



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Construção e Avaliação Térmica de um Coletor Solar

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente na Especialidade de Tecnologia e Gestão do Ambiente

Autor

João Chaves Carvalho

Orientador

Professor Doutor António Rui de Almeida Figueiredo

Coorientador

Engenheiro Vítor Manuel Alves da Silva

Júri

Presidente Professor Doutor António Rui de Almeida Figueiredo

Vogal Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar

Vogal Professor Doutor José Joaquim da Costa

Coimbra, Julho, 2013

Pleasure in the job puts perfection in the work.
Aristotle

Agradecimentos

Expresso o meu agradecimento ao meu orientador, Professor Doutor Rui Figueiredo, pela oportunidade de ter realizado esta dissertação, e pela ajuda tanto na construção do coletor como pelas opiniões e sugestões que permitiram o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu coorientador, engenheiro Vítor Silva, pelo apoio, disponibilidade, incentivo, partilha de informação e correções prestadas para levar este trabalho a bom termo.

À Sara por todo o apoio, incentivo, amizade e paciência para me aturar estes anos todos e principalmente nesta última fase. Sem ela este trabalho não seria o que é.

Aos meus pais pela constante preocupação e apoio incondicional ao longo deste trabalho e destes anos académicos.

A todos os amigos e à Real República Palácio da Loucura que colaboraram, em diversas formas, para a realização e concretização deste trabalho e também pelo companheirismo durante o meu percurso académico.

A todos os que direta ou indiretamente fizeram de mim quem sou hoje e me ajudaram a concluir esta etapa da vida.

Resumo

A necessidade de um crescente recurso às energias renováveis é incontornável. As energias renováveis são fontes limpas de energia. A sua utilização permite reduzir os impactos ambientais, produzindo menos desperdícios, e contribui para um desenvolvimento sustentável da sociedade atual e futura.

A energia solar é a fonte mais abundante do nosso planeta e a fonte de todas as energias. As principais formas da energia solar são o calor e a luz. O aproveitamento da energia para aquecimento do ar é obtida a partir de coletores solares térmicos. Esses coletores são utilizados para diversas finalidades como climatização e secagem.

A montagem experimental de um coletor solar para aquecimento de ar foi concebida em Coimbra com o objetivo de estudar o desempenho térmico do mesmo. É inovador pois apresenta baixo custo, simplicidade de construção e consiste na utilização de uma matriz porosa metálica como elemento absorvedor, a palha de aço, atravessada por um escoamento forçado de ar. Deste modo o coletor funcionará como um gerador de ar quente, com o intuito de vir a integrar um equipamento futuro, para a secagem de produtos agroalimentares.

A ideia principal é estudar as relações entre o comportamento térmico do coletor, a radiação solar e a diferença de temperaturas, sendo fruto de reflexão a possível diminuição de perdas pela cobertura superior do coletor e a maximização da extração de calor da matriz, melhorando assim o rendimento térmico.

De acordo com os resultados obtidos nos ensaios realizados o coletor apresenta valores para aquecimento de ar bastante satisfatórios, sendo capaz de aumentar a temperatura em aproximadamente 45°C. O rendimento térmico médio situa-se pelos 29%, sendo possível melhorá-lo efetuando algumas alterações ao nível da constituição e da inclinação do coletor.

Palavras-chave: Energia Solar, Coletor Solar, Secador Solar, Matriz Porosa Metálica, Palha de Aço, Rendimento Térmico.

Abstract

The need of an increasing resource to the renewable energy is inevitable. Renewable energies are clean energy sources. Its use reduces the environmental impact, producing less waste and it contributes to a sustainable development of the current and future society.

Solar energy is the most abundant source of our planet and the source of all energies. The main ways of solar energy are heat and light. The use of the energy for heating the air is obtained from solar thermal collectors. These collectors are used for various purposes such as air conditioning and drying.

