



ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Mecânica

Simulação do Desempenho Energético de Sistemas Solares Térmicos para a Produção de Água Quente Sanitária com Circulação Forçada

**JOANA CRISTINA DIAS GONÇALVES PIRES
CARRETO**

(Licenciado em Engenharia Química e Biológica)

**Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Mecânica**

Orientadores:

Doutora Cláudia Sofia Séneca da Luz Casaca

Doutor Celestino Rodrigues Ruivo

Júri:

Presidente: Doutor João Manuel Ferreira Calado

Vogais:

Doutora Helena Maria Nóbrega Avelino

Doutora Cláudia Sofia Séneca da Luz Casaca

Dezembro de 2016



ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia Mecânica

Simulação do Desempenho Energético de Sistemas Solares Térmicos para a Produção de Água Quente Sanitária com Circulação Forçada

**JOANA CRISTINA DIAS GONÇALVES PIRES
CARRETO**

(Licenciado em Engenharia Química e Biológica)

**Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Mecânica**

Orientadores:

Doutora Cláudia Sofia Séneca da Luz Casaca

Doutor Celestino Rodrigues Ruivo

Júri:

Presidente: Doutor João Manuel Ferreira Calado

Vogais:

Doutora Helena Maria Nóbrega Avelino

Doutora Cláudia Sofia Séneca da Luz Casaca

Dezembro de 2016

Agradecimentos

A realização desta dissertação de mestrado contou com importantes apoios e incentivos sem os quais não se teria tornado uma realidade e aos quais estarei eternamente grata.

À Professora Doutora Cláudia Casaca e ao Professor Doutor Celestino Ruivo pela disponibilidade, pela sua orientação, pelo saber que me transmitiram, pelas opiniões e críticas, total colaboração no solucionar de dúvidas e problemas que surgiram ao longo da elaboração deste trabalho.

Aos meus pais, irmãos e avós pela paciência, apoio incondicional, incentivo que surgiram ao longo desta caminhada.

Por último agradeço a todos que de uma certa forma estiveram presente e pela compreensão e encorajamento durante todo este período.

*“O que for teu desejo, assim será tua vontade.
O que for tua vontade, assim serão teus actos.
O que forem teus actos, assim será teu destino”*

Deepak Chopra

Resumo

O consumo energético deve-se efectuar sempre que possível com uma energia gratuita e só depois com uma energia de apoio (convencional), isto é, quando a energia solar já não for suficiente. Nesta dissertação é demonstrado o desenvolvimento de um modelo para simular o desempenho energético de um sistema de circulação forçada para produção de Águas Quentes Sanitárias situada no telhado do refeitório do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

O modelo desenvolvido inicialmente foi construído para uma determinada latitude com 2 ângulos diferentes de inclinação do painel. A construção deste modelo foi realizado para uma latitude de 40°N com ângulo de inclinação de 90° e 0°, de modo a ser possível validar os valores obtidos com valores teóricos disponibilizados em literatura de referência. Após o modelo ter sido validado adequou-se o mesmo para a latitude do painel em estudo, 38°N, verificando-se a influência da variação da latitude. Com a alteração da latitude verificou-se que o painel analisado a sul adquire mais ganhos solares no Inverno que no Verão. A radiação na superfície vertical no solstício de Verão é menor em relação ao solstício de Inverno. Neste a radiação na superfície inclinada no modelo para uma latitude de 40°N é ligeiramente maior que para uma latitude de 38°N.

A posteriori houve a necessidade de verificar a influência do ângulo de inclinação do painel, sendo esta verificada para os ângulos de 0°, 90° e o 35° (ângulo dos painéis em estudo). O método de cálculo foi concretizado a partir de uma folha de cálculo e verificou-se que para o solstício de Verão à medida que se diminui o ângulo de inclinação do painel tem-se um valor de insolação maior, o que não acontece para o solstício de Inverno em que se verifica o oposto.

Após obtido o valor da radiação solar incidente na superfície inclinada, determinou-se a potência do painel solar térmico bem como a temperatura final expectável à saída do colector, utilizando para o efeito os valores obtidos experimentalmente das sondas colocadas na instalação.

Palavras-chave: AQS; Circulação forçada; Radiação solar; Radiação na Superfície Inclinada; Energia térmica fornecida; Eficiência do colector solar térmico.

Abstract

Energy consumption should be performed whenever possible with a free energy and only then with a power support (conventional), that is, when solar energy is not enough. This dissertation demonstrated the development of a model for the production of domestic hot water by forced circulation system located on the roof of the canteen of the Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

The model was initially constructed for a certain latitude with 2 different angles of inclination of the panel. The construction of this model was performed for a latitude 40°N with an inclination angle of 90° and 0° , in order to be able to validate the theoretical values obtained with reference values available in the literature. After the model has been validated suited is the same for the panel latitude study 38°N , verifying the influence of variation in latitude. With the change of latitude found that the panel analyzed the south gets more solar gain in winter than in summer. The radiation on the vertical surface in midsummer is lower compared to the winter solstice. In this radiation on the inclined surface model for a 40°N latitude is slightly greater than that for a latitude of 38°N .

Subsequently there was a need to check the influence of the panel tilt angle, which is checked for angles of 0° , 90° and 35° (angle of the panels in the study). The calculation method was realized from a spreadsheet and it was found that for the summer solstice as it decreases the inclination angle of the panel has a greater insolation value, which is not true for the winter solstice in which the opposite is true

After obtaining the solar radiation incident value on the inclined surface, determined the thermal power of solar panel as well as the expected final temperature collector output, using for this purpose the experimental values of the probes placed installation.

Keywords: DHW; Forced circulation; Solar radiation; Radiation on tilted surface; Provided thermal energy; Efficiency of the solar collector .

Abreviaturas

AQS	Água Quente Sanitária
AQSpP	Água Quente Solar para Portugal
AQSpP	Programa Água Quente Solar para Portugal
CPC	Colector Parabólico Composto
ICS	Painel Solar
INETI	Instituto Nacional de Engenharia, tecnologia e inovação
IV	Raios Infravermelhos
LECS	Laboratório de Ensaio de Colectores Solares
LEM	Laboratório de Testes Mecânicos
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MST	Medida Solar Térmico
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico
UV	Raios Ultravioleta
VIS	Radiação Visível

Símbolos

U_L	Coeficiente global de perdas	[W/m ² °C]
δ	Declinação	[graus]
AST	Tempo solar aparente	[horas]
ET	Equação do tempo	
H	Ângulo horário	[radianos]
β	Ângulo de altitude Solar	[radianos]
φ	Ângulo azimute solar	[radianos]
γ	Ângulo azimute solar de superfície	[radianos]
E_{DN}	Radiação directa normal	[W/m ²]
E_D	Radiação directa na superfície	[W/m ²]
E_{Ground}	Radiação solar reflectida	[W/m ²]
θ	Ângulo de incidência	[graus]
θ_I	Ângulo do colector de superfície inclinada	[graus]
$E_{total-hor}$	Radiação total na horizontal	[W/m ²]
$E_{total-sup.incli}$	Radiação total na superfície inclinada	[W/m ²]
$H_{\Theta it}^d$	Radiação total diária	[W/m ²]
I_{HT}	Radiação total na horizontal	[W/m ²]
$H_{\Theta IT}^d$	Radiação total na superfície inclinada	[W/m ²]
I_{IT}	Radiação na superfície inclinada	[W/m ²]
VM	Valor máximo	[W/ m ²]
$\overline{E_{G1}}$	Média mensal da radiação global incidente	[W/m ²]
E_{HM}	Radiação horizontal no modelo	[W/m ²]
$E_{sup.incli.M}$	Radiação na superfície inclinada no modelo	[W/m ²]

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	v
Abstract.....	vii
Abreviaturas.....	ix
Símbolos	xi
Índice	xiii
Índice de Figuras	xv
Índice de Tabelas	xix
Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objectivos.....	4
1.3. Organização.....	4
Capítulo 2 - Radiação Solar.....	5
2.1. O Sol e a Constante Solar	5
2.2. Radiação directa e difusa.....	8
2.3. Planos e meridianos.....	10
2.4. Posição e Orientação do Sol.....	11
2.5. A Geometria Sol-Terra	13
2.5.1 Ângulos solares	15
2.6. Radiação Solar Incidente numa Superfície.....	20
Capítulo 3 - Colectores Solares Térmicos	25
3.1. Sistema Solar Térmico e características gerais	25
3.2. Tipo de Colector.....	29
3.2.1 Colector Simples	30
3.2.2 Colector Solares Planos.....	30
3.2.3 Colector tubo de vácuo.....	33
3.2.4 Colector solar do tipo concentrador parabólico composto.....	35

3.3. Sistemas de Circulação.....	37
3.3.1 Sistema de circulação forçada.....	37
3.3.2 Sistema de circulação em termosifão	38
3.3.3 Sistema de solar com recolha automática	40
3.4. Caso de Estudo	42
3.5. Implementação do modelo	46
3.5.1 Radiação incidente média Global	46
3.5.2 Radiação solar no plano horizontal e numa superfície inclinada	48
Capítulo 4 - Análise de dados.....	55
4.1. Validação do Modelo	55
4.2. Influência da Latitude.....	59
4.3. Influência da variação do ângulo de inclinação	61
4.4. Análise da Eficiência do Colector Solar.....	63
Capítulo 5 - Conclusões.....	73
Referências Bibliográficas.....	77
Anexo A - Outros equipamentos e acessórios	85
Depósito de Acumulação	89
Anexo B - Esquema de Princípio de funcionamento da instalação do ISEL	93
Anexo C - Radiação Solar diária durante o ano para latitude de 40°N, Ahsrae	95
Anexo D - Radiação Solar diária durante o ano para latitude de 40°N, Carrier	97
Anexo E - Folha de Cálculo	99
Anexo F - Solterm	101

Índice de Figuras

Figura 1. 1 Pirelióforo. (Adaptação[2]).....	2
Figura 2. 1 Fonte de luz com diferentes densidades de fluxo em função da distância (Adaptação [9]).....	6
Figura 2. 2 Esquematização da radiação solar fornecida à Terra (Adaptação [9]).....	7
Figura 2. 3 Espectro de radiação fora da atmosfera da Terra em comparação com o espectro de um corpo negro a 5800 K [11].	8
Figura 2. 4 Componentes da radiação solar na superfície terrestre (Adaptação [13]).....	9
Figura 2. 5 Pólos Norte (N) e Sul (S), eixo terrestre (NS), plano do equador ϵ , equador (e), plano paralelo (P), paralelo (p), plano meridiano (M) e meridiano (m) (Adaptação [12]).....	10
Figura 2. 6 Azimute e altura solar (Adaptação [16]).....	11
Figura 2. 7 Órbita da Terra (N:Norte, E:Este, S:Sul) (Adaptação [17]).	12
Figura 2. 8 Diferentes inclinações do painel em diferentes alturas do ano (Adaptação [18]).....	12
Figura 2. 9 A órbita terrestre em torno do Sol e a variação da declinação ao longo do ano (Adaptação [21]).....	14
Figura 2. 10 Definição da latitude, ângulo horário e a declinação solar (Adaptação [21]). 16	
Figura 2. 11 Movimento diurno aparente do sol desde que nasce até que se põe (Adaptação [21]).....	17
Figura 2. 12 Ângulos solares para superfícies verticais e horizontal (Adaptação [23]).	20
Figura 3. 1 Componentes de um sistema solar térmico (Adaptação [29]).	26
Figura 3. 2- Componentes de um colector [30].	27
Figura 3. 3 Representação da orientação de um colector (Adaptação [18]).....	29
Figura 3. 4 Colector simples para o aquecimento de piscinas (Adaptação [36]).	30
Figura 3. 5 Colector Plano (Adaptação [41]).	31
Figura 3. 6 Colector solar sem acumulação (ICS) (Adaptação [36]).	32
Figura 3. 7 Diagrama esquemático de um colector de tubo de vácuo [42].	34
Figura 3. 8 Constituição de um colector CPC (Adaptação [47]).....	36
Figura 3. 9 Sistema de Circulação forçada [52].	38

Figura 3. 10 Sistema Solar térmico por termosifão [53].	39
Figura 3. 11 Sistema de circulação em termosifão [54].	40
Figura 3. 12 Instalação solar com recolha automática parada [55].	41
Figura 3. 13 Instalação solar em funcionamento [55].	41
Figura 3. 14 Colectores solares térmicos instalados no telhado do refeitório (ISEL).	42
Figura 3. 15 Esquema solar com depósito de uma serpentina e apoio de esquentador [56].	43
Figura 3. 16 Simbologia do esquema solar [56].	44
Figura 3. 17 Purgador de ar automático, modelo ELT cinco [59].	45
Figura 3. 18 Válvula de segurança de 6 bar [59].	45
Figura 3. 19 Termóstato diferencial B-Sol 100 [59].	45
Figura 3. 20 Série histórica de dados diários médios mensais de radiação máxima e média global em plano horizontal adquiridos na estação meteorológica do IST ao longo do ano 2013.	47
Figura 3. 21 Variação da declinação $\delta(^{\circ})$, para o dia 21 de cada mês.	48
Figura 4. 1 Radiação total na superfície horizontal (0°) a latitude 40°N durante o solstício de Verão.	56
Figura 4. 2 Radiação total na superfície horizontal (0°), a latitude 40°N durante o solstício de Inverno.	56
Figura 4. 3 Radiação total na superfície vertical (90°), a latitude 40°N durante o solstício de Verão.	57
Figura 4. 4 Radiação total na superfície vertical (90°), a latitude 40°N durante o solstício de Inverno.	58
Figura 4. 5 Radiação incidente média na superfície inclinada no modelo (90°) para uma latitude de 38° e 40°N para o solstício de Verão.	60
Figura 4. 6 Radiação incidente média na superfície inclinada no modelo (90°) para uma latitude de 38° e 40°N para o solstício de Inverno.	60
Figura 4. 7 Radiação incidente média na superfície inclinada para uma latitude de 38°N com ângulo de inclinação de 0° , 35° , 90° durante o solstício de Verão.	62
Figura 4. 8 Radiação incidente média na superfície inclinada para uma latitude de 38°N com ângulo de inclinação de 0° , 35° , 90° durante o solstício de Inverno.	62
Figura 4. 9 Curva característica para o mês de Junho.	65

Figura 4. 10 Curva Característica para o mês de Dezembro.	66
Figura 4. 11 Temperatura média da água da rede ao longo do ano.	68
Figura 4. 12 Variação da temperatura medida e do modelo.	69
Figura 4. 13 Variação da temperatura medida e do modelo no solstício de Verão.	70
Figura 4. 14 Variação da temperatura medida e no modelo no solstício de Inverno.	70
Figura 4. 15 Variação da potência no intervalo de tempo nos meses de Junho e Dezembro.	71
71	
Figura A. 1 Válvula de segurança [46].	85
Figura A. 2 Válvula de retenção [46].	86
Figura A. 3 Válvula de corte [46].	86
Figura A. 4 Válvula de três vias [46].	86
Figura A. 5 Válvula misturadora termostática [46].	87
Figura A. 6 Purgador [72].	87
Figura A. 7 Bomba de circulação [46].	88
Figura A. 8 Vaso de expansão [46].	89
Figura A. 9 Permutador de Camisa [46].	91
Figura A. 10 Permutador de serpentina [46].	92
Figura B. 1 Esquema do Princípio de funcionamento da instalação do ISEL.	94
Figura C. 1 Radiação Solar média diária durante o ano todo latitude de 40°N, Ashrae.	95
Figura D. 1 Radiação Solar média diária durante o ano todo latitude de 40°N, Ashrae. ...	97
Figura F. 1 Escolha as condições climáticas no programa Solterm.	102
Figura F. 2 Detalhes do local.	102
Figura F. 3 Perfil de consumo.	103
Figura F. 4 Escolha de perfil de consumo.	103
Figura F. 5 Ambiente de trabalho do programa <i>Solterm</i> e selecção de dados.	104
Figura F. 6 Características do sistema de circulação forçada.	105
Figura F. 7 Análise de dados.	105

Índice de Tabelas

Tabela 1- Coeficientes para o cálculo da radiação solar sem nebulosidade para o vigésimo primeiro dia de cada mês (Adaptação [23]).....	22
Tabela 2- Características principais dos equipamentos no sistema de circulação forçada.	44
Tabela 3- Valores de α_1 para o mês de Junho e Dezembro.....	50
Tabela 4 - Valores de α_2 para o mês de Junho.....	51
Tabela 5 – Valores correspondentes ao modelo Vulcano FKC-1S/FKC-1W.....	64
Tabela 6- Perfis de consumo diários.....	67

Capítulo 1 - Introdução

1.1. Motivação

A energia solar é uma parte importante da vida, o homem está aprendendo a aproveitar este recurso de forma a usá-lo para substituir as fontes de energia convencionais, tais como os combustíveis fósseis. O preço dos combustíveis fósseis (gás natural, carvão, petróleo) sobe em proporcionalidade inversa à sua quantidade disponível para venda, ou seja, quanto mais escasseiam, mais elevado é o seu preço. Portanto com o passar do tempo estas energias acabarão por esgotar deixando-nos então num beco sem saída em relação ao uso energia. O recurso deste tipo de energia, energia não convencional, tem impactos ambientais bastante elevados bem como alteração no clima provocando alterações e prejuízos irreversíveis. A solução para ultrapassar esta adversidade é racionalizar o uso desse tipo de energia e utilizar em sua substituição energias renováveis, tais como: sol, água, biomassa e vento.

A utilização da radiação solar que incide na superfície terrestre em forma de energia térmica não é de toda uma originalidade. O uso desta energia remota à ancestralidade, a numerosos séculos a.C. quando as habitações construídas se situavam viradas a sul com fachadas bastante altas para que os raios penetrassem pelos pórticos durante a estação mais fria, já na estação mais quente, Verão, viradas para norte as fachadas eram sem dúvida mais baixas alcançando sombras. Pode-se comprovar pela arquitectura de antigas civilizações, como na Mesopotâmia e Egipto em que as portas eram colocadas de maneira a ficarem longe de lado solarengos no pico do sol. No Inverno as portas e janelas eram orientadas no lado da casa acolhido do vento mas sempre alinhado ao pico do sol, meio-dia [1].

Uma das aplicações da energia solar térmica é a produção de energia eléctrica, em que por sua vez é gerada a altas temperaturas por meio de centrais solares para produção de vapor. No início do século XVIII, foi inventado o precursor dos actuais painéis solares, pelo cientista Horace-Bénédict de Saussure. Um cientista português de nome Padre Manuel António Gomes, mais conhecido por Padre Himalaya, desenvolveu e construiu um avançado sistema de captação da energia solar denominado por Pirelióforo (latim: portador do fogo do sol) como se pode observar na Figura 1. O Pirelióforo é um forno solar que atinge temperaturas extremamente altas, 3800 °C e servia para diversas

aplicações, fusão de materiais, produção de água potável em sítios desérticos, produção de vapor em processos industriais [2].



Figura 1. 1 Pirelióforo (Adaptação [2]).

Na década de 60 constata-se um significativo aumento de investigações nesta área, desenvolvidos essencialmente pelo Doutor Salgado Prata, no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Os trabalhos desenvolvidos foram substancialmente nas áreas da destilação solar, aquecimento de água para uso doméstico, secagem, arquitectura solar, refrigeração solar, cozinhas solares e propriedades de materiais sob a acção da radiação. Ainda nessa década e em sintonia com a política israelita de utilização em larga escala de equipamento solar térmico, assistiu-se à importação de colectores solares térmicos por intermédio da primeira empresa portuguesa do sector, FALCONER, Lda, tendo sido o primeiro sistema solar instalado em Lisboa [3]. Sendo Portugal um dos países da OCDE com uma maior dependência energética, a crise petrolífera dos anos 70 teve um enorme impacto em todos os sectores da economia. Esta década foi dada uma maior atenção à energia solar. Neste contexto, a adesão de Portugal à Agência Internacional de Energia foi imediata, tendo sido reiniciados trabalhos de investigação na área da energia solar num novo laboratório do Estado, a partir do esforço conjunto de cientistas e engenheiros do Laboratório de Testes Mecânicos (LEM) da Direcção Geral de Combustíveis.

No ano de 1974 com a mudança de regime político abriram-se portas para a discussão pública de temas políticos, sociais, culturais ou científicos, sendo a dependência energética do País e a abordagem à política a seguir no domínio da energia um dos temas em discussão. No final dessa década o debate centra-se na energia nuclear e nas questões ambientais. No século XX, mais propriamente nos anos 80, devido ao elevado custo do barril de petróleo testemunha-se uma vaga de instalações térmicas

solares. Nos anos 80 foram instruídos vários trabalhos nesta área, realçando-se o papel de destaque do então Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (INETI), a partir do seu Departamento de Energias Renováveis criado pelo LEM. Contudo na década a seguir assiste-se a uma quebra acentuada da confiança do consumidor final em consequência dos técnicos não terem qualquer tipo de formação usando desta forma sistemas com pouca qualidade.

Na década seguinte assiste-se à acreditação do Laboratório de Ensaio de Colectores Solares (LECS), estrutura que se encontra na base da realização de ensaios de avaliação e qualificação de colectores e de sistemas solares térmicos [4]. Vários projectos a nível internacional são desenvolvidos ao longo desta década em várias áreas tais como dessalinização, a secagem solar, fornos solares, solar fotovoltaico e arrefecimento solar.

A respeito de incentivos à adesão deste tipo de tecnologias destaca-se o aparecimento do Programa VALOREN, e mais tarde, o programa ENERGIA, visando o financiamento de equipamento para o aproveitamento das energias renováveis e, em particular, da energia solar.

No decorrer do novo milénio ocorre uma inversão da situação, reestabelecendo o optimismo do consumidor final, desta forma foi lançado um Programa Água Quente Solar para Portugal (AQSpP) no seguimento da publicação do Programa E4 e da afirmação do carácter estratégico dos sistemas solares térmicos [5]. Este programa gera um enquadramento de regulação da actividade de instalação de sistemas solares térmicos não contendo incentivos directos ao investimento.

No panorama actual, em que as questões climáticas e energéticas são um problema cada vez com maior dimensão, é importante estudar e desenvolver alternativas energéticas limpas e renováveis que possam colmatar as necessidades actuais de forma rentável e economicamente competitiva. Deste modo, o interesse em estudar fontes de energia alternativas aos combustíveis fósseis torna-se mais pertinente. Torna-se importante saber o percurso histórico dos sistemas solares térmicos e observando desta forma a evolução desta tecnologia até à actualidade. É considerável ter-se algumas destas noções pois acima de tudo é mais fácil compreendê-la mas como também é encarecedor a nível de conhecimentos. Neste sentido, o desenvolvimento da temática deste trabalho conduziu a nível pessoal a um aprofundamento e aplicabilidade de determinadas matérias leccionadas no curso, bem como permitiu demonstrar o porquê

de determinadas regras implementadas no que diz respeito à montagem dos colectores solares em Portugal.

1.2. Objectivos

A presente dissertação tem como objectivo desenvolver um modelo simplificado a partir de uma folha de cálculo para analisar e verificar o desempenho de sistemas solares térmicos para a produção de AQS com circulação forçada.

O modelo matemático tem como base, o cálculo da radiação solar incidente no plano horizontal e inclinado para cada dia típico de cada mês ao longo do dia.

Após os dados obtidos da radiação solar é possível determinar-se a potência e eficiência do painel chegando desta forma a valores de temperatura à saída o painel comparando-os com valores obtidos experimentalmente.

1.3. Organização

Este trabalho é constituído por 5 capítulos. No primeiro capítulo é indicado a motivação e relevâncias para o desenvolvimento da tese e perspectiva histórica dos painéis solares térmicos, são discriminados os objectivos e respectivas contribuições e como é dividida a dissertação.

O segundo capítulo aborda a radiação solar em pormenor bem como os modelos utilizados para o cálculo dos ângulos solares e radiação directa e total.

No início do terceiro capítulo é abordado detalhadamente os sistemas solares térmicos bem como os sistemas de circulação forçada e termossifão. Posteriormente a modelação matemática para o cálculo da radiação solar incidente no painel em estudo.

No capítulo 4 é realizado o estudo comparativo entre os resultados do modelo criado com dados referentes na bibliografia. *A posteriori* expõe-se os resultados obtidos tendo em vista o cumprimento dos objectivos propostos e é efectuada a discussão dos mesmos.

Por fim, no quinto capítulo é sintetizado todas as análises elaboradas ao longo do trabalho.

Capítulo 2 - Radiação Solar

2.1. O Sol e a Constante Solar

O Sol fornece energia na forma de radiação, que é a base de toda a vida na Terra. No centro do Sol, a fusão transforma núcleos de hidrogénio em núcleos de hélio. Durante este processo, parte da massa é transformada em energia. O Sol é assim um enorme reator de fusão [6].

O Sol é a estrela central do sistema solar e a mais próxima de nosso planeta, estando a uma distância de aproximadamente 150 milhões de quilómetros sendo responsável por 99,86% da massa do Sistema Solar. A luz proveniente do Sol demora por volta de 8 minutos e 18 segundos a chegar à Terra. O Sol possui uma massa de 332,9 mil vezes maior que a Terra. Esta estrela detém de uma camada externa denominada fotosfera tendo uma temperatura cerca de 6000 °C. Esta camada apresenta uma aparência turbulenta devido às diversas erupções energéticas que lá ocorrem. Os compostos que constituem o Sol é sobretudo hidrogénio e hélio contendo também vestígios de diversos elementos, como ferro, níquel, oxigénio, enxofre, magnésio, cálcio e crómio [7].

A radiação do sol sustenta a vida na Terra e é a principal responsável pela dinâmica da atmosfera terrestre e pelas características climáticas da Terra. O fluxo de energia dentro do Sol resulta numa temperatura de superfície de cerca de 5800 K, de modo que o espectro da radiação do sol é semelhante à de um corpo negro 5800 K com estrutura fina devido à absorção de gás solar periférico fresco [8]. Outro conceito importante para o tema em causa é a constante solar, que é denominada pelo fluxo de radiação do Sol, que é o total de energia que atinge o limite da atmosfera na superfície de 1cm^2 , perpendicularmente aos raios solares durante um minuto. Quando a radiação solar é medida na superfície exterior da atmosfera terrestre esta fórmula pode ser ajustada através da lei do inverso do quadrado da distância, de modo a inferir a magnitude da radiação solar e deduzir assim a constante solar. Uma forma de se poder explicar esta lei é exemplificando o seu funcionamento a partir de um exemplo comum na nossa sociedade, como o de uma lâmpada incandescente no meio de uma sala, tal como se pode observar na figura 2.1. O ponto X representa a lâmpada, como a radiação se propaga os mesmos X watts emitidos pela lâmpada atingem esferas concêntricas imaginárias à volta da lâmpada [9].

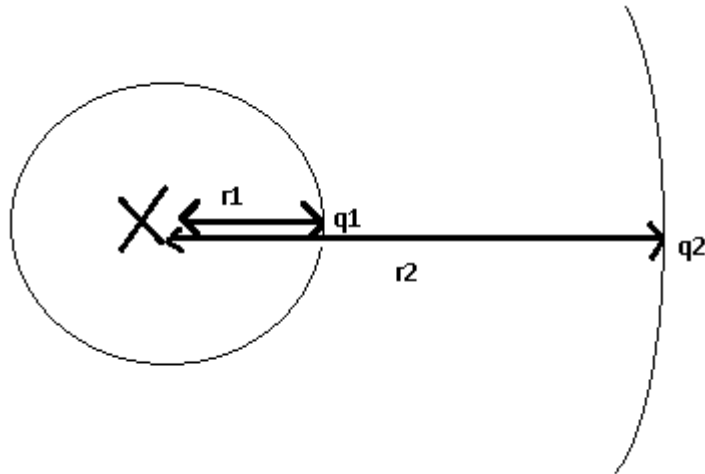


Figura 2. 1 Fonte de luz com diferentes densidades de fluxo em função da distância
(Adaptação [9]).

Pode-se constatar que q_1 é a intensidade luminosa de radiação a uma distância r_1 , a área da esfera imaginária é dada por $(4\pi r_1^2)$. Assim sendo:

$$q_1 = \frac{X}{4\pi r_1^2} \Leftrightarrow X = q_1 4\pi r_1^2 \quad (1)$$

Para a outra distância, r_2 , tem-se o mesmo raciocínio:

$$q_2 = \frac{X}{4\pi r_2^2} \Leftrightarrow X = q_2 4\pi r_2^2 \quad (2)$$

O valor de X é uma constante, sendo assim combinando ambas as equações tem-se:

$$q_1 4\pi r_1^2 = q_2 4\pi r_2^2 \Leftrightarrow q_2 = q_1 \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 \quad (3)$$

A equação 3 é conhecida como a lei do inverso do quadrado da distância. Essa lei geralmente aplica-se quando alguma força, energia, ou outra quantidade conservada é irradiada radialmente a partir de uma fonte pontual. Isto acontece pelo facto da radiação emitida por um corpo ou seja, pela energia se dissipar ao longo do espaço ao mesmo

tempo que se afasta da própria fonte. Isto fará com que haja uma diminuição no brilho do objecto à medida que a distância aumenta, isto é, a intensidade luminosa diminui quadraticamente. Tal como foi dito anteriormente a partir desta lei pode-se deduzir o valor da constante solar. Para tal é necessário usar os próximos dados:

- Temperatura do Sol, $T_{Sol} = 5800 \text{ K}$;
- Raio do Sol, $R_{Sol} = 6,96 \times 10^8 \text{ m}$;
- Distância Sol-Terra, $d = 1,5 \times 10^{11} \text{ m}$.

