquecimento de águas sanitárias foi considerada para uma habitação com 4 moradores. Dessa forma, foi necessário estimar as necessidades AQS de cada caso em estudo e proceder à análise de cada um dos combustíveis anteriormente referidos. No caso da solução solar recorreu-se à metodologia da fração solar para estimar a potencialidade da utilização destas.

1.2 Estrutura

Esta dissertação divide-se em 3 capítulos. O primeiro é a revisão bibliográfica onde é feita a fundamentação teórica acerca dos conceitos envolvidos neste trabalho dividindo-se em três tópicos. O primeiro consiste na explicação das especificidades da radiação incidente na superfície terrestre, o segundo aborda os painéis solares em estudo e o terceiro fala sobre o método de cálculo da fração solar.

O segundo capítulo é o desenvolvimento onde será explicado e apresentados os resultados das diferentes cidades europeias e o cálculo da fração solar para coletores solares planos bem como para coletores de tubos de vácuo. A análise económica e ambiental será realizada neste tópico.

Por fim temos o capítulo das conclusões onde os resultados serão discutidos e comentados.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Radiação Solar Incidente

2.1.1 O sol

O sol é a estrela central do sistema solar e todos os corpos celestes incluindo o planeta terra giram em torno dela. O sol possui um diâmetro de $1,39 \times 10^9$ metros, 109 vezes maior que o diâmetro equatorial da terra e encontra-se a uma distância de aproximadamente $1,5 \times 10^{11}$ metros da terra [3].

A massa do sol é cerca de 330 vezes superior à do planeta terra correspondendo a mais de 99% da massa de todo o sistema solar [4], sendo o responsável pela força gravítica que mantém os outros objetos celestes a orbitar à sua volta. A massa do sol é composta por cerca de 71% de hidrogénio e por 27% de hélio, além de outros elementos em menores quantidades [5].

Estima-se que a temperatura da superfície solar ronda os 5777 K e a temperatura nas zonas internas pode atingir os 40×10^6 K. A emissibilidade de um corpo negro é descrita pela lei de *Planck*; na Figura 1 apresentam-se curvas de poder emissivo espectral hemisférico para várias temperaturas. Sabendo que a superfície solar tem um poder emissivo espectral hemisférico próximo de um corpo negro a 5777 K, podemos admitir que o sol emite como um corpo negro a essa temperatura [6].

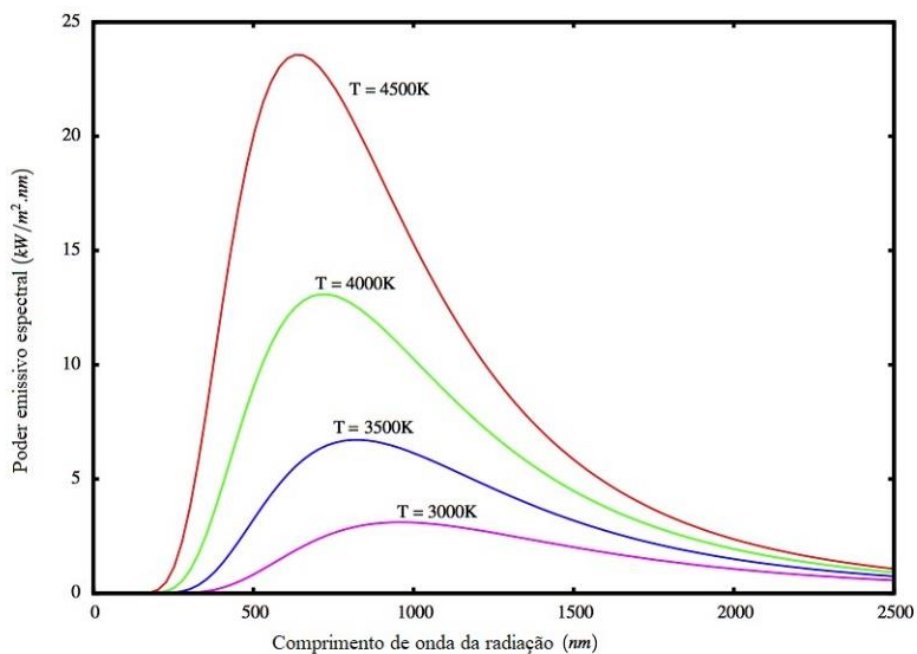


Figura 1 – Poder emissivo espectral hemisférico de um corpo negro a várias temperaturas (adaptado) [7].

Para determinar a potência térmica total hemisférica emitida pelo sol, aplica-se a Lei de Stefan-Boltzmann para o corpo negro aplicando a Equação 2.1:

$$P = \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (2.1)$$

Em que:

P – Potência total emitida, em W;

σ – Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$);

A – Área da superfície, em m^2 ;

T – Temperatura exterior do sol, em K.

Como o sol tem emissibilidade muito próxima de 1, e diâmetro de $1,39 \times 10^9$ metros, aplicando a Equação 2.1 é possível verificar que a potência térmica total emitida pelo sol é de $9,58 \times 10^{25} \text{ W}$.

Constante Solar

A constante solar, S_0 , é a energia emitida pelo sol por unidade de tempo e área, e recebida numa superfície, colocada fora da atmosfera terrestre, estando essa superfície perpendicular à direção de propagação da radiação solar e situada num ponto da órbita terrestre. O raio desta órbita varia cerca de 1,7% em relação à distância média terra-sol ao longo do ano [8].

Ao longo dos anos a determinação do valor desta constante tem sido objeto de estudo por várias entidades e investigadores. O valor adotado pela *World Radiation Center* (WRC) e que gera mais consenso é de 1367 W.m^{-2} [9].

A constante solar para determinado dia n do ano é expressa em Wm^{-2} e é calculada recorrendo à Equação 2.2:

$$S_n = S_0 \times \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360 \cdot n}{365} \right) \right] \quad (2.2)$$

Em que:

S_n – Constante solar fora da atmosfera num determinado dia ano, em W.m^{-2} ;

S_0 – Constante solar, em W.m^{-2} ;

n – Número de ordem do dia do ano.

2.1.2 Posição terra-sol

Os sistemas de coordenadas celestes têm como objetivo definir a posição dos astros na esfera celeste; nesta tese utilizar-se-ão o sistema de coordenadas equatorial e horizontal. É a partir destes sistemas de coordenadas que se efetua o cálculo da radiação solar incidente na terra [10].

Sistema de Coordenadas Equatorial

Segundo a teoria geocêntrica, a Terra encontra-se no centro do universo com os corpos celestes a orbitarem à sua volta. Por sua vez, a teoria heliocêntrica defende que o sol se encontra no centro do universo e todos os corpos celestes orbitam à sua volta. Estas duas teorias descrevem movimentos e posições muito distintas do sol em torno da terra, e de forma a simplificar a elaboração deste trabalho a teoria geocêntrica irá ser adotada [10].

Segundo esta teoria a terra está imóvel e encontra-se no centro do universo, à sua volta orbitam planetas, asteroides, o sol e estrelas do firmamento. O eixo da terra que une os polos norte e sul terrestres está alinhado com o eixo do universo e é denominado de “Eixo do Mundo”, passando pelos polos norte e sul celestes. Perpendicular a este eixo temos o plano do equador que coincide com o equador terrestre [10].

No sistema de coordenadas equatorial representado na Figura 2, a posição da estrela E é definida por dois ângulos [10]:

- Declinação, δ : representa o ângulo medido sobre o meridiano que passa pela estrela ou astro a partir do equador celeste;
- Ascensão reta, α : representa o ângulo medido sobre o equador celeste (no sentido contrário dos ponteiros do relógio) desde o meridiano que passa pelo ponto Vernal (γ) até ao meridiano que passa pela estrela.

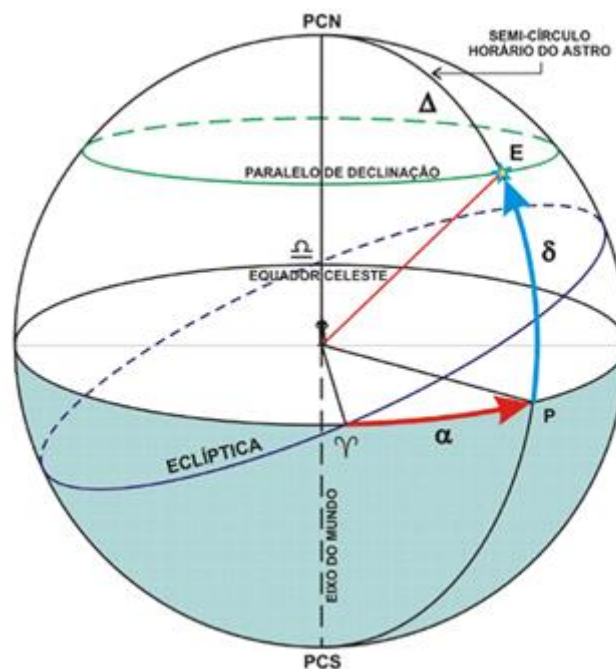


Figura 2 – Sistema de coordenadas equatorial [11].

A eclíptica define-se como sendo a órbita que o sol percorre em torno da terra durante um ano, e encontra-se num plano inclinado $23,45^\circ$ em relação ao plano do equador celeste.

Sistema de Coordenadas Horizontal

O sistema de coordenadas horizontal varia consoante a localização do observador sobre a terra. Define-se pela linha perpendicular à direção do fio prumo que passa pelo local onde está o observador. A linha de prumo interceta a esfera celeste no zénite e no nadir. O zénite representa o ponto da esfera celeste do lado da cabeça do observador e nadir representa o ponto do lado dos pés.

No sistema de coordenadas horizontal a posição de um astro define-se por [11]:

- Altura, h : Consiste no afastamento angular de um astro em relação ao horizonte do observador, como podemos ver representado a azul na Figura 3. A altura é expressa em graus, minutos e segundos de arco.
- Azimute, A_z : Indica o afastamento angular medido sobre o arco do horizonte, contado a partir do ponto cardeal norte do local de observação e o plano que passa pelo astro, zénite e nadir. Encontra-se na Figura 3 representado a vermelho.

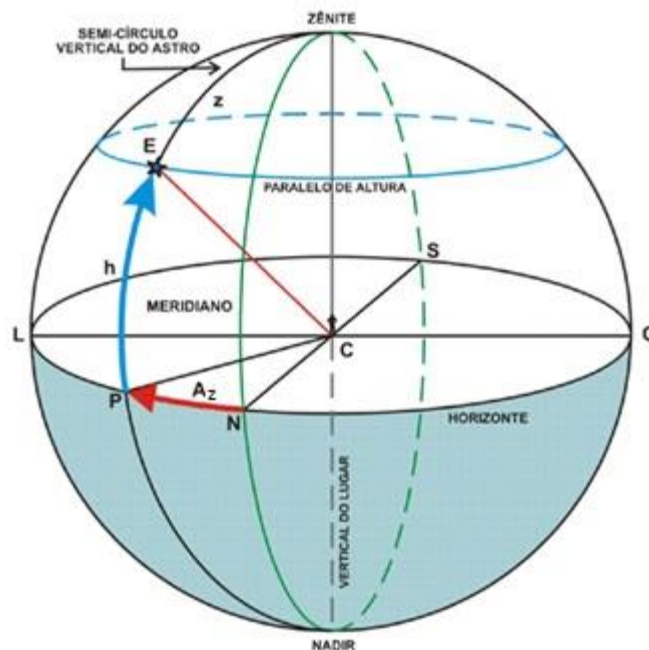


Figura 3 – Sistema de coordenadas horizontal [11].

A determinação de uma posição no planeta terra é realizada recorrendo a coordenadas geográficas de latitude e longitude.

A latitude é a distância angular ao Equador medida ao longo do meridiano de *Greenwich*. Esta medida varia entre os 0° no Equador e pode ir até aos 90° nos pólos, sendo positivo a norte e negativo a sul. A longitude é o ângulo entre uma determinada posição e o meridiano de *Greenwich*, variando entre 0° a 180° a Este ou Oeste. Na Figura 4 é apresentada a latitude à esquerda e a longitude à direita.

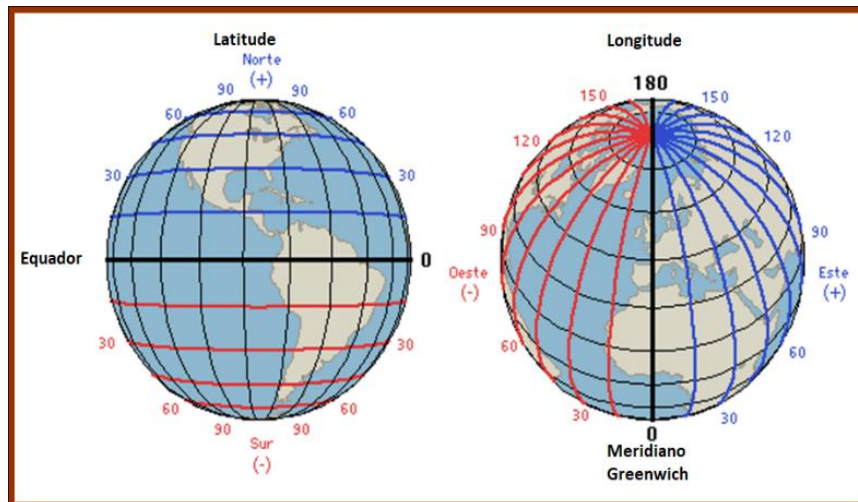


Figura 4 – Latitude e longitude.

Transformação de coordenadas entre o sistema equatorial e sistema horizontal

As Equações 2.3, 2.4 e 2.5 da Trigonometria Esférica apresentadas relacionam o sistema equatorial com o sistema horizontal [12].

$$\sin(\delta) = \sin(\phi) \sin(h_a) - \cos(\phi) \cos(h_a) \cos(A_z) \quad (2.3)$$

$$\cos(\delta) \cos(A_R) = \cos(h_a) \sin(A_z) \quad (2.4)$$

$$\cos \delta \sin(A_R) = \cos(\phi) \sin(h_a) + \sin(\phi) \cos(h_a) \cos(A_z) \quad (2.5)$$

Onde ϕ representa a latitude do local onde o observador se encontra na superfície terrestre.

Distância terra-sol

O movimento de translação da terra em torno do sol é feito numa trajetória elíptica e cada volta em torno do sol dura 365,25 dias. A excentricidade da órbita terrestre é considerada quase nula [13] pois varia cerca de 1,7% ao longo do ano.