The experimental setup of a solar collector for heating the air was designed in Coimbra with the aim of studying its thermal performance. It is highly innovative because it has low cost, simplicity of construction and it consists in using a metal porous matrix as an absorber, steel wool, crossed by a forced flow of air. Thus the collector will work as a hot air generator, in order to integrate a future equipment, for the drying of agricultural food products.

The main idea is to study the relationship between the thermal performance of the collector, the solar radiation and the temperature difference, being the result of reflection the possible reduction of loss from the top cover of the collector and the maximizing heat extraction from the matrix, thus improving the thermal efficiency.

According to the results obtained in the tests performed the collector shows values for heating the air satisfactory, being able to increase the temperature at approximately 45°C. The average thermal efficiency lies by 29%, being possible to improve it by making some changes in the constitution and the slope of the collector.

Keywords Solar Energy, Solar Collector, Solar Dryer, Metal Porous Matrix, Steel Wool, Thermal Efficiency.

Índice

Índice de Figuras	v
Índice de Tabelas	v
Simbologia	vi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento e Motivação	1
1.2. Revisão Bibliográfica	2
1.3. Objetivos	5
1.4. Estrutura da Dissertação	5
2. ENERGIA SOLAR	6
2.1. Energia Solar em Portugal	7
3. PRINCÍPIOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	9
3.1. Condução	9
3.2. Convecção	10
3.3. Radiação	12
4. COLETORES SOLARES	14
4.1. Coletor Solar Com Matriz Porosa	15
4.2. Aplicações	16
4.2.1. Secadores Solares	17
5. COLETOR SOLAR EM ESTUDO	22
5.1. Enquadramento	22
5.2. Descrição do Coletor	23
5.3. Instrumentação e Ensaio Experimentais	27
5.4. Resultados e Discussão	30
6. CONCLUSÕES	38
6.1. Trabalhos Futuros	39
Referências Bibliográficas	41

Índice de Figuras

Figura 1. Distribuição da irradiação solar horizontal na Europa.....	7
Figura 2. Distribuição da irradiação solar horizontal em Portugal.....	8
Figura 3. Tipos de coletores solares	14
Figura 4. Classificação dos secadores solares	20
Figura 5. Estrutura do coletor com os deflectores	24
Figura 6. Esquema ilustrativo do coletor solar (vista em planta)	24
Figura 7. Enchimento do coletor com palha de aço	25
Figura 8. Ventiladores	27
Figura 9. Coletor solar	27
Figura 10. Interface <i>PICO TC-08</i>	28
Figura 11. Esquema representativo das zonas de colocação dos termopares no coletor e do piranómetro.....	28
Figura 12. Seccção de saída.....	29
Figura 13. Medidor multifunções com anemómetro integrado	29
Figura 14. Variação das temperaturas e da radiação ao longo do dia (E1)	31
Figura 15. Variação das temperaturas e da radiação ao longo do dia (E2)	32
Figura 16. Variação das temperaturas e da radiação ao longo do dia (E3)	32
Figura 17. Perfil de temperatura do ar dos três ensaios ao longo do coletor.....	33
Figura 18. Diferença de temperaturas e radiação ao longo do dia	34
Figura 19. Efeito da radiação solar na diferença de temperaturas (E1).....	34
Figura 20. Rendimento térmico e radiação solar em função da hora do dia (E1)	35
Figura 21. Rendimento térmico e radiação solar em função da hora do dia (E3)	36
Figura 22. Efeito da radiação nas perdas térmicas (E1)	37

Índice de Tabelas

Tabela 1. Parâmetros físicos e termofísicos da palha de aço.....	26
Tabela 2. Dados dos ensaios realizados.....	30
Tabela 3. Resumo dos resultados	37