A superfície da Terra está permanentemente a receber energia do Sol, na forma de radiação electromagnética, na figura 2.2 pode-se observar a esquematização da radiação solar fornecida à Terra.

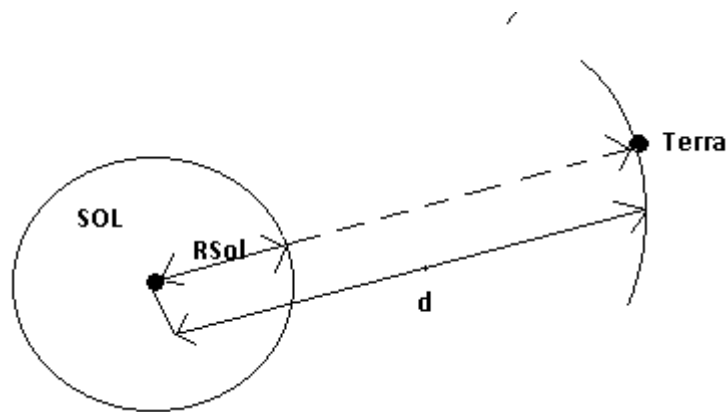


Figura 2. 2 Esquematização da radiação solar fornecida à Terra (Adaptação [9]).

A constante solar inclui todos os tipos de radiação, raios UV, VIS, IV, ondas eléctricas curtas, ondas hertzianas, ondas de rádio, raios gama, raios X e espectro electromagnético de curta e elevada energia cósmica [10]. Na figura 2.3 tem-se o espectro de radiação fora da atmosfera da Terra em comparação com o espectro de um corpo negro a 5800 K.

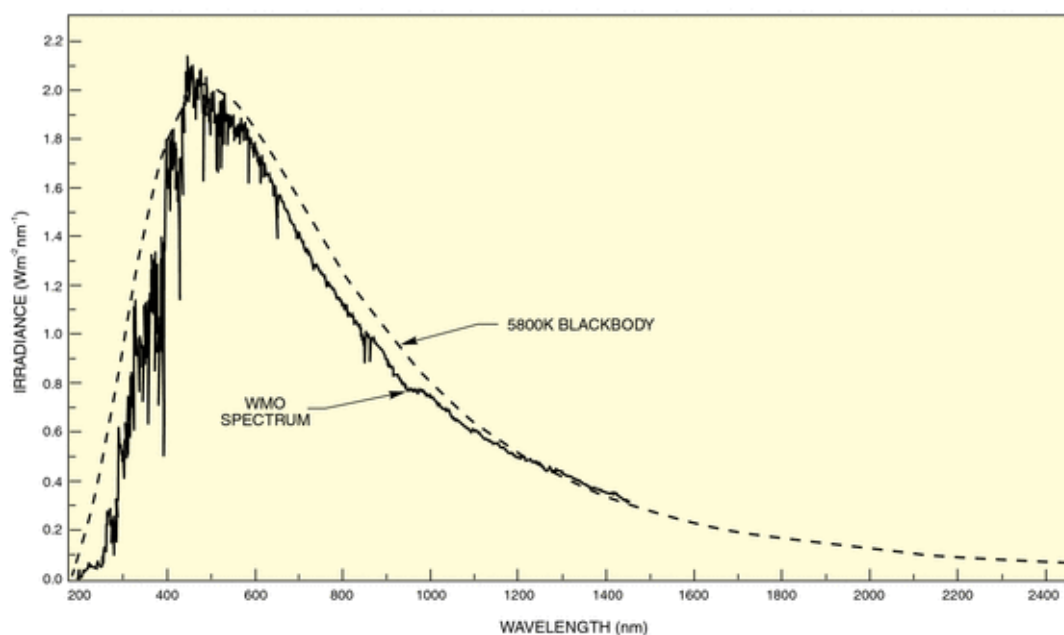


Figura 2. 3 Espectro de radiação fora da atmosfera da Terra em comparação com o espectro de um corpo negro a 5800 K [11].

2.2. Radiação directa e difusa

A radiação solar ao propagar-se na atmosfera, sofre moderação pelos processos físicos da absorção, reflexão e difusão, sendo estes provenientes da ligação entre os constituintes da atmosfera e as ondas electromagnéticas [12].

A energia solar que num determinado instante e local, atinge a superfície terrestre é denominada de radiação global. Esta radiação é dividida em dois componentes: radiação directa e radiação difusa. A radiação directa é a radiação que incide directamente na superfície terrestre sem qualquer mudança de direcção. Em relação à radiação solar difusa, esta é a que é recebida indirectamente na superfície da Terra, por outras palavras é a que chega aos olhos do observador a partir da difusão de moléculas de ar e partículas de pó. Dentro deste último componente inclui-se a radiação reflectida pela superfície terrestre (radiação do albedo). A radiação do albedo é um indicativo da quantidade de radiação solar reflectida pela superfície terrestre de acordo com o tipo de vegetação ou constituição da região [12].

A radiação solar difusa ao alcançar a superfície terrestre, une-se à radiação solar directa formando desta forma a radiação global, sendo esta absorvida pela superfície da

terra e emitida em função da temperatura. Posteriormente é reenviada para a atmosfera com a mesma quantidade de energia com a qual tinha sido recebida pela radiação terrestre. Pode-se concluir que a Terra encontra-se em equilíbrio térmico, desta forma se isto não acontecesse o planeta não era capaz de manter uma temperatura média da ordem dos 15 °C, sendo que aquecia e arrefecia constantemente.

A figura 2.4 demonstra de uma maneira mais simplificada o funcionamento da radiação solar. Analisando a figura 2.4, observa-se os componentes da radiação solar na superfície terrestre. No ponto 1 tem-se a energia emitida pelo sol quando atinge a Terra. A radiação difusa, que está representada pelo ponto 2, é a radiação solar que alcança a superfície da Terra a partir de todas as direcções, após ser dispersa pelas moléculas de algumas substâncias, entre os quais o dióxido de carbono (CO₂) e vapor de água. A radiação difusa pode ser interpretada como a claridade do céu quando o sol está totalmente encoberto por nuvens. Com isso, a temperatura do planeta aumenta, em que tudo funciona como se a atmosfera fosse uma gigantesca estufa. No ponto 3 parte da energia emitida pelo Sol é reflectida pelas camadas superiores da atmosfera. Por último o ponto 4 demonstra a restante energia que o planeta absorve e por sua vez emite calor na forma de radiação IV.

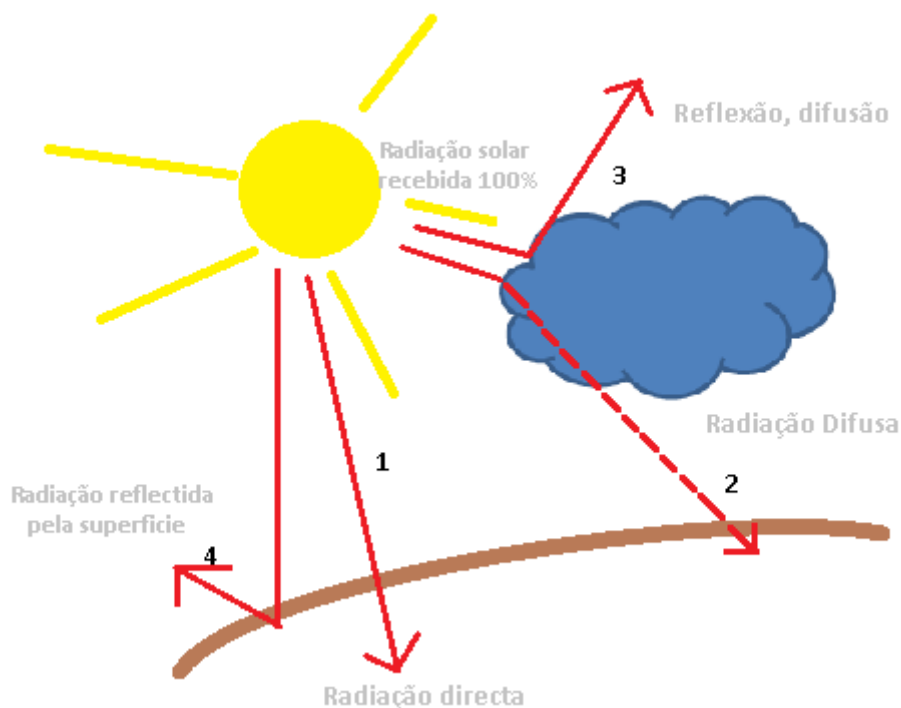


Figura 2. 4 Componentes da radiação solar na superfície terrestre (Adaptação [13]).

Pode-se verificar que em dias com o céu particularmente limpo a radiação directa prevalece sendo que em dias substancialmente nublados como acontece no Inverno, a radiação solar é na totalidade difusa.

2.3. Planos e meridianos

A Terra possui um eixo de rotação, cujas extremidades constituem os pólos verdadeiros ou geográficos, Norte (N) e Sul (S). O plano perpendicular àquele eixo, que atravessa o seu centro divide a Terra em dois hemisférios: o Hemisfério Norte ou Hemisfério Sul. O plano é apelidado de plano equatorial e a intersecção com a superfície do globo terrestre é constituída por uma circunferência denominada de equador [12]. Os planos paralelos ao equador, que interceptam a superfície do globo terrestre, determinam circunferências de menor raio, denominadas de paralelos. Os planos de meridiano são semiplanos perpendiculares ao plano do equador e que tem como limite o eixo terrestre. Os meridianos são formados a partir de intersecções dos planos meridianos com a superfície do globo. Cada meridiano começa num pólo e termina no outro [12]. Na figura 2.5 pode-se observar como a terra é constituída desde os pólos aos planos.

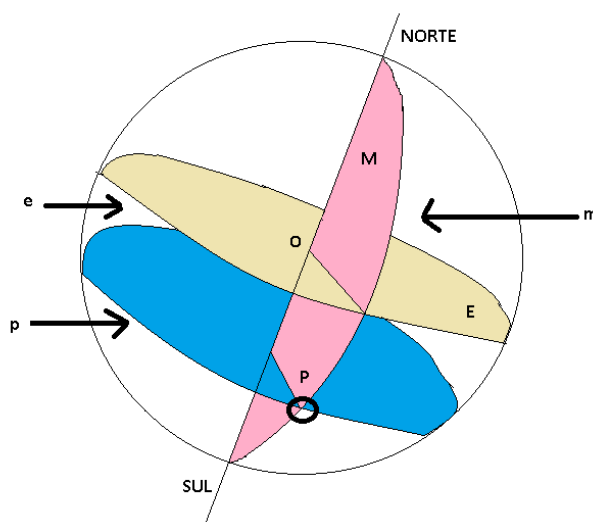


Figura 2. 5 Pólos Norte (N) e Sul (S), eixo terrestre (NS), plano do equador €, equador (e), plano paralelo (P), paralelo (p), plano meridiano (M) e meridiano (m) (Adaptação [12]).

2.4. Posição e Orientação do Sol

A localização exacta do Sol é fundamental para a determinação de dados de radiação e a respectiva energia produzida pelas instalações solares. Esta pode ser definida em qualquer altura, local e pelo seu azimute. O Sul é referido como $\varphi = 0^\circ$. Para ângulos orientados a Este atribui-se o símbolo negativo (Este: $\varphi = -90^\circ$) para ângulos orientados a Oeste o símbolo positivo (Oeste: $\varphi = 90^\circ$) [14]. Na figura 2.6 observa-se os diversos ângulos solares, um deles, o azimute que é o ângulo que a projecção do Sol faz com a direcção Norte. A altura solar é o ângulo que o Sol faz com o plano horizontal. Ambos os ângulos variam de acordo com a latitude do local, hora do dia e dia do ano [15].

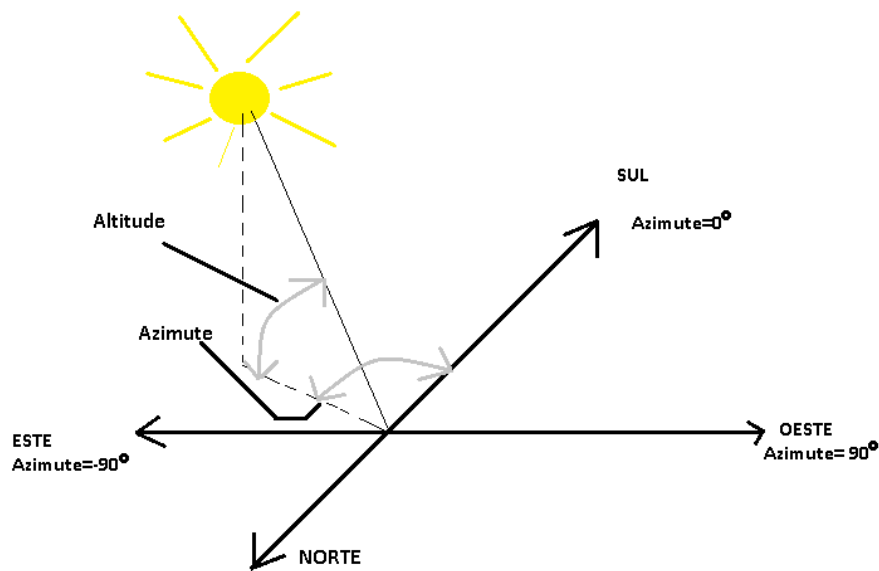


Figura 2. 6 Azimute e altura solar (Adaptação [16]).

A distância do Sol à Terra varia em relação à translação da Terra, devido ao movimento elíptico que a Terra faz em torno do Sol. Ao mudar-se de estação do ano a distancia Sol-Terra também altera. As estações do ano são causadas pela inclinação do eixo de rotação da Terra em relação à perpendicular ao plano definido pela órbita da Terra, tal como se pode observar na figura 2.7. Este fenómeno tem como consequência uma variação na altura do Sol, sendo este um facto relevante para o projecto e optimização dos sistemas solares térmicos.

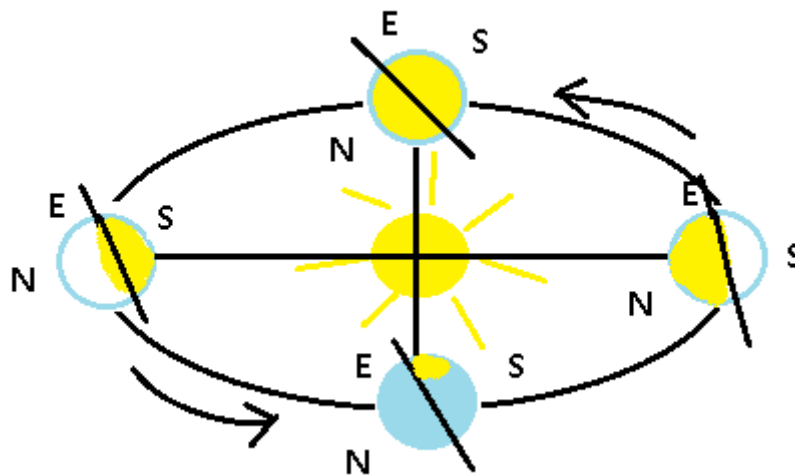


Figura 2. 7 Órbita da Terra (N:Norte, E:Este, S:Sul) (Adaptação [17]).

Neste tipo de sistemas, sistemas solares térmicos é importante frisar a importância das estações o ano. Isto é, este sistema é avaliado para uma estação do ano específica, pois tem como propósito poder-se garantir uma produção de AQS mínima para o mês mais desfavorável ou máxima para o mês mais favorável.

A orientação solar é um ponto determinante para se otimizar os ganhos solares ao longo de todo o ano obtendo desta forma uma maior energia térmica. Portanto, a inclinação do painel deve tentar otimizar ao máximo a radiação solar tendo sempre em conta a variação do azimute solar e da altura ao longo do ano, tal como se pode constatar na figura 2.8.

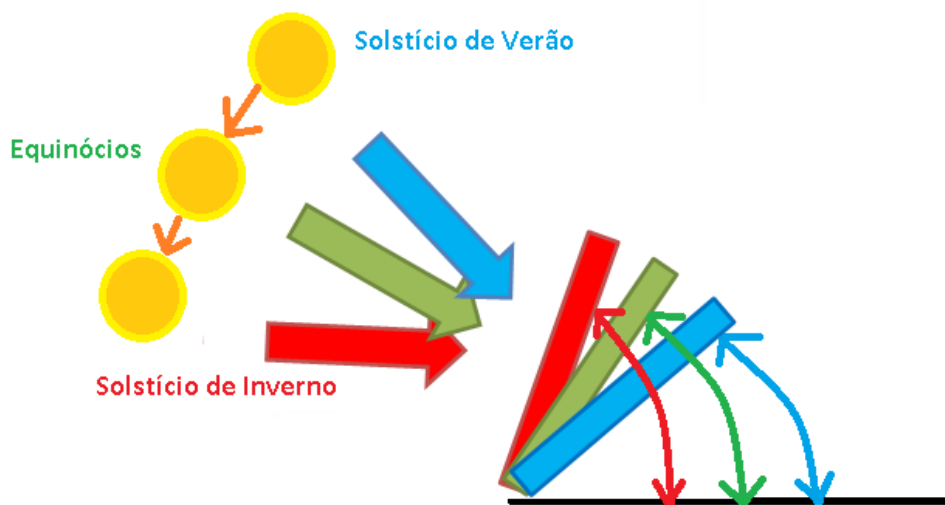


Figura 2. 8 Diferentes inclinações do painel em diferentes alturas do ano (Adaptação [18]).

No clima como é o de Portugal faz todo o sentido privilegiar-se sempre a orientação a Sul. É esta a orientação que maximiza a quantidade de radiação aproveitável. A orientação óptima, em Portugal para o tipo de painel em estudo é o Sul com uma inclinação de 38°. Um desvio pouco acentuado para Oeste ou Este pode prejudicar a captação na ordem dos 5%, desde que a inclinação se reduza para perto de 25°. O ângulo com a horizontal será o da Latitude $\pm 5^\circ$. O ângulo com a horizontal inferior a 35° beneficiam o Verão, enquanto para o Inverno será o ângulo com a horizontal superior a 35°. Pois este tipo de inclinação transmite o “pior” caso que é o Inverno, de maneira a que tenha um melhor aproveitamento solar. Uma vez que para inclinações inferiores é interessante apenas para casas como de praia ou de férias que têm pouco uso. No caso de instalações para uso ocasional, a inclinação deverá ser de 30° uma vez que para instalações de uso habitual deverá ter inclinação de 45° [19].

2.5. A Geometria Sol-Terra

Declinação

A declinação (δ) é a posição angular do Sol, ao meio dia, em relação ao plano do ano por causa do ângulo de 23,45° existente entre o eixo de rotação da Terra e o seu plano de translação. Dessa forma, a declinação máxima é igual a esse ângulo sendo considerada positiva quando o Sol está ao norte do equador e negativa quando o Sol está ao sul do equador.

Nos dias de equinócio, o Sol está bem acima do equador e a declinação é $\delta=0$. Os equinócios acontecem duas vezes ao ano, nos dias 20 ou 21 de Março e 22 ou 23 de Setembro. Tais datas marcam o início do Outono e da Primavera. Nos dias de solstício, que ocorrem duas vezes por ano, o Sol encontra-se com a máxima declinação, estando bem acima do trópico de capricórnio ou de caranguejo. Tais datas marcam o início do Verão e do Inverno e ocorrem em dois dias por ano, entre 21 Junho, o dia mais longo do ano e entre os dias 21 Dezembro, dia mais curto do ano. Portanto, a declinação varia ao longo do ano entre os valores:

$$-23,45^\circ < \delta < 23,45^\circ$$

A declinação sofre uma pequena alteração ao longo de cada dia. Nos dias próximos ao solstício, essas variações são pequenas, mas perto dos equinócios, elas são maiores. Essa variação deve-se ao movimento de translação da Terra em volta do Sol,

aliado à inclinação de 23,45° apresentada pelo plano do equador terrestre, relativamente ao plano da órbita da Terra, denominado Plano da eclíptica [20]. Na figura 2.9 pode-se observar a órbita terrestre em torno do Sol e a variação da declinação ao longo do ano.

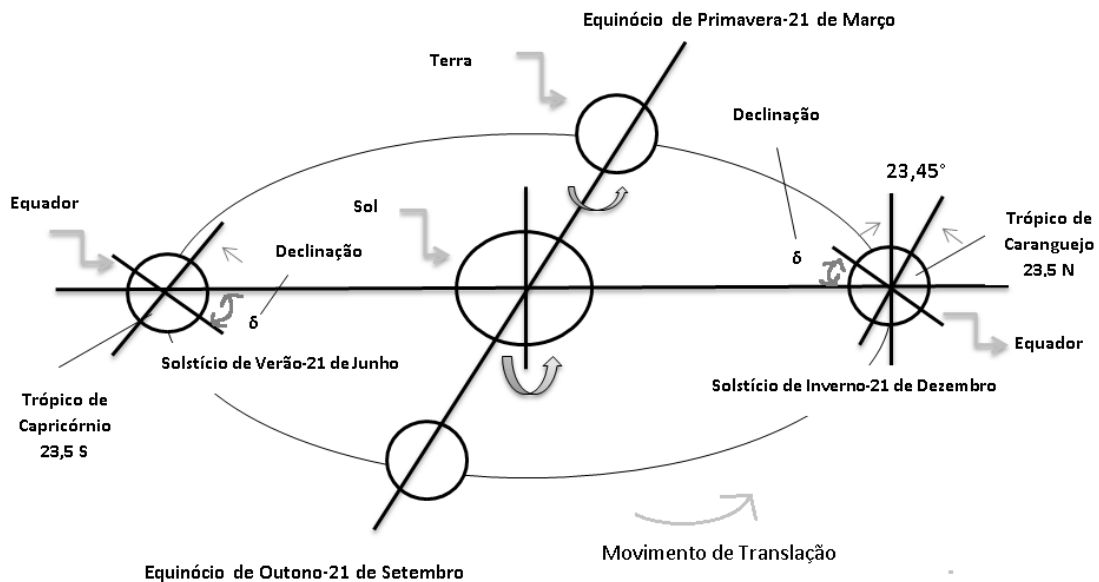


Figura 2. 9 A órbita terrestre em torno do Sol e a variação da declinação ao longo do ano (Adaptação [21]).

A declinação solar, para um determinado dia do ano, pode ser calculada através da equação 4:

$$\delta = 23,45 \times \text{sen} \left(\frac{360 \times (284 + n)}{365} \times \frac{\pi}{180} \right) \quad (4)$$

Em que:

δ – declinação, graus;

n - número do dia, 1 de Janeiro= dia 1; 4 de Março= dia 63 ou 64 (dependendo de Fevereiro).

Tempo solar aparente

O tempo solar aparente, ou seja a hora solar é baseada no movimento angular do Sol através do céu. O meio-dia corresponde à hora em que o Sol cruza o meridiano do observador. A hora solar aparente quase nunca coincide com a hora marcada no relógio. Duas correcções são necessárias para se calcular a hora solar a partir do horário local. A primeira correcção deve-se ao facto da diferença entre o meridiano do observador e o

meridiano do fuso horário que indica a hora do local em que ele se encontra. A segunda deve-se a perturbações na rotação da terra. Na equação 5 pode-se ver a forma como é calculada a hora solar aparente, em que é designada pelo somatório da hora local com a equação do tempo e a diferença da longitude do fuso horário com a longitude ao meridiano de Greenwich [21,22]. A hora solar aparente está compreendida entre as 0 e as 24h.

$$AST = LST + \frac{ET}{60} + \left(\frac{LSM - LONG(^{\circ})}{15} \right) \quad (5)$$

Em que:

LST- hora local, horas;

LSM- longitude do fuso horário que indica a hora e local, 0° no meridiano de Greenwich, radianos;

LONG- longitude, distância ao meridiano de Greenwich medida ao longo do equador (graus entre 0° e 180° para Este ou para Oeste), radianos.

A equação do tempo (ET) corresponde a um factor de correcção pela irregularidade da velocidade do movimento da Terra em torno do Sol, ver equação 6:

$$ET = 9,87 \times \text{sen}(2 \times B) - 7,53 \cos B - 1,5 \text{sen} B \quad (4)$$

Onde B é calculado através da equação 7 se o seno e o co-seno da equação 6 estiverem na unidade - graus:

$$B = \frac{360 \times (n - 81)}{364}$$

(Erro! Marcador não definido.)

Sendo:

n o número do dia, 1 de Janeiro= dia 1; 4 de Março= dia 63 ou 64 (dependendo dos dias que tem Fevereiro).

2.5.1 Ângulos solares

A posição do sol no céu está expressa em termos da altitude solar, β , acima da horizontal, onde se pode observar na figura 2.10 e o azimute solar, ϕ a partir do sul.

Estes ângulos por sua vez, dependem da latitude local, da declinação (δ) e do tempo solar aparente (AST), como se pode observar na equação 5.

Ângulo horário

O ângulo horário, H, de um ponto na superfície da terra é definido como o ângulo através do qual a terra falta girar para que o sol ilumine o meridiano local. A Figura 2.10 mostra o ângulo horário do ponto P como o ângulo medido no plano equatorial da Terra entre a projecção dos pontos OP e a projecção do centro da Terra ao Sol.

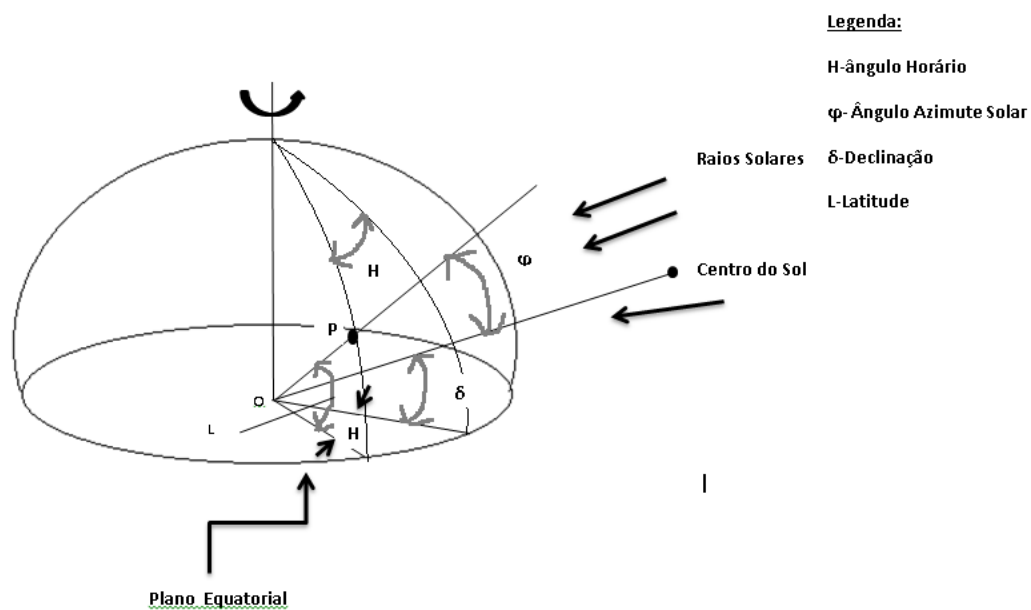


Figura 2. 10 Definição da latitude, ângulo horário e a declinação solar (Adaptação [21]).

O ângulo horário (H) pode ser obtido a partir da hora solar aparente (AST), tal como se pode observar na equação 8:

$$H = 15 \times (AST - 12) \quad (8)$$

Em que:

H - Ângulo horário, graus;

AST - Hora solar aparente, horas;

12 - Representa o meio-dia solar.

Ângulo de altitude solar

O ângulo de altitude solar é o ângulo entre os raios solares e um plano horizontal, tal como mostrado na figura 2.11 que está relacionada com o ângulo azimute solar, φ , que é o ângulo entre os raios solares e a vertical.

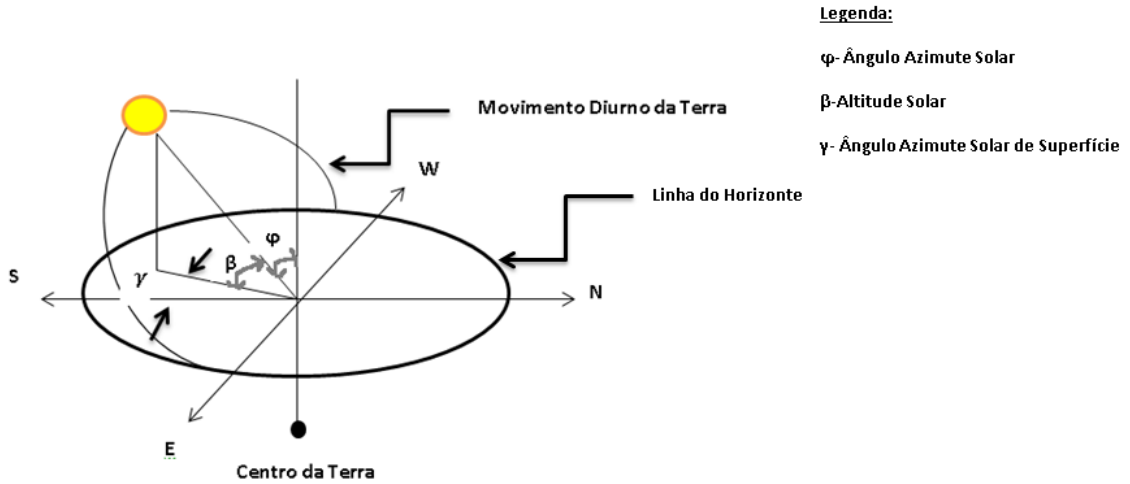


Figura 2. 11 Movimento diurno aparente do sol desde que nasce até que se põe (Adaptação [21]).