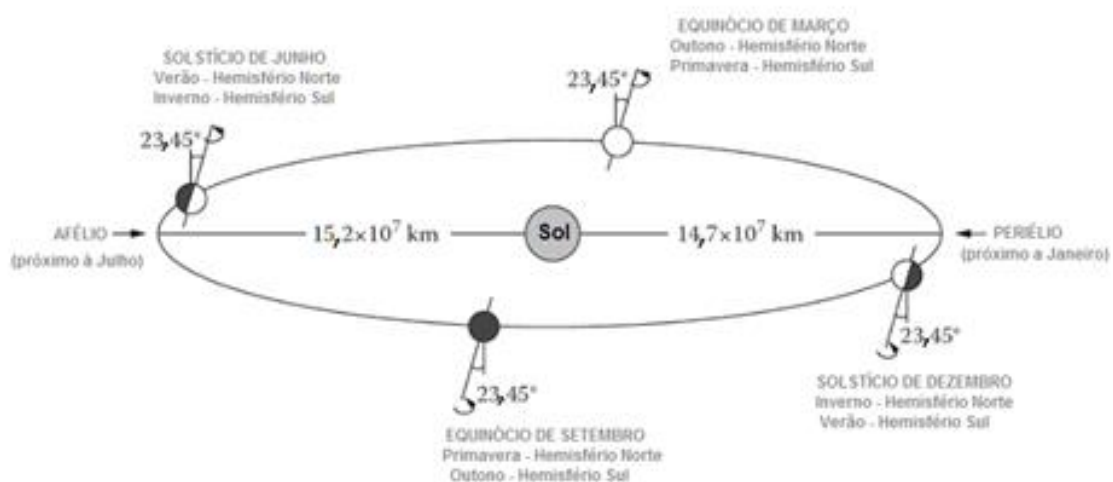


Figura 5 – Movimento terra-sol (adaptado) [14].

Declinação Solar

A declinação solar δ , é um ângulo em graus que pode ser calculado com recurso à Equação 2.6 [15]:

$$\delta = 23,45 \times \sin\left(360 \times \frac{284 + n}{365}\right) \quad (2.6)$$

Em que n é o número de ordem do dia do ano, que pode ir de 1 de janeiro até 31 de dezembro.

Duração do dia

Considerando que a terra se encontra imóvel no centro da Esfera Celeste, durante 24 horas o sol gira 360° em torno da terra. A duração do dia, DD , em horas, para dado local na terra à latitude de ϕ , é calculada pela Equação 2.7 [10]:

$$DD = \frac{2}{15} \times \arccos(-\tan \delta \tan \phi) \quad (2.7)$$

Em que:

δ – Declinação do sol, em graus;

ϕ – Latitude, em graus.

Ângulo Horário

O ângulo horário define-se pela Equação 2.8, e os vários ângulos ao longo do dia podem ser vistos na Figura 21 [10]:

$$H_o = \arccos(-\tan \delta \tan \phi) \quad (2.8)$$

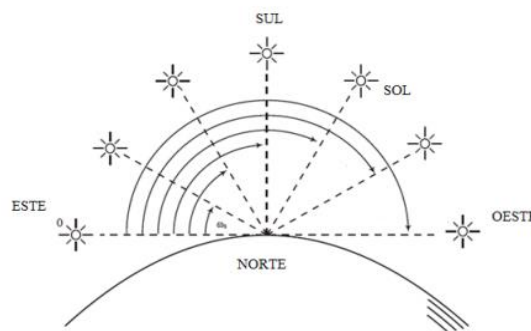


Figura 6 – Ângulo horário ao longo do dia

2.1.3 Radiação solar incidente numa superfície horizontal

Quase todas as formas de energia na terra têm origem na radiação solar. A energia emitida pelo sol chega à terra sob forma de ondas eletromagnéticas. A radiação solar que incide num coletor montado na superfície terrestre é composta por três tipos [10]:

- Radiação direta, R^{dir} : os raios solares atingem diretamente a superfície do coletor, sem qualquer reflexão ou refração.
- Radiação difusa, R^{dif} : resulta da difusão dos raios solares incidentes nas nuvens e aerossóis suspensos na atmosfera.
- Radiação refletida (albedo), R^{alb} : consiste na radiação solar refletida por edifícios, vegetação e solo sobre o coletor solar.

Estes três tipos de radiação estão representados na Figura 7.

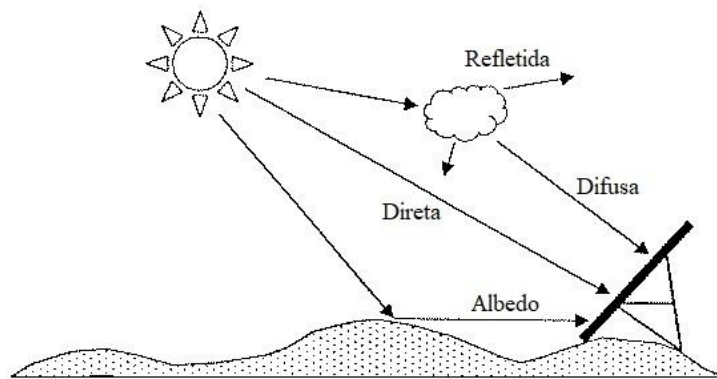


Figura 7 - Tipos de radiação solar (adaptado) [16].

A radiação global incidente numa superfície, G , é calculada utilizando a Equação 2.9:

$$G = R^{dir} + R^{dif} \quad (2.9)$$

Por sua vez, a irradiação de uma superfície, I , pode ser calculada pela Equação 2.10:

$$I = R^{dir} + R^{dif} + R^{alb} \quad (2.10)$$

As Equações 2.9 e 2.10 podem ser utilizadas para cálculos instantâneos (R^i), horários médios (R^{hm}), diários (R^d) ou diários médios mensais (R^{dm}).

Radiação solar sobre uma superfície exterior da atmosfera terrestre

A energia média diária da radiação solar sobre uma superfície horizontal e fora da atmosfera terrestre, S_{oh}^d pode ser calculada pela Equação 2.11 [10]:

$$S_{oh}^d = \frac{24 \times 3600}{\pi} \times 1367 \times \left(1 + 0,033 \times \cos\left(\frac{360 \times n}{365}\right)\right) \times \left(\cos \varphi \cos \delta \sin H_o + \frac{2\pi \times H_o}{360} \sin \varphi \sin \delta\right) \quad (2.11)$$

Índice de Claridade

O índice de claridade, K_t , é a razão entre a radiação global incidente sobre uma superfície horizontal pousada na terra e a radiação que incide horizontalmente na atmosfera, sendo utilizado para classificar a nebulosidade. Este índice é calculado utilizando a Equação 2.12 [10]:

$$K_t = \frac{G_h}{S_{oh}} \quad (2.12)$$

2.1.4 Quocientes entre radiação difusa e global

O quociente entre a radiação difusa diária mensal ($R_h^{dif d}$) numa superfície horizontal e a radiação global diária mensal (G_h^d) na mesma superfície está relacionado com o índice de claridade. A relação entre estas duas radiações e o índice de claridade diário médio mensal é mostrada pela curva de Collares-Pereira e de Rabl [17] apresentada na Figura 8.

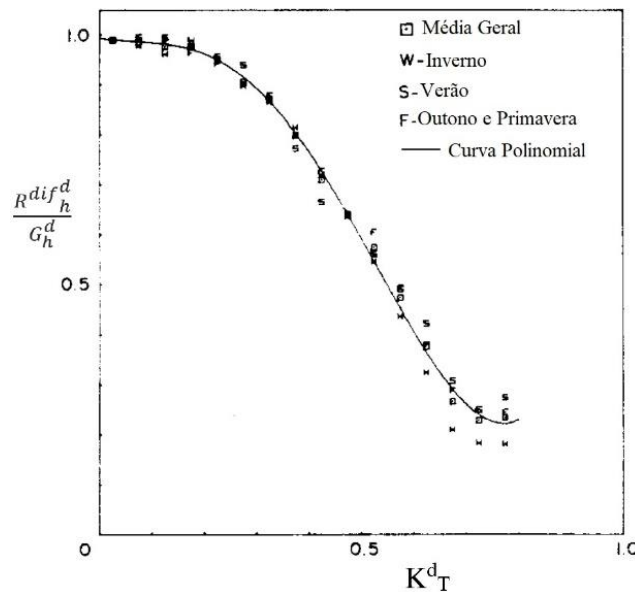


Figura 8 – Curva de Collares Pereira e Rabl (adaptado) [17].

A curva da Figura 8 pode ser aproximada pelas correlações das Equações 2.13, 2.14, 2.15 e 2.16 [17]:

$$\frac{R_h^{dif d}}{G_h^d} = 0,99 \text{ se } K_T^{dif} \leq 0,17 \quad (2.13)$$

$$\frac{R_h^{dif d}}{G_h^d} = 1,188 - 2,272k_t^d + 9,473 \times (k_t^d)^2 - 21,865 \times (k_t^d)^3 + 14,648 \times (k_t^d)^4 \quad (2.14)$$

$$\text{se } 0,17 \leq k_t^d \leq 0,75$$

$$\frac{R_{dh}^{difd}}{G_h^d} = -0,54k_t^d + 0,632 \text{ se } 0,75 \leq k_t^d \leq 0,80 \quad (2.15)$$

$$\frac{R_{dh}^{difd}}{G_h^d} = 0,2 \text{ se } k_t^d \geq 0,80 \quad (2.16)$$

2.1.5 Radiação incidente numa superfície inclinada e horizontal

A irradiação que incide num coletor solar inclinado pode ser calculada a partir do valor de irradiação sobre uma superfície horizontal, [3]. Sendo o rácio r a relação entre a irradiação total incidente sobre uma superfície inclinada na terra, I_β , e a irradiação global incidente sobre uma superfície pousada na terra, G_h , temos que:

$$r = \frac{I_\beta}{G_h} \quad (2.17)$$

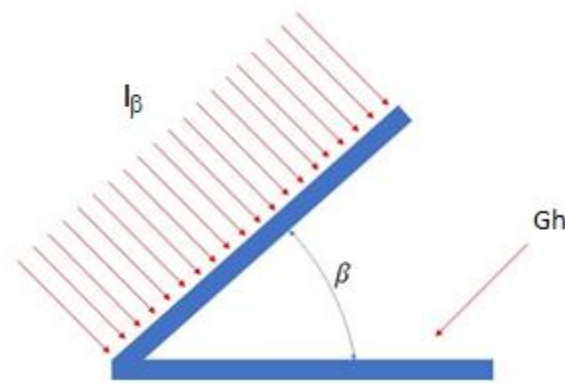


Figura 9 – Ângulo de incidência do feixe

Analogamente para a irradiação direta, difusa e albedo existem as seguintes relações para um coletor solar com o ângulo de inclinação β em relação à horizontal, ver as Equações 2.18, 2.19 e 2.20 [10].

$$r_{dir} = \frac{R_{\beta}^{dir}}{R_{dh}^{dir}} \quad (2.18)$$

$$r_{dif} = \frac{R_{\beta}^{dif}}{R_{dh}^{dif}} \quad (2.19)$$

$$r_{alb} = \frac{R_{\beta}^{alb}}{R_{dh}^{alb}} \quad (2.20)$$

Desenvolvendo a Equação 2.18 e recorrendo à relação de geometrias da Figura 9, a relação r_{dir} , para coletores no hemisfério sul ou norte é determinada pelas Equações 2.21 e 2.22 expostas na Tabela 1, a partir da latitude e a declinação do sol [10]:

Tabela 1 – Rácio de radiação entre superfície inclinada e horizontal [10]

Hemisfério norte com inclinação para sul	$r_{dir} = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \sin H_o^{min} + \frac{\pi}{180} H_o^{min} \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \sin H_o + \frac{\pi}{180} H_o \sin \varphi \sin \delta} \quad (2.21)$
--	--

Hemisfério sul com inclinação para norte	$r_{dir} = \frac{\cos(\varphi + \beta) \cos \delta \sin H_o^{min} + \frac{\pi}{180} H_o^{min} \sin(\varphi + \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \sin H_o + \frac{\pi}{180} H_o \sin \varphi \sin \delta} \quad (2.22)$
--	--

Radiação Difusa

No caso da radiação difusa o rácio r_{dif} , é dado pela Equação 2.23 [18]:

$$r_{dif} = \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (2.23)$$

Radiação Refletida

Para o albedo, assumindo o coeficiente global de reflexão do solo, ρ , tem-se r_{alb} , dado por [18]:

$$r_{alb} = \rho \times \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (2.24)$$

Desenvolvendo a Equação 2.17 e recorrendo às Equações 2.18, 2.19, 2.20, 2.21, 2.22, tem-se r^{dm} (valor diário médio mensal) calculada pela Equação 2.25:

$$r^{dm} = \left(1 - \frac{R_{dif}^{dm}}{G_h^{dm}} \right) R_{dir}^{dm} + \frac{R_{dif}^{dm}}{G_h^{dm}} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (2.25)$$

2.2 Coletores Solares

Em qualquer coletor solar, o princípio de funcionamento consiste na exposição de uma superfície negra à radiação solar de forma que a energia solar térmica absorvida seja transferida para um determinado fluido sob forma de calor. O calor contido nesse fluido que percorre o coletor é utilizado para aquecimento de água/ambiente, quer diretamente quer mediante um tanque de armazenamento de calor, devidamente isolado; neste caso, o calor armazenado pode ser utilizado durante a noite ou então em dias de menor exposição solar [18].

Os dois tipos de coletores solares em estudo nesta dissertação serão os coletores solares planos e os coletores solares de tubos de vácuo.

2.2.1 Coletores Solares Planos

Um coletor solar plano tem funcionamento e fabrico relativamente simples e não tem grande necessidade de manutenção; por esse motivo são muito utilizados em habitações [8]. Estes coletores possuem a mesma área de receção e absorção de radiação, pois o seu fator ótico é praticamente igual a 1, sendo essa radiação aproveitada para gerar energia térmica.

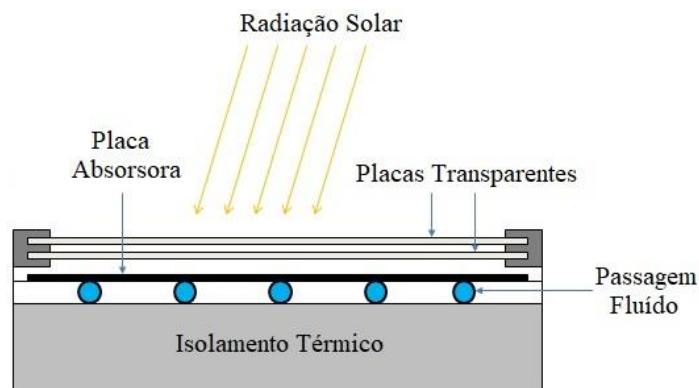


Figura 10 – Coletor Solar Plano (adaptado) [19].

Na Figura 10 é possível observar esquematicamente os componentes de um coletor solar plano. Este coletor tem placas de vidro transparentes para a maior parte da irradiação solar nelas incidente; a irradiação que atravessa as placas de vidro é absorvida pela placa absorvedora, e parcialmente transferida para o líquido, que escoar nos tubos fixados à placa absorvedora. Esta energia absorvida pelo líquido é a energia útil; a diferença entre a energia irradiada sobre o coletor e a dita energia útil é a energia de perdas do coletor, [18].