Simbologia

A	Área de transferência de calor.....	$[m^2]$
A_c	Área do coletor.....	$[m^2]$
A_{transf}	Área de transferência de calor da palha de aço.....	$[m^2/m^3]$
c_p	Calor específico do fluido.....	$[kJ/kg.K]$
d_c	Diâmetro da secção de saída do coletor.....	$[m]$
$d_{médio}$	Diâmetro médio da palha de aço.....	$[m]$
dT/dx	Gradiente da temperatura.....	$[°C/m]$
E	Emissividade da superfície.....	Adimensional
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção.....	$[W/m^2.°C]$
k	Condutividade térmica.....	$[W/m.°C]$
L	Espessura da camada do fluido.....	$[m]$
L_c	Comprimento característico.....	$[m]$
\dot{m}	Caudal mássico do ar.....	$[kg/s]$
Nu	Número de Nusselt.....	Adimensional
Pr	Número de Prandtl.....	Adimensional
\dot{Q}_c	Energia útil obtida pelo coletor.....	$[W]$
\dot{Q}_{cond}	Taxa de transferência de calor por condução.....	$[W]$
\dot{Q}_{conv}	Taxa de transferência de calor por convecção.....	$[W]$
\dot{Q}_{emit}	Radiação emitida por todas as superfícies reais.....	$[W]$
\dot{Q}_{rad}	Taxa de transferência de calor por radiação.....	$[W]$
\dot{q}_{cond}	Fluxo de calor por condução.....	$[W/m^2]$
\dot{q}_{conv}	Fluxo de calor por convecção.....	$[W/m^2]$
Re	Número de Reynolds.....	Adimensional
S	Radiação solar incidente no coletor por unidade de área....	$[W/m^2]$
T_a	Temperatura absoluta.....	$[°C]$
T_i	Temperatura de entrada no coletor.....	$[°C]$
T_o	Temperatura de saída do coletor.....	$[°C]$
T_s	Temperatura da superfície.....	$[°C]$
T_∞	Temperatura do fluido suficiente longe da superfície.....	$[°C]$
u	Velocidade do ar.....	$[m/s]$
V	Velocidade a montante.....	$[m/s]$
ΔT	Diferença de temperaturas através da parede.....	$[°C]$
Δx	Espessura da parede.....	$[m]$

Símbolos Gregos

α	Difusividade térmica.....	[m ² /s]
ε	Porosidade da palha de aço.....	Adimensional
η	Rendimento térmico do coletor.....	[%]
μ	Viscosidade dinâmica do fluido.....	[kg/m.s]
ν	Viscosidade cinemática do fluido.....	[m ² /s]
ρ	Densidade da palha de aço.....	[kg/m ³]
ρ_{ar}	Densidade do ar.....	[kg/m ³]
σ	Constante Stefan-Boltzmann.....	[W/m ² .K ⁴]

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento e Motivação

A importância deste estudo relaciona-se com um dos grandes desafios atuais do ser humano que é, sem dúvida, o abastecimento energético mundial.

O consumo de energia das fontes convencionais é muitas vezes irracional e desenfreado e por isso, o Homem enfrenta alguns problemas no que respeita ao abastecimento energético. Em primeiro lugar, estas fontes apresentam indícios de esgotamento. Paralelamente, causam desequilíbrios ecológicos como: poluição, chuvas ácidas e aquecimento global; levando a que o custo unitário da sua utilização e as crises energéticas aumentem substancialmente.

Segundo as estatísticas *BP Statistical Review of World Energy*, o consumo energético mundial durante o ano 2012 foi de 12476,6 Mtep. Cerca de 91% foi proveniente de fontes não renováveis, correspondendo a maior parcela ao petróleo com 33,1%. Aproximadamente 9% do consumo é derivado das energias renováveis, do qual 6,7% provêm da energia hídrica. Em Portugal as energias renováveis contribuem em cerca de 20% para o total do consumo de energia (BP, 2013).

A fonte de energia atual ainda é dominada pelos combustíveis fósseis. Os países da União Europeia são extremamente, e cada vez mais, dependentes da importação destes combustíveis (especialmente petróleo e gás) para os transportes e para a geração de eletricidade. As energias renováveis têm um enorme potencial para reforçar a competitividade industrial da Europa e mante-las na vanguarda dessa evolução é fundamental para a economia (Direção-Geral da Energia (Comissão Europeia), 2011).