A equação matemática que traduz o seno do ângulo da altitude solar é:

$$\text{sen } \beta = \text{cos}(\text{Lat}) \times \text{cos}(\delta) \times \text{cos}(H) + \text{sen}(\text{Lat}) \times \text{sen}(\delta) \quad (9)$$

Em que:

β - Altitude solar, radianos;

Lat - Latitude (coordenada geográfica na superfície terrestre, que é o ângulo entre o plano do equador e a normal à superfície de referência), radianos;

δ – Declinação (Distância angular do Equador ao paralelo do astro), radianos;

H - Ângulo horário, radianos.

O cálculo do angulo da altitude solar, em radianos, é dado da seguinte forma:

$$\beta = \text{arcsen}(\text{sen}(\beta)) \quad (10)$$

Em que:

β – Altitude solar, radianos.

Ângulo azimute solar

O ângulo azimute solar, φ , mede o desvio angular entre a projecção da normal ao plano na superfície horizontal e o meridiano local. Esse ângulo pode variar entre $-180^\circ \leq \varphi < 180^\circ$. No hemisfério sul, $\varphi = -180^\circ$ quando a projecção da normal ao plano coincide com o norte enquanto no hemisfério norte, $\varphi = 180^\circ$ quando a projecção da normal ao plano coincide com o sul. Adiante, na figura 2.12 pode-se observar o ângulo azimute solar e os restantes ângulos abordados até ao momento de uma superfície colectora. Através da equação 11 calcula-se o co-seno do azimute solar [23].

$$\cos\varphi = \frac{(\text{sen}\beta \times \text{sen}(\text{Lat}) - \text{sen}(\delta))}{\cos(\beta) \times \cos(\text{Lat})} \quad (11)$$

Sendo que:

φ -Azimute Solar, radianos;

β – Altitude solar, radianos;

Lat- latitude, radianos;

δ – Declinação, radianos;

O ângulo de azimute solar é dada por:

$$\text{Se: LST} < 12 \rightarrow -\text{acos}(\cos(\varphi)) \times \frac{180}{\pi} \quad (12)$$

$$\text{Se LST} > 12 \rightarrow \text{acos}(\cos(\varphi)) \times \frac{180}{\pi} \quad (13)$$

Ângulo Azimute solar de superfície

O ângulo de azimute solar superfície, γ , é definido como o ângulo entre projecção dos raios solares na horizontal e a projecção horizontal da normal da superfície, tal como se pode ver na figura 2.12 a linha designada por “v” [21]. Este ângulo é calculado através da diferença do azimute solar, φ , e pelo ângulo de azimute do colector, ψ , como se observa na equação 14.

$$\gamma = \varphi - \psi \quad (14)$$

O ângulo de Azimute do colector, ψ , como se pode observar na figura 2.12, indica em quantos graus a superfície do colector térmico se desvia da direcção sul

exacta [58]. Isto é, o ângulo formado pela projecção horizontal da sua orientação com a direcção Norte-Sul. Portanto, no sentido dos ponteiros do relógio, o valor de ψ é zero para colectores orientados a Sul, 90 °C quando a orientação é para leste e -90 °C para Oeste [21,23].

Ângulo de incidência

O ângulo de incidência, θ , para qualquer superfície é definido como o ângulo entre os raios solares de entrada e uma linha normal à superfície, a linha normal é um segmento que forma com a superfície, com um ângulo de 90°.

$$\cos\theta = \cos\beta \times \cos(\gamma) \times \text{sen}(Hz) + \text{sen}\beta \times \cos(Hz) \quad (15)$$

Sendo que:

θ - Ângulo de incidência, radianos;

Horizontal – 0, radianos;

β – Altitude solar, radianos;

γ – Ângulo azimute solar de superfície, radianos.

Ângulo do colector de superfície inclinada

O ângulo do colector de superfície inclinada, θ_1 , é o ângulo de inclinação do colector em relação à normal da superfície inclinada (PO), tal como se pode observar na figura 2.12.

$$\cos\theta_1 = \cos\beta \times \cos(\gamma) \times \text{sen}(S_1) + \text{sen}\beta \times \cos(S_1) \quad (16)$$

Sendo que:

θ_1 – Ângulo do colector de superfície inclinada, radianos;

β – Altitude solar, radianos;

γ – Ângulo azimute solar de superfície, radianos;

S_1 – Ângulo da superfície inclinada, radianos.

Na figura 2.12 pode-se observar todos os parâmetros e ângulos abordados anteriormente.

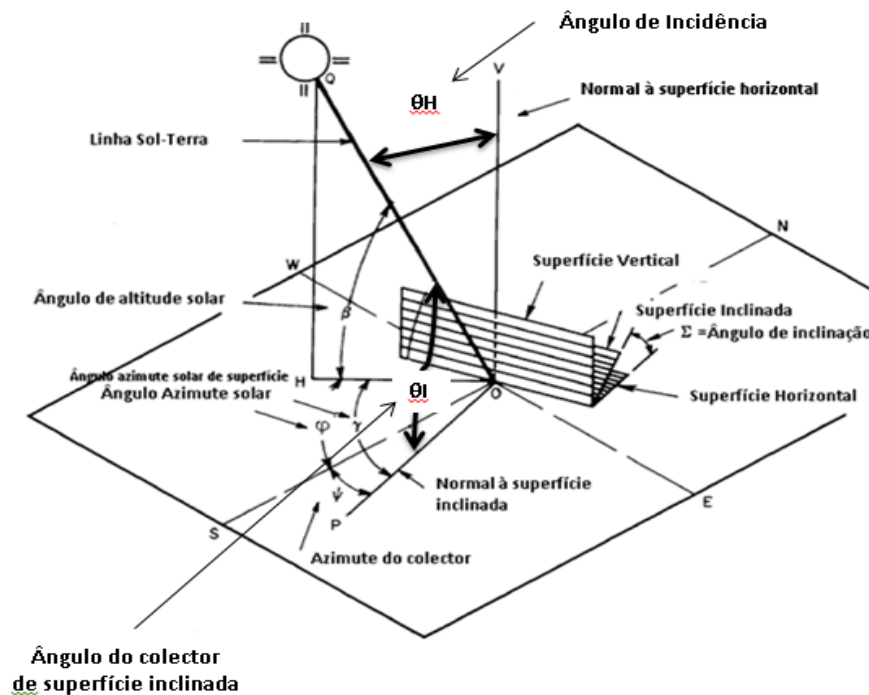


Figura 2. 12 Ângulos solares para superfícies verticais e horizontal (Adaptação [23]).

2.6. Radiação Solar Incidente numa Superfície

Este subcapítulo descreve sucintamente o modelo implementado para a simulação do desempenho energético de um sistema solar térmico. Nele é evidenciado um dos modelos existentes na literatura para o cálculo da radiação solar horária incidente na superfície do colector solar térmico. Após alguma pesquisa e com o apoio incondicional dos orientadores foi possível encontrar um método de cálculo aplicado ao painel em estudo.

Estimar a radiação solar incidente sobre uma superfície inclinada é um ponto fulcral para analisar o desempenho de sistemas de aproveitamento de energia solar, como é o caso do estudo em causa. Diversas estações meteorológicas fornecem dados de radiação solar, obtidos a partir da monitorização em vários pontos da superfície terrestre. No presente trabalho os dados foram fornecidos pela Estação Meteorológica Automática do Instituto Superior Técnico. Estes dados são de extrema importância pois sem eles não era possível calcular a radiação incidente na superfície inclinada, tal como se vai poder constatar no capítulo 3.

Contudo, há outras maneiras de se alcançar dados de radiação solar incidente na superfície inclinada sem ser através do método da Ashrae e que se encontram acessíveis na literatura. Tais como, o modelo de Duffie e Beckman (1991), eles expressaram que uma das maiores complexidades na aquisição de modelos mais precisos consiste na dificuldade de calcular as parcelas de radiação difusa [24]. Segundo Liu&Jordan, a partir do conhecimento da radiação solar difusa em superfície horizontal, em conjunto com as componentes de radiação directa e global é possível calcular a quantidade de radiação solar incidente numa superfície inclinada [25]. Contudo o modelo matemático utilizado para a implementação deste modelo tem por base o cálculo efectuado pela Ashrae (2001), uma explicação para a utilização deste modelo foi pela simplicidade de ser implementado e interpretado quando comparado com outros modelos. De seguida explicitarei todos os passos determinantes para a obtenção desses mesmos valores.

Radiação directa normal

A radiação directa é a componente da radiação solar que chega a uma superfície vinda directamente do Sol, sem passar por outros obstáculos além da própria atmosfera. Na superfície da terra num dia com céu claro, a radiação directa normal é representada pela equação 17:

$$E_{DN} = \frac{A}{e^{B \sin \beta}} \quad (17)$$

Sendo que os coeficientes A e B são empiricamente determinados a partir de medições feitas de radiação directa normal em dias claros típicos. Os coeficientes podem ser interpretados como:

E_{DN} – Radiação directa normal, W/m^2 ;

A - Radiação Solar aparente apenas fora da atmosfera, W/m^2 ;

B - Coeficiente de extinção atmosférico.

Os valores numéricos A e B variam ao longo do ano por causa de mudanças sazonais na poeira, do conteúdo de vapor de água da atmosfera e também devido à mudança da distância entre a terra e o sol. A lista de valores para os coeficientes A e B

são recomendadas para o vigésimo primeiro dia de cada mês. Estes valores são apresentados na Tabela 1. Também é incluído na tabela os valores do ângulo de declinação, e a equação do tempo que foi determinada a partir da equação 6 e os valores recomendados do coeficiente adimensional C.

Tabela 1- Coeficientes para o cálculo da radiação solar sem nebulosidade para o vigésimo primeiro dia de cada mês (Adaptação [23]).

Mês	$E_o, W/m^2$	ET, min	$\delta(^{\circ})$	A (W/m^2)	B	C
Janeiro	1416	-11,2	-20,14	1230	0,142	0,058
Fevereiro	1401	-13,9	-11,3	1215	0,144	0,06
Março	1381	-7,5	3,62	1186	0,156	0,071
Abril	1356	1,1	11,58	1136	0,18	0,097
Mai	1336	3,3	20,14	1104	0,196	0,121
Junho	1336	-1,4	23,09	1088	0,205	0,134
Julho	1336	-6,2	20,44	1085	0,207	0,136
Agosto	1338	-2,4	12,10	1107	0,201	0,122
Setembro	1359	7,5	-0,20	1151	0,177	0,092
Outubro	1380	15,4	-14,11	1192	0,16	0,073
Novembro	1405	13,8	-20,24	1221	0,149	0,063
Dezembro	1417	1,6	-23,45	1233	0,142	0,057

A tabela 1 apresenta os coeficientes para o cálculo da radiação solar sem nebulosidade para o vigésimo primeiro dia de cada mês. Os valores de declinação, $\delta(^{\circ})$, foram calculados a partir da equação 4 abordada anteriormente. É importante salientar que os valores usados de ET foram os teóricos, baseados na literatura, tal como descritos na tabela 1, a equação 6 e 7 serve apenas para explicar como se chega a esses valores.

Radiação directa na superfície

A radiação directa na superfície é calculada através da equação 18 [23].

$$E_D = C \times E_{DN} \times \frac{(1+\cos(\gamma))}{2} \quad (18)$$

Sendo que:

E_D – Radiação directa na superfície, W/m^2 ;

C – Factor de céu difuso, adimensional;

γ – Ângulo de azimute solar de superfície, radianos.

Radiação solar reflectida

A radiação solar reflectida é a que atinge uma superfície após a radiação ser reflectida em superfícies circundantes. Em geral, a radiação solar reflectida sobre uma superfície depende nomeadamente da localização, orientação e características de reflexão solar das superfícies circundantes. Uma situação de ocorrência comum é a radiação solar ser reflectida a partir do solo. A radiação solar reflectida, E_{Ground} é dada pela equação 19 [23].

$$E_{Ground} = E_{DN} \times (C + \text{sen}\beta) \times \rho_{ground} \times \frac{(1+\cos(\gamma))}{2} \quad (19)$$

Em que:

E_D – Radiação directa na superfície, W/m^2 ;

β – Ângulo de altitude solar, grau;

ρ_{ground} – Albedo, em que varia conforme o tipo de solo, adimensional;

γ – Ângulo azimute solar de superfície, grau.

Radiação total na Horizontal

Na equação 20 observa-se a radiação total na horizontal, sendo a soma da radiação directa na superfície, E_D , a radiação solar reflectida, E_{Ground} e o produto da radiação directa normal, E_{DN} , com o co-seno do ângulo de incidência, $\cos\theta$ [23].

$$E_{total-hor} = E_{DN} \times \cos\theta + E_d + E_{ground} \quad (20)$$

Em que:

$E_{\text{total-hor}}$ – Radiação total na horizontal, W/m^2 ;

E_{DN} – Radiação directa normal, W/m^2 ;

$\cos\theta$ – Co-seno do ângulo de incidência, radianos;

E_d – Radiação directa na superfície, W/m^2 ;

E_{ground} – Radiação solar reflectida, W/m^2 .

A radiação solar total na horizontal em outros modelos aparece com outra nomenclatura, como por exemplo o modelo Liu&Jordan, em que se pode encontrar a mesma equação mas escrita de maneira diferente. Um exemplo é definir a radiação com a letra H como é o caso: H_{θ}^d [26] para a horizontal. Um outro exemplo, bastante comum na literatura, é definir a radiação com a letra I sendo que desta forma fica: I_{HT} [27] para a inclinada.

Radiação total na superfície inclinada

Na equação 21 o raciocínio é idêntico ao da equação 20, à excepção do ângulo usado, que diz respeito ao ângulo efectuado pela superfície inclinada [23].

$$E_{\text{total-supinclinada}} = E_{\text{DN}} \times \cos\theta_I + E_d + E_{\text{ground}} \quad (21)$$

Em que:

$E_{\text{total-supinclinada}}$ – Radiação total na superfície inclinada, W/m^2 ;

E_{DN} – Radiação directa normal, W/m^2 ;

$\cos\theta_I$ – Co-seno do ângulo de incidência, radianos;

E_d – Radiação directa na superfície, W/m^2 ;

E_{ground} – Radiação solar reflectida, W/m^2 .

Capítulo 3 - Colectores Solares Térmicos

3.1. Sistema Solar Térmico e características gerais

A utilização dos colectores solares tem vindo aumentar nestes últimos anos em consequência da preocupação do meio ambiente, devido efeitos destrutivos do uso das formas convencionais de energia, tais como a energia nuclear, gás natural e derivados de petróleo. Actualmente entende-se que o uso destas energias são na grande maioria os causadores da contaminação do ar e água, modificando o clima do nosso planeta. Uma maneira de ultrapassar ou tentar solucionar o problema é recorrendo ao uso de energias limpas e ilimitadas, como é o caso do Sol. O colector solar é o principal componente de um sistema de aquecimento de água por energia solar, sendo o responsável pela captação da energia radiada do Sol e pela sua conversão em calor utilizável. Existe ainda elementos de apoio, tais como, a unidade de depósito, unidade de controlo e a unidade de apoio, que de certa forma actuam quando o sistema não tem capacidade suficiente de produção. Estes elementos devem possuir características de resistência a altas temperaturas. Os elementos constituintes de um sistema solar térmico são [28]:

- Colector solar - Um ou mais colectores, que transformam a radiação solar incidente em energia térmica;
- Sistema de circulação - Conjunto de equipamentos e acessórios que fazem com que o fluído de trabalho circule do colector solar para o depósito acumulador (no circuito primário), e a água a aquecer, circule desde a entrada ainda fria no depósito, até à sua saída e consequente consumo;
- Unidade de depósito (acumulador) - Reservatório que acumula a água quente até que esta seja necessária para consumo;
- Unidade de controlo - Elementos de regulação que asseguram o correcto funcionamento do sistema;
- Unidade de apoio - Sistemas complementares de aquecimento que apenas são accionados quando as radiações recebidas no painel não são suficientes para o nível de aquecimento desejado. Como por exemplo caldeiras e esquentadores.

Na figura 3.1 pode-se observar os diversos constituintes, descritos anteriormente, de um sistema solar térmico.

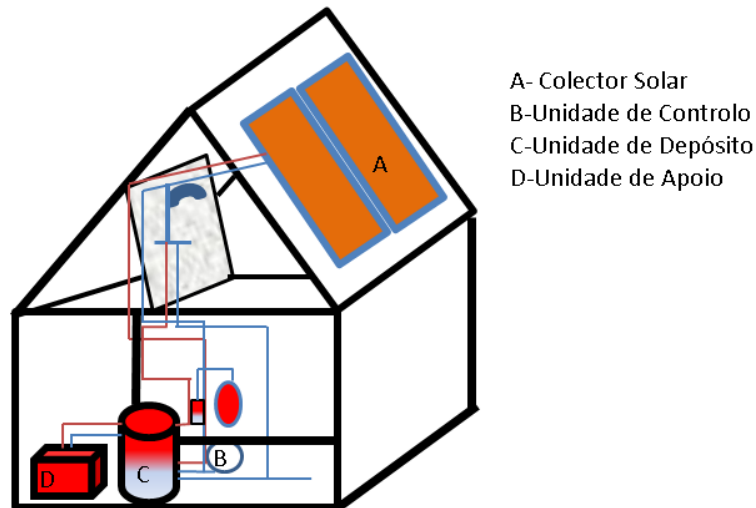


Figura 3. 1 Componentes de um sistema solar térmico (Adaptação [29]).

Habitualmente os colectores (painéis) solares são confundidos com outra tecnologia de aproveitamento de energia solar, painéis fotovoltaicos. Os colectores destinam-se ao aquecimento de água quente sanitária enquanto os painéis fotovoltaicos têm como objectivo a produção de energia eléctrica. O colector solar é basicamente um dispositivo que promove o aquecimento de um fluido de trabalho, como água, ar ou fluido térmico, através da conversão da radiação electromagnética proveniente do Sol em energia térmica. O funcionamento do colector tal como o nome indica fundamenta-se no efeito de estufa, em que o sol ao incidir sobre o colector e a reflexão dos raios solares no seu interior fará com que exista um armazenamento de calor, que por sua vez será transferido por um fluido térmico, como a água ou um anticongelante.

De modo ao colector captar o máximo de energia radiante incidente, este deve dispor de uma superfície com um grande grau de absorção. Relativamente à forma de diminuir as perdas por convecção o colector deve ser bem isolado termicamente, com materiais como a lã mineral ou poliuretano, e ter uma baixa emissividade [30]. Na figura 3.2 pode-se observar os componentes de um colector térmico.



Figura 3. 2- Componentes de um coletor [30].

De forma a obter-se a melhor eficiência do coletor (η), que se obtém através da razão entre a radiação incidente no coletor e a energia convertida em calor (os respectivos constituintes têm de reunir as melhores características). As características dos constituintes são influenciadas a partir de diferenças da temperatura entre o absorvora e o meio ambiente e a radiação solar global. O rendimento dos painéis é por volta de 30% em relação à radiação total. Um dos factores principais que influencia a energia que o coletor capta com o nosso sistema solar é o grau de nebulosidade. Quanto maior for o grau de nebulosidade, menor será o rendimento do sistema, tipicamente o rendimento máximo (céu limpo) do coletor solar é cerca de 70% [31]. O rendimento de um coletor solar depende de vários factores tais como [32]:

- Tipo de coletor;
- Diferença de temperatura entre a vizinhança e o coletor;
- Possibilidade de armazenar a energia;
- Intensidade da radiação solar;
- Eficiência óptica do coletor (transparência e absorção devem ser elevadas);
- Comportamento do consumidor face à utilização de água quente;
- Condutividade térmica do absorvora;
- Isolamento do coletor, minimizando as perdas para o exterior;
- Emissividade do absorvora (a mínima possível).

O coletor solar exhibe uma cobertura transparente em acrílico ou em vidro com características de baixa reflexão e forte transmissão. A radiação solar incide nesta cobertura que por sua vez atravessa para um receptáculo de ar criando um efeito de estufa consecutivamente na parte superior da placa absorvora. A placa absorvora é

normalmente constituída por alumínio, cobre ou então outros elementos metálicos e revestida de tinta preta sem brilho ou revestimento selectivo, e deverá captar o mais possível e reflectir o mínimo. Tem inserido um sistema de tubos que transfere o calor gerado para o fluido de transferência térmica que por sua vez flui para o tanque de armazenamento de água quente. Sendo este calor transferido para a água potável através de um permutador de calor. Além disso o isolamento térmico terá de possuir capacidade de resistência a temperaturas elevadas na ordem dos 150 °C, pois quando o sistema não se encontra a ser utilizado pode atingir temperaturas nessa ordem de grandeza [33].

No centro do colector existe um absorsor, que converte a radiação solar em calor o mais eficaz possível e transfere-a para o fluido circulante (mistura de água e anticoagulante) com uma perda mínima de calor [34]. O absorsor deve estar adaptado para conter a maior absorvidade possível da radiação solar e a menor emissividade térmica possível. Os absorsores com revestimento selectivo ou revestimento de tinta preta sem brilho são quase sempre utilizados em chapas planas e em colectores de tubo de vácuo para AQS. Há diversas diferenças entre estes dois tipos de revestimento. O revestimento de tinta preta sem brilho permite à superfície absorver a radiação incidente mas não evita as perdas, já o revestimento selectivo apresenta diversas camadas que melhoram a conversão da radiação solar, reduz a capacidade de emitir e por sua vez diminui as perdas por condução e por convecção. Os tratamentos mais usados em revestimentos selectivos são os tratamentos electroquímicos (crómio-preto ou níquel-preto) [30].

Em relação à caixa (termicamente isolada), que se pode observar na figura 3.2, é colocada no exterior do colector, e é onde se encontram todos os elementos instalados de forma a proteger os elementos dos agentes externos, como neve, chuva entre outros. É devidamente isolada de modo a reduzir as perdas de calor para o exterior e aumentando o efeito de estufa dentro da caixa, daí a extrema importância que a espessura seja a adequada e que se encontre bem colocada nomeadamente nas juntas entre materiais [30, 35].

De forma a poder-se analisar o desempenho num colector solar, tem de se ter em conta vários parâmetros, tais como [36]:

- **Eficiência óptica (η_0 , factor de conversão)** - é a percentagem de radiação que o colector dispõe que pode ser convertida em calor;

- **Factor de perda de calor (η_K)** - Perda de calor em percentagem com influência na forma e isolamento do colector;
- **Eficiência do colector por meio do seu rendimento (η)** - razão entre a radiação incidente no colector e a energia convertida em calor;
- **Temperatura de estagnação** - é a temperatura máxima que o colector pode atingir, para uma temperatura ambiente e radiação determinadas;
- **Fracção solar** - Percentagem de energia utilizada no aquecimento de água que pode ser coberta pelo sistema solar.
- **Eficiência de um colector (η)** - é definida como a taxa de energia térmica utilizada para o total da radiação de energia solar.

3.2. Tipo de Colector

Pode-se classificar os colectores solares de acordo com cinco características tais como: o movimento do sistema, o tipo de colector, o tipo de absorção, a característica de concentração ou não-concentração do sistema e o alcance da temperatura entregue.

Um sistema solar térmico não usa qualquer mecanismo para seguir o sol, como o caso de sistemas fotovoltaicos. Normalmente, tal colector é orientado em direcção ao equador com um ângulo de inclinação em relação à horizontal aproximadamente igual à latitude do local para o funcionamento ideal durante todo o ano [37]. A figura 3.3 exemplifica essa situação.

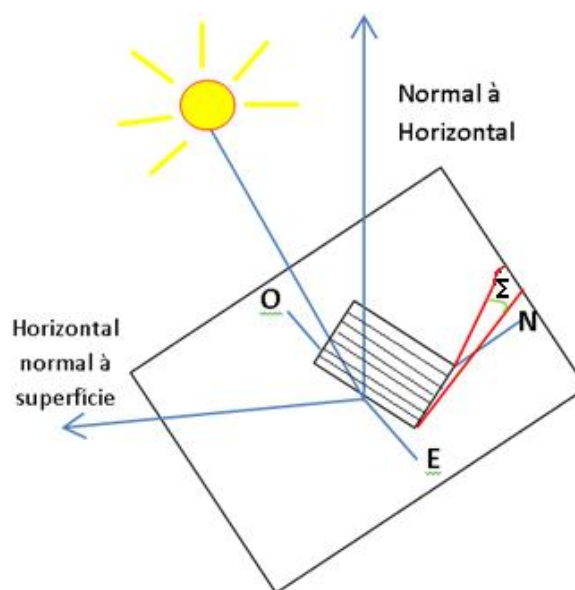


Figura 3. 3 Representação da orientação de um colector (Adaptação [18]).

Como se pode observar a figura 3.3 o Σ é o ângulo de inclinação que faz com a horizontal, com intervalo $0^\circ < \Sigma < 90^\circ$ os painéis estão orientados para o equador, se o intervalo for $90^\circ < \Sigma < 180^\circ$ os painéis estão orientados para fora do equador.

Neste ponto aborda-se de uma maneira resumida os diversos tipos de painéis existentes. Dividiu-se em 4 tipos, sendo eles [38]:

- Colectores simples;
- Colectores Planos;
- Colector de Tubo de vácuo;
- Colector CPC.

3.2.1 Colector Simples

Este tipo de colector é composto unicamente pelo absorvedor. São aplicados em diversas aplicações, sendo a principal como uma placa absorvedora de plástico para o aquecimento da água das piscinas.

Este colector é pouco eficiente porque não possui cobertura, revestimento e isolamento térmico conduzindo a elevadíssimas perdas de calor. Uma grande vantagem neste tipo de colector é o facto de ser barato e estar disponível para várias formas de telhados, planos e inclinados. Na figura 3.4 pode-se observar um exemplo de um colector simples.

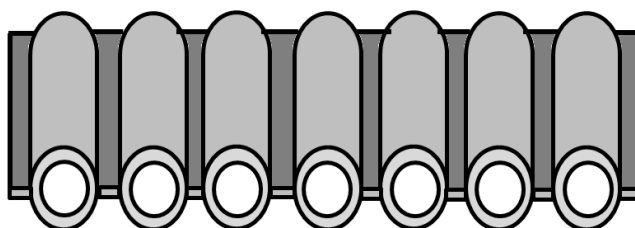


Figura 3. 4 Colector simples para o aquecimento de piscinas (Adaptação [36]).

3.2.2 Colector Solares Planos

Os colectores solares planos foram construídos numa ampla variedade de modelos e a partir de diferentes materiais. Eles têm sido usados para aquecer líquidos, tais como água, água com aditivo anticongelante ou ar. O principal objectivo é absorver o máximo de energia solar possível com o menos custo possível. Hoje em dia os colectores solares planos são os mais usualmente utilizados, uma vez que são mais baratos e convenientes

para o fornecimento de energia até temperaturas de 70 °C acima da temperatura ambiente [39].

O colector plano, ver figura 3.5, é geralmente constituído por diversos elementos, tais como, uma caixa, cobertura transparente, placa absorvora, isolamento e serpentina de tubos. A caixa é onde se encontram todos os componentes protegidos das acções do tempo e que permite a existência de um efeito de estufa. O interior da caixa é pintado ou revestido de preto. A radiação solar passa através de uma cobertura transparente de forma a provocar o efeito de estufa e reduzir as perdas de calor e atinge a superfície absorvora, a maioria dessa energia é absorvida na placa absorvora. A placa absorvora transforma a energia recebida, transmitindo-a para o fluido térmico que circula por uma série de tubos em paralelo ou serpentina. Ao fazer circular o fluido térmico através dos tubos dos colectores, retira-se calor destes podendo aproveitar este calor para aquecer um depósito de água [40].

Em relação ao rendimento deste tipo de colector, 35-40%, deve-se substancialmente às propriedades radioactivas da superfície absorvora e do tipo vidro de cobertura, ao nível de isolamento térmico e ao percurso do fluido do painel [40]. De forma a evitar-se perdas de condução, o lado de baixo da placa absorvente e o lado do revestimento são bem isolados. O isolamento mais usual é a lã de rocha, pois as propriedades não sofrem alterações quando sujeitas a temperaturas elevadas. As tubagens do fluido podem ser soldadas à placa absorvente, ou então podem ser uma parte integrante da chapa. Este tipo de colectores são geralmente fixados em uma posição permanente e não se movimenta acompanhando o sol. Estes devem ser orientados directamente para o equador, virada a Sul no Hemisfério Norte e virado a norte no Hemisfério Sul [40].

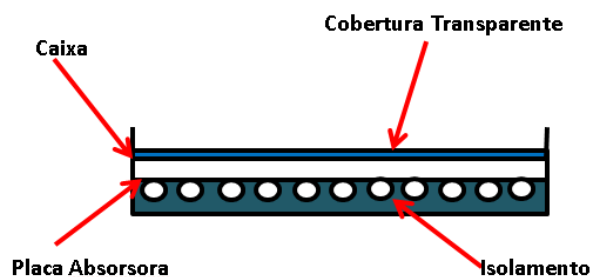


Figura 3. 5 Colector Plano (Adaptação [41]).

O colector deverá ter um longo período de vida apesar das situações habituais tais como: a corrosão, efeitos da radiação ultravioleta, granizo, deposição de poeira ou

humidade sobre o vidro entre outros. Estas causas ambientais podem ser minimizadas através da utilização de vidro temperado [36]. Pode-se dizer, que isto se aplica a todo o tipo de colectores, que a eficiência é influenciada a partir das características do colector, mais propriamente das perdas térmicas e das perdas por reflexão [14]. As perdas térmicas estão relacionadas à diferença de temperatura entre o ar exterior e o absorvedor, através da insolação e da construção do colector. O coeficiente global de perdas (U_L) em W/m^2K descreve a influência da construção do colector. Em relação às perdas ópticas, estas reductam a proporção de radiação solar que não pode ser absorvida pela placa absorvedora. Dependem da capacidade de absorção da superfície da placa absorvedora e são descritas a partir eficiência óptica (η_0) [14].