Os coletores solares planos devem ser direcionados diretamente para o sul no hemisfério norte e para norte no hemisfério sul. Estes coletores permitem o aquecimento da água a temperaturas inferiores a 60°C. Os comprimentos de onda incidentes nos coletores solares planos estão sobretudo entre 0,3 a 2,5 μm , [20].

2.2.2 Coletores solares de tubos de vácuo

Um coletor solar de tubo de vácuo consiste numa série de tubos de vidro dispostos paralelamente e ligados a um tubo de cobre que é designado de tubo do coletor. Estes tubos de vidro substituem a placa absorvedora dos coletores planos.

Os tubos de vidro cilíndricos, pela sua geometria, são atingidos pelos raios solares sempre na perpendicular permitindo assim um desempenho interessante mesmo quando a radiação solar é menor, fazendo delas uma solução interessante em países em que há pouca disponibilidade solar [21].

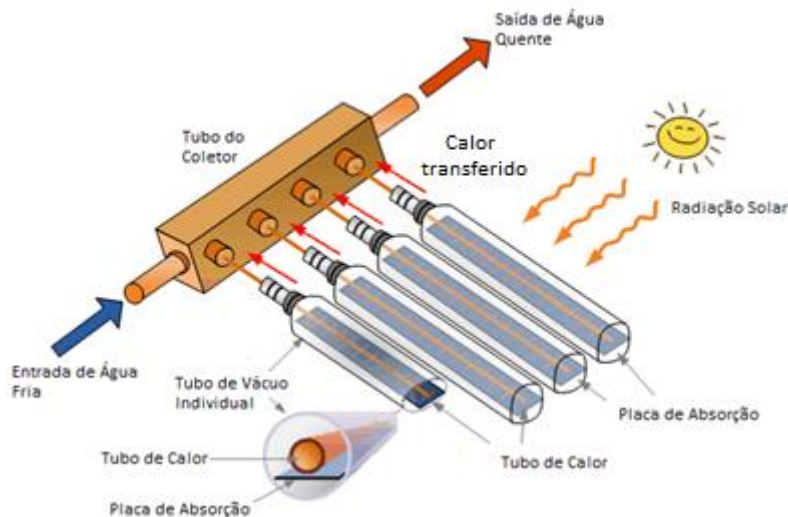


Figura 11 – Esquema de coletor solar tubo de vácuo (adaptado), [21].

Na Figura 11 é possível observar os componentes destes coletores solares. Dentro de cada tubo de vidro existe uma placa de absorção fixa ao tubo de calor que transfere o calor para o fluido que circula dentro deste tubo. O tubo de calor é fabricado em cobre e transfere o calor proveniente da radiação solar por convecção ao fluido que circula no seu interior. Estes tubos de calor em cobre estão ligados a um tubo do coletor que conduz o fluido aquecido para um reservatório [21].

O isolamento por vácuo é tão eficaz que é possível atingir temperaturas de 150°C no tubo interno estando o tubo exterior à temperatura ambiente. A perda de calor dos tubos de vácuo é muito menor quando comparado com os coletores planos, mesmo em ambientes frios [21]. A maior desvantagem dos tubos de vácuo é o seu custo que é superior ao dos coletores planos.

2.2.3 Balanço energético em coletores solares

Uma análise ao balanço energético a coletores solares foi realizada para melhor compreender as trocas de energia [22]. Na Figura 12 é possível ver esquematizado o balanço energético da radiação solar num coletor solar. A potência térmica que entra num coletor solar plano é dada pelo produto da irradiação no coletor, I , em W.m^{-2} , e da área do coletor, A , em m^2 , ver Equação 2.26.



Figura 12 – Balanço energético típico de um coletor solar.

$$Q_{inc} = I \times A \quad (2.26)$$

Há perdas de energia do coletor, para cujo cálculo é necessário saber o coeficiente de transmissão do vidro, τ , e o coeficiente de absorção da placa, α . A potência térmica útil do coletor é dada pela Equação 2.27:

$$Q_{inc} = I(\tau\alpha) \times A \quad (2.27)$$

A perda de potência térmica do coletor por convecção, Q_{per} , varia com o coeficiente de transferência de calor do coletor U_L , com a área do coletor A , com a temperatura do coletor T_{col} e temperatura ambiente T_{amb} , ver a Equação 2.28.

$$Q_{per} = U_L \times A \times (T_{col} - T_{amb}) \quad (2.28)$$

A potência útil do útil do coletor solar $Q_{útil}$ é expressa pela Equação 2.29:

$$\dot{Q}_{útil} = Q_{inc} - Q_{per} = I(\tau\alpha) \times A - U_L \times A \times (T_{col} - T_{amb}) \quad (2.29)$$

Esta potência térmica é igual à potência térmica absorvida pelo fluido de trabalho, do que resulta a Equação 2.30.

$$\dot{Q}_{útil} = m \times c_p \times (T_{sai} - T_{ent}) \quad (2.30)$$

O “fator de remoção do calor do coletor”, F_r , expresso pela Equação 2.31, é a relação entre o ganho útil real de potência térmica do coletor e o ganho útil se todo o coletor estivesse à temperatura de entrada do fluido de trabalho do coletor.

$$F_r = \frac{m \times c_p \times (T_{sai} - T_{ent})}{A \times (I(\tau\alpha) - U_L \times (T_{ent} - T_{amb}))} \quad (2.31)$$

O ganho útil real é obtido multiplicando o fator F_r pelo ganho máximo possível. Reescrevendo a Equação 2.29:

$$Q_{útil} = F_r \times A \times (I(\tau\alpha) - U_L \times (T_{ent} - T_{amb})) \quad (2.32)$$

A Equação 2.32 é utilizada para calcular o ganho real de coletores solares e é conhecida como sendo a “Equação de *Hottel-Whillier-Bliss*”.

O rendimento de um coletor solar, η , é a relação entre a energia térmica útil, $Q_{útil}$, e a energia solar incidente num determinado lapso de tempo, como podemos ver na Equação 2.32.

$$\eta = \frac{\int Q_{útil} \cdot dt}{A \int I \cdot dt} \quad (2.33)$$

A partir da Equação 2.33, o rendimento térmico é dado sucessivamente pelas Equações 2.34, 2.35 e 2.36:

$$\eta = \frac{Q_{\text{útil}}}{A \times I} \quad (2.34)$$

$$\eta = \frac{F_r \times A \times [I(\tau\alpha) - U_L \times (T_{\text{ent}} - T_{\text{amb}})]}{A \times I} \quad (2.35)$$

$$\eta = F_r \tau \alpha - F_r U_L \cdot \left(\frac{T_{\text{ent}} - T_{\text{amb}}}{I} \right) \quad (2.36)$$

Concluimos então que a rendimento de um coletor depende da irradiação solar, da temperatura de entrada do fluido, da temperatura ambiente, do coeficiente de absorção (α), do coeficiente de transmissão (τ).

2.2.4 Radiação solar absorvida por um coletor inclinado relativamente à horizontal

Da radiação incidente sobre uma cobertura de vidro, parte é refletida para a atmosfera, parte é absorvida e o resto é transmitida pela dita cobertura de vidro. Para dada superfície, o coeficiente de absorção (α) representa a fração da radiação total hemisférica incidente absorvida pela superfície; o coeficiente de reflexão (ρ) representa a fração da radiação total hemisférica incidente refletida pela superfície; e o coeficiente de transmissão (τ) representa a fração total hemisférica da radiação incidente que atravessa a superfície [10].

A radiação solar absorvida pela placa absorvedora é dada pela Equação 2.37, em que (α) se refere à placa absorvedora e (ρ) se refere à cobertura de vidro.

$$I_{\beta}(\tau\alpha) = R^{\text{dir}}_{\beta}(\tau\alpha)_{\text{dir}} + R^{\text{dif}}_{\beta}(\tau\alpha)_{\text{dif}} + R^{\text{alb}}_{\beta}(\tau\alpha)_{\text{alb}} \quad (2.37)$$

Aplicando as Equações 2.18, 2.19 e 2.20 temos:

$$I_{\beta} = r_{\text{dir}} \times R^{\text{dir}}_h(\tau\alpha)_{\text{dir}} + r_{\text{dif}} \times R^{\text{dif}}_h(\tau\alpha)_{\text{dif}} + \rho \times G_h \times r_{\text{alb}}(\tau\alpha)_{\text{alb}} \quad (2.38)$$

2.3 Método da fração solar

O método da fração solar ou *f-chart* serve para dimensionar sistemas de aquecimento com coletores solares, para edifícios em que a temperatura mínima requerida é de 20°C. Este método é aplicado essencialmente em edifícios residenciais, onde o orçamento do projetista é limitado e não lhe permite fazer simulações [3]. Permite estimar a fração de uma carga total de aquecimento que será fornecida sob forma de energia solar por um determinado sistema solar térmico. A variável primária deste método é a área do coletor, sendo as secundárias o tipo de coletor, a capacidade de armazenamento e caudal de fluido, e finalmente o tamanho dos permutadores de calor. O método da fração solar resulta da correlação de resultados de muitas simulações em sistemas solares térmicos.

A fração solar é estimada mensalmente ou anualmente, dependendo do período da quantificação de energia. A estimativa desta fração é expressa pela Equação 2.39.

$$f = \frac{Q_{sol}}{Q_{req}} \quad (2.39)$$

Em que:

Q_{sol} – Energia captada pelos coletores solares, em J;

Q_{req} – Carga térmica requerida, em J.

Fazendo uma simples análise da Equação 2.39, se f estiver perto de 1,0 significa que as necessidades de consumo são quase cumpridas pelos coletores solares.

A fração solar pode ser relacionada com dois parâmetros adimensionais, X e Y [3], em que:

$$X = F_R U_L \times \frac{F'_R}{F_R} \times (T_{ref} - T_a) \times N_{segundos} \times \frac{A_{cs}}{Q_{AQS}} \quad (2.40)$$

$$Y = F_R (\tau\alpha)_n \times \frac{F'_R}{F_R} \times \frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n} \times I_\beta \times N_{dias} \times \frac{A_{cs}}{Q_{AQS}} \quad (2.41)$$

Em que $F_R U_L$ e $F_R (\tau\alpha)_n$ são valores fornecidos pelo fabricante do coletor solar, $\frac{F'_R}{F_R}$ é um fator de correção de quedas de temperatura entre o coletor e o tanque de armazenamento e o rácio $\frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n}$ é dado por:

$$\frac{\tau\alpha}{(\tau\alpha)_n} = \frac{R_{DIR} r_{DIR} \frac{(\tau\alpha)_{DIR}}{(\tau\alpha)_n} + R_{DIF} r_{DIF} \frac{(\tau\alpha)_{DIF}}{(\tau\alpha)_n} + R_{DIF} r_{DIF} \frac{(\tau\alpha)_{DIF}}{(\tau\alpha)_n}}{I_\beta} \quad (2.42)$$

Nas instalações em que o fluido de trabalho está no estado líquido, a fração solar mensal depende dos valores X e Y , é calculada pela Equação 2.42:

$$f = 1,029Y - 0,065X - 0,245Y^2 + 0,0018X^2 + 0,0215Y^3 \quad (2.43)$$

Para o cálculo da fração solar recorrendo às Equações 2.27, 2.28 e 2.29, as seguintes premissas devem ser respeitadas:

- $(\tau\alpha)_n$ – Varia entre 0,6 e 0,9;
- $F'_R A_{cs}$ – Varia entre 5 e 120 m²;
- U – Varia entre 2,1 e 8,3 W.m⁻²K⁻¹;
- β – Varia entre 30°C e 90°C;
- Q_{per} – Varia entre 83 e 667 W.K⁻¹.

Para dimensionamento de sistemas líquidos é possível recorrer à Equação 2.43, ou consultar uma carta de fração solar (Figura 13) [3]:

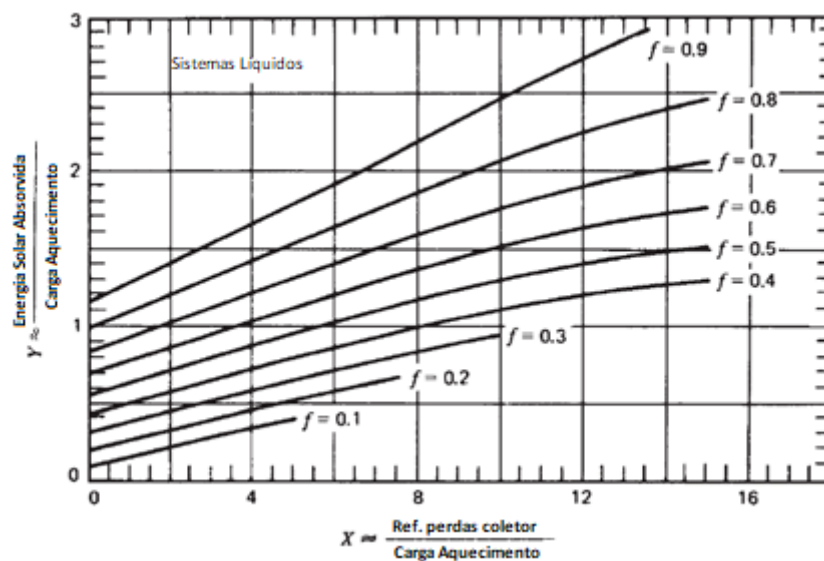


Figura 13 – Carta de fração solar, [3].

O método da fração solar foi desenvolvido para uma capacidade de armazenamento padrão de 75 litros de água por metro quadrado de área do coletor solar. Para sistemas com capacidade de armazenamento entre 37,5 a 300 litros por metro quadrado, X deve ser corrigido, $X_{\text{corrigido}}$, com a Equação 2.44 [3].

$$\frac{X_{\text{corrigido}}}{X} = \left(\frac{\text{capacidade de armazenamento real}}{\text{capacidade de armazenamento padrão}} \right)^{-0,25} \quad (2.44)$$

O gráfico da Figura 14 representa a Equação 2.44.

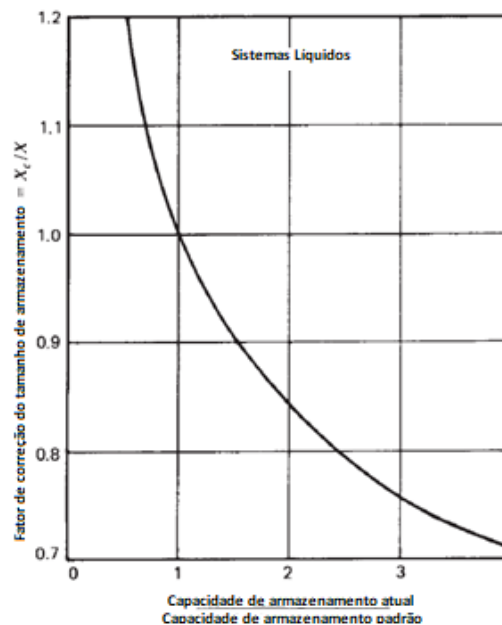


Figura 14 - Correção de armazenamento para sistemas líquidos, [3].