Emerge assim a necessidade de um crescente recurso às energias renováveis de forma a colmatar os desequilíbrios enfrentados. Entre todas as fontes alternativas de energia usadas atualmente, pode-se considerar a energia solar como uma das mais promissoras porque é segura, limpa e gratuita, e apresenta um enorme potencial para ser utilizada em diversas aplicações como aquecimento de água, de ar e produção de eletricidade. Esta tem condições de se tornar uma solução com um custo competitivo para

minimizar significativamente o consumo das energias convencionais, através de uma fonte inesgotável e não poluente como é o Sol, promovendo assim um desenvolvimento sustentável.

Uma das formas de converter a energia solar em energia útil é através dos coletores solares. Estes são equipamentos que transformam a energia solar em calor. O calor, por sua vez, é transferido por convecção do absorvedor para o ar que circula no interior do coletor. São utilizados principalmente para fins domésticos, de secagem de produtos agroalimentares e para algumas aplicações industriais.

Henden *et al.* (2002), mencionou que a maior barreira para a introdução a larga escala de sistemas solares térmicos é o seu elevado custo em comparação com os sistemas de aquecimento convencionais. Os custos dos coletores têm vindo a ganhar mais importância, e a necessidade de coletores mais baratos é evidente. Baseado nesta ideia, este estudo pretende a construção de um coletor simples e de baixo custo que utiliza palha de aço, um material bastante acessível e económico, como elemento absorvedor.

1.2. Revisão Bibliográfica

Muitos trabalhos têm sido feitos em coletores solares para aquecimento de ar numa gama de temperaturas baixas a moderadas nos últimos anos com o objetivo de atingir maiores rendimentos.

Basicamente, existem dois tipos de coletores solares para o aquecimento de ar, cada um com diferentes características: os convencionais que possuem uma placa absorvedora que se encontra em cima e/ou em baixo do fluido; e os que têm uma matriz porosa absorvedora por onde circula o ar.

O grande problema deste tipo de aquecedores é a baixa condutividade térmica do ar que resulta numa pobre transferência de calor entre a placa de absorção e o ar que circula, conduzindo a um baixo rendimento do coletor (Garg *et al.*, 1991). Aldabbagh *et al.* (2010), também referem que as perdas térmicas e o coeficiente de transferência de calor dentro do coletor solar são os parâmetros mais importantes que afetam o rendimento do mesmo. Outros factores como por exemplo as dimensões do coletor, o tipo de absorvedor, o tipo de cobertura e o caudal mássico, também têm influência.

Diversos coletores foram estudados com diferentes configurações para

aumentar o coeficiente de transferência de calor entre o absorvedor e o ar e diminuir as perdas de calor do coletor.

As principais perdas térmicas deste tipo de coletores são encontradas à superfície da cobertura, enquanto que as perdas da base e das laterais do coletor são baixas quando são adequadamente isoladas. Para minimizar estas perdas e melhorar o rendimento, a colocação de um vidro adicional é recomendado (Prasad *et al.* 2009). Também foi introduzido o contra fluxo para minimizar estas perdas, no qual inicialmente o ar passa entre os vidros e depois é direcionado para o canal onde se encontra o elemento absorvedor (Mohamad, 1997; Jain e Jain, 2004).