Neste tipo de colectores tem-se os colectores sem acumulação e com acumulação. Na Europa o colector mais usual é sem acumulação (ICS) enquanto nos Estados Unidos é a utilização do colector com acumulação. A distinção entre um e outro é que, o primeiro a acumulação de calor faz-se num reservatório situado no próprio painel, em que a água aquecida dirige-se para um depósito auxiliar à “medida” que a AQS é usada.

Os sistemas ICS são bastante simples, ver figura 3.6, onde o depósito de acumulação é simultaneamente o absorvedor, e trabalham no princípio do Termossifão, quer dizer que são sistemas directos. Relativamente ao depósito com acumulação, existe no interior e no exterior do edifício, portanto é separado do painel ou acoplado a ele no exterior.

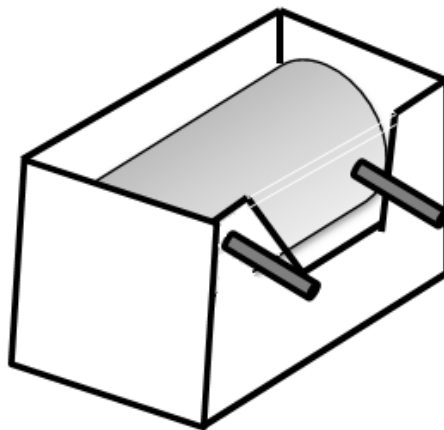


Figura 3. 6 Colector solar sem acumulação (ICS) (Adaptação [36]).

O colector solar plano possui um depósito de acumulação na horizontal, anexo ao colector e na parte superior deste. Algumas das vantagens apresentadas por este colector são [40]:

- Montagem simples;
- Barato (em relação ao colector de tubo de vácuo);
- Múltiplas opções de montagem (integrado no telhado, montado na fachada, sobre o telhado);
- Boa eficiência η do colector.

Como desvantagens apresentam [40]:

- Não serve para gerar altas temperaturas;
- Ocupa mais espaço nos telhados que os colectores de vácuo;
- Menor eficiência que os colectores de tubo vácuo, devido ao elevado valor de coeficiente global de perdas U_L .

3.2.3 Colector tubo de vácuo

Os colectores solares de tubos de vácuo operam de forma diferente do que os outros colectores disponíveis no mercado. Estes colectores solares consistem num tubo de calor dentro de um tubo selado a vácuo como se pode observar na figura 3.7.

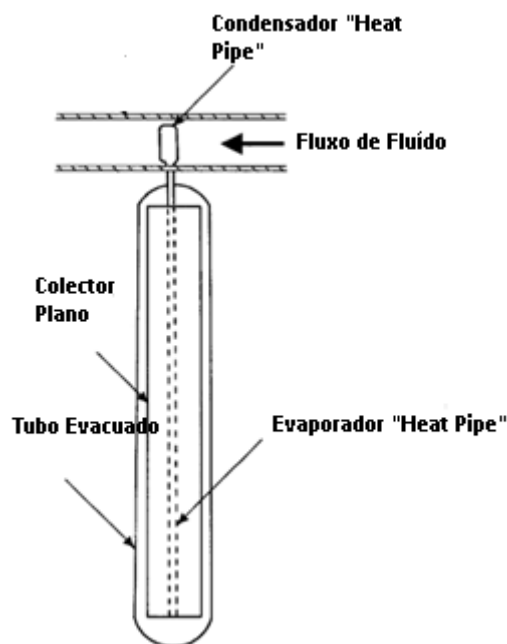


Figura 3. 7 Diagrama esquemático de um coletor de tubo de vácuo [42].

O fluido térmico circula no interior de tubos concêntricos sendo o interior de cor escura para absorver a radiação solar e o exterior de vidro de forma a ser transparente à radiação solar e “opaco” à radiação própria [36]. Este tipo de coletor consiste geralmente em tubos de vidro transparente cujo interior contem tubos metálicos (absorvedores). A atmosfera interior dos tubos é livre de ar o que elimina as perdas por convecção nos tubos de vácuo, elevando assim o rendimento a altas temperaturas devido a menores coeficientes de perda a eles associados. Estes colectores são especialmente usados em regiões de fraca exposição solar.

Tal como os colectores planos, estes recolhem radiação directa e difusa no entanto a sua eficiência será maior em menores valores de ângulos de incidência. Desta forma esse efeito tende a dar uma vantagem sobre os colectores planos no desempenho ao longo do dia [42]. Neste tipo de colectores um revestimento selectivo de metal com propriedades de condutor térmico, ligado a um tubo de calor, é colocado dentro do tubo de vácuo. O tubo de calor contém uma pequena quantidade de fluido, por exemplo metanol, que é submetido a um ciclo de evaporação – condensação. Neste ciclo o calor evapora o líquido e o vapor viaja para a região do dissipador de calor onde condensa libertando o calor latente. Dentro do tubo de vidro encontra-se um outro tubo em cobre, intitulado de “heat-pipe” sendo este um excepcional condutor térmico [43]. Dentro do tubo de cobre encontra-se um gás que facilmente evapora efectuando um ciclo de

evaporação/condensação. No momento em que a radiação solar incide sobre o colector, o fluido que se encontra no “heat-pipe” aquece e cresce. A parte superior do tubo de cobre permanece em contacto com a água, e transmite-lhe o calor, arrefecendo o fluido que retorna ao fundo [44]. Ao aquecer a água transmitindo-lhe calor, arrefece o vapor, fazendo com que este condense e retorne ao início do ciclo sob a forma líquida para ser aquecido novamente [45].

Este tipo de colector para além de garantir a absorção de energia solar directa, também absorve a energia radiante através da sua cobertura selectiva. Este tipo de colector exhibe bastantes vantagens tais como [40,43]:

- Boa eficiência com baixa radiação;
- Suporta cargas térmicas com mais eficiência que os colectores planos;
- Atinge elevadas temperaturas;
- Facilidade de transporte;
- Apresenta uma redução significativa de perdas de calor por condução no interior dos tubos;
- Um tubo danificado não obriga a parar o sistema;
- Evita a remoção de material do telhado mantendo a estrutura intacta;
- Suporta, com um mínimo efeito na eficiência, o vento e a chuva.

Como desvantagens do colector tubo de vácuo, tem-se [40,43]:

- Mais dispendioso que o colector solar plano;
- Não pode ser utilizado numa instalação no telhado.

3.2.4 Colector solar do tipo concentrador parabólico composto

Colector solar do tipo concentrador parabólico composto (CPC) deve o seu nome à concentração, por conseguinte a relação entre a área de captação (cobertura transparente) e a área de recepção. De modo a reduzir as respectivas perdas térmicas, este tipo de colector diminui a área de absorção em relação à área de captação, sendo esta área uma parabólica [32].

É adequado para temperaturas bem mais elevadas que os outros tipos de colectores, com temperaturas de cerca de 110 °C. Este tipo de colector é aconselhado para aquecimento de AQS. Uma das grandes distinções entre este tipo de colector e do

colector solar plano é a geometria da superfície de absorção e a óptica usada. Nos colectores planos o elemento absorvedor é uma placa plana onde se encontram soldados, prensados e embutidos os tubos. Nos colectores do tipo concentrador parabólico composto, a superfície absorvedora é composta por duas alhetas com configuração de um acento circunflexo unidas a um tubo e colocadas na parte superior de uma superfície reflectora [43]. Esta configuração permite uma óptica de baixa concentração o que faz com que sejam estacionários, tal como os colectores concentradores planos.

A radiação solar incide na parte superior das alhetas e os raios reflectidos incidem na parte inferior, fazendo com que exista uma dupla absorção da radiação aumentando desta forma a temperatura do fluido de aquecimento [46]. Desta forma a superfície reflectora concentra a radiação com o uso de material espelhado com o alto nível de reflectividade e devido à sua forma. Na figura 3.8 é possível observar a constituição de um colector CPC.

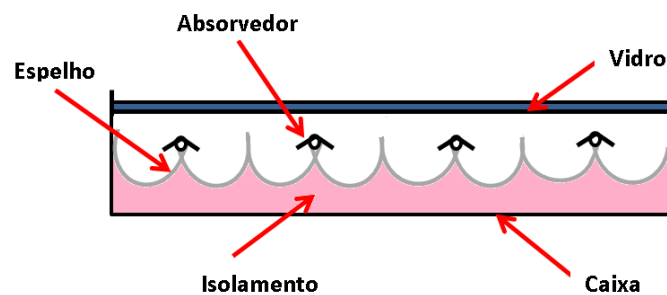


Figura 3. 8 Constituição de um colector CPC (Adaptação [47]).

Em relação ao colector CPC as suas vantagens são [40]:

- Elevada eficiência com baixa radiação;
- Origina altas temperaturas;
- Tolera aplicações de calor com mais eficiência do que para os colectores planos;
- Indicado para AQS.

No que diz respeito às desvantagens de um colector CPC, estas são [40]:

- Mais dispendioso que um colector plano;
- Apenas permite captação por radiação directa;
- Necessidade do colector se manter sempre perpendicular aos raios solares, sendo o mecanismo de controlo para seguir a trajectória do sol dispendioso.

3.3. Sistemas de Circulação

A maior parte dos sistemas operam com um fluido de transferência térmica que circula dentro do circuito primário do colector e transfere a energia térmica absorvida a outro sistema. O fluido térmico é constituído por água e anticongelante. O anticongelante protege os colectores do perigo de congelamento (geada) e em simultâneo contra a corrosão [48]. A água é dos fluidos térmicos mais usado para a circulação entre o colector e o permutador de calor. Para além de um circuito primário existe um circuito denominado de circuito secundário, que tem como objectivo transportar a água aquecida desde o depósito acumulador até aos pontos de distribuição. Neste ponto irá ser abordado três tipos de sistemas de circulação, a circulação forçada, a circulação em termossifão e o sistema de recolha automática. A selecção entre eles tem por base a quantidade de energia necessária e na suposição de se colocar a unidade de depósito numa cota superior aos colectores [49].

3.3.1 Sistema de circulação forçada

Um sistema de circulação forçada é um sistema onde o colector solar e o depósito se encontram fisicamente separados, o que permite uma série de vantagens em relação aos sistemas de Termossifão. Uma delas é que o sistema de circulação forçada tem um rendimento superior, dado que a gestão da energia é superior por ser regulada através de um controlador diferencial. Uma desvantagem é o custo elevado relativamente ao sistema de circulação termossifão.

O depósito é instalado no interior da habitação, ou em um local protegido, e os painéis são colocados no exterior orientados para Sul no Hemisfério Norte como é o caso de Portugal. O facto de o depósito não ser colocado no telhado trará vantagens estéticas e energéticas, reduzindo as perdas térmicas por contacto com o ar frio, como é no caso do inverno em que temos temperaturas mais baixas [50,51].

Este sistema é caracterizado pela existência de uma bomba circuladora para forçar a circulação do fluido de transferência térmica nos colectores. Esta bomba é comandada por uma unidade de controlo que reage à diferença de temperatura entre a água à saída dos colectores e a temperatura da água na parte inferior do depósito. De forma a prevenir a circulação inversa no caso da temperatura do fluido nos colectores ser

inferior à temperatura no depósito, devem ser instaladas válvulas de anti-retorno. Dependendo do clima, da composição química da água, do local onde é instalada e da pressão da rede, o sistema de circulação forçada deverá necessitar de mecanismos de segurança de forma a prevenir a congelação, a corrosão e facilitar o enchimento dos colectores à pressão pretendida [51]. Na figura 3.9 está demonstrada o sistema de Circulação forçada em uma habitação, tal como a circulação da água quente como da água fria.

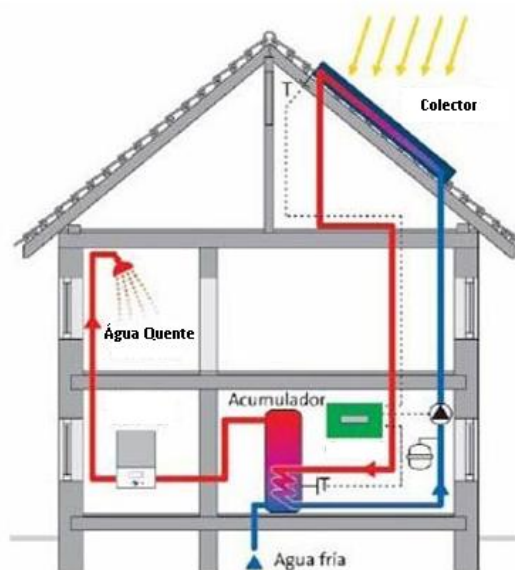


Figura 3. 9 Sistema de Circulação forçada [52].

3.3.2 Sistema de circulação em termossifão

O sistema termossifão é composto por um painel solar plano e por um depósito de água que se encontra na parte superior do painel. Não é necessário bombas circuladoras ou controladores electrónicos, pois o fluido de transferência térmico circula num circuito primário através da diferença de densidades criada pelo aquecimento nos painéis, conduzindo a energia calorífica captada para o depósito acumulador. A água no colector fica menos densa ao ser aquecida deslocando-se desta forma para a parte superior do circuito (dentro do depósito). Já a água fria (mais densa) desloca-se para a parte mais baixa do circuito (à entrada do colector). Uma vez que este se encontra no colector sofre novamente aquecimento, e deste modo volta a iniciar o seu ciclo.

A circulação do fluido térmico realiza-se desde que haja radiação solar e quanto maior for a intensidade de radiação maior será o caudal de circulação. Na figura 3.10 encontra-se o modo de funcionamento de um sistema solar térmico por termossifão.

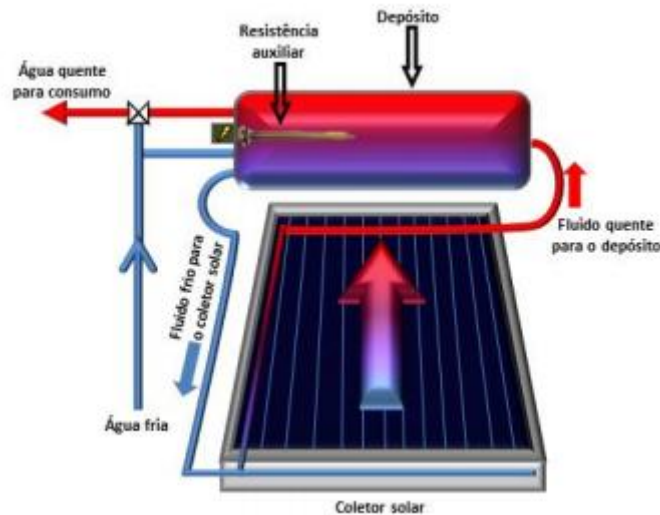


Figura 3. 10 Sistema Solar térmico por termosifão [53].

Caso não haja radiação solar, não haverá circulação e desta forma, o risco de inversão de circulação aumenta consideravelmente. De forma a evitar a inversão da circulação é necessário aplicar uma válvula de retenção entre o acumulador e o coletor.

O sistema de circulação em termosifão pode ser configurado para instalações de grandes dimensões se bem que seja necessário saber realizar bem a ligação entre os painéis. Para zonas com invernos mais rigorosos deve ser esperável um circuito primário independente [51]. Nas soluções tradicionais em termosifão, existe a necessidade de desnivelar as posições do campo dos colectores e do depósito, o que pode resultar em vários casos na inconveniência de instalar depósitos pesados em sítios que para isso não estão preparados. Há outras soluções com o depósito ao nível do campo dos colectores, utilizando válvulas electro comandadas que, à noite ou nos períodos diurnos sem sol, impeçam o retorno aos colectores de água quente do depósito, arrefecendo aquele. No entanto esta solução é mais complicada e falível que a do sistema com circulação forçada. Na figura 3.11 pode-se observar a instalação de um sistema de circulação em termosifão em uma habitação familiar.

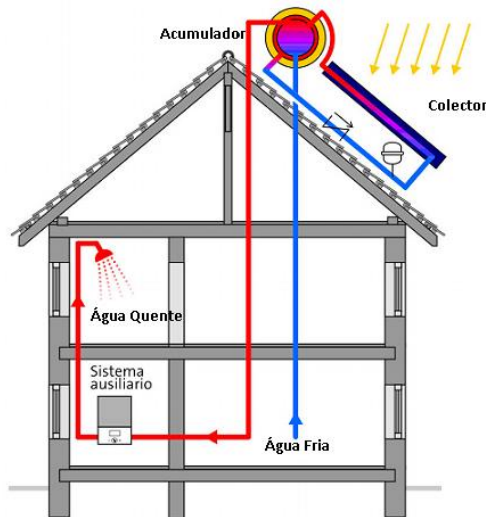


Figura 3. 11 Sistema de circulação em termosifão [54].

3.3.3 Sistema de solar com recolha automática

É um sistema em que os colectores ficam vazios quando o depósito já está quente ou não há energia solar. Também há quem chame este sistema de “sistema de painéis secos” (Drain-Back). Este é composto por colector, depósito de acumulação e um comando diferencial, que detém de uma tecnologia de recolha automática do líquido de trabalho, evitando grandes problemas dos sistemas convencionais gerados por baixas temperaturas ou altas no caso de paragem do equipamento. Este sistema funciona de duas formas diferentes, instalação solar parada e instalação solar em funcionamento. A instalação solar parada ocorre quando não há radiação solar ou quando esta é em demasia. Nesta situação a mistura aditivo-água continua no nível de drenagem enquanto o colector é esvaziado. Na figura 3.12 observa-se uma instalação solar com recolha automática parada.

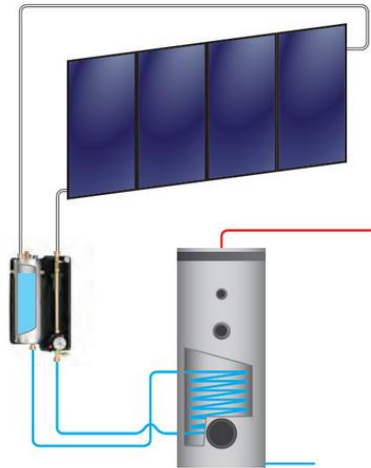


Figura 3. 12 Instalação solar com recolha automática parada [55].

A instalação solar em funcionamento ocorre quando existe níveis de radiação solar aceitável, sendo captada a energia solar e cedida ao acumulador. Nesta situação a bomba conduz a mistura de aditivo-água até aos painéis solares e o sistema passa desta forma a trabalhar como um sistema forçado. A figura 3.13 representa um sistema de instalação solar em funcionamento.

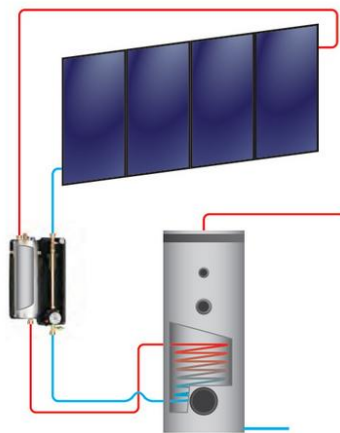


Figura 3. 13 Instalação solar em funcionamento [55].

Relativamente à instalação solar em funcionamento as suas vantagens são [55]:

- Baixo risco de congelação;
- Menor manutenção do aditivo;
- Não são necessários alguns dos elementos de segurança como os purgadores ou os vasos de expansão;

- Nunca alcançará a temperatura de estagnação dos painéis pois aos 110 °C o sistema parará.

3.4. Caso de Estudo

A instalação experimental encontra-se em Lisboa na freguesia de Marvila, no telhado do refeitório do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa a 38°42'49.27"N, 9°8'21.79"W. É de referir que a instalação não tem qualquer tipo de sombreamento, ver figura 3.14.



Figura 3. 14 Colectores solares térmicos instalados no telhado do refeitório (ISEL).

A instalação é caracterizada por dois sistemas de circulação, forçada e termossifão. O caso de estudo é um colector solar térmico de sistema de circulação forçada com partilha de equipamentos com o outro sistema. As principais características do colector solar do sistema de circulação forçada em estudo são as seguintes:

- Objectivo: AQS;
- Tipo de utilização: Permanente;
- Orientação do Colector: Sul;
- Tipo de cobertura: Plana;
- Inclinação dos colectores: 35°;
- Localização da sala técnica: Piso 0;
- Tipo de equipamento de sistema de apoio para o sistema: esquentador a Gás Natural.

O sistema de circulação forçada (kit T9/FKC/200) é da gama WarmSun do modelo FKC-1S com isolamento em lã mineral. Este tipo de colectores são de instalação na vertical, mas mediante as estruturas e ligações apropriadas, podem ser instalados em telhados planos ou inclinados. No caso em estudo o colector encontra-se com um ângulo de inclinação de 35°, localizado a Sul. A escolha de orientação do painel a Sul deve-se ao facto de nesta posição ser possível captar-se mais luz solar e maior energia disponível.

Tipicamente o consumo doméstico tem uma variação de 40 a 70 litros/hab.dia de água quente a 45 °C mas no caso em estudo o perfil de consumo correspondente a 200 Litros diários sendo que este consumo é dividido por vários períodos de consumo tal como vai ser possível visualizar no capítulo 4. Os consumos são controlados a partir de uma válvula de equilíbrio dinâmico, que funciona com um temporizador de maneira a comandar o tempo de abertura e fecho da válvula. A potência fornecida do colector é determinada a partir de aquisição de dados de temperatura de água de alimentação do colector solar e das temperaturas de saída num intervalo de tempo. A figura 3.15 demonstra o esquema solar de sistema de circulação forçada onde se constata os diversos equipamentos existentes para o funcionamento do sistema em causa. Esses equipamentos encontram-se identificados na figura 3.16.

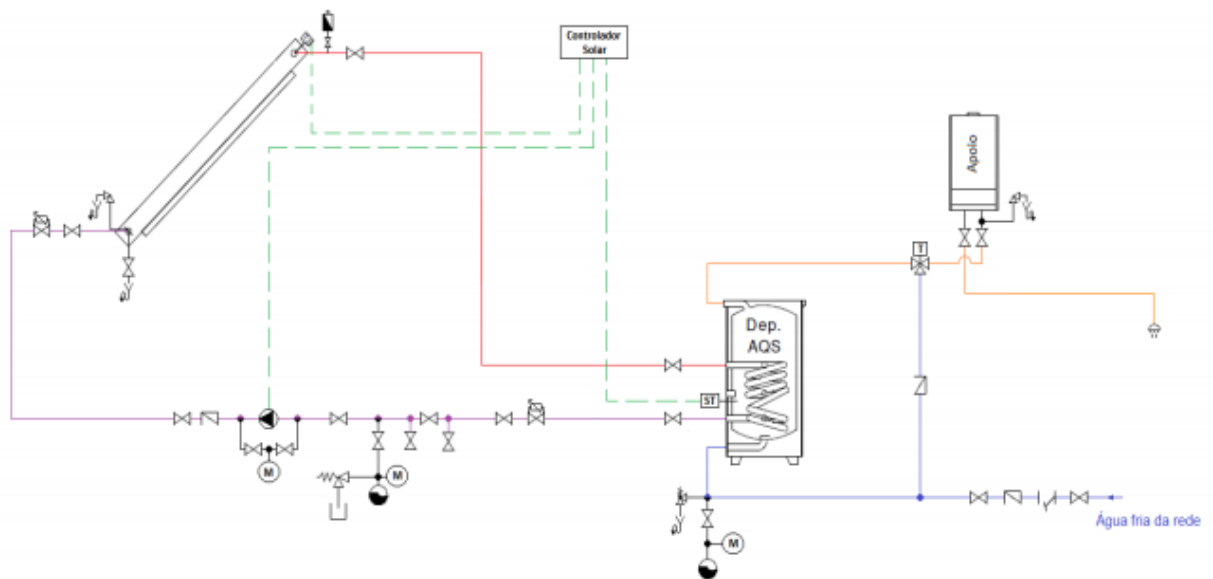


Figura 3. 15 Esquema solar com depósito de uma serpentina e apoio de esquentador [56].



Figura 3. 16 Simbologia do esquema solar [56].

De acordo com o fabricante constata-se que a gama WarmSun é a mais adequada, quando se intenciona um coletor aliado à facilidade de instalação e fiabilidade [57]. A área útil do coletor é de 2,25 m² e a área total de 2,398 m², tem um rendimento óptico de 0,770, coeficiente de perdas linear de 3,681 W/m²K e um coeficiente de perdas secundário de 0,0173W/m²K² [58]. Em relação ao depósito de acumulação é de serpentina simples do modelo SO 200-1E e com uma capacidade de 191 litros. Relativamente aos restantes equipamentos as principais características podem ser observadas na tabela 2.

Tabela 2- Características principais dos equipamentos no sistema de circulação forçada.

Equipamento	Tubagem	Modelo	Material	Capacidade	Suporte
Kit de Acessórios de ligação	EPDM, reforçada com nylon	FS 22	-	-	-
Estrutura de suporte para telhado	-	Plano e vento normal	Alumínio FK3	-	-
Vaso de expansão	-	-	-	25 Litros	SAG 25+ AAS1

Na figura 3.17 pode-se observar o purgador de ar automático utilizado na instalação (Modelo ELT cinco). Mas para uma melhor percepção em relação ao sistema a figura 3.15 demonstra a localização do purgador de ar automático.



Figura 3. 17 Purgador de ar automático, modelo ELT cinco [59].

A figura 3.18 mostra a válvula de segurança do sistema (Modelo VS6).



Figura 3. 18 Válvula de segurança de 6 bar [59].

A figura 3.19 demonstra o modelo do termóstato diferencial utilizado neste tipo de sistemas (Modelo B-Sol 100).



Figura 3. 19 Termóstato diferencial B-Sol 100 [59].

A instalação inclui um sistema de aquisição de dados com uma memória interna e descarrega por via remota, esses dados, para um computador.

Por forma a contabilizar-se o caudal, instalou-se à saída do sistema um regulador de caudal que garante um caudal constante, nunca sendo superior à capacidade de produção instantânea dos equipamentos de apoio (11 lts/min). Na entrada da água da rede, na saída do depósito do sistema e na entrada e saída do equipamento de apoio encontram-se instaladas sondas de temperatura, como se observa na figura 3.15 com a designação de ST. Os consumos foram simulados a partir da abertura de válvula de equilíbrio dinâmico, com corte comandado por relógio, com tempo de permanência de abertura programável, de forma a simular os consumos.

As temperaturas utilizadas para a construção do modelo foram obtidas no ano de 2012 e 2013 fornecidas por trabalhos já existentes [bibliografia-Anexo D]. Ao contrário do que é habitual, em que o método de cálculo é a partir de um *software*, como o caso do *Solterm*, o método de tratamento de dados utilizado nesta dissertação tratou-se de uma folha de cálculo no Excel. O Anexo E demonstra a folha de cálculo criada para a obtenção de resultados.

3.5. Implementação do modelo

No capítulo dois exemplificou-se todas as soluções para a descrição do processo de obtenção de valores da radiação solar no plano do colector através do modelo da Ashrae, bem como o funcionamento de cada tipo de painel solar térmico e a importância da radiação solar. Partindo dos conhecimentos adquiridos e de maneira a se poder construir e analisar o modelo procedeu-se a um desenvolvimento pormenorizado de todas as etapas seguidas para a construção do mesmo. Para a análise da simulação do desempenho energético do painel solar térmico para a produção de AQS por circulação forçada implementou-se uma folha de cálculo. Essa folha pode ser visualizada apenas em formato digital.

3.5.1 Radiação incidente média Global

Nas estações meteorológicas são obtidos dados de temperatura ambiente, velocidade e direcção do vento, humidade do ar e radiação global em plano horizontal em que constituem numa série histórica que contribui para a caracterização da radiação solar.

A maioria das estações meteorológicas medem rotineiramente apenas a radiação solar global, enquanto as medidas das radiações directa e difusa são escassas devido ao

elevado custo dos métodos de medidas e instrumentos envolvidos. A partir dos dados adquiridos, a radiação solar incidente média, a partir da estação meteorológica automática localizada no Instituto Superior Técnico para cada mês foi possível calcular a respectiva radiação horizontal e vertical tal como se poderá observar no capítulo quatro [60]. Na figura 3.21 apresenta a radiação média e máxima incidente fornecida pela estação meteorológica para cada mês, no ano correspondente dos dados experimentais deste estudo.

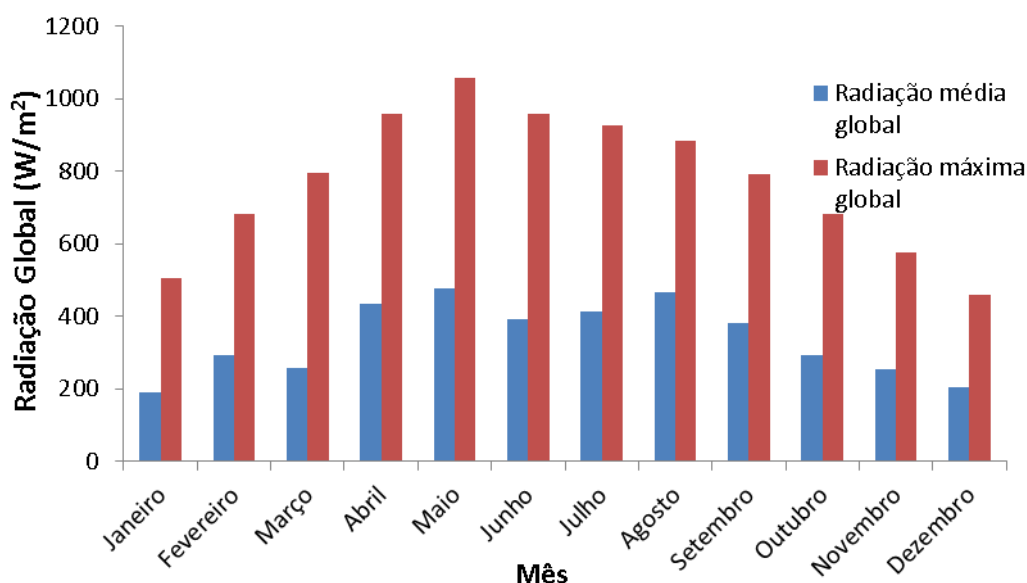


Figura 3. 20 Série histórica de dados diários médios mensais de radiação máxima e média global em plano horizontal adquiridos na estação meteorológica do IST ao longo do ano 2013.