A matéria de estudo deste trabalho é a instalação de coletores solares apenas para AQS (aquecimento de águas sanitárias), de forma que o parâmetro X deverá ser corrigido com recurso à Equação 2.45:

$$\frac{X_{\text{corrigido}}}{X} = \frac{11,6 + 1,18 \times T_{\text{min}} + 3,86 \times T_{\text{rede}} - 2,32 \times T_{\text{ar}}}{100 - T_{\text{ar}}} \quad (2.45)$$

Em que:

- T_{min} – Temperatura mínima da água aquecida, ($T_{\text{mínima}} = 30^{\circ}\text{C}$)
- T_{rede} – Temperatura diária mensal de água de rede
- T_{ar} – Temperatura ambiente média mensal de cada país.

2.3.1 Cálculo das necessidades de aquecimento AQS

As necessidades mensais de aquecimento de AQS com consumo constante para uma habitação, são calculadas através da Equação 2.46 tendo em consideração a temperatura da água da rede e a temperatura desejada.

$$Q_{\text{AQS}} = \frac{(M_{\text{AQS}} \times c_{\text{água}} \times \Delta T \times n_d)}{3600 \times 1000} \text{ [kWh/mês]} \quad (2.46)$$

Em que:

- M_{AQS} – Consumo médio diário de referência;
- $c_{\text{água}}$ – Calor específico da água ($c_{\text{água}} = 4187 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$);
- ΔT – Diferença de temperatura entre a água de aquecida e de rede;
- n_d – Número de dias do mês.

O consumo médio de água diário de referência é dado na alínea c) do 14º artigo do capítulo 5 do Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), que se considera de 40 litros/pessoa a 60°C [23]. Outros consumos de referência podem ser consultados na Figura 15.

$$M_{\text{AQS}} = 40 \text{ [l]} \times n_{\text{ocupantes}} \quad (2.47)$$

Tipo de edifício	Consumo diário de referência a 60°C
Moradia unifamiliar	30 l/pessoa (40 l/pessoa)
Edifício Multifamiliar	22 l/pessoa
Hospital ou Clínica	55 l/pessoa
Hotel ****	70 l/pessoa
Hotel ***	55 l/pessoa
Hotel/Residencial **	40 l/pessoa
Residencial/Pensão	35 l/pessoa
Campismo	40 l/pessoa
Lar de idosos ou estudantes	55 l/pessoa
Escola (refeições)	3 l/pessoa
Quartel	20 l/pessoa
Fábrica ou oficina	15 l/pessoa
Escritório	3 l/pessoa
Ginásio	20 a 25 l/pessoa
Lavandarias	3 a 5 l/Kg de roupa

Figura 15 – Consumo diário de referência [24].

A temperatura de aquecimento a atingir é de 60°C, sendo que a diferença de temperatura entre a água aquecida e a de rede (ΔT) será calculada de acordo com a temperatura de cada país.

Com a obtenção das necessidades de aquecimento de águas sanitárias e da fração solar é possível calcular a energia obtida por fonte solar. A relação destas é descrita pela Equação 2.46:

$$Q_{AQS} = Q_{solar} + Q_{linha} \quad (2.46)$$

Em que:

Q_{AQS} – Energia mensal necessária, em kWh;

Q_{solar} – Energia mensal obtida por fonte solar, em kWh;

Q_{linha} – Energia mensal obtida por recurso a apoio, em kWh.

A energia solar mensal é calculada pela Equação 2.47:

$$Q_{solar} = Q_{AQS} \times f \quad (2.47)$$

Em que:

f – Fração solar anual.

2.4 Estimativa económica de retorno do investimento

A análise económica realizada anteriormente permite simplesmente avaliar o custo anual da utilização dos sistemas referidos. No entanto, uma análise económica considerando os custos de equipamento e instalação é fundamental para avaliar a viabilidade da utilização de coletores solares em habitações.

Quatro parâmetros serão abordados neste capítulo:

- Poupança estimada;
- Balanço económico anual;
- Tempo de retorno de investimento;
- Valor atual líquido (VAL);
- Taxa interna de retorno (TIR);

2.4.1 Poupança económica estimada

A poupança económica estimada consiste no produto entre a quantidade de energia poupada e o custo da unidade dessa energia. Esta poderá ser calculada recorrendo à Equação 2.48:

$$V_{poupado\ anual} = E_{poupada\ anual} \times C_{kwh} \quad (2.48)$$

Em que:

$V_{poupado\ anual}$ – Valor poupado anual, em euros;

$E_{poupada\ anual}$ – Energia poupada anual, em kWh;

C_{kwh} – Custo do kWh do referente ano, em euros por kWh.

2.4.2 Balanço económico anual

O balanço económico anual, B_{anual} consiste no comparativo entre o custo de manutenção do equipamento com o lucro gerado, e pode ser estimado pela Equação 2.49:

$$B_{anual} = V_{poupado\ anual} - V_{manutenção} \quad (2.49)$$

Em que:

B_{anual} – Balanço económico anual, em euros por ano.

$V_{manutenção}$ – Custo de manutenção anual do equipamento, em euros.

2.4.3 Tempo de retorno de investimento

O retorno do investimento é possivelmente o fator mais decisivo na aquisição de aparelhos de produção de energia solar em habitações. O tempo de retorno é estimado pela Equação 2.50.

$$t_r = \frac{INV}{B_{anual}} \quad (2.50)$$

Em que:

t_r – Tempo de retorno, em anos;

INV – Investimento inicial, em euros;

2.4.4 Valor atual líquido (VAL)

O valor atual líquido (VAL) é um critério usado na avaliação da rentabilidade de projetos de investimento. Este é calculado recorrendo à Equação 2.51:

$$VAL = \sum_{t=1}^n \frac{B_{anual} \times t}{(1 + i)^t} \quad (2.51)$$

Em que:

VAL – Valor atual líquido, em euros;

t – Período que o dinheiro será investido;

i – Taxa de desvalorização ou inflação.

2.4.5 Taxa interna de retorno (TIR)

A taxa interna de retorno (TIR) é uma fórmula utilizada para calcular a taxa de retorno que um determinado investimento permite num determinado período. A TIR é calculada recorrendo à Equação 2.51 e igualando o VAL a zero.

Enquanto o VAL consiste no valor absoluto do retorno do investimento, o TIR consiste num indicador de rentabilidade.

DESENVOLVIMENTO

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Características dos equipamentos em estudo

3.1.1 Coletor solar plano

Para o cálculo da fração solar e da análise de custo realizada nesta dissertação, o coletor solar plano selecionado foi o KAIROS XP 2.5 da Ariston (Anexo A), apresentado na Figura 16. Este coletor possui um rótulo de qualidade da Solar Keymark onde se demonstra aos clientes finais que o produto está em conformidade com os padrões europeus de acordo com a norma EN 12975.

Conforme a ficha técnica, as seguintes características são relevantes para os cálculos nesta dissertação:

- Área do Coletor: $2,26 \text{ m}^2$
- Caudal Mássico: $0,020 \text{ kg.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$
- Rendimento do sistema, η_0 : 0,808
- Coeficiente de perdas, $F_R U_L$: $3,131 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.



Figura 16 – Coletor Solar Plano Ariston KAIROS XP 2.5

3.1.2 Coletor solar tubos de vácuo

No caso do coletor solar de tubos de vácuo, foi selecionado o coletor THERMOMAX HP400 da Kingspan Solar (Anexo B) apresentado na Figura 17 que cumpre também com a norma europeia EN 12975.



Figura 17 – Coletor Solar de Tubos de Vácuo Kingspan Solar THERMOMAX HP400

Para efeitos de cálculo as seguintes características do coletor foram usadas:

- Área do Coletor: 2,13 m²;
- Caudal Mássico: 0,020 kg.s⁻¹.m⁻²;
- Rendimento, η_0 : 0,750;
- Coeficiente de perdas, $F_R U_L$: 1,180 W.m⁻².K⁻¹.

3.1.3 Termoacumulador elétrico

Um termoacumulador elétrico foi escolhido como sistema de apoio aos coletores solares e também como sistema independente de AQS. Para o cálculo da fração solar é necessário conhecer a capacidade do termoacumulador e o rendimento terá influência na análise de custo.

O termoacumulador elétrico escolhido para análise foi o Ariston PRO R VTD (Anexo C). As características mais relevantes deste termoacumulador são:

- Capacidade do termoacumulador: 200 litros;
- Potência: 1500 W;
- Rendimento: 95%.



Figura 18 – Termoacumulador elétrico Ariston

3.1.4 Esquentador a gás natural e GPL

De forma a estimar o custo e impacto ambiental de soluções a gás natural e GPL, selecionou-se um esquentador capaz de trabalhar com ambos combustíveis. O esquentador escolhido para esta análise foi o Alteas One Net 7A. A ficha técnica deste encontra-se no Anexo D e as seguintes características são necessárias para análise:

- Caudal água quente: 19,8 l/min;
- Potência: 34,5 kW;
- Rendimento: 97,7%.



Figura 19 – Caldeira Alteas a Gás Natural e GPL

3.1.5 Caldeira a pellets

Sendo a utilização de *pellets* uma solução com um combustível relativamente mais barato, foi utilizada uma caldeira a *pellets*. A caldeira a *pellets* escolhida foi a Zantia Nara Plus Green Edition, cuja ficha técnica encontra-se no Anexo E.



Figura 20 – Caldeira a *pellets*

As características mais relevantes desta caldeira são:

- Potência: 32,2 kW;
- Rendimento: 91,32%.

3.2 Dados relevantes acerca das cidades em estudo

As coordenadas das cidades do continente europeu escolhidas para este estudo estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Coordenadas geográficas das estações em estudo.

País	Cidade	Latitude	Longitude
Espanha	Almeria	36,8	-2,3
Alemanha	Estugarda	48,5	9,1
Bélgica	Bruxelas	50,8	4,2
Grécia	Atenas	38,0	23,4
Portugal	Porto	41,2	-8,6

Na Tabela 3 estão apresentados os índices de claridade médios mensais para as ditas seis cidades.

Tabela 3 – Índices de claridade relativos a cada país nos respectivos meses do ano.

Meses	Almeria	Estugarda	Bruxelas	Atenas	Porto
Janeiro	0,57	0,35	0,27	0,40	0,47
Fevereiro	0,56	0,39	0,32	0,43	0,52
Março	0,53	0,42	0,36	0,48	0,55
Abril	0,56	0,46	0,40	0,51	0,62
Maio	0,60	0,46	0,43	0,57	0,62
Junho	0,62	0,47	0,43	0,59	0,64
Julho	0,66	0,49	0,42	0,61	0,67
Agosto	0,64	0,47	0,43	0,60	0,66
Setembro	0,61	0,50	0,43	0,57	0,60
Outubro	0,60	0,45	0,38	0,52	0,55
Novembro	0,57	0,35	0,30	0,46	0,50
Dezembro	0,58	0,32	0,24	0,40	0,48

A especificidade de cada cidade será referida mais à frente.

Ângulo horário do pôr do sol

Na Figura 21, é possível observar a evolução do ângulo horário médio mensal do pôr-do-sol.

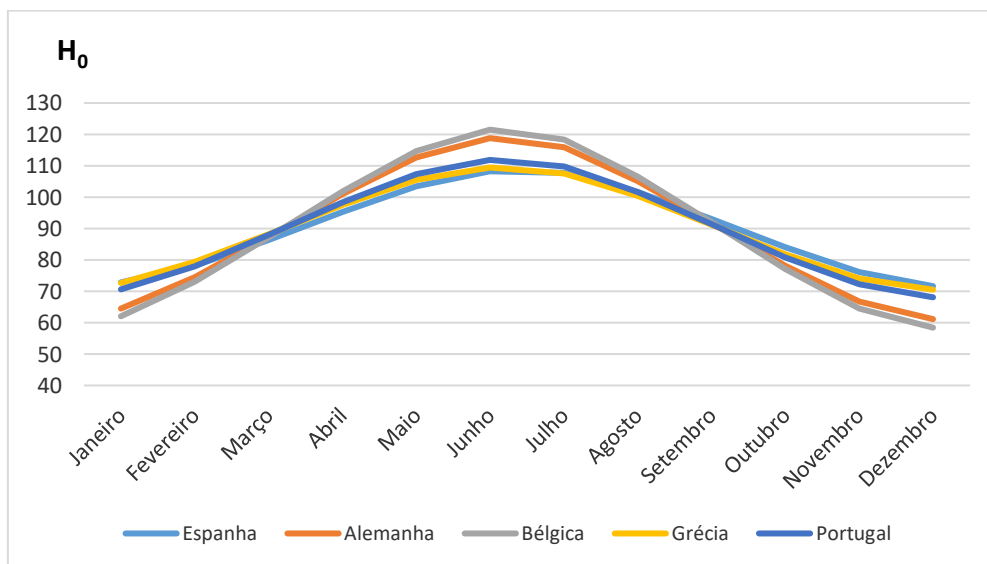


Figura 21 – Ângulos horários de pôr do sol em cada cidade.

No hemisfério norte o ângulo de pôr-do-sol varia mais substancialmente ao longo do ano quanto maior for a latitude da cidade.

Radiação incidente no exterior da atmosfera

A evolução mensal da radiação diária média mensal que incide numa superfície horizontal pousada fora da atmosfera terrestre, S_{oh}^d foi calculada pela Equação 2.11, a partir dos valores H_o da Figura 21, dos valores da declinação solar, calculados a partir da Equação 2.6, e das latitudes da Tabela 2, e está apresentada na Figura 22.

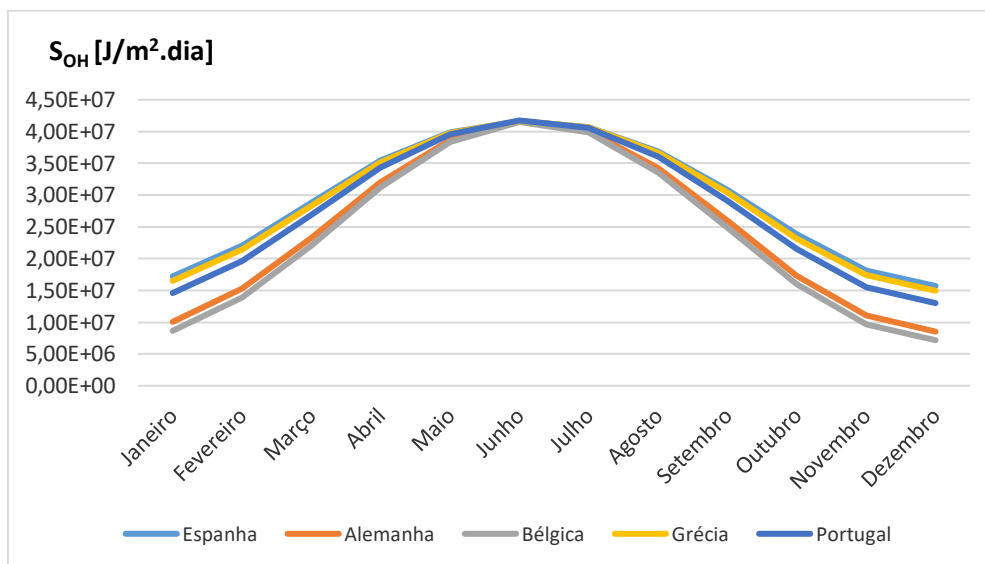


Figura 22 – Radiação incidente no exterior da atmosfera.