Foram colocados alguns obstáculos e deflectores com diferentes formas e em diferentes posições para aumentar a área da placa absorvedora, melhorando assim o coeficiente de transferência de calor entre a placa e o ar (Romdhane, 2007). O mesmo investigador comparou coletores com ou sem deflectores, concluindo que os deflectores favorecem a transferência de calor no coletor, e conseqüentemente aumentam o rendimento do mesmo e também as temperaturas de saída. Garg *et al.* (1991), introduziram deflectores paralelos ao comprimento do coletor o que levou a um aumento da temperatura da saída. Hu *et al.* (2013), testou com diferentes números de deflectores, nenhum, três e nove, e mostrou que a distribuição da temperatura no coletor com nove é mais uniforme, mas apresenta uma maior temperatura média na superfície superior, o que resulta em maiores perdas convectivas. O coletor sem deflectores tem uma área de maior temperatura o que leva a ocorrerem mais perdas por radiação. Concluem que o coletor com três deflectores é o que tem maior rendimento. Esen (2008), afirmou que a inserção de obstáculos na placa também melhora o rendimento do coletor. El-khawajah *et al.* (2011), testaram coletores *double-pass* (coletor com dupla passagem de ar) com dois, quatro ou seis deflectores, e verificaram que a diferença de temperaturas entre o ar de entrada e de saída aumenta com o número de deflectores para o mesmo caudal mássico, e que essa mesma diferença diminui com o aumento do caudal mássico. O aumento do caudal também conduziu à melhoria do rendimento térmico sendo de 75,0%, 82,1% e de 85,9% para os coletores com dois, quatro e seis deflectores, respetivamente, com um caudal de 0,042 kg/s.

Por outro lado, diferentes formas de placas absorvedoras foram estudadas para melhorar o coeficiente de transferência de calor. Parker *et al.* (1993), propuseram uma placa absorvente ondulada em forma de V. Mohamad (1997), sugeriu a utilização de uma

matriz porosa absorvente. Kolb *et al.* (1999), propuseram uma matriz de metal como placa absorvente que melhora o desempenho térmico. Foi sugerido em coletores *double-pass*, inserir a placa absorvedora no meio do coletor para que haja uma passagem dupla de forma a que o ar possa circular em cima e em baixo dessa placa (Sopian, 1999; Naphon, 2005; Sopian, 2009). Naphon (2005), simulou numericamente as características da transferência de calor e o desempenho do coletor de placa plana *double-pass* com e sem meio poroso. Afirmou que o rendimento variou de 38% a 59% sem meio poroso, e de 42% a 70% com meio poroso com caudais mássicos entre 0,03 kg/s a 0,07 kg/s, respetivamente. Sopian *et al.* (1999), também constatou tal facto mas experimentalmente, concluindo que o rendimento do mesmo tipo de coletor com o meio poroso foi de 20% a 70% mais alta do que sem o meio poroso. Alvarez *et al.* (2004) e Ozgen *et al.* (2009), investigaram experimentalmente o efeito no rendimento utilizando latas de alumínio recicladas como placa absorvedora em coletores *single-pass* e *double-pass*, respetivamente. Afirmaram que, para além da redução no custo do coletor, esta configuração melhorou a eficiência do coletor através do aumento da velocidade do fluido e da melhoria do coeficiente de transferência de calor entre a placa e o ar. Mittal and Varshney (2006), utilizaram materiais porosos como telas de arames e matrizes de folhas cruzadas de alumínio na conduta do coletor para melhorar a eficiência do mesmo. Constataram que o meio poroso aumenta a turbulência do ar levando a um aumento do coeficiente de transferência de calor entre o mesmo e o meio. Outra vantagem referida com o uso destes materiais é a tendência para aumentar a superfície por unidade de volume. Sopian *et al.* (2009), efetuaram ensaios térmicos com palha de aço como material absorvedor, estudando também a diferença de coletores solares *double-pass* com e sem matriz porosa, concluindo que o coletor com a matriz porosa possui um rendimento térmico superior, a rondar os 60%-70%. Também foram sugeridos novos desenhos para os enchimentos do coletor usando duas camadas de malhas de arame com a placa plana. Este novo desenho melhorou o desempenho térmico, obtendo maiores taxas de transferência de calor para o ar e menos perdas por fricção, comparando com os coletores de placa plana convencionais. Consideraram o caudal mássico entre 0,01 kg/s e 0,037 kg/s e obtiveram rendimentos entre 58% e 81%, respetivamente (Klob *et al.*, 1999).

1.3. Objetivos

Esta dissertação tem como finalidade a construção de um coletor solar de baixo custo que tem como meio absorvedor uma matriz porosa metálica, e a avaliação do desempenho térmico do mesmo.