Observando a figura 3.21 pode-se perceber claramente a dependência sazonal dos dados diários médios mensais de radiação global. Nos meses de Abril, Maio e Agosto, houve altos índices de irradiação solar, podendo-se caracterizar estes meses como meses com poucas nuvens e alta incidência de radiação solar para a cidade de Lisboa. Em relação aos meses de Dezembro e Janeiro estes apresentaram índices mais baixos, comparativamente aos outros meses tratando-se de meses com uma maior nebulosidade. Um outro factor dependente da energia solar que chega ao plano ao plano horizontal é a duração do dia e a altura do Sol.

Aplicando a equação 4, tal como foi exemplificada no capítulo 2 calculou-se as declinações correspondentes para cada mês, podendo-se observar na figura 3.22 a variação da declinação calculada para o dia 21 de cada mês.

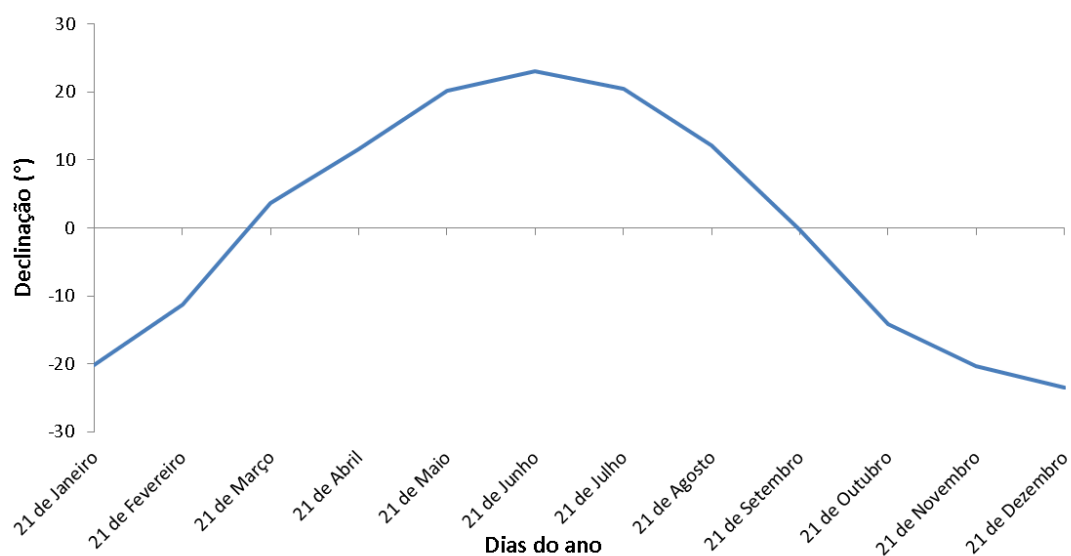


Figura 3. 21 Variação da declinação $\delta(^{\circ})$, para o dia 21 de cada mês.

No capítulo 2 quando abordado a declinação na tabela 1 foi possível observar valores da declinação típicos. Neste caso específico utilizou-se a equação 4 e calculou-se os valores de declinação para o local de estudo e para todos os meses de modo a verificar a validação dos valores tabelados. Na figura 3.21 pode-se verificar que a declinação atinge o seu maior valor, $23,45^{\circ}$ a 21 de junho o que corresponde ao solstício de verão para o hemisfério norte. Quando a declinação atinge o menor valor, $-23,45^{\circ}$ ocorre o solstício de inverno, a 21 de dezembro. Por volta dos dias 21 de março e 21 de Setembro ocorrem respectivamente os equinócios de primavera e outono para o hemisfério norte, isto é, quando a declinação se iguala a zero. De qualquer forma, para o efeito de cálculos efectuados neste trabalho, essas variações são consideradas desprezáveis, podendo-se considerar a declinação um valor constante ao longo de cada dia.

3.5.2 Radiação solar no plano horizontal e numa superfície inclinada

A radiação solar, tanto no plano horizontal como numa superfície inclinada trata-se de um parâmetro importante do modelo de simulação do desempenho do colector, pois é com este parâmetro que se consegue obter os valores de temperatura expectáveis à saída do painel.

Com o auxílio da folha de cálculo e aplicando todas as equações abordadas anteriormente adquire-se os valores teóricos de radiação solar incidente no plano horizontal e na superfície inclinada. A partir destes valores teóricos elaborou-se uma relação entre radiações tal como se pode ver no ponto adiante por forma a conseguir os valores mais reais possíveis de radiação no caso em estudo para as respectivas condições. A primeira relação efectuada sucederá a valores de radiação no plano horizontal e a segunda relação a valores de radiação no plano inclinado.

Desenvolvendo uma relação entre a radiação total na horizontal com a radiação máxima dessa radiação, sendo que ela é máxima ao meio-dia, conseguindo uma relação de valores compreendida entre 0 e 1. A relação de valores obtida permite definir o número de horas solar que existe radiação solar no plano horizontal, normalmente designado por horas de insolação. O cálculo desta relação está descrito na equação 22:

$$\alpha_1 = \frac{E_{total-hor}}{E_{máximo-total-hor}} \quad (22)$$

Em que:

α_1 – Relação entre a radiação total horizontal e a radiação máxima, adimensional;

$E_{total-hor}$ – Radiação total horizontal, W/m²;

$E_{máximo-total-hor}$ – Radiação total na horizontal máxima, W/m².

Na tabela 3 pode-se observar os valores de α_1 ao longo do dia, para os meses de Junho e Dezembro.

Analisando os dados anteriores verifica-se que o número de horas de insolação para o mês de Junho é das 5 h às 19 h, pois fora desse período de horas já não temos insolação tal como se pode observar pelos valores nulos apresentado na tabela 3. Efectuando o mesmo raciocínio para um mês típico de Inverno, mês de Dezembro, verifica-se que o número de horas de insolação para o mês de Dezembro é das 8 h às 16 h, pois fora desse período de horas já não temos insolação tal como se pode observar pelos valores nulos apresentados.

Tabela 3- Valores de α_1 para o mês de Junho e Dezembro.

	Junho	Dezembro
AST	α_1	α_1
4	-	-
5	0,00440	-
6	0,16660	-
7	0,38731	-
8	0,59847	0,11367
9	0,77744	0,46948
10	0,90914	0,75858
11	0,98238	0,93905
12	1	1
13	0,98238	0,93905
14	0,90914	0,75858
15	0,77744	0,46948
16	0,59847	0,11367
17	0,38731	-
18	0,16660	-
19	0,0044	-
20		-

Após esta análise podemos confirmar que os dias de Verão são maiores do que os dias de Inverno, isto deve-se à inclinação do eixo da Terra. Isto é, o mês de Junho tem maior número de horas de insolação em relação ao mês de Dezembro. Posteriormente, com o cálculo de α_1 é possível determinar a radiação na horizontal ao longo do dia.

Relativamente à relação entre a radiação total da superfície inclinada e a radiação total na horizontal, este é designado por α_2 , sendo este parâmetro calculado na equação 23. Através desta relação consegue-se verificar o quanto diferente é a radiação de uma superfície inclinada relativamente á superfície horizontal, podendo assim obter-se a radiação horizontal e inclinada expectável no colector. O α_2 é dado pela equação 23:

$$\alpha_2 = \frac{E_{\text{total-supinclinada}}}{E_{\text{total-hor}}} \quad (23)$$

Em que:

α_2 – Relação entre a radiação total na superfície inclinada e a radiação total na superfície horizontal, adimensional;

$E_{\text{total-supinclinada}}$ – Radiação total na superfície inclinada, W/m^2 ;

$E_{\text{total-hori}}$ – Radiação total na horizontal, W/m^2 .

Na tabela 4 observa-se os valores α_2 para o mês de Junho e Dezembro, calculados a partir da equação 23. Como se pode verificar o número de horas de insolação obtidos para o mês de Junho é exactamente o mesmo do α_1 .

Tabela 4 - Valores de α_2 para o mês de Junho.

	Junho	Dezembro
AST	α_2	α_2
4	-	-
5	0,52123	-
6	0,35505	-
7	0,69586	-
8	0,83918	3,00016
9	0,91339	2,15543
10	0,95437	1,92051
11	0,97544	1,83082
12	0,98195	1,80634
13	0,97544	1,83082
14	0,95437	1,92051
15	0,91339	2,15543
16	0,839181	3,00016
17	0,69586	-
18	0,35505	-
19	0,52123	-
20	-	-

Comparando com os valores calculados do modelo com os valores da literatura disponíveis no Anexo C e E, a gama do número de horas de insolação é a mesma para ambos [61, 62]. Com o cálculo de α_2 será possível estabelecer os valores de radiação solar na superfície inclinada do painel. Observa-se que o intervalo horário de insolação solar é das 8 h às 16 h o que significa que antes e depois não existe insolação solar.

A equação 24 é essencial pois é a partir desta que se efectua a determinação da radiação máxima para o mês em estudo, sendo esta a média do α_1 . A média de α_1 representa a média do factor para um dado dia.

$$\alpha_{\text{médio}} = \overline{\alpha_1} \quad (24)$$

O valor máximo é dado pela relação entre a média da radiação incidente fornecida pela estação meteorológica do IST para cada mês e o alfa médio.

$$\text{Valor máximo} = \frac{\overline{E_{G1}}}{\alpha_{1\text{médio}}} \quad (25)$$

Em que:

$\alpha_{1\text{médio}}$ – Média de α_1 , adimensional;

$\overline{E_{G1}}$ -Radiação global incidente média mensal, W/m².

Radiação Horizontal no modelo

A determinação da radiação horizontal no painel é obtida através da multiplicação entre o factor de α_1 e o valor máximo, sendo que este representa a relação da radiação global incidente média mensal com o α_1 médio.

$$E_{HM} = \alpha_1 \times \text{Valor Máximo} \quad (26)$$

Em que:

E_{HM} – Radiação horizontal no modelo, W/m²;

Valor Máximo - É calculado pela equação 25, W/m².

Radiação na superfície inclinada no modelo

Comparativamente à radiação na superfície horizontal, a radiação na superfície inclinada é dada pela multiplicação do factor de α_2 com a radiação horizontal obtida através da equação 26.

$$\mathbf{E_{sup.incl.M}} = \alpha_2 \times \mathbf{E_{HM}} \quad (27)$$

Em que:

$E_{sup.incl.M}$ – Radiação na superfície inclinada no modelo, W/m^2 ;

α_2 – Relação entre a radiação total na superfície inclinada e a radiação total na horizontal, adimensional;

E_{HM} – Radiação horizontal no modelo, W/m^2 .

Capítulo 4 - Análise de dados

Neste capítulo são simulados vários cenários de referência, por forma a validar o modelo e a estudar a influência da radiação solar nos painéis solares térmicos em estudo. A análise foi efectuada para o dia típico 21 de cada mês tal como foi referido anteriormente.

4.1. Validação do Modelo

Inicialmente fez-se um teste com latitude de 40°N na horizontal, comparando os dados do modelo com a superfície na horizontal para duas referências bibliográficas diferentes, tal como se pode observar no Anexo C e D [62,63]. Em alguma literatura consegue-se obter tabelas que contêm a radiação solar na superfície horizontal e no plano inclinado para diferentes latitudes, no caso da Ashrae as latitudes são: 24°, 32°, 40°, 48°, 58° e 64°N. Em relação à Carrier, esta tem: 50°, 40°, 30°, 20°, 10° e 0°N. No caso de estudo o colector está situado no telhado do refeitório do ISEL, Lisboa, onde a latitude a considerar deverá ser a latitude de 38°N.

Para ambas as literaturas o caso mais semelhante será o da latitude de a 40°N, hemisfério Norte [62, 63]. De forma a saber-se qual o ganho de calor solar através do vidro nos dados da Carrier é necessário multiplicar a radiação incidente pelo factor solar do vidro (1,15). O factor usado indica a razão entre a radiação incidente num determinado plano e o ganho solar de um vão envidraçado de referência situado no mesmo plano.

Nas figuras 4.1 e 4.2 observa-se a decomposição da radiação solar de referência (Ashrae e Carrier) e a radiação total obtida numa superfície horizontal no modelo adoptado, durante o Solstício de Inverno e Verão. Analisando as figuras 4.1 e 4.2 é possível constatar que no Verão há um maior número de horas solares e maior radiação incidente média (971 W/m²; 858 W/m²; 958 W/m² para a Ashrae, Carrier e Modelo) do que no Inverno (409 W/m²; 307 W/m²; 452 W/m² para a Ashrae, Carrier e Modelo).

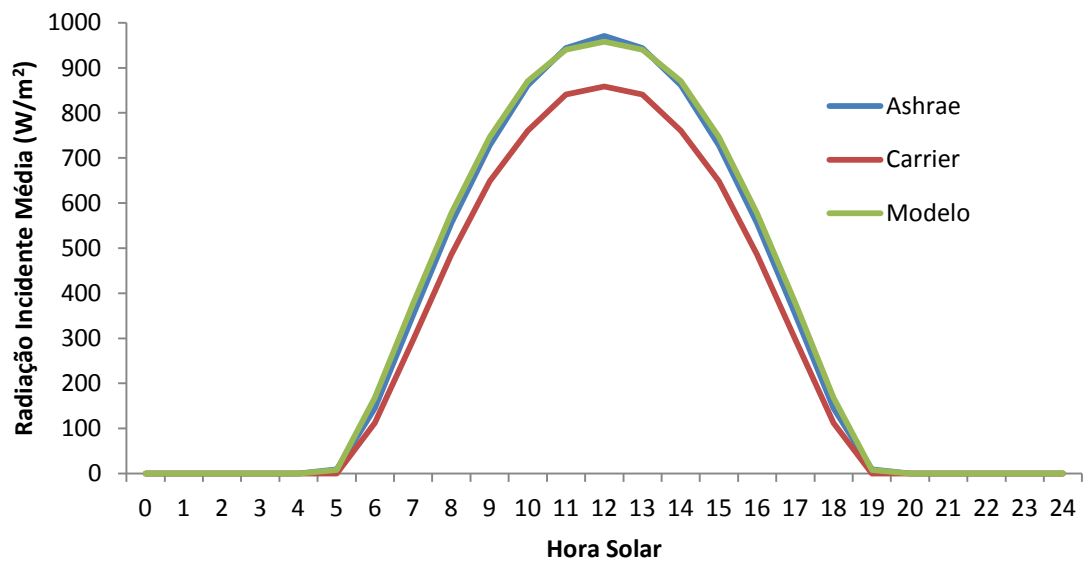


Figura 4. 1 Radiação total na superfície horizontal (0°) a latitude 40°N durante o solstício de Verão.

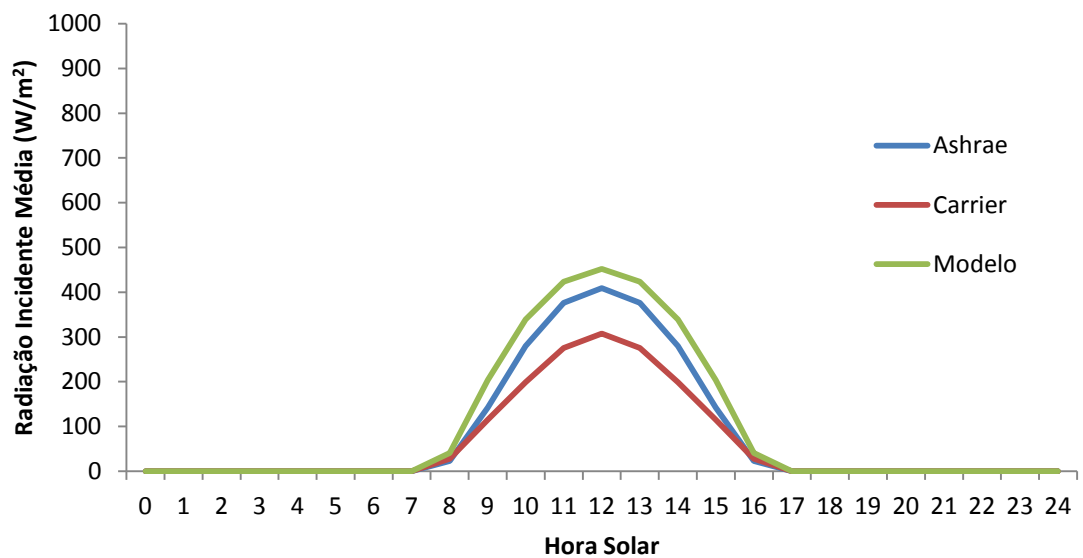


Figura 4. 2 Radiação total na superfície horizontal (0°), a latitude 40°N durante o solstício de Inverno.

As figuras 4.3 e 4.4 decompõem a radiação solar teórica abordada no capítulo 2 Carrier e Ahsrae com a radiação total numa superfície vertical virada a sul, com um ângulo de inclinação de 90° , no Anexo E encontram-se os dados mais aprofundados para os solstícios de Verão e Inverno.

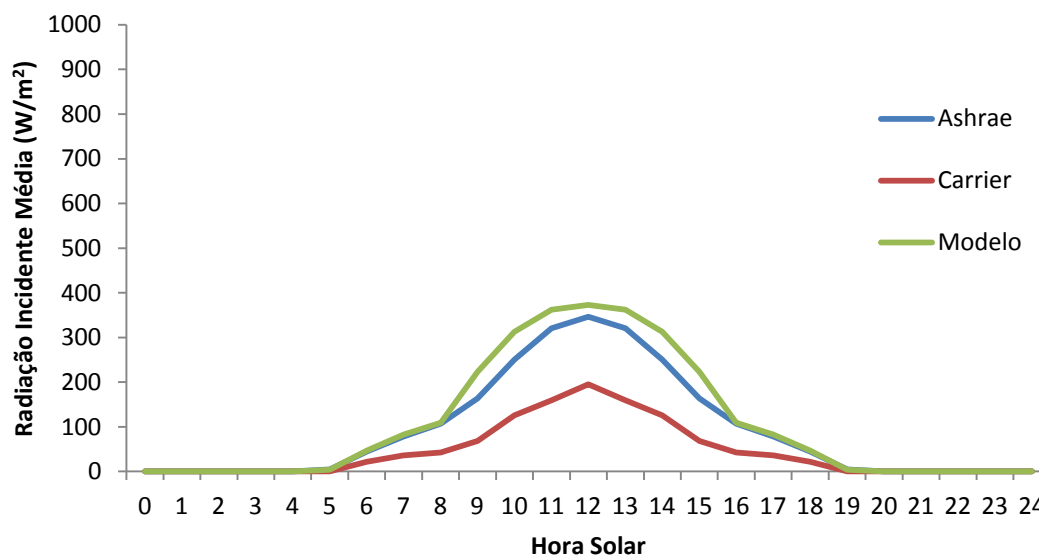


Figura 4. 3 Radiação total na superfície vertical (90°), a latitude 40°N durante o solstício de Verão.

Comparando a figura 4.3 com a figura 4.4 observa-se o oposto que nas figuras 4.1 e 4.2, isto é a radiação incidente média na superfície vertical é maior para o solstício de Inverno (918 W/m^2 ; 598 W/m^2 ; 854 W/m^2 para a Ashrae, Carrier e Modelo) do que para o solstício de Verão (346 W/m^2 ; 195 W/m^2 ; 373 W/m^2 para a Ashrae, Carrier e Modelo). Uma explicação para este acontecimento é devido ao movimento de translação em torno do Sol. Como verificado em alguma bibliografia de referência, constata-se que no Inverno o percurso do Sol é maior portanto a altura solar é menor e uma superfície vertical virada a sul, recebe os raios solares durante mais tempo que uma com qualquer outra orientação [64]. Em contrapartida a orientação Norte tem um comportamento de “perdedora de energia”, isto quer dizer, não está sujeita à incidência directa do sol. No Verão o tempo de insolação de uma superfície vertical orientada a sul é menor do que no Inverno, ao mesmo tempo que o sol está mais alto. Numa superfície horizontal a energia recebida é apenas função da altura solar enquanto a inclinada depende não só da altura solar mas também do ângulo azimutal da parede.

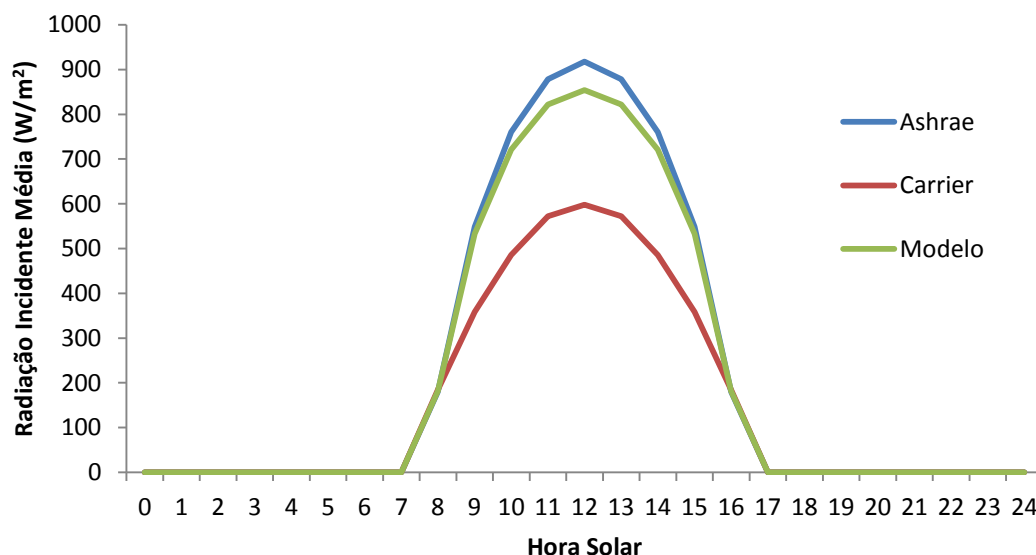


Figura 4. 4 Radiação total na superfície vertical (90°), a latitude 40°N durante o solstício de Inverno.

No caso do hemisfério norte, como é o caso, os painéis solares deverão estar orientados a Sul, por forma a receber o máximo de radiação solar no Inverno e minimizarem os ganhos solares no Verão [65]. Isto é, no Inverno é necessário aquecer os edifícios, portanto a estratégia correcta será de captar a máxima radiação solar disponível. A orientação a sul é aquela que propicia maiores ganhos solares. O percurso do sol no Inverno é vantajoso para esta orientação, uma vez que o seu percurso se efectua para azimutes muito próximos do Sul geográfico [65]. No Verão é necessário minimizar os ganhos solares, uma vez que, no seu percurso de nordeste (onde nasce) até noroeste (onde se põe), o sol “vê” todas as orientações, sendo que é a horizontal (coberturas), que maior nível de radiação recebe. Assim, verifica-se que o percurso do Sol, sendo próximo e zénite, apresenta um ângulo de incidência com a normal de valor mais elevado. Carrega menos ganhos solares, facilmente atenuáveis se existir uma pala sombreadora sobre o vidro, no caso de uma fachada orientada a sul. Pode-se verificar que os valores do modelo encontram-se próximos da literatura.

Isto acontece devido ao facto de se utilizar a mesma metodologia de cálculo que os valores da Ashrae. De qualquer forma há sempre discrepâncias, essas discrepâncias poderão residir no efeito climático, pois como tal não foram recolhidos dados na mesma altura.

As diferenças observadas em relação aos valores de referência da Carrier advêm de se usar outro método de cálculo diferente. Outro motivo poderá residir no efeito climático, pois como tal não foram recolhidos dados na mesma altura para ambas as referências, daí haver de facto algumas diferenças entre eles. Portanto, analisando as quatro figuras, na superfície vertical para as mesmas horas solares obtém-se maior aproveitamento a nível de radiação incidente no solstício de Inverno.

Para as duas análises anteriores à que referir que na superfície horizontal a latitude (40°N), num solstício de Verão obtém-se maiores valores de radiação incidente (0° e 90°) enquanto numa superfície vertical é no solstício de Inverno que se tem valores maiores.

4.2. Influência da Latitude

Nesta secção irá ser apresentado os resultados correspondentes para um painel situado a uma latitude 40°N e a 38°N com um ângulo de inclinação de 90°, isto é um painel colocado na vertical. Após esta análise iremos ver adiante a variação do ângulo de inclinação para o valor de latitude do painel em estudo, 38°N. Inicialmente o objectivo deste estudo é validar o modelo em estudo, e desta forma analisar e ver qual a influência da orientação, isto é, quais as diferenças obtidas quando os colectores se encontram a diferentes latitudes. O modelo utilizado é exactamente o modelo em estudo, sendo que um dos parâmetros principais, a latitude foi alterado por forma a poder-se validar o mesmo. Inicialmente a análise foi efectuada para 90° com uma latitude de 40°N de seguida para uma latitude de 38°N, depois de validado alterou-se o ângulo de inclinação para 35°, comparando-o com outros ângulos de inclinação, 90° e 0°.

Nas figuras 4.5 e 4.6 pode-se observar a variação de radiação na superfície inclinada no modelo para latitudes de 40° e 38°N com um ângulo de inclinação de 90° para o solstício de Verão e Inverno. A latitude é um factor bastante importante pois este define a forma como os raios solares atingem a superfície terrestre. Analisando as figuras 4.5 e 4.6 em separado pode-se constatar que a diferença de valores de radiação para uma latitude de 40°N e para uma latitude de 38°N em cada solstício é mínima. Com a variação da latitude 40°N para 38°N, para ambos os solstícios a radiação incidente

média é sempre inferior (Solstício de Verão - 40°N: 263 W/m², 38°N: 249 W/m²; Solstício de Inverno - 40°N: 631 W/m², 38°N: 589 W/m²).

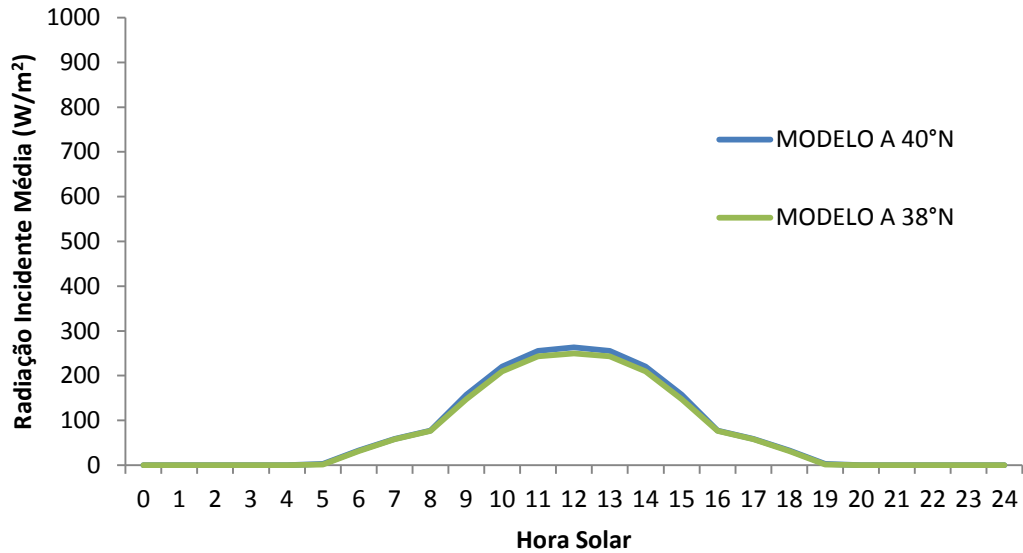


Figura 4. 5 Radiação incidente média na superfície inclinada no modelo (90°) para uma latitude de 38° e 40°N para o solstício de Verão.

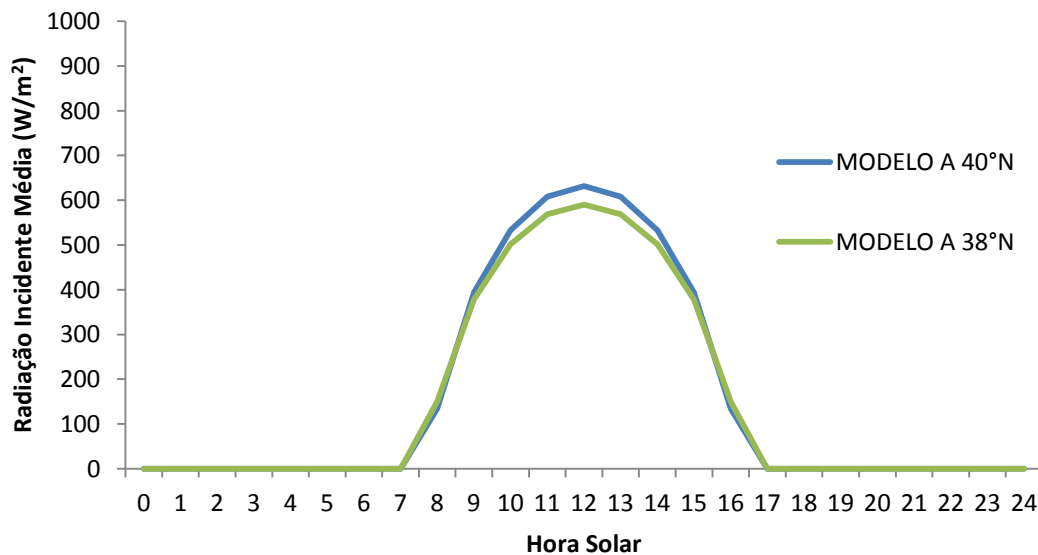


Figura 4. 6 Radiação incidente média na superfície inclinada no modelo (90°) para uma latitude de 38° e 40°N para o solstício de Inverno.