Conclui-se que para latitudes mais próximas do equador S_{oh}^d é maior.

Radiação global

O valor médio mensal da radiação global diária G_m^d , ao longo dos meses está apresentado na Figura 23; foi calculado com a Equação 2.12 e com os índices de claridade da Tabela 2.

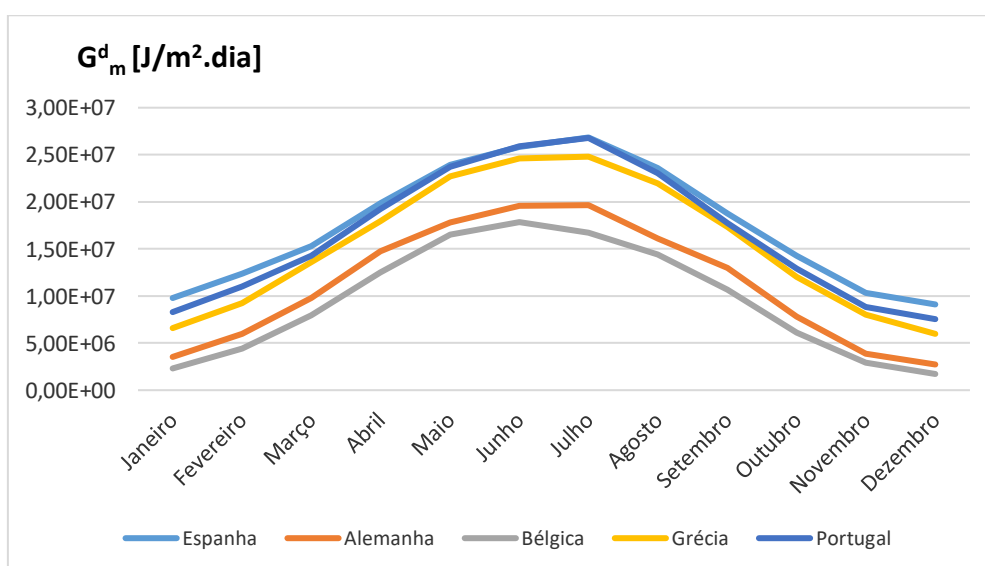


Figura 23 – Radiação global média mensal incidente numa superfície pousada horizontalmente no solo.

3.3 Análise da irradiação nas cidades em estudo

Para o cálculo da fração solar é importante conhecer a irradiação incidente no coletor num determinado local do planeta. Nos dois sistemas em estudo, o ângulo de inclinação dos coletores será constante, não havendo variação do ângulo ao longo do dia. Assim, é importante conhecer o ângulo ótimo de forma que a obtenção de energia solar ao longo dos meses seja máxima.

Para otimizar o ângulo de inclinação do coletor solar, utilizou-se 5 ângulos para análise em cada cidade, sendo eles de 20°, 25°, 30°, 35° e 40°. Fazendo a soma da irradiação de cada mês para cada ângulo de inclinação, obtém-se o total anual, e seleciona-se o ângulo mais favorável.

3.3.1 Almeria, Espanha

No caso espanhol a cidade em estudo foi Almeria que se localiza no sul de Espanha. Analisando pela Tabela 4 podemos verificar os valores de irradiação incidente.

Tabela 4 - Irradiação incidente Almeria, Espanha.

Irradiação incidente em Almeria, Espanha (kWh m ⁻² .mês)					
Mês	$\beta=20^\circ$	$\beta=25^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=35^\circ$	$\beta=40^\circ$
Janeiro	120,04	127,15	133,42	138,82	143,29
Fevereiro	122,62	127,42	131,41	134,57	136,86
Março	148,88	151,05	152,33	152,69	152,13
Abril	171,02	170,06	168,14	165,28	161,50
Maiο	200,89	197,03	192,16	186,31	179,53
Junho	204,32	199,17	193,06	186,04	178,15
Julho	222,05	216,99	210,83	203,63	195,42
Agosto	205,68	203,51	200,20	195,78	190,27
Setembro	172,80	174,32	174,78	174,18	172,53
Outubro	152,31	157,37	161,43	164,46	166,45
Novembro	119,33	125,86	131,58	136,44	140,40
Dezembro	116,12	123,82	130,70	136,71	141,80
Total	1956,06	1973,73	1980,03	1974,88	1958,33

À custa de cálculos efetuados com partição de 1 grau no valor do ângulo β , concluiu-se que com o ângulo de 30° se obtém a maior irradiação incidente durante o ano.

3.3.1 Estugarda, Alemanha

Em Estugarda, analisando pela Tabela 5 é possível verificar os valores de irradiação incidente.

Tabela 5 – Irradiação incidente Estugarda, Alemanha.

Irradiação incidente em Estugarda, Alemanha (kWh m ⁻² .mês)						
Mês	$\beta=20^\circ$	$\beta=25^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=35^\circ$	$\beta=36^\circ$	$\beta=40^\circ$
Janeiro	49,38	53,45	57,18	60,54	61,16	63,49
Fevereiro	64,30	67,88	71,05	73,76	74,52	76,02
Março	100,11	102,70	104,70	106,09	106,29	106,85
Abril	131,14	131,52	131,20	130,17	129,88	128,44
Mai	153,59	151,92	149,54	146,46	145,76	142,70
Junho	159,54	157,02	153,80	149,92	149,06	145,38
Julho	167,50	165,24	162,22	158,45	157,61	153,96
Agosto	144,26	143,90	142,79	140,95	140,49	138,38
Setembro	125,13	127,63	129,38	130,36	130,47	130,57
Outubro	90,16	94,61	98,46	101,70	102,27	104,30
Novembro	50,23	54,02	57,47	60,55	61,12	63,24
Dezembro	40,62	44,32	47,74	50,84	51,42	53,60
Total	1275,96	1294,23	1305,55	1309,81	1310,07	1306,94

À custa de cálculos efetuados com partição de 1 grau no valor do ângulo β , concluiu-se que com o ângulo de 36° se obtém a maior irradiação incidente durante o ano.

3.3.2 Bruxelas, Bélgica

Por análise da Tabela 6 é possível verificar que o ângulo ótimo registado em Bruxelas é semelhante ao de Estugarda, 35° , possivelmente pela proximidade geográfica. No entanto, os valores de irradiação são comparativamente menores.

Tabela 6 – Irradiação incidente Bruxelas, Bélgica.

Irradiação incidente em Bruxelas, Bélgica (kWh m ⁻² .mês)					
Mês	$\beta=20^\circ$	$\beta=25^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=35^\circ$	$\beta=40^\circ$
Janeiro	33,58	36,48	39,14	41,54	43,68
Fevereiro	48,22	50,97	53,41	55,52	57,29
Março	81,21	83,33	84,97	86,12	86,78
Abril	110,89	111,22	110,96	110,14	108,74
Mai	142,59	141,19	139,14	136,45	133,15
Junho	146,01	143,87	141,13	137,78	133,86
Julho	142,94	141,14	138,72	135,70	132,09
Agosto	129,65	129,42	128,54	127,01	124,85
Setembro	102,86	104,92	106,38	107,22	107,44
Outubro	70,53	74,08	77,18	79,81	81,94
Novembro	38,85	41,98	44,85	47,43	49,69
Dezembro	26,49	29,04	31,41	33,56	35,49
Total	1073,84	1087,63	1095,81	1098,28	1095,01

À custa de cálculos efetuados com partição de 1 grau no valor do ângulo β , concluiu-se que com o ângulo de 35° se obtém a maior irradiação incidente durante o ano.

3.3.3 Atenas, Grécia

Em Atenas, o ângulo ótimo é relativamente menor que os países da Europa central. Analisando pela Tabela 7 podemos verificar os valores de irradiação incidente.

Tabela 7 – Irradiação incidente Atenas, Grécia.

Irradiação incidente em Atenas, Grécia (kWh m ⁻² .mês)					
Mês	$\beta=20^\circ$	$\beta=25^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=35^\circ$	$\beta=40^\circ$
Janeiro	77,82	81,98	85,63	88,74	91,29
Fevereiro	89,36	92,54	95,15	97,19	98,63
Março	132,18	134,10	135,23	135,57	135,12
Abril	154,59	153,79	152,16	149,68	146,40
Mai	191,22	187,75	183,34	178,01	171,79
Junho	195,50	190,82	185,25	178,80	171,53
Julho	206,08	201,66	196,25	189,87	182,57
Agosto	192,28	190,43	187,52	183,59	178,65
Setembro	159,40	160,89	161,42	160,98	159,58
Outubro	127,80	131,93	135,26	137,74	139,37
Novembro	91,08	95,85	100,02	103,56	106,43
Dezembro	73,40	77,82	81,76	85,18	88,05
Total	1690,69	1699,57	1698,98	1688,91	1669,42

À custa de cálculos efetuados com partição de 1 grau no valor do ângulo β , concluiu-se que com o ângulo de 27° se obtém a maior irradiação incidente durante o ano.

3.3.4 Porto, Portugal

Em Portugal, na cidade do Porto, analisando pela Tabela 8 podemos verificar os valores de irradiação incidente.

Tabela 8 – Irradiação incidente em Porto, Portugal.

Irradiação incidente em Porto, Portugal (kWh m ⁻² .mês)					
Mês	$\beta=20^\circ$	$\beta=25^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=35^\circ$	$\beta=40^\circ$
Janeiro	108,42	116,06	122,93	128,98	134,16
Fevereiro	113,83	119,25	123,90	127,75	130,77
Março	142,47	145,34	147,34	148,45	148,66
Abril	168,41	168,14	166,92	164,76	161,68
Mai	202,08	198,93	194,76	189,61	183,50
Junho	207,53	203,06	197,61	191,22	183,94
Julho	224,67	220,40	215,03	208,58	201,10
Agosto	204,37	203,05	200,59	197,01	192,33
Setembro	167,24	169,58	170,88	171,14	170,35
Outubro	142,90	148,74	153,62	157,51	160,39
Novembro	108,47	115,57	121,90	127,42	132,09
Dezembro	103,83	112,00	119,41	126,02	131,77
Total	1894,24	1920,10	1934,89	1938,45	1930,74

À custa de cálculos efetuados com partição de 1 grau no valor do ângulo β , concluiu-se que com o ângulo de 31° se obtém a maior irradiação incidente durante o ano.

3.3.5 Irradiação incidente nos vários países com ângulo ótimo

A irradiação de cada país com os ângulos ótimos está apresentada na Tabela 9.

Tabela 9 – Irradiação incidente com ângulos ótimos.

	Alemanha	Espanha	Bélgica	Grécia	Portugal
Mês	$\beta=36^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=35^\circ$	$\beta=27^\circ$	$\beta=31^\circ$
Janeiro	61,18	133,42	41,54	83,52	97,22
Fevereiro	74,27	131,41	55,52	93,68	114,87
Março	106,32	152,33	86,12	134,68	152,40
Abril	129,91	168,14	110,14	153,28	185,32
Mai	145,81	192,16	136,45	186,15	199,40
Junho	149,10	193,06	137,78	188,75	202,99
Julho	157,66	210,83	135,70	199,67	218,40
Agosto	140,53	200,20	127,01	189,44	206,19
Setembro	130,50	174,78	107,22	161,26	169,21
Outubro	102,30	161,43	79,81	133,40	140,89
Novembro	61,14	131,58	47,43	97,62	104,72
Dezembro	51,44	130,70	33,56	79,48	94,90
Total	1310,17	1980,03	1098,28	1700,95	1886,51

Os ângulos de inclinação ótimos dos países no Sul da Europa rondam os 30°, e no caso dos países da Europa central rondam os 35°.

3.4 Fração solar

Com os dados de irradiação da Tabela 9 calculou-se a fração solar recorrendo à metodologia referida no capítulo 2.2.

Neste subcapítulo está apresentado o cálculo do parâmetro $X_{\text{corrigido}}$ calculado pela Equação 2.44, do parâmetro Y calculado pela Equação 2.41, da fração solar calculada pela Equação 2.43 e da energia útil Q_{solar} pela Equação 2.47 para coletores solares planos e coletores solares de tubos de vácuo.

Na Tabela 10 encontram-se dados relevantes para o cálculo da fração solar.

Tabela 10 - Valores utilizados para o cálculo da fração solar

	Coletores Planos	Coletores Tubos de Vácuo
$T_{\text{mínima}}$	30°C	
η	0,808	0,750
$F_R U_L$	3,131	1,180
$V_{\text{reservatório}}$	200L	
n_{hab}	4	
$(\tau\alpha)_n$	0,8272	
Nº de coletores	1	
A_c	2,241	2,130

Na Tabela 11 está apresentada a temperatura média mensal da água de rede (T_{rede}), com a variação (ΔT) necessária a ser realizada pelo sistema AQS.

Tabela 11 - Temperatura da água de rede de cada país, em graus [41]

Mês	Alemanha		Espanha		Bélgica		Grécia		Portugal	
	T_{rede}	ΔT	T_{rede}	ΔT	T_{rede}	ΔT	T_{rede}	ΔT	T_{rede}	ΔT
Janeiro	1,4	58,7	12,6	47,4	3,15	56,9	8,9	51,2	13,5	46,5
Fevereiro	2,3	57,7	13,3	46,7	3,5	56,5	9,5	50,6	10,1	49,9
Março	6,1	53,9	15,1	44,9	6,4	53,6	11,2	48,8	11,5	48,5
Abril	9,1	51,0	17,0	43,1	9,0	51,1	14,9	45,1	12,9	47,1
Mai	13,7	46,3	19,7	40,4	13,3	46,7	20,0	40,1	15,1	44,9
Junho	16,5	43,5	23,4	36,6	15,8	44,3	24,7	35,4	18,1	41,9
Julho	19,0	41,0	26,1	33,9	18,0	42,0	27,2	32,9	19,9	40,2
Agosto	18,9	41,1	26,7	33,3	18,0	42,1	27,0	33,1	19,8	40,2
Setembro	15,1	44,9	24,2	35,8	14,8	45,3	23,3	36,8	19,0	41,1
Outubro	10,4	49,7	20,4	39,6	11,0	49,0	18,4	41,7	16,2	43,9
Novembro	5,0	55,0	16,4	43,6	6,4	53,6	14,0	46,1	12,3	47,7
Dezembro	2,4	57,6	13,8	46,3	4,2	55,8	10,5	49,6	9,9	50,1

3.4.1 Cálculo das necessidades AQS

Na Tabela 12 está apresentado os valores das necessidades AQS de cada país, estimado a partir da temperatura necessária de aquecimento de cada mês.