Para a caracterização do comportamento térmico é necessário avaliar o efeito que determinados fatores exercem no rendimento térmico do coletor, como a radiação solar e temperatura do ar. Posto isto, a análise da interferência dos fatores nomeados será também um objetivo fulcral durante este estudo.

1.4. Estrutura da Dissertação

Para além deste capítulo introdutório, esta dissertação está estruturada em mais cinco capítulos. No capítulo 2 é feita uma breve referência à energia solar, onde são apresentados os meios para o aproveitamento dessa energia, e no final é avaliado o potencial da energia solar no território português. O capítulo 3 aborda uma revisão teórica sobre os diferentes mecanismos de transferência de calor envolvidos na conversão de energia solar em energia térmica, da qual a sua compreensão é essencial para o estudo dos coletores solares. No capítulo 4 são identificados os diferentes tipos de coletores solares, destacando aquele que se encontra em estudo, e são apresentadas algumas das aplicações que estes proporcionam, nomeadamente a secagem solar. O capítulo 5 foca-se no coletor solar em estudo, nos materiais utilizados para a sua construção e nos equipamentos usados para a avaliação térmica do mesmo. São analisados ainda os ensaios experimentais efetuados. Por último, o capítulo 6 inclui as conclusões e os comentários finais resultantes deste estudo, incluindo algumas sugestões para desenvolvimento de trabalhos futuros.

2. ENERGIA SOLAR

A principal fonte de energia na Terra é o Sol, sendo este um recurso energético renovável, praticamente inesgotável e constante, quando comparado com a nossa escala temporal de existência neste planeta (DGEG, 2013).

Um corpo que emite radiação na gama do visível é chamado de fonte de luz. O Sol é obviamente a nossa principal fonte de luz. A radiação eletromagnética emitida por este corpo é conhecida como radiação solar (Çengel, 2003).

Segundo Kreith *et al.*, 1978 (citado por Kalogirou, 2004), a energia total emitida pelo Sol é de $3,8 \times 10^{20}$ MW, que é irradiada em todas as direções, sendo apenas $1,7 \times 10^{14}$ kW interceptada pela Terra. No entanto, desta pequena fracção estima-se que 30 minutos de radiação solar que é recebida pela Terra equivale ao consumo de energia mundial durante um ano.

A distribuição desta radiação incidente é alterada à medida que esta atravessa a atmosfera, atingindo a superfície terrestre em três componentes: radiação direta (atinge diretamente a superfície), radiação difusa (desviada em diferentes direções pelos componentes da atmosfera) e radiação refletida (refletida pelo solo e objetos circundantes). (Portal das Energias Renováveis, 2013).

A energia solar tem um grande potencial para aplicações a baixa temperatura, especialmente para secagem de produtos agrícolas. Na secagem e aquecimento, a energia solar é uma escolha ideal porque o ar quente pode ser utilizado diretamente, eliminando qualquer necessidade de um permutador de calor adicional no sistema térmico (El-Sawi *et al.*, 2010).

As formas de converter a radiação solar em energia, que possa ser aproveitada, podem ser passivas ou ativas. A forma de conversão passiva é muitas vezes baseada no projeto ideal de edifícios que captam a energia do Sol, permitindo assim reduzir a necessidade de luz artificial e de aquecimento. A forma de conversão ativa baseia-se na utilização de equipamentos que transformam a radiação solar em energia útil (Baños *et al.*, 2010). Por exemplo, é possível através do efeito fotovoltaico converter-se a radiação solar em energia eléctrica ou como neste estudo experimental, a conversão da energia solar em

energia térmica.

2.1. Energia Solar em Portugal

A grande dependência de Portugal de fontes de energia externa (algumas com efeitos nocivos no ambiente) e a crescente consciencialização de que não pode haver desenvolvimento sem qualidade ambiental, deverá orientar as opções energéticas do país não só para a diversidade das fontes de energia mas também para a maximização, sempre que possível, das potencialidades energéticas do território, nomeadamente das energias renováveis (Ramos e Ventura, 1997).