Comparando as duas figuras pode-se verificar que a radiação na superfície vertical no solstício de Verão é menor em relação ao solstício de Inverno. Apesar de valores

muito aproximados pode-se observar que no solstício de Inverno a radiação na superfície inclinada no modelo para uma latitude de 40°N é ligeiramente maior que para uma latitude de 38°N . Uma explicação para este acontecimento é a altura solar e o ângulo azimutal da parede formado pela orientação do painel. O mês de Junho é o que tem um valor de insolação mais baixo precisamente por coincidir com a época do ano em que a altura solar é maior. O mesmo não acontecia se o painel estivesse voltado a Norte, em que nos meses de Junho, o valor de radiação é mais elevado que em Dezembro. Neste caso em concreto, os raios solares incidem na perpendicular da superfície terrestre, sendo a área receptora menor por sua vez há uma maior concentração de energia recebida por unidade de superfície. Visto a altura do Sol ser menor no Inverno temos então valores de insolação mais altos que no Verão. Observando a figura 4.5 é de notar que existem dois picos de radiação, um de manhã entre as 6 h e 9 h e outro a tarde entre as 16 h e 19 h, este facto acontece devido à incidência directa de luz do Sol nestes períodos.

Em determinados meses do ano um hemisfério recebe luz e calor com mais intensidade que o outro dando origem às estações do ano. Os efeitos do movimento de translação na variação anual da quantidade de radiação solar recebida na superfície terrestre, tornam-se tanto mais evidentes quanto maior for a latitude. Por exemplo, para latitudes compreendidas entre 32° e 42° localizado no hemisfério norte é no solstício de Verão que se recebe maior quantidade de energia solar, isto acontece quando o painel se encontra na horizontal, isto é no Verão há maior insolação que no Inverno [66]. Mas como o objectivo é obter maiores ganhos solares no Inverno e não no Verão, pois é quando há maiores necessidades de aquecimento, a opção mais benéfica é um painel voltado a Sul com uma determinada inclinação, tal como se pode verificar no ponto a seguir.

4.3. Influência da variação do ângulo de inclinação

As figuras 4.7 e 4.8 identificam a variação da radiação incidente numa superfície inclinada para uma latitude de 38°N com diferentes ângulos de inclinação, 0° , 35° e 90° . Observando atentamente as figuras 4.7 e 4.8 constata-se que para o solstício de Verão à medida que se diminui o ângulo de inclinação do painel tem-se um valor de insolação maior, o que não acontece para o solstício de Inverno em que se verifica o oposto.

(Solstício de Verão - 0°: 679 W/m², 35°: 667 W/m², 90°: 250 W/m²; Solstício de Inverno - 0°: 328 W/m², 35°: 593W/m², 90°: 590 W/m²).

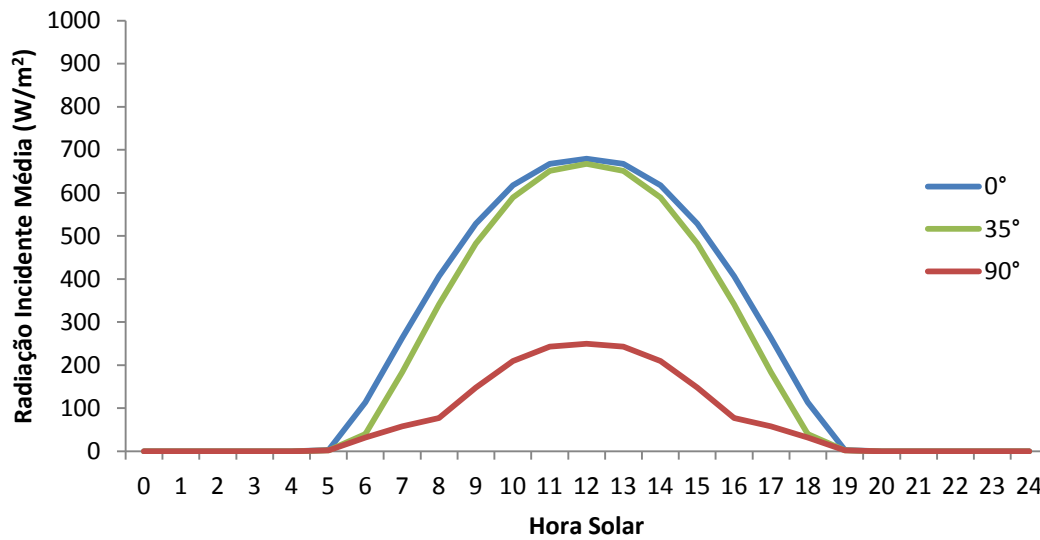


Figura 4. 7 Radiação incidente média na superfície inclinada para uma latitude de 38°N com ângulo de inclinação de 0°, 35°, 90° durante o solstício de Verão.

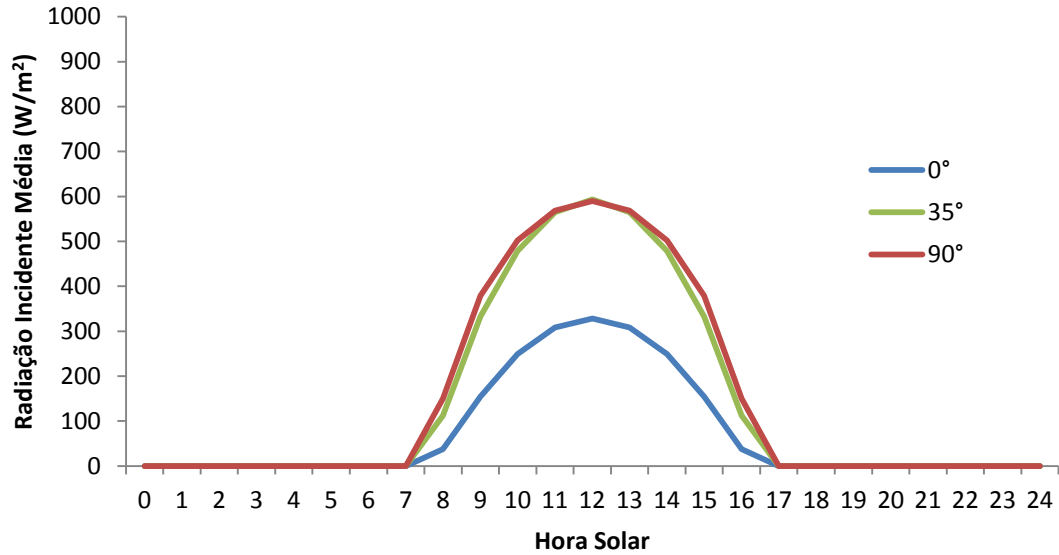


Figura 4. 8 Radiação incidente média na superfície inclinada para uma latitude de 38°N com ângulo de inclinação de 0°, 35°, 90° durante o solstício de Inverno.

Uma justificação para este acontecimento é a forma como os raios solares incidem na superfície. Portanto para o solstício de Verão os raios solares incidem

perpendicularmente na superfície com uma menor inclinação que por sua vez terá maior radiação solar. Se o ângulo for maior terá desta forma uma radiação menor.

O ângulo óptimo da superfície onde se quer “capturar” a energia solar é próximo do ângulo de latitude do local onde a superfície está instalada. A explicação para este acontecimento é no ângulo que os raios solares fazem com a superfície, isto é, uma superfície com uma inclinação em relação à horizontal igual à latitude do local de instalação receberá os raios solares aproximadamente normais à superfície durante todo o ano.

O ângulo ideal com que devem ser montados os colectores solares, depende da latitude e do período do ano de maior consumo de água quente. Se o objectivo da instalação tem como objectivo produzir água quente sanitária (AQS) para uma residência de utilização permanente, como é o caso, a inclinação deve permitir captar a maior quantidade de energia durante todo o ano. Um outro exemplo é o caso de um hotel de temporada que pode estar completo no semestre de Verão (Abril a Setembro) e menor ocupado no semestre de Inverno (Outubro a Março) ou vice-versa, neste caso a inclinação ideal deverá permitir captar a maior quantidade de energia na temporada.

Portanto o ângulo óptimo será de 35° para uma latitude de 38°N , isto é, observando os gráficos anteriores atentamente constata-se que dos três ângulos o de 35° é o que tem maior radiação incidente média ao longo de todo o ano. Enquanto, para os outros ângulos eles invertem os papéis, 90° favorece o Inverno e 0° favorece o Verão.

4.4. Análise da Eficiência do Colector Solar

O colector que se podia denominar de colector ideal, era aquele que proporcionaria que toda a radiação solar que o alcançasse fosse totalmente transformada em calor. Mas como tal isso na prática não acontece, pois nem toda a energia é absorvida. Há vários elementos que auxiliam esta situação, para tal uma análise minuciosa do perfil térmico do colector seria bastante complexo. Utilizando uma análise simples é possível determinar a importância que várias variáveis têm no desempenho de um colector [67]. A eficiência de um colector é interpretada a partir do quociente da energia térmica utilizável pela energia solar recebida. A dependência funcional da eficiência do colector em estudo sobre os valores de operação e sistema meteorológico pode ser representado pela equação 28. A Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems

tem ao dispor um documento que especifica o tipo de painel em estudo, de acordo com a EN 12975-2: 2006. Para o cálculo da eficiência do painel “Vulkano FKC-1S/ FKC-1W” foi utilizada a equação 28 [58].

$$\eta \left(E_{\text{sup.incl.M}}(t_m - t_a) \right) = \eta_0 - a_1 \frac{t_m - t_a}{G} - a_2 \frac{(t_m - t_a)^2}{G} \quad (28)$$

$$t_m = \frac{T_i + T_f}{2} \quad (29)$$

Em que:

$E_{\text{sup.incl.M}}$ – Radiação total da superfície inclinada, W/m^2 ;

T_i – Temperatura da água da rede, $^{\circ}\text{C}$;

T_f – Temperatura de saída do colector, $^{\circ}\text{C}$;

T_a – Temperatura ambiente, $^{\circ}\text{C}$;

η_0 – Rendimento sem perdas de calor;

a_1 – Coeficiente de perda de calor do colector;

a_2 – Coeficiente de perda de calor do colector;

G – Radiação solar na superfície inclinada no modelo sobre a área do colector, W/m^2 .

Os valores de rendimento de um colector são executados a partir de ensaios em laboratórios acreditados, sendo fornecidos pelos fabricantes de maneira a permitir analisar a sua qualidade térmica. Os valores de temperatura ambiente utilizados foram fornecidos pela estação meteorológica do IST. No documento fornecido pelo fabricante do colector solar em estudo obtêm-se os dados da tabela 5, referentes ao modelo Vulkano FKC-1S/ FKC-1W.

Tabela 5 – Valores correspondentes ao modelo Vulkano FKC-1S/FKC-1W.

Área de cobertura do colector (m^2)	Rendimento (η_0)	Coeficiente de perda de calor (a_1) $\text{W/m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$	Coeficiente de perda de calor (a_2) $\text{W/m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$
2,256	0,770	3,681	0,0173

Aplicando as equações 28 e 29 determinou-se a eficiência do colector para os 12 meses em estudo, tal como se pode observar no Anexo E. Nas figuras 4.9 e 4.10 pode-se

observar a curva característica do colector para os meses de Junho e Dezembro, respectivamente. Estas figuras identificam a variação da eficiência do colector com diferença da temperatura média da água à entrada e saída do colector com a temperatura ambiente, sendo representada por T^* , à qual a sua designação é temperatura característica do colector. Os valores utilizados na figura 4.9 e 4.10 são correspondentes para os perfis de consumo controlados por uma válvula de equilíbrio dinâmico. O perfil a partir as 18-19 h não consta pois para esse intervalo não há valores de radiação para todos os meses, como o caso de Dezembro. Como tal e de forma a poderem ser comparáveis os dois solstícios utilizou-se apenas estes três perfis representados nas figuras 4.8 e 4.9.

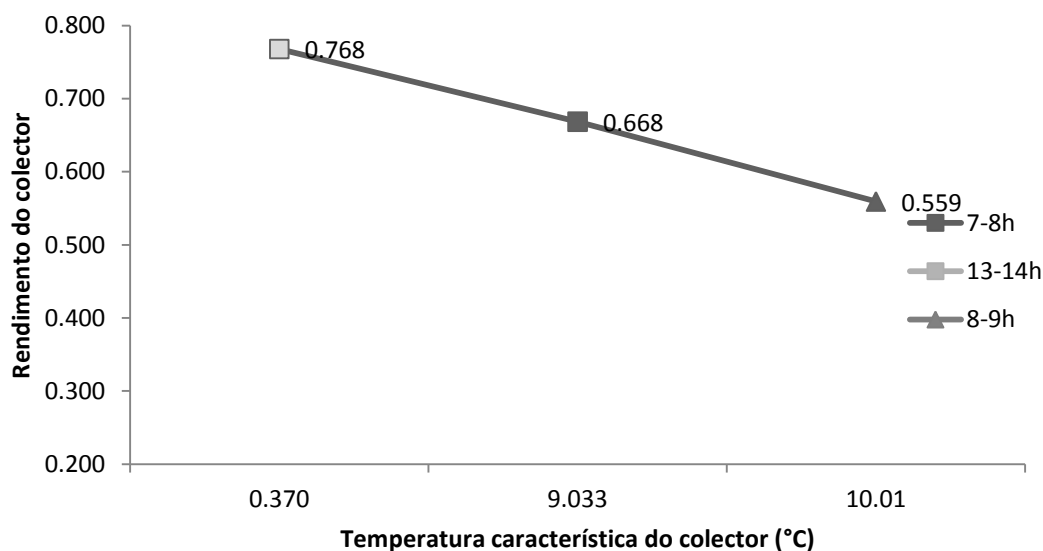


Figura 4. 9 Curva característica para o mês de Junho.

Observando as figuras 4.9 e 4.10 verifica-se que à medida que o rendimento do colector diminui a temperatura característica do colector aumenta. Tal como se pode constatar nas figuras o rendimento do colector é máximo no intervalo das 13-14 h, e mínimo no intervalo das 7-8 h. É de notar que esta tendência ocorre devido à maior ou menor radiação existente nesses períodos.

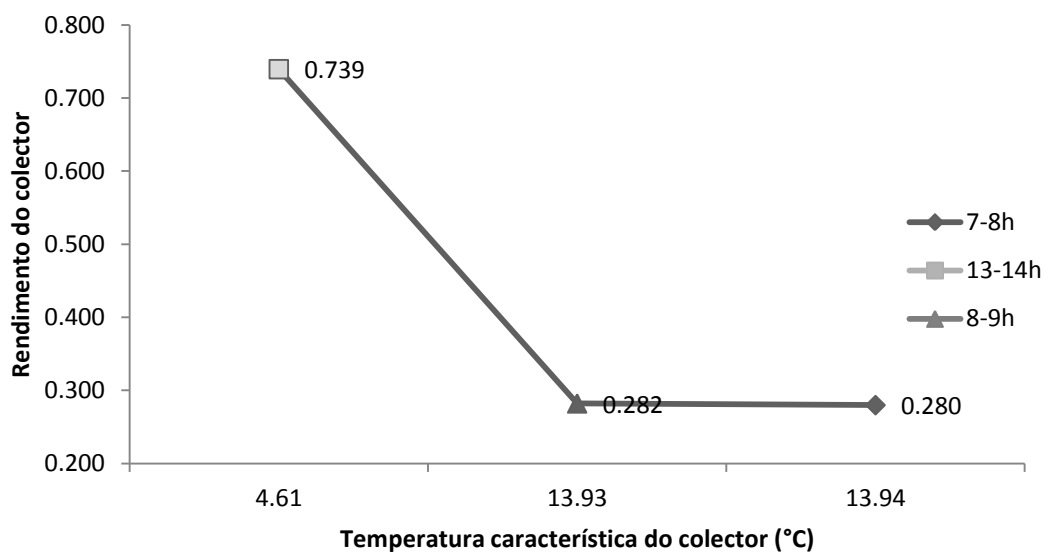


Figura 4. 10 Curva Característica para o mês de Dezembro.

O caudal no coletor é zero quando a temperatura chega a um ponto em que não é necessário aquecer mais o fluido, dessa forma o sistema de circulação desliga-se e o fluido pára de maneira a que não haja mais transferência de calor para o depósito acumulador. Desta forma o rendimento é máximo quando atinge a temperatura máxima, tal como se pode verificar nas figuras 4.9 e 4.10 [68]. Após a determinação e análise dos parâmetros da radiação incidente no plano inclinado do painel e da respectiva eficiência ao longo do dia durante todo o ano, eis que é possível determinar a temperatura de saída do painel. Todas as temperaturas fornecidas e aplicadas ao longo da folha de cálculo são adquiridas a partir de um sistema de aquisição de dados, sendo utilizados para esta parte do estudo o mesmo espaço temporal que o da construção do modelo de radiação. Utilizando a folha de cálculo e aplicando a equação 30 é possível calcular a potência produzida do sistema para cada perfil de consumo.

$$Q = E_{sup.incl.M} \times A_{colector} \times \eta(E_{sup.incl.M}, (t_m - t_a)) \quad (30)$$

Em que:

Q – Potência fornecida pelo coletor solar, W;

$E_{sup.incl.M}$ – Radiação na superfície inclinada, W/m^2 ;

$A_{colector}$ – 2,26 m^2 [56];

$\eta(E_{sup.incl.M}, (t_m - t_a))$ – Eficiência do coletor, dada pela equação 28.

Tal como foi dito anteriormente o perfil de consumo é de 200 Litros diários. Este consumo é distribuído por um perfil de consumo distribuído ao longo do dia por intervalos de tempo, sendo controlados por uma válvula de equilíbrio dinâmico, baseado num relógio que comanda o tempo de abertura e fecho da respectiva válvula. A tabela 7 define o perfil de consumo diário estipulado para simulação de uma habitação típica. Sendo que a abertura da válvula nos três primeiros perfis esteve aberta durante 240 segundos e nos restantes 300 segundos.

Tabela 6- Perfis de consumo diários.

Horas	Consumo (l)	Tempo de abertura da válvula (s)
07-08 h	25	240
08-09 h	25	240
13-14 h	25	240
18-19 h	50	300
19-20 h	50	300
20-21 h	25	240

Após o cálculo da potência fornecida pelo colector solar é possível determinar-se a temperatura de saída do colector. Como tal e com o auxílio da folha de cálculo determinou-se a temperatura a partir da equação 31 para um intervalo de tempo das 07 h às 21 h de cada mês. Pelo facto de não haver radiação em determinadas horas do dia não é possível ter-se sempre valores de temperatura durante todo o dia. A potência que se transfere para um escoamento de um fluido com um caudal mássico \dot{m} é dada pela equação 31:

$$\dot{Q} = \dot{m} \times c_p \times (T_f - T_i) \quad (31)$$

Sendo que:

\dot{Q} – Potência transferida para a água, kW;

\dot{m} - Caudal mássico de água, kg/s;

C_p - Calor específico da água, kJ/kg °C;

T_i - Temperatura da água da rede, °C.

T_f – Temperatura à saída do colector, °C.

Para o cálculo do caudal mássico de água é necessário aplicar a equação 32.

$$\dot{m} = V \times \rho \quad (32)$$

Em que:

\dot{m} - Caudal mássico de água, kg/s;

\dot{V} - Caudal volúmico de água, m³/s;

ρ - Massa volúmica do fluido (água), kg/m³ [68].

A temperatura à saída do painel é obtida através da manipulação das equações 31 e 32. O autómato da instalação forneceu e recolheu os valores diários da temperatura da água da rede, fez-se a soma da temperatura dos respectivos perfis de consumo e calculou-se a média para cada mês. Na figura 4.11 encontram-se as temperaturas médias para cada mês ao longo de 2013 e as temperaturas médias típicas para cada mês adquiridas no Software *Solterm*.

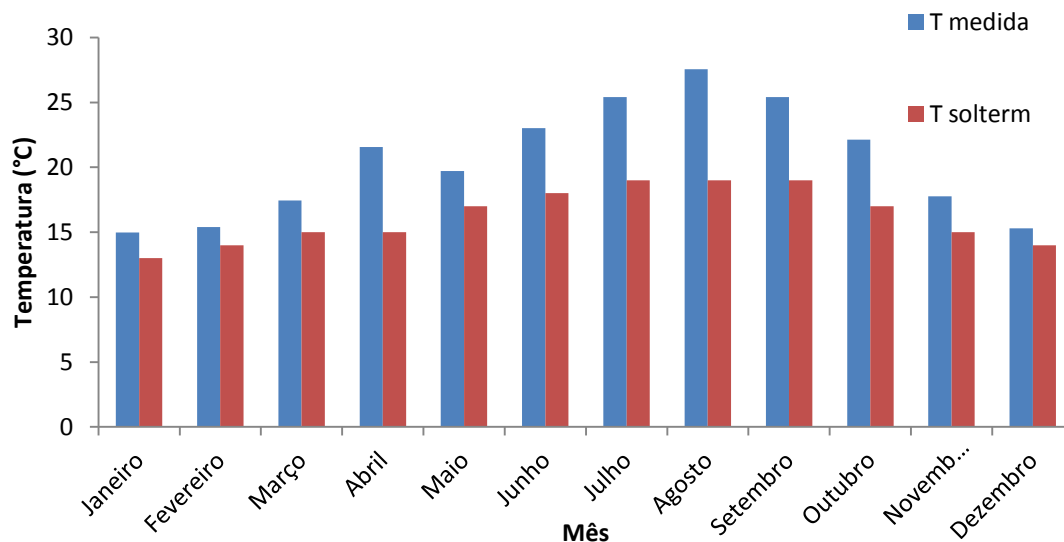


Figura 4. 11 Temperatura média da água da rede ao longo do ano.

Observando a figura 4.11 pode-se constatar que a temperatura máxima da água da rede ao longo do ano medidos na instalação é de 27,56 °C, para o mês de Agosto e a mínima de 14,97 °C para o mês de Janeiro. Em relação aos valores de *Solterm* os mesmo são de 19 °C para o mês de Agosto e 13 °C para o mês de Janeiro, em que para o primeiro tem-se uma diferença de cerca de 9 °C e para o segundo apenas de 2 °C. Uma explicação para estas discrepâncias de valores entre o *Solterm* e os valores medidos na

instalação deve-se ao facto da sonda de temperatura utilizada para tal medição, estar localizada dentro do edifício, mais concretamente na sala técnica. Como a sonda se encontra localizada dentro da sala técnica, as variações da temperatura ambiente acaba por influenciar o valor da temperatura da água da rede lida através da sonda. Sendo que estas condições conduzem a uma menor contribuição solar por parte do painel ao sistema instalado e acabarão por alterar os valores de temperatura de saída do colectador, tal como se poderá constatar adiante.

Utilizando os valores de temperatura médios à entrada do painel lidos a partir do programa de aquisição de dados e aplicando as equações de 31 e 32 é possível determinar os valores da temperatura à saída do painel. A figura 4.12 mostra a evolução da temperatura à saída do painel obtida através do modelo e os valores de temperatura médios lidos a partir do autómato.

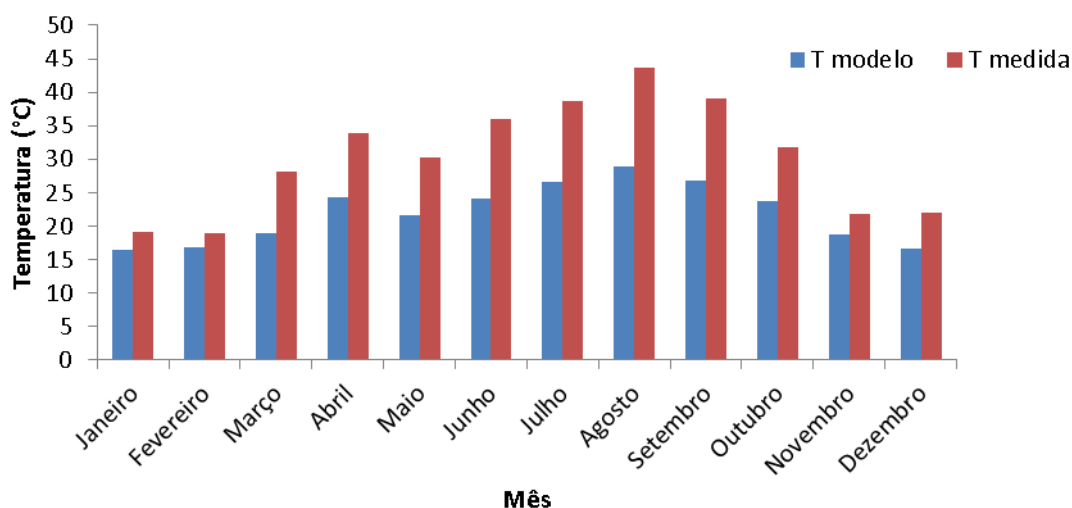


Figura 4. 12 Variação da temperatura medida e do modelo.

Observando a figura 4.12 é de notar algumas diferenças entre a temperatura média lida através do autómato e a temperatura prevista a partir do modelo à saída do painel. Verifica-se que a temperatura máxima ao longo do ano média lida é de 43,59 °C, para o mês de Agosto e a mínima de 19,16 °C para o mês de Janeiro. Em relação à temperatura à saída do painel prevista no modelo, é máxima com 28,95 °C também para o mês de Agosto, e mínima com 16,36 °C para o mês de Janeiro. Uma das influências, tal como foi dito anteriormente, poderá ser o facto da sonda se localizar dentro da sala técnica, verificando-se um menor diferencial térmico. Uma outra razão é de não haver um

caudal contínuo ao longo de todo o perfil, visto que se tem apenas momentaneamente aberta a válvula simulando um determinado consumo de uma habitação familiar, promovendo assim à estagnação. Esta leitura de valores poderá corresponder a um valor de temperatura de estagnação devido à não existência de circulação de água do sistema no instante antes da medição da respectiva temperatura.

A figura 4.13 e 4.14 mostra a temperatura à saída do painel obtida através do modelo e os valores de temperatura médios lidos na instalação a partir do autómato para os dois Solstícios de Verão e Inverno, respectivamente.

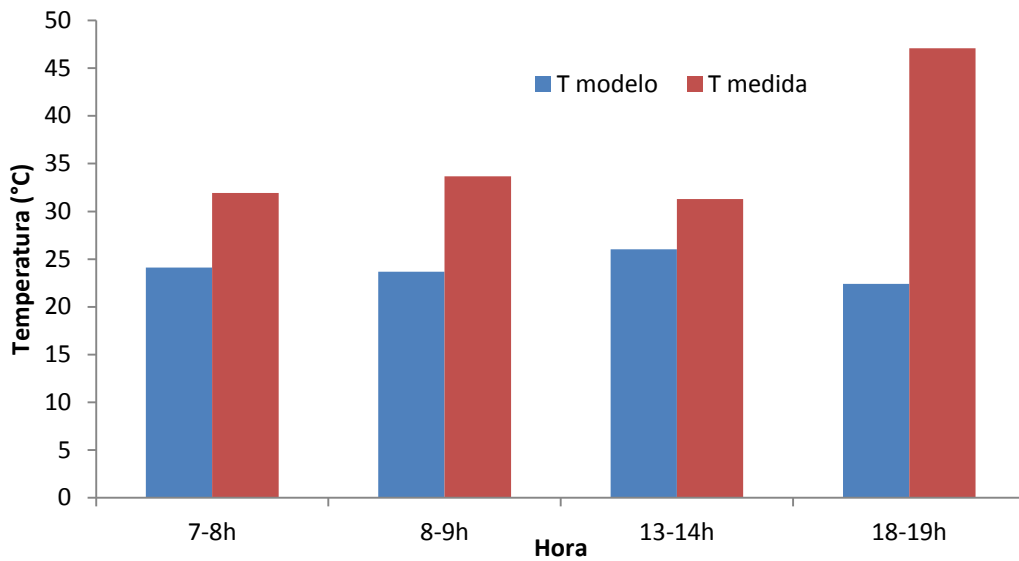


Figura 4. 13 Variação da temperatura medida e do modelo no solstício de Verão.