Tabela 12 - Valores das necessidades AQS, em kWh

Mês	Alemanha		Espanha		Bélgica		Grécia		Portugal	
	ΔT	Q_{AQS}	ΔT	Q_{AQS}	ΔT	Q_{AQS}	ΔT	Q_{AQS}	ΔT	Q_{AQS}
Janeiro	58,7	338,3	47,4	273,4	56,9	328,0	51,2	295,1	46,5	268,2
Fevereiro	57,7	300,6	46,7	243,3	56,5	294,4	50,6	263,4	49,9	260,0
Março	53,9	310,9	44,9	259,0	53,6	309,2	48,8	281,5	48,5	279,8
Abril	51,0	284,4	43,1	240,3	51,1	285,0	45,1	251,8	47,1	262,9
Mai	46,3	267,1	40,4	232,8	46,7	269,4	40,1	231,0	44,9	259,0
Junho	43,5	242,8	36,6	204,3	44,3	247,0	35,4	197,3	41,9	233,9
Julho	41,0	236,5	33,9	195,6	42,0	242,3	32,9	189,5	40,2	231,6
Agosto	41,1	237,1	33,3	192,1	42,1	242,6	33,1	190,7	40,2	231,9
Setembro	44,9	250,7	35,8	199,9	45,3	252,6	36,8	205,2	41,1	229,2
Outubro	49,7	286,4	39,6	228,4	49,0	282,7	41,7	240,3	43,9	253,0
Novembro	55,0	307,0	43,6	243,4	53,6	299,2	46,1	257,1	47,7	266,3
Dezembro	57,6	332,3	46,3	266,8	55,8	321,9	49,6	285,8	50,1	289,0
	3394		2779		3374		2888		3064	

Com os dados anteriormente apresentados foi calculada a fração solar para cada cidade.

3.4.2 Almeria, Espanha

Tabela 13 – Fração Solar em Almeria, Espanha.

	Coletor Solar Plano				Coletor Solar de Tubos de Vácuo			
Meses	$X_{\text{corrigido}}$	Y	f	Q_{solar} (kWh)	$X_{\text{corrigido}}$	Y	f	Q_{solar} (kWh)
Janeiro	1,55	0,77	0,58	157,23	0,55	0,74	0,60	164,99
Fevereiro	1,56	0,85	0,63	153,31	0,55	0,81	0,66	159,79
Março	1,59	0,93	0,68	175,94	0,56	0,88	0,70	182,31
Abril	1,62	1,09	0,78	186,89	0,57	1,04	0,80	192,09
Maio	1,67	1,27	0,88	204,88	0,59	1,21	0,90	209,21
Junho	1,76	1,45	0,97	198,29	0,62	1,38	0,99	201,40
Julho	1,83	1,67	1,07	208,28	0,65	1,59	1,08	210,81
Agosto	1,85	1,63	1,05	201,67	0,65	1,55	1,06	204,03
Setembro	1,78	1,38	0,94	187,67	0,63	1,32	0,95	190,61
Outubro	1,69	1,12	0,80	181,91	0,60	1,06	0,82	186,29
Novembro	1,61	0,85	0,63	152,98	0,57	0,81	0,65	159,08
Dezembro	1,57	0,76	0,57	151,01	0,55	0,72	0,59	158,51
	2160,1				2219,1			

3.4.1 Estugarda, Alemanha

Tabela 14 – Fração Solar em Estugarda, Alemanha.

	Coletor Solar Plano				Coletor Solar de Tubos de Vácuo			
Meses	$X_{\text{corrigido}}$	Y	f	Q_{solar} (kWh)	$X_{\text{corrigido}}$	Y	f	Q_{solar} (kWh)
Janeiro	1,41	0,28	0,18	61,56	0,50	0,27	0,23	77,13
Fevereiro	1,42	0,39	0,27	82,24	0,50	0,37	0,32	94,91
Março	1,46	0,54	0,40	123,89	0,52	0,51	0,43	135,22
Abril	1,50	0,71	0,53	150,86	0,53	0,68	0,56	159,73
Maio	1,57	0,85	0,63	167,15	0,55	0,81	0,65	174,24
Junho	1,61	0,95	0,69	168,59	0,57	0,91	0,72	174,30
Julho	1,66	1,04	0,75	177,29	0,59	0,99	0,77	182,23
Agosto	1,66	0,93	0,68	161,98	0,59	0,89	0,71	167,28
Setembro	1,59	0,82	0,61	153,14	0,56	0,78	0,64	159,71
Outubro	1,52	0,56	0,42	119,93	0,54	0,54	0,45	129,70
Novembro	1,45	0,31	0,21	63,49	0,51	0,30	0,25	76,96
Dezembro	1,42	0,24	0,14	46,62	0,50	0,23	0,19	62,37
	1476,8				1593,8			

3.4.2 Bruxelas, Bélgica

Tabela 15 – Fração Solar em Bruxelas, Bélgica.

	Coletor Solar Plano				Coletor Solar de Tubos de Vácuo			
Meses	X _{corrigido}	Y	f	Q _{solar} (kWh)	X _{corrigido}	Y	f	Q _{solar} (kWh)
Janeiro	1,43	0,20	0,11	34,49	0,51	0,19	0,15	50,44
Fevereiro	1,44	0,30	0,19	57,23	0,51	0,28	0,24	70,44
Março	1,47	0,44	0,32	98,41	0,52	0,42	0,36	110,51
Abril	1,50	0,60	0,45	128,21	0,53	0,58	0,48	137,80
Maió	1,56	0,79	0,58	157,48	0,55	0,75	0,61	164,97
Junho	1,60	0,86	0,64	157,66	0,57	0,82	0,66	163,88
Julho	1,64	0,87	0,65	156,50	0,58	0,83	0,67	162,25
Agosto	1,64	0,82	0,61	148,46	0,58	0,78	0,64	154,43
Setembro	1,58	0,67	0,50	127,44	0,56	0,64	0,53	134,85
Outubro	1,53	0,44	0,33	91,94	0,54	0,42	0,36	102,43
Novembro	1,47	0,25	0,15	45,17	0,52	0,24	0,20	58,82
Dezembro	1,44	0,16	0,07	22,19	0,51	0,15	0,12	38,23
	1225,2				1349,1			

3.4.3 Atenas, Grécia

Tabela 16 – Fração Solar em Atenas, Grécia.

	Coletor Solar Plano				Coletor Solar de Tubos de Vácuo			
Meses	X _{corrigido}	Y	f	Q _{solar} (kWh)	X _{corrigido}	Y	f	Q _{solar} (kWh)
Janeiro	1,50	0,44	0,32	95,67	0,53	0,42	0,36	106,88
Fevereiro	1,51	0,56	0,42	109,67	0,53	0,53	0,45	118,77
Março	1,53	0,75	0,56	157,89	0,54	0,72	0,59	166,17
Abril	1,59	0,95	0,69	174,48	0,56	0,91	0,72	180,62
Maió	1,68	1,25	0,87	200,61	0,59	1,19	0,89	204,89
Junho	1,79	1,48	0,98	194,30	0,63	1,41	1,00	197,09
Julho	1,86	1,64	1,06	200,06	0,66	1,56	1,07	202,31
Agosto	1,86	1,56	1,02	194,73	0,66	1,48	1,03	197,00
Setembro	1,76	1,24	0,87	178,12	0,62	1,18	0,88	181,42
Outubro	1,65	0,87	0,65	155,42	0,58	0,83	0,67	161,07
Novembro	1,57	0,59	0,44	114,08	0,56	0,56	0,48	122,22
Dezembro	1,52	0,43	0,31	88,70	0,54	0,41	0,35	99,53
	1863,7				1938,0			

3.4.4 Porto, Portugal

Tabela 17 – Fração Solar em Porto, Portugal.

	Coletor Solar Plano				Coletor Solar de Tubos de Vácuo			
Meses	$X_{\text{corrigido}}$	Y	F	Q_{solar} (kWh)	$X_{\text{corrigido}}$	Y	f	Q_{solar} (kWh)
Janeiro	1,56	0,57	0,43	114,54	0,55	0,53	0,45	123,34
Fevereiro	1,51	0,69	0,52	134,69	0,55	0,71	0,58	141,83
Março	1,53	0,86	0,63	176,74	0,56	0,88	0,70	182,20
Abril	1,55	1,10	0,78	205,21	0,57	1,15	0,86	207,06
Mai	1,59	1,19	0,83	216,10	0,59	1,27	0,93	215,59
Junho	1,64	1,34	0,91	213,54	0,62	1,47	1,02	209,03
Julho	1,68	1,47	0,97	225,37	0,65	1,66	1,11	216,12
Agosto	1,68	1,39	0,94	217,70	0,65	1,60	1,08	208,22
Setembro	1,66	1,17	0,82	188,63	0,63	1,28	0,93	186,39
Outubro	1,61	0,88	0,65	163,55	0,60	0,92	0,73	166,98
Novembro	1,55	0,61	0,46	122,06	0,57	0,64	0,53	129,72
Dezembro	1,51	0,50	0,37	107,74	0,55	0,52	0,44	117,84
				2085,9				2104,3

3.4.5 Energia útil anual dos coletores solares

Na Tabela 18 está sintetizada as necessidades AQS em cada país e a energia obtida a partir dos coletores solares com os dois tipos de coletor solar.

Tabela 18 – Necessidades AQS e energia útil anual dos coletores solares.

País	Q_{AQS} (kWh)	Solar Plano (kWh)	Solar Tubos de Vácuo (kWh)	Variação (%)
Espanha	2779,4	2160,1	2219,1	2,7
Alemanha	3394,3	1476,8	1593,8	7,9
Bélgica	3374,3	1225,2	1349,1	10,1
Grécia	2888,7	1863,7	1938,0	4,0
Portugal	3064,9	2085,9	2104,3	0,9

Analisando os resultados apresentados da Tabela 18, torna-se notório que em países onde a exposição solar é menor, como a Bélgica e Alemanha, a utilização de coletores solares de tubos de vácuo permite uma maior obtenção de energia útil comparativamente com coletores solares planos. Esta constatação vai ao encontro do que foi referido em 2.2.2.

3.5 Análise económica e ambiental

A análise económica será feita abordando 6 soluções para aquecimento de águas sanitárias:

- i. Termoacumulador elétrico: sistema de aquecimento de água recorrendo apenas a energia elétrica;
- ii. Coletor solar plano com apoio elétrico: a energia solar obtida diminui a dependência de energia elétrica para fins de aquecimento;
- iii. Coletor solar de tubos de vácuo com apoio elétrico: solução semelhante à anterior;
- iv. Caldeira a gás natural: caldeira com funcionamento gás natural de rede;
- v. Caldeira a Gás de Petróleo Liquefeito (GPL): caldeira com funcionamento a gás butano;
- vi. *Pellets*: caldeira com aquecimento a *pellets*.

As necessidades AQS para uma habitação com 4 moradores foram calculadas para cada país e estão apresentadas na Tabela 18. Seguidamente serão apresentadas as análises económicas dos seis tipos de soluções.

Para esta análise, foram definidos os seguintes termos:

- Q_{solar} : energia obtida a partir de coletores solares;
- Q_{linha} : energia proveniente da rede elétrica;
- €/kWh: custo em euros por kWh.

3.5.1 Análise económica dos sistemas

i. Termoacumulador elétrico

No caso do sistema de aquecimento elétrico simples, a despesa anual está apresentada na Tabela 19. Neste caso, para obter a energia de consumo da rede elétrica é necessário considerar o rendimento de 95% do equipamento, como referido em 3.2.3. O preço da eletricidade por kWh foi obtido com recurso aos dados publicados pelo *Eurostat* [25].

Tabela 19 - Análise económica termoacumulador elétrico

País	Q_{AQS} (kWh)	η (%)	Q_{linha} (kWh)	€/kWh	Custo (€)
Espanha	2779,4	95,0	2925,7	0,220	643,65
Alemanha	3394,3		3572,9	0,305	1089,75
Bélgica	3374,3		3551,9	0,280	994,53
Grécia	2888,7		3040,7	0,194	589,90
Portugal	3064,9		3226,2	0,228	735,58

ii. Coletor solar plano com apoio elétrico

Na Tabela 20 é feita a análise económica anual de um sistema com coletor solar e termoacumulador elétrico para cada país. O apoio elétrico deste sistema é semelhante ao utilizado na solução elétrica, desta forma considerou-se o rendimento de 95%.

Tabela 20 – Análise económica com coletor solar.

País	Q_{AQS} (kWh)	Q_{solar} (kWh)	Q_{linha} (kWh)	€/kWh	Custo (€)
Espanha	2779,4	2160,1	651,9	0,220	143,42
Alemanha	3394,3	1476,8	2018,4	0,305	615,62
Bélgica	3374,3	1225,2	2262,2	0,280	633,42
Grécia	2888,7	1863,7	1078,9	0,194	209,32
Portugal	3064,9	2085,9	1030,5	0,228	234,96

iii. Coletor solar com tubos de vácuo com apoio elétrico

A análise económica de um sistema semelhante ao anterior com coletor solar de tubos de vácuo está apresentado na Tabela 21.

Tabela 21 - Análise económica com coletor solar tubo de vácuo.

País	Q_{AQS} (kWh)	Q_{solar} (kWh)	Q_{linha} (kWh)	€/kWh	Custo (€)
Espanha	2779,4	2219,1	589,8	0,220	129,75
Alemanha	3394,3	1593,8	1895,3	0,305	578,06
Bélgica	3374,3	1349,1	2131,8	0,280	596,90
Grécia	2888,7	1938,0	1000,7	0,194	194,14
Portugal	3064,9	2104,3	1011,2	0,228	230,54

Comparando os resultados da Tabela 21 com a Tabela 20 podemos verificar que os coletores com tubos de vácuo são mais eficientes.

iv. Gás natural

O custo de aquecimento de águas sanitárias com recurso a caldeira a gás natural está apresentado na Tabela 22 . O rendimento da caldeira é de 97,5% como indicado em 3.1.4. O preço foi obtido com recurso à referência [26].

Tabela 22 – Análise económica gás natural.

País	Q_{AQS} (kWh)	η (%)	Q_{linha} (kWh)	€/kWh	Custo (€)
Espanha	2779,4	97,5	2850,7	0,090	256,56
Alemanha	3394,3		3481,3	0,060	208,88
Bélgica	3374,3		3460,8	0,060	207,65
Grécia	2888,7		2962,8	0,070	207,39
Portugal	3064,9		3143,5	0,080	251,48

v. Gás de petróleo liquefeito (GPL)

O gás de petróleo liquefeito mais utilizado em habitações é o gás butano, pelo que nesta abordagem iremos considerar esse gás.

Sabendo que é possível extrair 13,7 kWh de energia por quilo de gás butano [27], os preços foram obtidos recorrendo a referências comerciais [28-31]. Considerando que o rendimento do equipamento que utiliza este sistema é de 97,7%, como referido em 3.1.4. Na Tabela 23 o preço por kWh de GPL e o custo de utilização em cada país está discriminado.