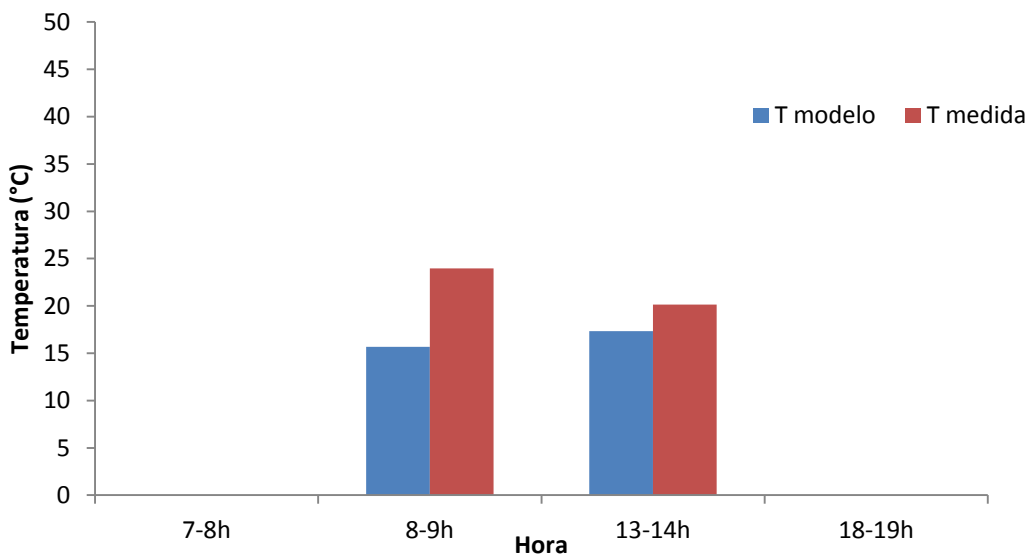


Figura 4. 14 Variação da temperatura medida e no modelo no solstício de Inverno.

A partir das figuras 4.13 e 4.14 averigua-se que não é possível calcular o valor de temperatura à saída do colector para todas as horas do dia. Como é de esperar no Verão há radiação durante todas as horas estipuladas de consumo diário daí ter-se conseguido calcular os valores de temperatura em todas as horas, o que não foi verificado em relação ao Inverno. Uma maneira de se confirmar estas argumentações é avaliar-se os valores de potência para os dois solstícios em que se observa que há valores mais elevados para determinadas horas do dia tal como a temperatura. Na figura 4.15 pode-se verificar essa variação

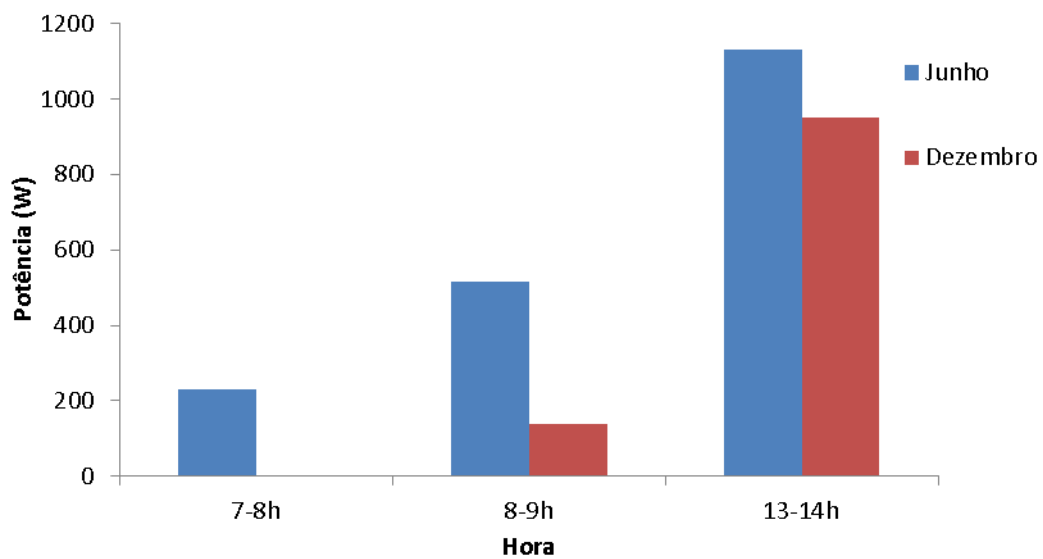


Figura 4. 15 Variação da potência no intervalo de tempo nos meses de Junho e Dezembro.

Observando a figura 4.15 constata-se que apenas temos potência para o mês de Dezembro no intervalo de tempo das 8-9 h e das 13-14 h, o mesmo que se verificou para a temperatura. É de notar que mais uma vez a potência é mais elevada no solstício de Verão. Para este tipo de colector, tal como foi dito anteriormente obtém-se valores de radiação mais elevados no Verão, em que por sua vez se observa valores de potência maiores, adquirindo desta forma temperaturas mais elevadas.

Capítulo 5 - Conclusões

É de salientar que os sistemas solares térmicos permitem o aquecimento de águas sanitárias através da energia proveniente do sol. O nosso país é bastante favorável no que toca ao aproveitamento desta fonte de energia, sendo que o uso de colectores solares para AQS permite uma vasta diminuição relativamente ao custo energético bem como ao impacte ambiental.

Durante este trabalho foi efectuada uma ferramenta de cálculo que garanta a qualidade e a facilidade de cálculo da radiação solar no plano horizontal e inclinado para um sistema de circulação forçada. Ao ter acesso a valores de radiação global média no plano horizontal, como foi o caso deste trabalho que teve acesso aos valores medidos na estação meteorológica do IST, e aplicando os dados referentes ao local e respectivas características do colector é possível chegar-se a valores de radiação incidente e à previsão da temperatura final do colector solar térmico.

Nesta dissertação o estudo de radiação solar foi efectuado para todos os meses do ano, contudo foi dado maior ênfase aos meses de solstício de Verão e Inverno, isto é, para o mês de Junho e Dezembro. Numa primeira fase deste estudo houve a necessidade de validar o modelo implementado e para o efeito foi efectuado o estudo para uma localização e inclinação do colector de referência encontrada na maior parte da literatura, isto é para uma latitude de 40°N com uma inclinação horizontal (0°) e vertical (90°). Em primeira análise verifica-se que comparando os valores obtidos no modelo com os valores bibliográficos é possível constatar que para uma superfície horizontal no Verão há um maior número de horas solares e maior radiação incidente média (971 W/m²; 858 W/m²; 958 W/m² para a Ashrae, Carrier e Modelo) do que no Inverno (409 W/m²; 307 W/m²; 452 W/m² para a Ashrae, Carrier e Modelo). Em relação a uma superfície vertical conclui-se o oposto, isto é a radiação incidente média na superfície vertical é maior para o solstício de Inverno (918 W/m²; 598 W/m²; 854 W/m²) para a Ashrae, Carrier e Modelo) do que para o solstício de Verão (346 W/m²; 195 W/m²; 373 W/m²) para a Ashrae, Carrier e Modelo). Uma das principais razões para que aconteça este comportamento contraditório nos dois solstícios deve-se à diferença de altura do Sol encontrada nessas épocas do ano. No Inverno o percurso do Sol é maior portanto a altura solar é menor e uma superfície vertical virada a sul, recebe os raios solares durante mais tempo que uma com qualquer outra orientação. No Verão o tempo de

insolação de uma superfície vertical orientada a sul é menor do que no Inverno, ao mesmo tempo que o sol está mais alto. Portanto, para a superfície horizontal a latitude (40°N), num solstício de Verão obtém-se maiores valores de radiação incidente numa superfície horizontal (0°) enquanto em uma superfície vertical é no solstício de Inverno que se tem valores maiores. Após a validação do modelo, estudou-se quais as implicações da variação da latitude mantendo o mesmo ângulo de inclinação do colector solar (90°), isto é, usou-se a latitude de referência 40°N e a latitude 38°N do colector em estudo. Não se verificou valores muito discrepantes pois trata-se de latitudes muito idênticas. Com a variação da latitude 40°N para 38°N, para ambos os solstícios a radiação incidente média é sempre inferior (Solstício de Verão - 40°N: 263 W/m², 38°N: 249 W/m²; Solstício de Inverno - 40°N: 631 W/m², 38°N: 589 W/m²). Pode-se verificar que a radiação na superfície vertical no solstício de Verão é menor em relação ao solstício de Inverno. Apesar de valores muito aproximados pode-se observar que no solstício de Inverno a radiação na superfície inclinada no modelo para uma latitude de 40°N é ligeiramente maior que para uma latitude de 38°N. O mês de Junho é o que tem o valor de insolação mais baixo precisamente por coincidir com a época do ano em que a altura solar é maior, pois nesta altura o sol encontra-se sobre o trópico de caranguejo afastado do equador.

Outra análise efectuada foi a influência do ângulo de inclinação do colector solar, o ângulo em estudo, 35°, e os de referência 0° e 90°, tendo sido realizado este estudo para a latitude de 38°N. Verificou-se que para o solstício de Verão à medida que se diminui o ângulo de inclinação do painel tem-se um valor de insolação maior, o que não acontece para o solstício de Inverno em que se verifica o oposto (Solstício de Verão - 0°: 679 W/m², 35°: 667 W/m², 90°: 250 W/m²; Solstício de Inverno - 0°: 328 W/m², 35°: 593 W/m², 90°: 590 W/m²). Dos três ângulos estudados, o que é considerado óptimo é de 35° para uma latitude de 38°N. Constata-se que ângulos superiores a 35° favorecem o Inverno e ângulos inferiores a 35° favorecem o Verão.

Para além do que foi estudado a nível de parâmetros após verificada algumas das influências que conduzem a diferentes valores de insolação no colector solar achou-se interessante verificar a variação da transferência de calor, no colector instalado, ao longo de um dia típico. Para o efeito analisou-se os valores de eficiência do colector solar térmico, tendo-se verificado que a eficiência é máxima para o intervalo das 13-14h, e mínimo no intervalo das 7-8h. A razão para verificar esta diferença de eficiência

é a radiação, pois é no pico do dia que há maior radiação solar daí haver um maior valor de potência em que por sua vez resulta de uma eficiência maior. Com o modelo de radiação implementado e tendo em conta a eficiência do colector solar instalado foi possível validar os resultados do modelo com os valores experimentais, obtendo para efeito comparativo a previsão do valor de temperatura à saída do painel. A primeira análise observada foi que o valor de temperatura da água da rede assumido no programa *Solterm* difere dos valores experimentais obtidos (Anexo F). Verificou-se que a temperatura máxima ao longo do ano medidos na instalação é de 27,56 °C, para o mês de Agosto e a mínima de 14,97 °C para o mês de Janeiro. Em relação aos valores do programa *Solterm* são de 19 °C para o mês de Agosto e 13 °C para o mês de Janeiro. Uma explicação para estas discrepâncias de valores entre o *Solterm* e os valores medidos na instalação deve-se ao facto da sonda de temperatura estar localizada dentro do edifício, mais concretamente na sala técnica, promovendo um ligeiro aquecimento da água comparativamente se esta estivesse no exterior do edifício. Relativamente ao valor previsível da temperatura à saída do painel verificou-se algumas diferenças com a temperatura média lida pelo autómato. Em Agosto a temperatura lida foi de 44 °C e a temperatura obtida através do modelo foi de 29 °C, quanto a Janeiro a temperatura lida foi de 19 °C, enquanto a que foi prevista pelo modelo foi de 16 °C. Estas diferenças obtidas advêm de mais uma vez a sonda se localizar dentro da sala técnica, sendo mais expressiva a diferença quando as condições exteriores a nível de temperatura são elevadas. Outra razão é de não haver um caudal contínuo ao longo de todo o sistema, uma vez que a instalação foi programada para simular uma habitação familiar típica com consumos a determinadas horas. Esta descontinuidade de caudal promoverá a estagnação conduzindo a leituras de temperatura instantâneas quando ocorre a abertura da válvula e não quando o fluido se encontra em condições de estabilizadas.

Referências Bibliográficas

- [1] Renewable Energies Transfer System: *Artigo sobre energia solar térmica*. [Online]. Disponível em: <http://www.rets-project.eu>. [Acedido em 12 de Novembro de 2014].
- [2] Cordeiro, J., Agência Nacional para a cultura científica e tecnológica: *O Pireliofo*. [Online]. Disponível em: <http://www.cienciaviva.pt> [Acedido em 12 de Novembro de 2014].
- [3] Borges, Duarte de Bragança – “*Avaliação do impacto do solar térmico para produção de AQS e apoio à Climatização no âmbito da nova Regulamentação*” - Relatório do Projecto Final do MIEM - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (Julho 2008).
- [4] Água Quente solar: Apresentação da Iniciativa Pública “*Água Quente Solar para Portugal*”. [Online]. Disponível em: <http://www.aguaquentesolar.com/publicacoes> [Acedido em 12 de Novembro de 2014].
- [5] Associação Empresarial Portuguesa: *Casos de utilização de energias renováveis. Futur-Compet, Competências empresariais para o Futuro*. [Online]. Disponível em: <http://futurcompet.aeportugal.pt/Documentation/EnergiasRenovaveis.pdf>. [Acedido em 12 de Novembro de 2014].
- [6] Instituto Tecnológico metalomecânico: *Informe Técnico-Divulgativo sobre Energia Solar, Térmica Y Fotovoltaica, Noviembre 2008*. [Online]. Disponível em: http://www.aimme.es/archivosbd/observatorio_oportunidades/informe_energia_solar.pdf. [Acedido em 15 de Novembro de 2014].
- [7] Chen, C.J. (2011) “*Physics of Solar Energy*”, Canada, John Wiley & Sons.
- [8] Oliveira, P.J. (2014), “*Transmissão de calor- radiação*”, Departamento de Engenharia Electromecânica, UBI.
- [9] Departamento de Engenharia de Biosistemas da Escola Superior de Agricultura “*Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo: Capítulo 4: Outras leis da radiação*”.
- [10] Bahia, Maria Fernanda, Porto 2003 “*Protecção Solar*”, Editora UP.

- [11] Newport Experience- *Solutions: Introduction to Solar Radiation- Basics of solar radiation*. [Online]. Disponível em: <http://www.newport.com/Introduction-to-Solar-Radiation/411919/1033/content.aspx>. [Acedido a 22 de Novembro de 2014].
- [12] M.A. Varejão. Silva, Recife, *Meteorologia e Climatologia*, 2006.
- [13] Energia Solar Térmica- *Mudanças Climáticas e as suas consequências*. [Online]. Disponível em: <http://www.ebah.pt/content/ABAAAE2mYAF/>. [Acedido a 25 de Novembro de 2014].
- [14] GreenPro, (Janeiro 2004), “*Energia fotovoltaica: Manual sobre tecnologias, projecto e instalação*”, *Portal-Energia*.
- [15] Bittencourt. L (2004)- “*Uso das cartas solares- directrizes para arquitectos*”, 4ª edição, Maceió, EdUFAL.
- [16] Electrónica: *Energia Solar*. [Online] Disponível em: <http://www.electronica-pt.com/energia-solar> [Acedido a 26 de Novembro de 2014]
- [17] Ciência Viva: *Concurso Solar Padre Himalaya, Guia 5: Relógios de Sol*. [Online] Disponível em: <http://www.cienciaviva.pt/rede/himalaya/home/guia5.pdf> [Acedido a 28 de Novembro de 2014]
- [18] Ciência Viva: Concurso Solar Padre Himalaya, Guia 2: *Conceitos Gerais de Heliotecnia*. [Online] Disponível em: <http://www.cienciaviva.pt/rede/himalaya/home/guia2.pdf> [Acedido a 28 de Novembro de 2014]
- [19] Nova Energia, Fórum de Discussão sobre: *Energias Renováveis e Alternativas: Orientação e Inclinação dos painéis solares*. [Online] Disponível em: <https://www.novaenergia.net/forum/viewtopic.php?t=16257> [Acedido a 30 de Novembro de 2014]
- [20] Szokolay.S.V., (2005) “*Solar Geometry*”- Passive and low Energy Architecture International Design tools and techniques, Australia, PleaNotes
- [21] Kalogirou,A.S.(2009). *Solar Energy Engineering Processes and Systems*. London, Elsevier.
- [22] Goswami,D.Y.; Kreith, F.;Kreider,J.F.(2000). *Principles of Solar Engineering*, second edition, Taylor & Francis.

- [23] Claridge,D.E., Rock.B.A, Underwood,T.D. e Woodford.M.W. (2001), “*Handbook Fundamentals*”, America, Ashrae.
- [24] Duffie, J.A., Beckman,W.A., 2013, *Solar Engineering of Thermal Processes, second edition*, Wiley.
- [25] A. DAL PAI, J.F.ESCOBEDO, *Modelo de Estimativa da radiação solar difusa na equipartição instantânea, Departamento de Recursos Naturais- FCA/UNESP, Botucatu, SP.*
- [26] Sclar,J., Martins,D., Escobedo, J.F., (2004), *Estimativa da irradiação total sobre uma superfície inclinada a partir da irradiação global na horizontal*, Brasil.
- [27] ERAMAC- Maximização da Penetração das Energias Renováveis e Utilização Racional da Energia nas Ilhas da Macaronésia, (2005), *Avaliação do potencial energético solar na Região Autónoma da Madeira, IDMEC.*
- [28] LusoSol- Energia Solar Térmica: *Componentes do Sistema Solar para AQS.* [Online] Disponível em: <http://www.lusosol.com/funcionamento.html> [Acedido a 5 de Dezembro de 2014]
- [29] Steka Elektronik. Sistemas Solares Térmicos- *Regulador solar empleado para regulador de diferencia de temperatura y estaciones solares.* [Online] Disponível em: http://www.steca.com/index.php?Sistemas_solares_termicos [Acedido a 6 de Dezembro de 2014]
- [30] Instituto Superior Técnico, Solar térmico: *Uso de painéis solares térmicos*, Luiz Roriz. Disponível em: http://web.ist.utl.pt/luis.roriz/MyPage/Solar_Term.pdf [Acedido a 10 de Dezembro de 2014]
- [31] Distribuição de equipamentos de climatização, Thermital- Solar Térmico [Online] Disponível em: www.disterm.pt/files/_SOLAR_TERMICO_PT_4a0d52331dc64.pdf [Acedido a 13 de Dezembro de 2014]
- [32] Casa e Energia, Sistemas: Solar Termodinâmico ou Colector Solar. Disponível em: <http://casa-e-energia.blogspot.pt/2008/07/sistemas-solares-termodinmicos-vs.html>

- [33] Fernandes,C.A.O, Guaronghi.V.M, “*Energia Solar*”, Faculdade de Engenharia Mecânica. Disponível em:
<http://www.fem.unicamp.br/~em313/paginas/esolar/esolar.html>
- [34] Rommel, M., Kóvacs. P., Kramer.K., “*Solar Thermal Technology update*”, 2001.
- [35] E Costa, M. *A utilização de coletores solares no Centro Histórico do Porto*. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.
- [36] Roriz, L.F., Calhau,K.,Lourenço.F.,Rosendo,J., *Energia Solar em Edifícios*, Edições Orion, 2010.
- [37] Almeida,L.M.G., Perdigão, M.M.S.D., Francisco,N.M.T., *Painéis Solares activos*. Trabalho final de Mestrado, Departamento de Engenharia Electrotécnica da Universidade de Coimbra.
- [38] Cottret.N., Menichetti.E., “*Technical Study Report on: Solar Heat for Industrial Processes*”, State of the art in the Mediterranean region.
- [39] Instituto Superior Técnico, *Painéis Solares Planos*, Luiz Roriz. Disponível em:
http://web.ist.utl.pt/luis.roriz/MyPage/et_T24.html [Acedido a 10 de Janeiro de 2015]
- [40]_Aita.F., “*Estudo do desempenho de um sistema de aquecimento de água por energia solar e gás*”Dissertação de Mestrado de Engenharia, Porto Alegre 2006.
- [41] Educação Tecnológica- *Colector Solar*. [Online]
http://www.jorgeneto.eprofes.net/coletor_solar.html [Acedido a 20 de Janeiro de 2015]
- [42] Kalogirou, A. S., *Solar thermal collectors and applications*. Department of Mechanical Engineering, Higher Technical Institute, 2004.
- [43] LusoSol- *Energia Solar Térmica: Colectores Solares*. [Online] Disponível em:
<http://www.lusosol.com/colectores.html> [Acedido a 3 de Fevereiro de 2015]
- [44] Sinuta4Sun, *Renewable Energy Systems: Tubos de vácuo*. [Online] Disponível em:
http://www.sinuta4sun.pt/item_seccao.php?s=2&c=47 [Acedido a 5 de Fevereiro de 2015]

- [45] *Marla-Painel Solar tubos de vácuo heat pipe*. [Online] Disponível em: <http://www.marla.pt/paineis-vacu.php> [Acedido a 10 de Fevereiro de 2015]
- [46] *Água Quente Solar, Apresentação da Iniciativa Pública, Água Quente Solar para Portugal*. [Online] Disponível em: <http://www.aguaquentesolar.com/publicacoes/8/piscinas.pdf> [Acedido a 15 de Fevereiro de 2015]
- [47] Portal das Energias Renováveis “*Colectores Solares térmicos*”.
- Disponível em: http://energiasrenovaveis.com/images/upload/flash/anima_como_funciona/solartermico10.swf [Acedido a 15 de Fevereiro de 2015]
- [48] Técnico Instalador de Sistemas Solares Térmicos, *Energia solar térmica: Tipos de Sistemas*. [Online] Disponível em: <http://www.tisst.net/documentos/sistemas-solares-termicos/tipos-de-sistemas/> [Acedido a 16 de Fevereiro de 2015]
- [49] Proteu Solutions- *Catálogo 2016* [Online] <http://www.sanipower.pt/pdf/campanhas/solar.pdf> [Acedido a 5 de Janeiro de 2016]
- [50] Grupos de estudos de energia: *Como funciona o aquecimento solar*. [Online] Disponível em: http://www.pucminas.br/green/index_padrao.php?pagina=3480&PHPSESSID=0d4154e8e5e01c39db779d9b38750faf [Acedido a 3 de Março de 2015]
- [51] Volker, *Solar thermal water heating: Technology Fundamentals*. Disponível em: http://www.volker-quaschnig.de/articles/fundamentals4/index_e.ph [Acedido a 15 de Março de 2016]
- [52] Portal Metalica, *Aquecedor solar: utilização e vantagens*. [Online] Disponível em: <http://wwwo.metalica.com.br/aquecedores-solar-utilizacao-e-vantagens> [Acedido a 20 de Março de 2016]
- [53] Pires, Edgar Avelino Figueira - “*Redes de Águas e Instalações de Climatização e de Produção de Água Quente Sanitária*”- Dissertação final de mestrado de Engenharia Mecânica- Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.
- [54] Studio Tecnico Ing Marco Camilloni, *Solare Termico*. [Online] Disponível em: <http://www.studiocamilloni.it/approfondimenti/solare-termico> [Acedido a 15 de Abril de 2015]

- [55] JBtérmica, Distribuição térmica: *Sistema drain back*. [Online]
Disponível em: <http://www.jbtermica.pt/Produtos/Energia-solar/Roth/SISTEMAS/>
[Acedido a 16 de Abril de 2015]
- [56] Antunes, Sónia Cristina Martins-“ *Desempenho energético no Âmbito do Aquecimento Solar Térmico para as Condições de Utilização Recomendadas pelo RSECE/RCCTE*”- Dissertação final de mestrado de Engenharia Mecânica- Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- [57] Vulcano- *Soluções de água quente: Paineis Solares WarmSun*. [Online] Disponível em: <http://www.vulcano.pt/consumidor/productos/catalogo/> [Acedido a 5 de Maio de 2016]
- [58] Fraunhofer Institut Solare Energiesysteme: *Efficiency test according to EN 12975-2:2006. Vulcano FKC-1S/ FKC-1W*.
- [59] Vulcano-Soluções de água quente: *Tabela de preços Solar Térmico, 2014*. [Online] Disponível em: http://pre.pt/eurotubo/pdf/Produtos/Paineis%20Solares/Paineis%20Solares-Vulcano/Tabela/Tabela%20Precos%20Solar%20VULCANO%2010_2014.pdf
[Acedido a 10 de Maio de 2016]
- [60] Meteo Técnico, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Histórico. [Online] Disponível em: <http://meteo.ist.utl.pt/odata-past.php?period=daily¶m=temp>
[Acedido a 15 de Novembro de 2014]
- [61] Claridge,D.E., Rock.B.A, Underwood,T.D. e Woodford.M.W. (2001), “*Handbook Fundamentals*”, America, Ashrae.
- [62] Vilaplana, J.M, Creus, J.A (1980), “*Manual de Aire Acondicionado- Handbook of air conditioning system design*”, Espanha, Marcombo.
- [63] Claridge,D.E., Rock.B.A, Underwood,T.D. e Woodford.M.W. (1997), “*Handbook Fundamentals*”, America, Ashrae.
- [64] Cunha, Márcio Manuel Ferreira, Vãos Envidraçados- “*Geometria de Insolação- Otimização do Dimensionamento de Elementos de Protecção Solar*”. Tecnologia de Fachadas, Mestrado em Construção de Edifícios, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

- [65] Gonçalves, H., Graça, J.M., *Laboratório Nacional de Energia e Geologia, INETI: Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal*. [Online] Disponível em: <http://www.lneg.pt/download/4117/Conceitos%20Bioclim%C3%A1ticos.pdf> [Acedido a 5 de Maio de 2015]
- [66] Aprende Geografia: Unidade 3- *Os recursos Naturais de que a população dispõe: usos, limites e potencialidades. A Atmosfera e a radiação solar*. [Online] Disponível em: http://aprendegeografia.no.sapo.pt/recursos_radiacao_solar.html [Acedido a 10 de Maio de 2015]
- [67] Instituto Superior Técnico, *Concentradores Solares*, Luiz Roriz. [Online] Disponível em: http://web.ist.utl.pt/luis.roriz/MyPage/et_T25.html [Acedido a 15 de Maio de 2015]
- [68] Costa, J.C., Lebeña, E.P., Sociedade Portuguesa de Energia Solar, *Instaladores de Equipamentos Solares Térmicos- Conversão Térmica da Energia Solar*. [Online] Disponível em: http://www.disterm.pt/files/_Manual_Instaladores_488dd9566d27f.pdf [Acedido a 20 de Maio de 2015]
- [69] Avelino, H.T., Pires, A.C., (2002), *“Tabelas de Tecnologia Química”*, Departamento de Engenharia Química, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- [70] Antunes, Sónia Cristina Martins- *“ Desempenho energético no Âmbito do Aquecimento Solar Térmico para as Condições de Utilização Recomendadas pelo RSECE/RCCTE”*-ANEXO D. Dissertação final de mestrado de Engenharia Mecânica- Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- [71] Energias Renováveis em Casa- *Legionella* [Online] Disponível em: https://energias-renovaveis-emcasa.pt/solar_termico/b/especialistas/archive/2015/10/16/legionella-em-acumuladores [Acedido a 10 de Junho de 2016]
- [72] SfInternational, *Products:Traps*. Disponível em: <http://sfinternational.com.br/produtos/purgadores> [Acedido a 6 de Outubro de 2015]

[73] Técnico Instalador de Sistemas Solares Térmicos, *Energia solar térmica: Tubagens*
Disponível em: <http://www.tisst.net/documentos/sistemas-solares-termicos/tubagens/> [Acedido a 8 de Outubro de 2015]

Anexo A - Outros equipamentos e acessórios

Nestes sistemas de circulação há diversos acessórios e equipamentos a ter em conta para um óptimo funcionamento de um sistema solar térmico. Embora pareça tratar-se de elementos pequenos, são estes acessórios que regulam, monitorizam e permanecem o sistema activo.

- **Válvulas**

Existem diversos tipos de válvulas, estas podem ser de retenção, segurança, corte, 3 vias e misturadora termostática.

Uma válvula de segurança tem como objectivo assegurar que determinado nível de pressão interior não seja superior à pressão atmosférica, e assim proteger mecanicamente a tubagem ou o equipamento a instalar. Deve ser instalada no retorno do fluido junto ao vaso de expansão e na entrada de água fria nos depósitos [46].



Figura A. 1 Válvula de segurança [46].

As válvulas de retenção destinam-se a permitir a circulação do fluido em uma só direcção. Têm as aplicações mais diversas como na saída dos tanques de armazenagem (para impedir o esvaziamento, quando se efectuar o enchimento através do nível inferior), a saída da flange de descarga das bombas, na tubagem de compressão (para proteger o impulsor, a voluta e o sistema a montante dos efeitos de refluxo).



Figura A. 2 Válvula de retenção [46].

As válvulas de corte ou de passagem têm a finalidade de parar a passagem de fluído, de forma total ou parcial para causar quebra de pressão.



Figura A. 3 Válvula de corte [46].

Em relação às válvulas de três vias, estas permitem a circulação do fluido por vias alternativas, sendo úteis, por exemplo, nos casos em que os sistemas têm múltiplas aplicações (AQS e piscina ou aquecimento ambiente), ou quando se pretende fazer um *bypass* a um equipamento de energia de apoio.



Figura A. 4 Válvula de três vias [46].

A válvula misturadora termostática tem como principal função a medição, comparação e controlo da temperatura do processo dentro dos valores pré-fixados.

A válvula misturadora termostática é colocada à saída do depósito de acumulação permitindo que a mistura da água quente proveniente do depósito de acumulação (ponto 1) e a água fria da rede (ponto 2) atinja a temperatura desejada para consumo [46]. Este

tipo de válvulas deverá atingir temperaturas até 90°C, por forma a resistir aos ciclos de desinfecção a que as respectivas instalações estão sujeitas [46].



Figura A. 5 Válvula misturadora termostática [46].

Purgador

A purga pode ser automática ou manual e são instalados nos pontos mais altos do sistema a sua função é evacuar o ar existente no circuito [72]. O fluido deverá ser eliminado de forma rápida de maneira a evitar-se fenómenos de corrosão e perigo de desgaste da bomba circuladora.



Figura A. 6 Purgador [72].