Tabela 23 – Análise económica GPL.

País	Q_{AQS} (kWh)	η (%)	Q_{linha} (kWh)	€/kWh	Custo (€)
Espanha	2779,4	97,7	2844,8	0,086	244,66
Alemanha	3394,3		3474,2	0,145	503,76
Bélgica	3374,3		3453,7	0,145	500,79
Grécia	2888,7		2956,7	0,161	476,03
Portugal	3064,9		3137,1	0,146	458,01

vi. Pellets

Os *pellets* são um biocombustível e pela sua recente utilização não existe grande variedade de estudos e mercados bem regulamentados [32]. Dessa forma, a obtenção de preço para este combustível foi feita com recurso a referências comerciais [33-37]. Na Tabela 24 foi analisado o custo com um rendimento de 91,3% do equipamento.

Tabela 24 – Análise económica pellets.

País	Q_{AQS} (kWh)	Q_{linha} (kWh)	€/ton	kWh/ton	€/kWh	Custo (€)
Espanha	2779,4	3044,2	221,56	4800	0,046	140,03
Alemanha	3394,3	3717,7	249,94		0,052	193,32
Bélgica	3374,3	3695,8	280,00		0,058	214,36
Grécia	2888,7	3164,0	260,00		0,054	170,86
Portugal	3064,9	3357,0	250,00		0,052	174,56

3.5.2 Síntese da análise económica

Fazendo uma síntese do custo anual calculado anteriormente em 3.4.1, na Tabela 25 apresentam-se os resultados de custo de utilização dos vários sistemas.

Tabela 25 – Síntese da análise económica, em euros.

País	Elétrico	Solar Plano e elétrico	Solar Vácuo e elétrico	Gás Natural	GPL	Pellets
Espanha	643,65	143,42	129,75	256,56	244,66	140,03
Alemanha	1089,75	615,62	578,06	208,88	503,76	193,32
Bélgica	994,53	633,42	596,90	207,65	500,79	214,36
Grécia	589,90	209,32	194,14	207,39	476,03	170,86
Portugal	735,58	234,96	230,54	251,48	458,01	174,56

A comparação do custo de utilização entre painéis solares planos e painéis com tubos de vácuo pode ser analisada na Tabela 26. A variação indicada consiste na percentagem de poupança dos tubos de vácuo em relação aos painéis solares planos.

Tabela 26 – Coletores planos vs. tubos de vácuo.

País	Solar Plano e elétrico (€)	Solar Vácuo e elétrico (€)	Variação (%)
Espanha	143,42	129,75	-9,5%
Alemanha	615,62	578,06	-6,1%
Bélgica	633,42	596,90	-5,8%
Grécia	209,32	194,14	-7,3%
Portugal	234,96	230,54	-1,9%

O comparativo da solução solar com elétrica comparativamente com elétrica sem apoio pode ser analisado pela Tabela 27.

Tabela 27 – Comparativo de custo com e sem apoio solar.

País	Elétrico	Solar Plano e elétrico (€)	Variação (%)	Solar Vácuo e elétrico (€)	Variação (%)
Espanha	643,65	143,42	-78%	129,75	-80%
Alemanha	1089,75	615,62	-44%	578,06	-47%
Bélgica	994,53	633,42	-36%	596,90	-40%
Grécia	589,90	209,32	-65%	194,14	-67%
Portugal	735,58	234,96	-68%	230,54	-69%

É possível verificar pela Tabela 27 que o apoio solar permite uma redução considerável de custo especialmente nos países que possuem maior exposição solar.

3.5.3 Análise de retorno de investimento

Para análise de retorno do investimento, recorreu-se ao método mencionado em 2.4. A título de exemplo foi feita a análise de investimento para Portugal.

Nesta dissertação, a poupança útil em kWh para Portugal recorrendo a coletores solares planos é de 2085,9 kWh e com coletores solares de tubos de vácuo de 2104,3 kWh, o

que com um rendimento de equipamento elétrico de 95% perfaz uma poupança efetiva de 2195,7 kWh e 2215,1 kWh.

Sabendo que o custo da energia elétrica no nosso país é de 0,228 € por kWh, o Balanço Económico Anual calculado pela Equação 2.49 é de 500,62 € para os coletores planos e 505,04 € para os coletores de tubos de vácuo.

Como esta abordagem recai sobre a viabilidade da utilização dos coletores solares, a estimativa de investimento é contabilizada apenas sobre o custo de aquisição dos coletores. Sabe-se que o coletor solar plano referido em 3.2.1 tem um custo de 1125€, e o coletor solar de tubos de vácuo em 3.2.2 tem um custo de 2800€. Em ambos casos apenas será analisado o custo de aquisição do equipamento e não da instalação. O custo de manutenção é considerado como sendo de 100€ anual.

Para o cálculo do VAL foi estimado um tempo de vida médio dos equipamentos de 15 anos, uma taxa de inflação do país de 1,4% (valor referente ao ano 2017) [39].

Tabela 28 – Análise de investimento pelo VAL.

Ano	Coletor Solar Plano (€)		Coletor Solar Vácuo (€)	
	B _{anual}	Saldo	B _{anual}	Saldo
0	-1125,00	-1125,00	-2800,00	-2800,00
1	395,09	-729,91	399,45	-2400,55
2	384,18	-345,73	388,42	-2012,13
3	373,50	27,76	377,62	-1634,52
4	363,03	390,80	367,04	-1267,48
5	352,79	743,58	356,68	-910,80
6	342,76	1086,34	346,54	-564,26
7	332,94	1419,28	336,61	-227,65
8	323,32	1742,60	326,89	99,24
9	313,91	2056,51	317,37	416,61
10	304,69	2361,21	308,06	724,67
11	295,67	2656,88	298,94	1023,61
12	286,85	2943,73	290,01	1313,62
13	278,20	3221,93	281,27	1594,89
14	269,75	3491,67	272,72	1867,61
15	261,47	3753,14	264,35	2131,96

Por análise da Tabela 28 conclui-se que o retorno do investimento no caso dos painéis solares planos chega após 3 anos de instalação, enquanto nos coletores com tubos de vácuo chega após 8 anos. Esta diferença é explicável pelo custo dos coletores de tubos de vácuo ser mais do dobro do que os planos, tornando a viabilidade destes mais limitada.

A taxa interna de retorno (TIR) permite-nos saber qual a percentagem de retorno do nosso investimento ao ano num determinado período. A TIR é tipicamente avaliada a 7, 10 e 15 anos e está apresentada na Tabela 29:

Tabela 29 – Taxa Interna de Retorno em Portugal para coletores solares planos e vácuo.

Tipo de Coletor	7 anos	10 anos	15 anos
Plano	27%	30%	32%
Tubos de Vácuo	-2%	5%	9%

Na análise de viabilidade de um projeto, muitas entidades utilizam como referência um valor de TIR de 15% [42]. Sabendo que acima desse valor o projeto é considerado viável, então os coletores planos superam facilmente, ao contrário dos coletores de tubos de vácuo.

3.5.4 Análise ambiental

O impacto ambiental do consumo energético depende de vários fatores, incluindo o método de obtenção de energia. O fator de emissão, f_e , consiste no rácio entre a quantidade de energia gasta em relação à quantidade de CO₂ que é emitida. Como exemplo, se num determinado país a percentagem de energia elétrica obtida por energias renováveis é maior do que outro, o fator de emissão de CO₂ será menor.

No caso dos sistemas AQS com coletor solar, a parcela das emissões referente à energia obtida a partir dos painéis solares é nula, visto não existir emissão de CO₂. O fator de emissão relativo à energia elétrica de cada país foi obtido consultando a referência [38], variando de país para país por haver variação da quantidade de energia renovável e não renovável consumida no país. Na Tabela 30 é possível analisar o comparativo de emissões CO₂ das soluções que recorrem ao renovável e ao exemplo de referência, a energia elétrica.

Tabela 30 – Emissões anuais de CO₂ em sistemas com coletor plano e tubos de vácuo.

	f_e (CO ₂ / kWh)	Solar Plano		Solar Vácuo		Elétrico
		Consumo (kWh)	Emissão (CO ₂)	Consumo (kWh)	Emissão (CO ₂)	Emissão (CO ₂)
Espanha	0,440	651,9	287	589,8	260	1223
Alemanha	0,624	2018,4	1259	1895,3	1183	2118
Bélgica	0,285	2262,2	645	2131,8	608	962
Grécia	1,149	1078,9	1240	1000,7	1150	3319
Portugal	0,369	1030,5	380	1011,2	373	1131

No caso do GPL e Gás Natural, o fator de emissão por país não apresenta variações pela origem destes combustíveis ser semelhante. No caso dos *pellets* não existe um fator de emissão de CO₂ por ser um combustível utilizado a partir de matéria prima que não contribui negativamente para o meio ambiente.

Os fatores de emissão foram obtidos através de consulta ao Diário da República [40] e estão apresentados na Tabela 31.

Tabela 31 – Emissões anuais de CO₂ de Gás Natural e GPL nos países europeus em estudo

	Gás Natural		Gás Petróleo Liquefeito	
	f_e (CO ₂ / kWh)	Emissões (CO ₂)	f_e (CO ₂ / kWh)	Emissões (CO ₂)
Espanha	0,2308	642	0,2268	630
Alemanha		783		770
Bélgica		779		765
Grécia		667		655
Portugal		707		695

3.5.5 Síntese da análise ambiental

Na Tabela 32 é possível analisar as emissões de CO₂ dos vários combustíveis em análise nos diferentes países.

Tabela 32 – Emissões CO₂ dos vários sistemas nos diferentes países, em kg/CO₂ ano

	Elétrico	Solar Plano	Solar Vácuo	Gás Natural	GPL	Pellets
Espanha	1416	287	260	642	630	-
Alemanha	2008	1259	1183	783	770	
Bélgica	917	645	608	779	765	
Grécia	3697	1240	1150	667	655	
Portugal	1187	380	373	707	695	

É possível verificar que a solução mais ecológica em estudo são os coletores solares de tubos de vácuo, especialmente nos países onde a exposição solar é mais abundante. Apesar disso, nesta análise não é evidenciada a pegada ecológica inerente ao fabrico e conceção dos equipamentos em estudo.

As emissões CO₂ em sistemas com coletor solar são relativamente menores comparativamente com os sistemas elétricos, no entanto é importante referir que na Alemanha pela fração solar ser relativamente mais baixa, o gás natural e GPL possuem emissões menores. Apesar da fração solar na Bélgica ser também de menor valor, o fator de emissão de eletricidade neste país é baixo, pelo que as soluções fósseis não possuem qualquer tipo de vantagem ambiental.

Ao contrário da Bélgica, a Grécia possui um fator de emissão bastante elevado comparativamente com os outros países europeus, refletindo-se na análise de emissões CO₂ de energia elétrica. Neste país apesar da grande exposição solar, em termos ambientais as soluções fósseis são mais adequadas.

Apesar dos *pellets* serem considerados produtos ecológicos e o fator de emissão não estar disponível, é importante referir que este produto necessita de ser devidamente recondicionado e é fruto dos desperdícios de outros processos industriais. Desta forma é importante referir que o seu impacto ambiental não é exatamente nulo, mas sim reduzido comparativamente a outros sistemas de aquecimento mais usados.

CONCLUSÕES

4 Conclusões e sugestão de trabalhos futuros

4.1 Conclusões

Nesta dissertação foi estudada a viabilidade de utilização de painéis solares comparativamente com soluções que recorrem a energias fósseis. Além disso, um comparativo entre dois tipos de coletores foi estudado nos diferentes países para melhor compreender como a fração solar pode influenciar os custos energéticos e impacto ambiental.

Como era esperado, a fração solar dos países mais a Sul da Europa é superior às que se encontram mais a Norte pela maior exposição solar que têm. Curioso será dizer que na maior parte dos países o aumento da fração solar com coletores de tubos de vácuo não foi significativo, com exceção da Bélgica e Alemanha que apresentaram um aumento considerável com coletores de tubos de vácuo. O aquecimento de águas sanitárias em países que o sol é mais escasso exige uma análise mais aprofundada, pois apesar da falta de energia solar, outras fontes renováveis podem ter maior potencialidade.

A evolução da tecnologia permite-nos ter equipamentos domésticos de uso diário com rendimentos acima dos 90%, algo que é desejável e permite um grande aproveitamento dos vários tipos de energia. Nesta dissertação a energia elétrica foi utilizada como referência pela sua disponibilidade e facilidade, além da popularidade que esta tem demonstrado nos últimos tempos.

Após uma análise de custo concluiu-se que utilizar os *pellets* como fonte de energia é neste momento uma alternativa economicamente mais favorável pelo custo reduzido da matéria prima, no entanto a solução solar não fica muito atrás desta. Na abordagem deste trabalho, o custo de possuímos energia solar encontra-se dependente da energia elétrica, o que desfavorece a viabilidade económica. Mesmo assim, a solução solar permite uma poupança que ronda os 70% em países com maior exposição solar e 50% os países estudados com menor exposição, quando comparados com a solução elétrica sem apoio. Verifica-se também que o ganho energético recorrendo a coletores de tubos de vácuo é mais significativo em países onde há menos sol.

Na análise de retorno do investimento em Portugal, permitiu-nos perceber que a adotar coletores solares planos, o investimento é recuperado em cerca de 3 anos, enquanto os tubos de vácuo em 8 anos. A taxa interna de retorno dos coletores planos a 10 anos é de 31% enquanto os tubos de vácuo rondam os 6%, o que torna mais viável a aplicação de coletores planos no nosso país.

Relativamente à questão ambiental, os fatores de emissão da energia elétrica em cada país estão interligados com a fonte de obtenção dessa mesma energia. A esse nível, Portugal possui um fator de emissão relativamente baixo quando comparado com a Grécia pela aposta nas energias de fonte renovável. Esse facto permite que a viabilidade ambiental da utilização de painéis solares com apoio elétrico em Portugal seja facilmente viável, e a Grécia, pelo contrário seja ambientalmente mais favorável recorrer a outro tipo de energia. O Gás Natural e o GPL possuem fatores de emissão

relativamente parecidos e intermédios. É importante referir que apesar dos *pellets* serem referenciados como não emissores de CO₂, tal abordagem pode estar a ignorar o facto de estes terem de ser produzidos e terem sido anteriormente processados. Futuros estudos podem abordar melhor esta questão.

Conclui-se neste trabalho que a utilização de alternativas solares é de facto viável, e que as populações tentassem produzir energia elétrica mais limpa e barata.