Tubagem

Existem diversos tipos de materiais de tubagem, os mais comuns são os de inox, cobre, aço galvanizado, materiais plásticos e aço negro. O material mais usado para o transporte de calor em condutas entre o colector e o termoacumulador é o cobre por ser tecnicamente o mais adequado e economicamente competitivo [73]. Este material é resistente à corrosão, a sua maleabilidade e ductilidade permite uma cómoda manipulação e uma grande facilidade para realizar traçados complicados. Em relação aos tubos de aço inox a sua utilização tem sido progressiva ao longo dos anos pois apresenta uma boa resistência à corrosão e uma facilidade de corte. Os tubos de aço inox têm menos perdas de carga em linha permitindo o uso de diâmetros menores [73].

Bomba de circulação

Quando a circulação por termosifão não é possível-ou porque os colectores estão colocados a um nível superior ao do depósito, ou porque a diferença de densidades criada pelo aquecimento não é suficiente para vencer a resistência do atrito nas tubagens – recorre-se à circulação forçada do fluido por intermédio de uma bomba. Instala-se na parte mais baixa do circuito hidráulico:

- No tubo de ida para os colectores (circuito primário);
- No tubo de ida para o permutador (circuito secundário);
- Sempre entre válvulas de seccionamento sem manípulo [46].

É de salientar a extrema importância minimizar a utilização de energia eléctrica de forma a evitar-se o sobredimensionamento da potência da bomba [36]. Observando a figura pode-se constatar que este tipo de bombas pode ser instalado tanto na vertical como na horizontal, não esquecendo que o eixo do motor tem de ficar sempre na horizontal e a caixa de ligações eléctricas de fácil acesso (para cima ou para o lado). As setas representam o sentido do fluxo tanto na horizontal como na vertical [46].

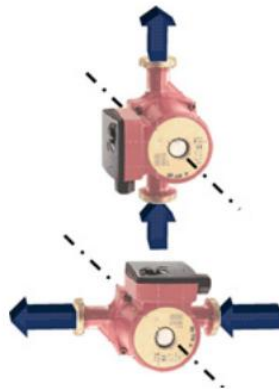


Figura A. 7 Bomba de circulação [46].

Vaso de expansão

O vaso de expansão deverá manter em prolongamento uma pressão constante na linha da aspiração da bomba. Sendo que ao mesmo tempo tem de garantir uma sobrepressão relativamente à atmosfera no topo da atmosfera [36].

Este acessório deve ser incluído numa instalação solar térmica com o propósito de absorver as dilatações da água ou o fluido de transferência térmico provocado pelo aquecimento.

A capacidade do vaso deve ser razoável para aguentar a expansão da água, na tubagem de ligação ao vaso de expansão nunca deve existir nenhuma válvula de seccionamento porque este tipo de válvulas altera a pressão.

Este acessório pode ser aberto ou fechado, mas neste caso interessa apenas os fechados, pois são os que se aplicam aos sistemas solares térmicos.

O vaso de expansão possui uma membrana que o divide a meio, de um lado tem o líquido do outro tem gás (geralmente azoto) que funciona como compensador da dilatação verificada [46].

O dimensionamento de um vaso de expansão segue sempre os mesmos princípios quer seja instalado na linha da aspiração da bomba ou entre esta e os painéis.

O primeiro passo é calcular o volume de água que deve de estar armazenado no interior do vaso quando a instalação está a trabalhar em regime nominal [36].



Figura A. 8 Vaso de expansão [46].

Manómetro

O manómetro tem por função a medição da pressão existente no circuito primário onde circula o fluido térmico.

Depósito de Acumulação

Os depósitos ou acumuladores são componentes vitais para o funcionamento de qualquer sistema solar térmico.

Perante a necessidade de armazenar o calor produzido durante o período de sol, para ser utilizado mais tarde, existem no mercado alguns tipos de depósitos, abordando-se apenas os adoptados em instalações de uso doméstico [36].

As principais características passam pelo isolamento, pela resistência mecânica e pela sua durabilidade. A eficiência de conversão de AQS passa pelo isolamento térmico existente do depósito de acumulação.

Para além disso podem ser agrupados segundo o material em que são construídos, a posição de instalação (vertical ou horizontal) e ainda segundo o tipo de permutador. Há duas geometrias para os depósitos de acumulação: depósitos com desenvolvimento horizontal e com desenvolvimento vertical. O uso de um depósito na horizontal não facilita a estratificação da água no seu interior, portanto é uma solução de baixa eficiência o que gere um alto custo. Um depósito vertical permite aproveitar de maneira correcta a estratificação da água no seu interior. É com certeza uma solução de alta eficiência térmica sendo que apresenta um elevado custo relativamente à horizontal [36]. O material do depósito de acumulação pode ser cobre, vitrificados, aço inoxidável, esmaltados ou revestidos em plástico. Os depósitos em aço inoxidável são os mais leves e com menores necessidade de manutenção comparativamente com os outros tipos.

Os depósitos de acumulação podem conter ou não permutadores de calor no seu interior. Se o sistema apenas servir para aquecimento de AQS e se for de um sistema directo sem apoio então não há nenhum permutador. Se for necessário apoio térmico quando do uso de AQS então existe permutador. No primeiro caso haverá um sistema com esquentador daí não ser necessário nenhum permutador [36].

Outro caso em específico que é o do trabalho em causa, é de um depósito de acumulação com uma serpentina. Este tipo de situação é ideal para habitações de grande dimensão, balneários ou restaurantes. Este tipo de acumuladores ligados directamente a uma caldeira, constituem a forma mais cómoda de gerar e conservar grandes quantidades de águas quentes sanitárias. Os permutadores são equipamentos destinados a transferir o calor captado pelos colectores entre o fluido a consumir, podendo ser internos ou externos. A eficácia do permutador deve ser tanto maior quanto possível para que o fluido térmico regresse aos colectores com uma temperatura baixa, não prejudicando o rendimento da instalação.

Segundo o tipo de permutadores pode-se classificar os acumuladores da seguinte forma:

- Acumulador com permutador de camisa;
- Acumulador com permutador de serpentina

Os mais simples em termos de funcionamento são os acumuladores com permutador de camisa uma vez que possuem nos limites laterais uma câmara onde circula a água aquecida. Este tipo de acumulador é utilizado para pequenos volumes, pode apresentar uma baixa eficiência, cerca de 35% [46]. A figura A.9 demonstra um de permutador de camisa.



Figura A. 9 Permutador de Camisa [46].

Os acumuladores com permutador de serpentina, podem ser de serpentina simples, dupla ou mesmo tripla, sendo os primeiros para armazenar apenas calor, enquanto os outros aquecem ainda a água na temperatura pronta a utilizar. Nas serpentinas duplas, a que se encontra na parte inferior acumula o calor proveniente dos colectores aquecendo a água nessa zona, enquanto a da parte superior que está ligada a uma caldeira termina de aquecer a água proveniente do fundo do acumulador e que a primeira serpentina não teve capacidade. Este é utilizado para pequenos e médios volumes de armazenamento, apresenta eficiências relativamente maiores 55% [46]. A figura A.10 representa um permutador de serpentina.



Figura A. 10 Permutador de serpentina [46].

Anexo B - Esquema de Princípio de funcionamento da instalação do ISEL

Anexo C - Radiação Solar diária durante o ano para latitude de 40°N, Ashrae

29.32

1997 ASHRAE Fundamentals Handbook (SI)

Table 18 Solar Irradiance (E_{NS}) and Solar Heat Gain Factors (SHGF) for 40° North Latitude

Date	Solar Time	Direct Normal W/m ²	Solar Heat Gain Factors, W/m ²																Solar Time	
			N	NNE	NE	ESE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW		Inc.
Jan	8	446	17	17	55	223	330	417	420	358	236	68	17	17	17	17	17	17	44	4
	9	753	37	37	41	233	485	648	706	658	504	280	42	37	37	37	37	37	172	3
	10	865	51	51	51	97	390	627	761	776	671	460	161	53	51	51	51	51	303	2
	11	912	59	59	59	62	193	493	699	796	769	623	372	89	59	59	59	59	390	1
	12	926	62	62	62	62	96	283	563	739	802	739	563	283	66	62	62	62	419	12
HALF DAY TOTALS			194	194	231	627	1425	2315	2851	2941	2565	1770	860	318	196	194	194	194	1117	
Feb	7	173	6	10	71	127	180	167	150	107	43	6	6	6	6	6	6	6	11	5
	8	691	33	33	158	407	576	651	628	504	296	56	33	33	33	33	33	33	136	4
	9	856	52	52	70	337	587	738	773	688	496	209	55	52	52	52	52	52	252	3
	10	926	65	65	67	155	449	666	777	768	640	408	120	66	65	65	65	65	450	2
	11	957	73	73	73	77	224	503	690	768	729	579	325	86	73	73	73	73	538	1
HALF DAY TOTALS			266	271	478	1139	2042	2887	3307	3201	2590	1601	789	360	269	276	266	266	1729	
Mar	7	540	27	92	295	440	514	509	425	271	69	26	26	26	26	26	26	26	83	5
	8	789	50	57	288	533	686	731	664	494	212	54	50	50	50	50	50	50	267	4
	9	888	67	70	147	428	639	749	743	624	404	127	69	67	67	67	67	67	450	3
	10	937	80	80	85	225	482	653	722	682	538	299	91	80	80	80	80	80	587	2
	11	960	88	88	88	94	247	475	623	672	622	473	244	94	88	88	88	88	672	1
HALF DAY TOTALS			358	439	953	1775	2624	3261	3425	3052	2189	1269	693	416	359	357	357	357	2409	
Apr	6	282	36	144	228	275	279	241	164	56	35	15	15	15	15	15	15	15	34	6
	7	651	50	223	442	583	633	588	451	235	51	45	45	45	45	45	45	45	193	5
	8	754	69	140	402	600	705	703	593	391	130	69	67	67	67	67	67	67	389	4
	9	864	84	91	253	488	637	690	640	493	260	91	84	84	84	84	84	84	557	3
	10	901	96	99	117	291	480	589	608	538	380	177	101	96	96	96	96	96	684	2
HALF DAY TOTALS			486	835	1579	2189	3018	3312	3133	2464	1538	935	628	495	467	464	463	463	3018	
May	5	3	1	2	3	3	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
	6	452	113	284	403	458	445	363	225	56	33	33	33	33	33	33	33	33	96	6
	7	681	89	320	520	638	658	579	412	172	63	59	59	59	59	59	59	59	275	5
	8	787	86	230	470	629	693	654	518	294	92	80	80	80	80	80	80	80	460	4
	9	843	99	131	330	517	620	631	530	382	168	100	96	96	96	96	96	96	616	3
HALF DAY TOTALS			679	1274	2100	2816	3228	3229	2775	1895	1128	779	629	568	553	550	549	552	3414	
Jun	5	68	32	54	68	70	63	46	20	5	4	4	4	4	4	4	4	4	8	7
	6	488	150	329	450	501	478	380	222	53	39	39	39	39	39	39	39	39	126	6
	7	681	118	355	543	647	654	562	385	145	68	65	65	65	65	65	65	65	306	5
	8	776	94	268	492	632	680	626	480	252	93	85	85	85	85	85	85	85	483	4
	9	829	105	160	358	524	606	601	507	332	142	104	100	100	100	100	100	100	633	3
HALF DAY TOTALS			799	1482	2314	2967	3274	3150	2579	1649	965	743	642	602	592	588	587	594	3550	
Jul	5	7	3	5	7	7	6	5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	7
	6	434	116	281	395	447	433	352	216	55	34	34	34	34	34	34	34	34	100	6
	7	656	95	321	513	625	643	564	400	166	66	62	62	62	62	62	62	62	278	5
	8	762	90	236	468	620	680	639	505	285	94	83	83	83	83	83	83	83	459	4
	9	818	102	138	333	513	630	618	537	371	165	104	99	99	99	99	99	99	611	3
HALF DAY TOTALS			705	1286	2102	2791	3180	3364	2706	1842	1110	783	643	586	572	568	567	570	3395	
Aug	6	255	38	137	214	256	259	223	151	52	18	17	17	17	17	17	17	17	38	6
	7	603	55	223	426	557	602	557	426	222	55	49	49	49	49	49	49	49	196	5
	8	747	75	149	397	584	681	675	569	373	128	74	72	72	72	72	72	72	386	4
	9	819	89	97	259	481	621	669	618	475	251	97	89	89	89	89	89	89	549	3
	10	857	102	105	126	294	472	573	589	519	367	175	107	102	102	102	102	102	674	2
HALF DAY TOTALS			518	860	1571	2138	2528	2195	3014	2370	1485	932	647	523	496	492	492	492	2982	
Sep	7	471	28	87	265	385	480	456	381	244	66	27	27	27	27	27	27	27	80	5
	8	725	52	61	275	504	646	689	626	467	224	57	52	52	52	52	52	52	258	4
	9	830	71	73	148	413	613	717	712	599	390	129	73	71	71	71	71	71	434	3
	10	881	84	84	89	224	468	630	696	658	521	293	95	84	84	84	84	84	567	2
	11	904	92	92	92	99	245	463	604	652	603	461	242	99	92	92	92	92	650	1
HALF DAY TOTALS			374	447	917	1683	2483	3091	3266	2917	2119	1250	699	432	376	373	373	373	2329	
Oct	7	152	6	10	64	113	142	148	132	94	38	7	6	6	6	6	6	6	12	5
	8	643	35	37	155	387	545	615	592	475	279	56	35	35	35	35	35	35	136	4
	9	811	54	54	73	329	567	710	742	661	476	202	57	54	54	54	54	54	305	3
	10	884	67	67	70	157	439	646	752	742	619	385	119	69	67	67	67	67	443	2
	11	917	76	76	76	80	223	491	670	745	707	562	317	89	76	76	76	76	529	1
HALF DAY TOTALS			277	282	479	1105	1964	2770	3172	3075	2493	1555	780	369	279	277	277	277	1704	
Nov	8	429	17	17	55	217	339	404	406	346	228	66	18	17	17	17	17	17	44	4
	9	732	38	38	42	230	476	634	690	643	492	254	42	38	38	38	38	38	173	3
	10	846	52	52	52	99	385	616	748	762	658	451	159	54	52	52	52	52	303	2
	11	894	60	60	60	63	192	486	688	783	756	613	367	89	60	60	60	60	388	1
	12	907	63	63	63	63	67	280	535	728	789	728	535	280	67	63	63	63	417	12
HALF DAY TOTALS			197	197	235	623	1402	2271	2795	2802	2515	1737	849	319	199	197	197	197	1115	
Dec	8	279	9	9	29	129	212	259	264	230	157	52	10	9	9	9	9	9	20	4
	9	684	31	31	33	188														

Anexo E - Folha de Cálculo

(Apenas em Formato digital)

Anexo F - Solterm

O *Solterm* é um programa de análise de desempenho e pré-dimensionamento de sistemas solares térmicos e fotovoltaicos, especialmente ajustado às condições climáticas e técnicas de Portugal, que tem vindo a ser desenvolvido pelo INETI há alguns anos. A análise de desempenho de um sistema solar é feita via simulação energética em regime quase estacionário: isto é, são simulados os balanços energéticos no sistema em intervalos curtos (5 minutos), durante os quais se considera constante o estado do ambiente e o do sistema.

Nestas simulações são usadas informações sobre:

- ✓ Configuração / dimensionamento do sistema;
- ✓ Estratégias de controlo e operação;
- ✓ Radiação solar horizontal e temperatura ambiente em base horária;
- ✓ Obstruções, sombreamentos, albedo das redondezas, turbidez da atmosfera;
- ✓ Características técnicas dos componentes (colectores, armazenamento, etc.);
- ✓ Consumo (ou “carga”) do sistema em base horária média mensal.

As informações são armazenadas a partir de categorias, algumas em bancos de dados que podem ser geridos e expandidos pelo utilizador. O programa traz já consigo na instalação um conteúdo inicial nestes bancos de dados, em que se realçam os dados meteorológicos de cada concelho de Portugal e os dados dos colectores e “kits” de tecnologia solar térmica. No entanto os restantes bancos de dados (depósitos/permutadores, coletores, baterias,...) também já incluem um conteúdo inicial substancial. A partir dos resultados das simulações de um sistema é possível obter o seu pré-dimensionamento - aliás são fornecidas no programa algumas ferramentas de optimização automática sob vários critérios energéticos. O programa é de fácil compreensão e bastante intuitivo. O programa *Solterm* que é utilizado para validar os dados do modelo desenvolvido, apresenta resultados somente a nível mensal e anual.

Na figura 4. é apresentada a secção na qual é feita a escolha dos dados climáticos, em que concelho estará localizado o sistema. Automaticamente após a inserção da localidade este fornecerá a variação da irradiação solar na horizontal e a temperatura ambiente de todo o ano.

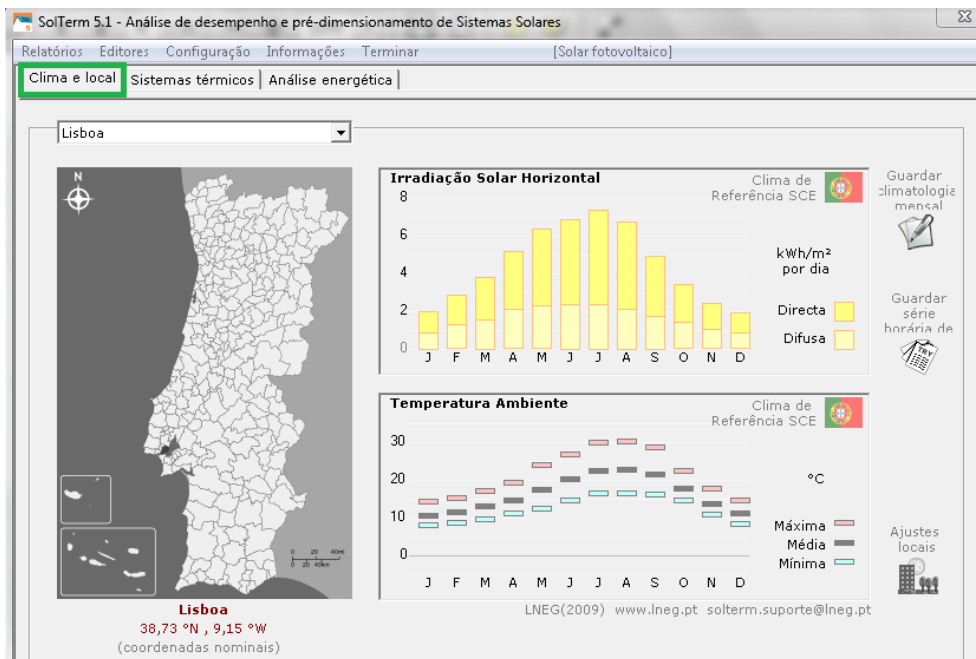


Figura F. 1 Escolha as condições climáticas no programa Solterm.

De seguida é necessário ajustar os locais, isto é definir a turbidez da atmosfera, albedo e definição de obstruções. Considerou-se uma zona urbana poluída, visto que a instalação se encontra em Lisboa, tal como verifica na figura F.1. Relativamente ao albedo definiu-se outras situações/valor típico de 20%, tal como se observa na figura F.2

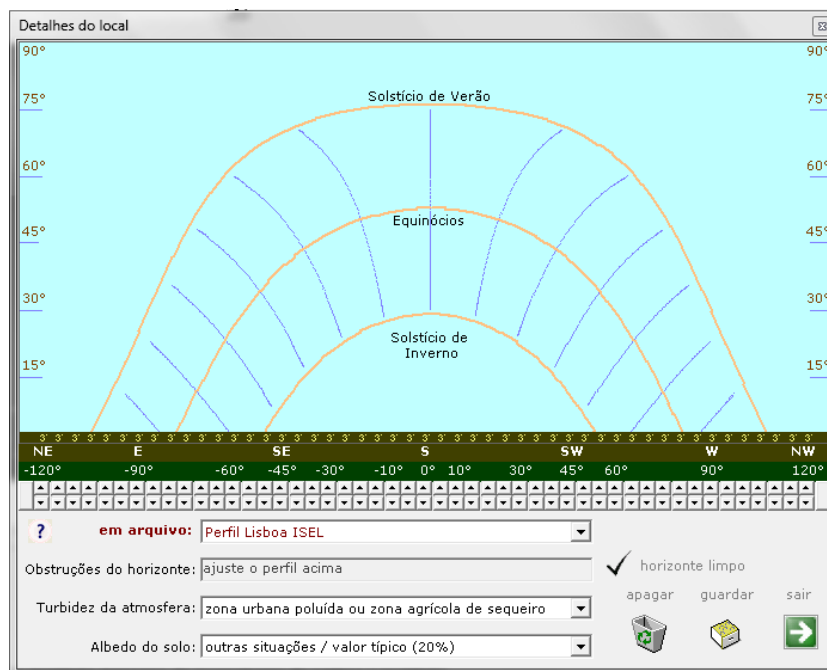


Figura F. 2 Detalhes do local.

Na figura F.3. define-se os perfis de consumo, bem como as temperaturas de entradas da água. O consumo deste sistema é de 200 L, portanto foi distribuído pelas respectivas horas do dia, de acordo com a abertura da válvula. Inicialmente assumiu-se os valores adquiridos pelo *Solterm*.

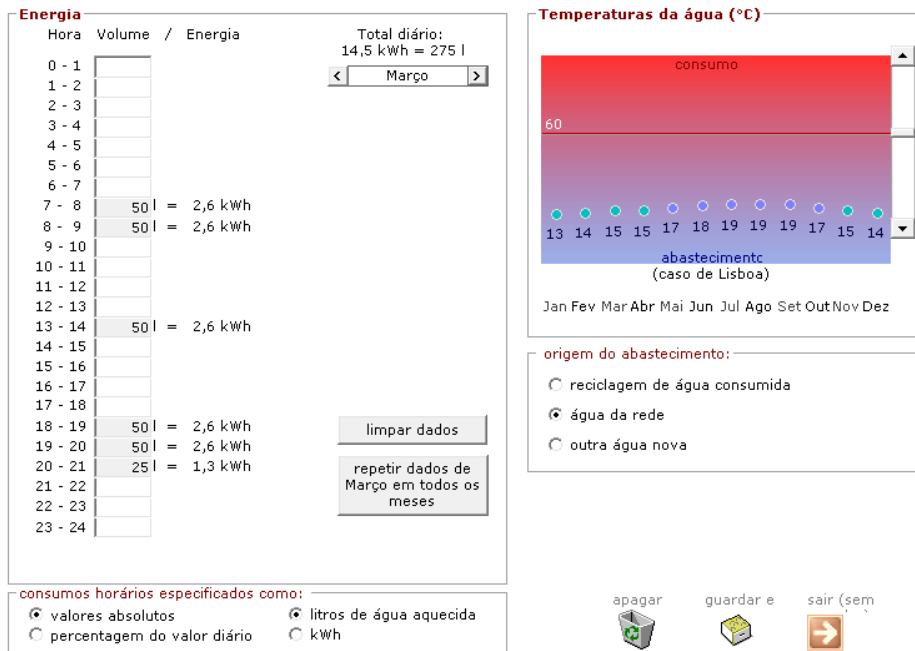


Figura F. 3 Perfil de consumo.

Foi feita uma segunda simulação em que são inseridos os valores de Temperatura de água de rede fornecidos pelo sistema de aquisição de dados.

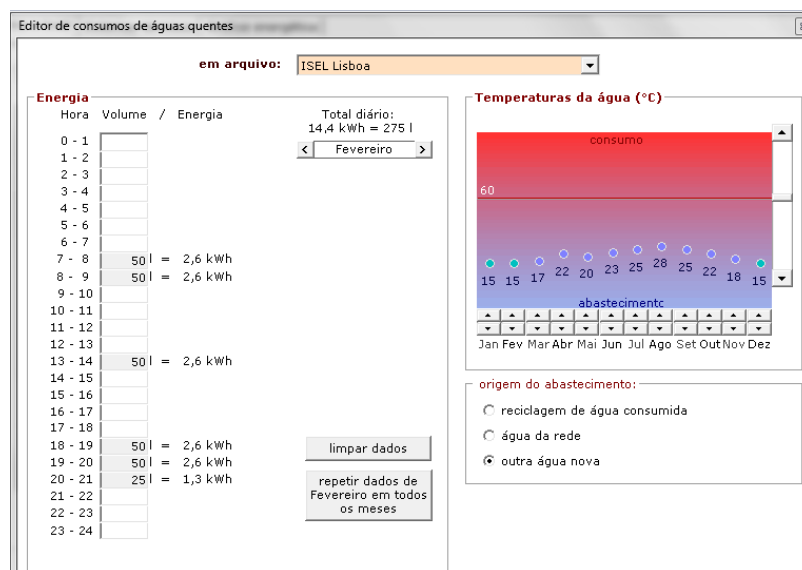


Figura F. 4 Escolha de perfil de consumo.

Neste ponto, “Sistemas térmicos” define-se as características do sistema em estudo neste caso em concreto trata-se de um colector de configuração com depósito, em que o equipamento é da Vulcano- FKC-1S/1W. Ao inserir-se estes dados o próprio programa fornece os valores de rendimento e a_1 e a_2 . Também neste ponto se indica a quantidade de colectores e a sua inclinação. Tal como se pode observar a figura F.5 demonstra as características do sistema de circulação forçada.

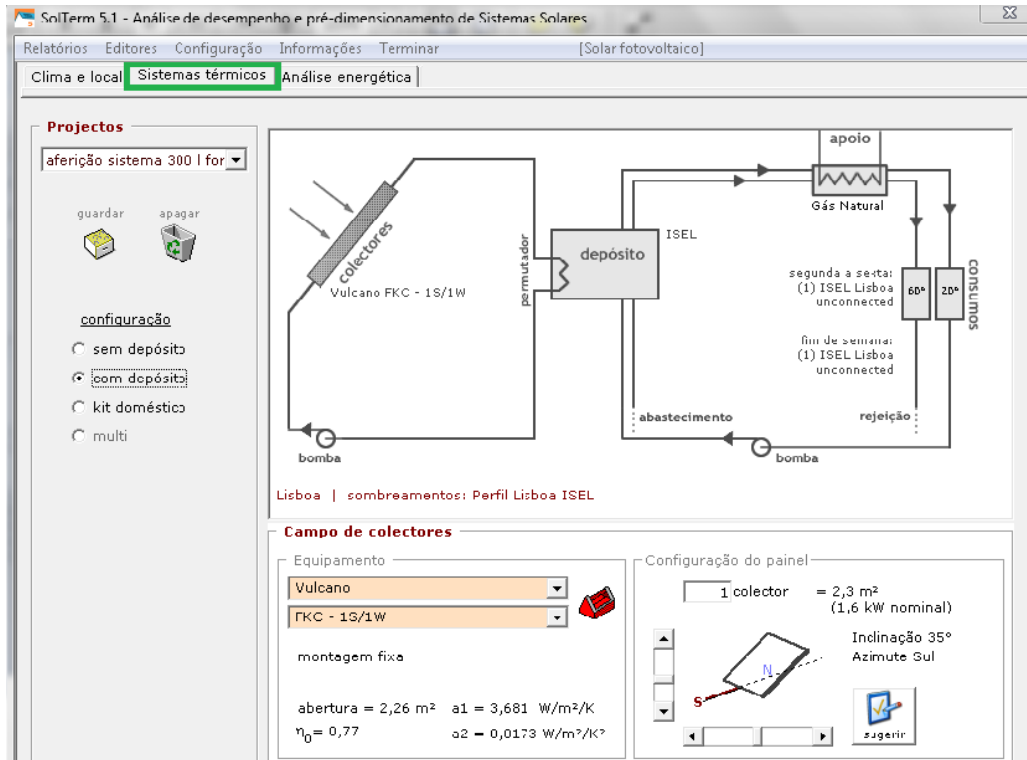


Figura F. 5 Ambiente de trabalho do programa Solterm e selecção de dados.

De seguida definiu-se as características do sistema de circulação forçada como se pode observar na figura F.6.

Editor de tanques de armazenamento / permutadores

em arquivo: ISEL

Permutador de calor

interno de camisa externo Eficácia 55%

Depósito

Localização: interior exterior

Posição: horizontal vertical existem deflectores internos

Material: cobre inox plástico metal vitrificado

Características geométricas: Volume = 190 l Área externa: 2,56 m² caso de cilindros

Coefficiente de perdas térmicas: Global: 3,1 W/K Específico: 1,195 W/m²/K sugerir

apagar guardar sair

Figura F. 6 Características do sistema de circulação forçada.

Por último, após a inclusão de todos os dados tem-se a análise energética da simulação do problema. A figura F.7. Mostra os valores fornecidos pelo programa *Solterm*.

SolTerm 5.1 - Análise de desempenho e pré-dimensionamento de Sistemas Solares

Relatórios Editores Configuração Informações Terminar [Solar fotovoltaico]

Clima e local | Sistemas térmicos | **Análise energética** | Análise económica | Benefícios ambientais

Lisboa

Desempenho do sistema térmico Projecto: aferição sistema 300 l forçado

	Rad.Horiz. kWh/m ²	Rad.Inclin. kWh/m ²	Desperdiçado kWh	Fornecido kWh	Carga kWh	Apoio kWh
Janeiro	63	102	,	110	446	336
Fevereiro	81	114	,	116	403	287
Março	118	144	,	138	426	289
Abril	156	166	,	144	365	221
Mai	197	191	,	174	397	223
Junho	207	191	,	161	355	194
Julho	228	215	,	185	347	162
Agosto	210	216	,	188	317	129
Setembro	148	174	,	161	336	175
Outubro	107	146	,	136	377	241
Novembro	73	116	,	114	403	289
Dezembro	59	101	,	108	446	338
Anual	1646	1876	,	1734	4617	2882

Fracção solar: 37,6%
Rendimento global anual do sistema: 41% Produtividade: 769 kWh/[m² colector]

Figura F. 7 Análise de dados.