4.2 Trabalhos futuros

Como sugestão de trabalhos futuros sugiro a realização dos seguintes estudos:

- Comparativo de custo entre diferentes qualidades de painel solar;
- Estudo de critérios alternativos ao método da fração solar;
- Análise VAL e TIR com coletores planos e de vácuo para países de menor irradiação solar;

BIBLIOGRAFIA

5 BIBLIOGRAFIA

- [1] Balaras, A.C. et al.; *Solar air conditioning in Europe*; (Fevereiro 2005)
- [2] Kellner, B.; *Vacuum Solar Collector*; Patente nr. 4 881 521 (Novembro 1989)
- [3] Duffie, J. A.; Beckman, W. A.; *Solar Engineering of Thermal Processes* (4ª edição)
- [4] BBC Newsround; *Solar System Facts* (Outubro 2014)
- [5] Sharp, T.; *What is the sun made of?*; Space.com (Novembro 2017)
- [6] Dickie, R. H.; Beringer, R.; *Microwave radiation from the Sun and Moon* (1946)
- [7] Neutrium; *Blackbody radiation* (Novembro 2012)
- [8] Kalogirou, S.; *Solar Energy Engineering: Processes and Systems* (2ª edição)
- [9] Ma, C. C. Y.; Iqbal, M.; *Statistical comparison of models for estimating solar radiation on inclined surfaces* (Setembro 1983)
- [10] Ribeiro, L. S.; *Coletores Solares Planos* (2011)
- [11] Gomes, I. G.; *Uranometria Nova* (2010)
- [12] Bakulin, P.; Kononovitch, E.; Moroz, V.; *Curso de astronomia* (1988)
- [13] Garg, H. P.; *Optimal geometries of plane mirror solar collector* (1982)
- [14] Foster, R.; Ghassemi, M.; Cota, A.; *Solar Energy: Renewable Energy and the Environment* (2009)
- [15] Cooper, P. I.; *The absorption of radiation in solar stills* (1968)
- [16] Cuevas, A.; *The Irradiation Data* (1998)
- [17] Collares-Pereira, M.; Rabl, A.; *The average distribution of solar radiation: correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values* (Agosto 1978)
- [18] Sukhatme, S. P.; *Solar Energy: Principles of thermal collection and storage* 2nd edition
- [19] Flat Plane Collectors; Penn State (2009)
- [20] W. B. M. A. C., Bandara; et al.; *Assessment of the possibility of unglazed transpired type solar collector to be used for drying purposes: a comparative assessment of efficiency of unglazed transpired type solar collector with glazed type solar collector* (Janeiro 2018)
- [21] Evacuated Tube Collector; Alternative Energy Tutorials (2015)
- [22] Struckmann, F.; *Analysis of a flat plane solar collector* (2008)
- [23] Regulamento das características de comportamento térmico de edifícios (RCCTE) (Abril 2006)

- [24] ISO 94002:2005; *Instalações solares térmicas para produção de águas quentes sanitárias* (2005)
- [25] Eurostat, Europa; *Electricity for household consumers* (nrg_pc_204) (2018)
- [26] Eurostat, Europa; *Gas prices for household consumers* (nrg_pc_202) (2018)
- [27] Blewburry; *Facts and figures of LPG* (2010)
- [28] Antargaz.be (Belgium and Germany)
- [29] Φιάλης Βουτανίου; GasExpress.gr
- [30] Precios butano y propano envasado; Repsol.es
- [31] Preço gás butano e propano; Poupenabotija.pt
- [32] Eurostat, Europe; *Wood fuels and price statistics in Europe* (2018)
- [33] Carmen-ev; *Holtzpellets*;
- [34] Pelletsprice.com; *Prices of pellets*
- [35] Caloryfrio.com; *Precio de sacos de pellets*
- [36] Biomasseverband.at; *Pellet market in Greece* (2014)
- [37] Leroy Merlin; *Aquecimento: pellets e lenha*
- [38] Covenant Mayors; *The emission facts*
- [39] Taxa de Inflação: total e por consumo; Base de dados Portugal Contemporâneo
- [40] Legislação dos PCI de vários combustíveis; *Diário da República, 2ª série – N 122 – 26 de junho de 2008*
- [41] World Water Temperature; <https://www.seatemperature.org/>
- [42] Portal Gestão (VAL e TIR); <https://www.portal-gestao.com/artigos/2500-analisar-projectos-o-payback-a-tir-e-o-val.html>

ANEXOS

6 ANEXOS

6.1 Anexo A

XP 2.5-1 V

5 YEARS

ALTA ABSORÇÃO

ANTI-GELADO

SOLAR KITTING

COLECTOR SOLAR

KAAIROS XP 2.5 - 1 V

/ COLECTOR SOLAR VERTICAL PARA CIRCULAÇÃO FORÇADA GRANDES INSTALAÇÕES

- Absorvedor com tratamento altamente selectivo de óxido de titânio
- Vidro solar prismático de segurança
- Circuito hidráulico de tubos de cobre
- Desenhado e dimensionado para sistemas solares de grandes dimensões
- 4 ligações hidráulicas rápidas
- Ligação envio e retorno pelo mesmo lado (máx.5 colectores/fila) ou em lados opostos (máx.10/fila)
- Teste de rendimento segundo EM 12975

99 mm

2.240 mm

1.125 mm

Até 5 colectores

Até 10 colectores

DADOS TÉCNICOS

COLECTOR SOLAR KAIROS XP 2.5-1 V

Peso	kg	46
Pressão de exercício	bar	6
Diâmetro tubos	mm	18
Capacidade líquido do colector	l	2,1
Absorção	%	95
Emissão	%	5
Superfície de abertura	m²	2,256
Superfície de absorção	m²	2,241
Eta µ0 (sobre área de abertura)		0,808*
k1	W/m²K	3,131*
k2	W/m²K²	0,016*
Temperatura de estagnação	°C	198
Caudal min/max/recomendado	l/h	36/102/60

* Os dados fazem referência à área de abertura.

Código

3020058

Curva de rendimento colector solar

Gráfico de eficiência (0,0 a 1,0) vs. $\frac{T_{media\ liquido\ colector} - T_{ambiente}}{G}$ (0,00 a 0,10). A curva mostra uma eficiência decrescente à medida que a diferença de temperatura aumenta.

159 /

ARISTON

COMPONENTES

<TÍTULO DA TESE>

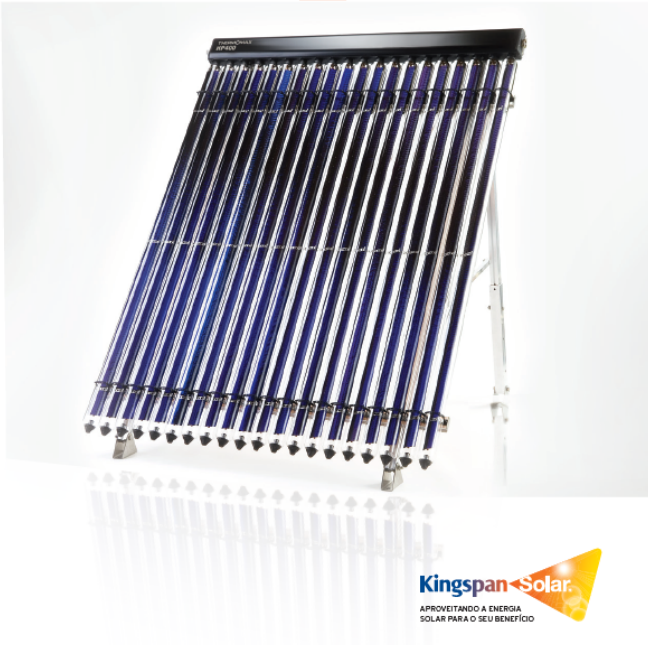
<NOME DO AUTOR>

6.2 Anexo B

SOLUÇÕES DE ENERGIAS RENOVÁVEIS
FICHA TÉCNICA KINGSPAN SOLAR

THERMOMAX HP400
NOVO DESIGN

PAINEL SOLAR DE TUBOS DE VÁCUO -
HEAT PIPE



THERMOMAX HP400

Com ligação a seco para fácil instalação e manutenção. Esta particularidade na ligação entre os condensadores e o coletor torna mais fácil a instalação e a manutenção dos tubos de vácuo. O dispositivo único de limitação da temperatura proporciona uma proteção adicional ao sistema. A possibilidade de escolha dos diferentes limites de temperatura máxima proporciona a solução perfeita no aquecimento de água da sua casa ou negócio.

OS PAINÉIS THERMOMAX HP ESTÃO DISPONÍVEIS EM 2 TAMANHOS DIFERENTES (20 OU 30 TUBOS) - AMBOS COM DIFERENTES DISPOSITIVOS DE TEMPERATURA MÁXIMA - 90°C (HP400) OU 135°C (HP450).

HP400 / HP450		
NÚMERO DE TUBOS	20	30
Área do Absorvedor (m ²)	2,01	3,021
Dimensões Totais (mm)	1952 x 1418 x 93	1952 x 2127 x 93
Largura do Coletor (mm)	1418	2127
Comprimento (tubo e coletor) (mm)	1952	1952
Profundidade (mm)	93	93
Área de Abertura (m ²)	2,13	3,20
Volume do Fluido (litr)	1,2	1,7
Dimensões de Entrada e Saída (mm)	22	22
Peso (vazio) (kg)	48	71
MONTAGEM		
Inclinação Recomendada (°)	20-70	20-70
PERFORMANCE		
Eficiência	Com base na Abertura	Com base na Abertura
Eta 0	0,75	0,75
a1 (W/m ² K)	1,18	1,18
a2 (W/m ² K ²)	0,010	0,010
CONDIÇÕES DE SERVIÇO - CAUDAL (litr/h)		
Nominal	160	240
Mínimo	120	180
Máximo	300	480
Pressão Máxima de Serviço	10 Bar	10 Bar
Temperatura de Estagnação (°C)	166	166
Fluido de Transferência de Calor	Solução de propilenoglicol	Solução de propilenoglicol
MATERIAIS		
Absorvedor	Cobre	Cobre
Revestimento	Revestimento Seletivo	Revestimento Seletivo
Absorvância (%)	95	95
Emissividade (%)	5	5
Suporte do Painel	Aço Inoxidável, Alumínio EPDM	Aço Inoxidável, Alumínio EPDM
Vidro	Baixa Transm. - Ferro 0.92	Baixa Transm. - Ferro 0.92
Vácuo	<10 ⁻⁴ mbar	<10 ⁻⁴ mbar
Limitação de Temperatura (°C)	90 / 135	90 / 135
Certificado MCS	KM 559829	KM 559829
Licença Solar Keymark	011-TS1793	011-TS1793

6.4 Anexo D

ALTEAS ONE NET 7A

SISTEMA PER4MANCE



/ CALDEIRA DE CONDENSÇÃO DE ALTA GAMA, DESIGN EXCLUSIVO, CONECTIVIDADE INTEGRADA E 7 ANOS DE GARANTIA E MANUTENÇÃO

- Novo permutador primário XTRATECHTM de aço inoxidável de alto rendimento patenteado e exclusivo Ariston
 - Secção de permutador aumentada de 142% em relação a versão anterior
 - Painel em vidro Temperado e anti-risco
 - Amplo ecrã, Interface táctil.
 - Sistema de Ignição: controle eletrónico da combustão
 - Seleção do tipo de gás desde o menu técnico (sem necessidade de kit de transformação de gás)
 - Classe A+ em aquecimento, graças a Cube e Sonda Externa Incluídos de serie.
 - Campo de Modulação do queimador 1:10
 - Conectividade Ariston NET Integrada na caldeira
 - Protocolo de comunicação BusBridgeNet®
 - Funções AUTO e COMFORT, CARE e PROGRAMAÇÃO horária Integrada
- Temperatura max./min.



Temperatura max./min. sanitária



		DADOS TÉCNICOS			24 FF	30 FF	35 FF
		CÂMARA			estaque	estaque	estaque
		CERTIFICADO CE			0085CR0394		
		POTÊNCIA					
		Potência nominal máx./min. (aquec.) PCI	kW		22,0/2,5	28,0/3	31,0/3,5
		Potência nominal máx./min. (sanit.) PCI	kW		26,0/2,5	30,0/3	34,5/3,5
		Potência útil máx./min. (60/80°C) (aquec.)	kW		21,5/2,3	27,5/2,8	30,3/3,3
		Potência útil máx./min. (sanit.)	kW		24,9/2,4	28,7/2,9	33,1/3,4
		RENDIMENTOS					
		A potência nominal (60/80°C) PCI	%		97,7	98,4	97,7
		A potência nominal (30/50°C) PCI	%		107,4	108,3	108,0
		A 30% da potência PCI	%		109,8	109,5	109,5
		PRESTAÇÕES					
		Temperatura max./min. aquecimento (alta temp.)	°C		82/35	82/35	82/35
		Temperatura max./min. aquecimento (baixa temp.)	°C		45/20	45/20	45/20
		Temperatura max./min. sanitária	°C		60/36	60/36	60/36
		Caudal água quente (T 25°C)	l/min		15,4	17,2	19,8
		PARTE ELÉTRICA					
		Tensão/Frequência de alimentação	V/Hz		230/50	230/50	230/50
		Potência elétrica absorvida total	W		80	91	82
		Grau de proteção da instalação elétrica	IP		X5D	X5D	X5D
		PESO E DIMENSÕES					
		Peso Kg	Kg		31,4	33,8	34,8
		Dimensões (altura-largura-profundidade)	cm		74,5-40-31,5	74,5-40-38,5	74,5-40-38,5
		ALTEAS ONE NET			24 EU	30 EU	35 EU
		Classe ErP AQUEC./AQ5	ErP		A+/A	A+/A	A+/A
		Perfil de consumo	ErP		XL	XL	XXL
		Código			3301058	3301059	3301060
		BARRA DE LIGAÇÕES			3318960	3318960	3318960
		KIT EVACUAÇÃO FUMOS			3318073	3318073	3318073

6.5 Anexo D

DADOS TÉCNICOS	UNIDADES	NARA PLUS 24	NARA PLUS 34
Potência Nominal Mínima/Máxima	kW	6,66 - 24,29	7,24 - 32,2
Potência Nominal Água Mínima/Máxima	kW	6,12 - 23,27	6,72 - 30,44
Rendimento Mínimo/Máximo	%	91,79 - 95,8	92,89 - 94,55
Tiragem Mínima da Chaminé	Pa	12	12
Alimentação Eléctrica	V/Hz	230/50	230/50
Consumo Eléctrico	W	94	94
Pressão de Serviço	bar	1,5	1,5
Conteúdo de Água na Caldeira	lts	36	36
Capacidade do Depósito de Pellets	kg	70	70
Consumo Médio de Pellets (Min - Máx)	kg/h	1,37 - 4,99	1,46 - 6,51
Vaso de Expansão	lts	8	8
Saída de Fumos (Evacuação)	mm	100	100
Entrada de Ar (Aspiração)	mm	80	80
Peso Líquido	kg	284	284
Volume Aquecido	m³	204 - 775	224 - 1014

DIMENSÕES (mm)

LEGENDA:
1 - IDA Radiadores 3/4"
2 - Descarga válvula de segurança 1/2"
3 - RETORNO Radiadores 3/4"
4 - Enchimento 1/2"
5 - Alimentação elétrica
6 - Saída de Fumos
7 - Entrada de ar novo