À medida que os combustíveis fósseis forem rareando e a sua utilização intensiva contestada, dados os custos ambientais que comporta, a tendência será para a maior e melhor utilização das energias alternativas (Ramos e Ventura, 1997).

Portugal é um dos países da Europa com maior disponibilidade de radiação solar por unidade de superfície. Uma forma de dar ideia desse facto é em termos do número médio anual de horas de Sol, que varia entre 2200 e 3000 horas para Portugal e, por exemplo, para Alemanha varia entre 1200 e 1700 horas (Portal das Energias Renováveis, 2013). Para constatar tal realidade, a seguinte imagem mostra a irradiação horizontal anual na Europa em kWh/m².

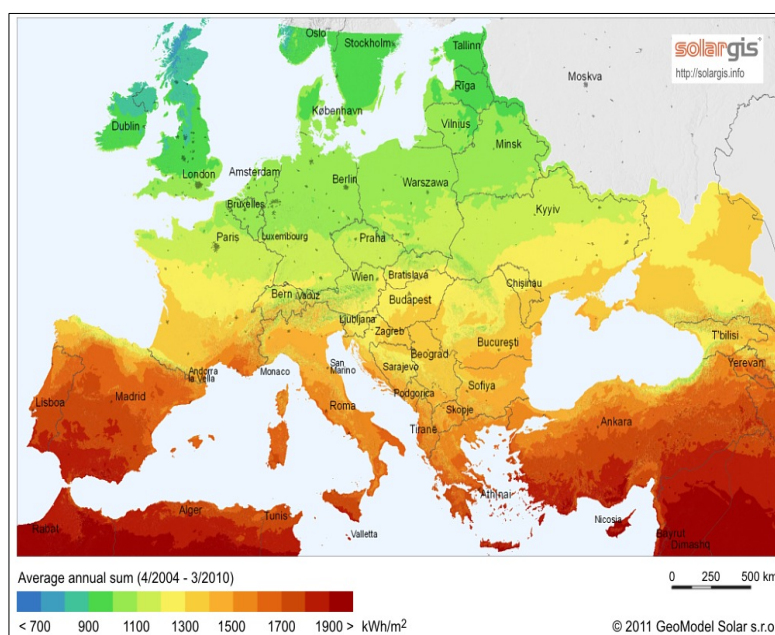


Figura 1. Distribuição da irradiação solar horizontal na Europa (SolarGIS, 2013)

Apesar de Portugal ser um dos países europeus com maior potencialidade para aproveitamento da energia solar, a disponibilidade desta energia apresenta fortes contrastes espaciais. A radiação global aumenta de norte para sul, em função da influência da latitude na altura do Sol, e do litoral para o interior devido à diminuição da nebulosidade, e os valores mínimos registam-se no noroeste, nas serras do Minho, com menos de 2000 horas/ano, sendo que os máximos são assinalados no Algarve oriental e nos sectores mais interiores do Alentejo com mais de 3000 horas/ano (Ramos e Ventura, 1997; DGEG, 2013). Na figura seguinte encontra-se a distribuição anual da irradiação solar horizontal em Portugal continental.

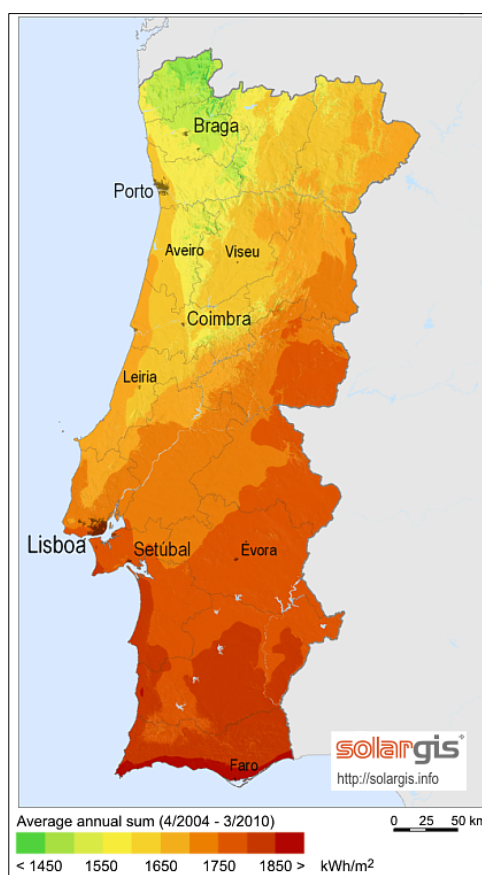


Figura 2. Distribuição da irradiação solar horizontal em Portugal (SolarGIS, 2013)

3. PRINCÍPIOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Ao longo deste capítulo abordar-se-á o conceito de calor e irão se apresentar os diferentes mecanismos de transferência de calor, baseados no livro “*Heat Transfer – A Practical Approach*” de Çengel, visto serem mecanismos essenciais para a compreensão do funcionamento de um coletor solar.

O calor é a forma de energia que pode ser transferida de um sistema para outro - ou entre partes de um mesmo sistema - devido à existência de uma diferença de temperaturas entre eles. A transferência de energia como calor ocorre sempre do meio com a temperatura mais elevada para o meio com a temperatura mais baixa. Essa transferência termina assim que os dois meios atingem a mesma temperatura, resultando num novo estado de equilíbrio. O calor pode ser transferido através de três diferentes mecanismos: condução, convecção e radiação. Os mesmos serão abordados nos seguintes subcapítulos.

3.1. Condução

A condução é a transferência de energia a partir das partículas mais energéticas de uma substância para as adjacentes menos energéticas como resultado das interações entre elas.

A condução pode ter lugar em sólidos, líquidos e gases. Nos gases e líquidos, a condução resulta das colisões e da difusão das moléculas nos seus movimentos aleatórios. No caso dos sólidos, deriva das vibrações das moléculas na rede e da energia transportada pela nuvem de electrões.

A velocidade de condução através de um meio depende da geometria deste, da sua espessura, das propriedades do material e da diferença de temperatura a que o meio está submetido.

A taxa de transferência de calor por condução (\dot{Q}_{cond}) através de uma camada plana é proporcional à diferença de temperatura ao longo da camada ($\Delta T = T_2 - T_1$) e à área de transferência de calor (A) mas é inversamente proporcional à espessura da camada (Δx), isto é:

$$\dot{Q}_{cond} \propto A \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

ou,

$$\dot{Q}_{cond} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

sendo a constante k a condutividade térmica do material, ou seja, é a capacidade que um material tem para conduzir calor.

No caso limite de a espessura da parede se aproximar do valor nulo ($\Delta x \rightarrow 0$), temos a forma diferencial, denominada por Lei de Fourier da condução térmica:

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

onde dT/dx [$^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ou K/m] é o gradiente da temperatura.

3.2. Convecção

A convecção é o mecanismo que envolve a transferência de energia térmica entre uma superfície sólida e o líquido ou o gás adjacente que está em movimento, e que envolve os efeitos combinados de condução e do movimento do fluido. Quanto mais rápido o movimento do fluido, maior será a transferência de calor por convecção. Na ausência de qualquer movimento do fluido, a transferência de calor entre uma superfície sólida e o fluido adjacente é por condução. A existência de movimento do fluido acelera a transferência por convecção mas complica a determinação das taxas de transferência de calor.

A convecção pode ser forçada quando o fluido é forçado a escoar sobre a superfície por meios externos como uma bomba ou um ventilador. Se o movimento do fluido é causado por forças de flutuação que são induzidas por diferenças de densidade devidas à variação da temperatura no mesmo, é chamada de convecção natural. A convecção também pode ser classificada como externa ou interna, dependendo se o fluido é forçado a fluir sobre uma superfície ou dentro de um canal.

Apesar da complexidade da convecção, a taxa de transferência de calor por convecção é proporcional à diferença de temperatura, e é expressa pela Lei de Newton do arrefecimento:

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_s - T_\infty) \quad (3)$$

em que h representa o coeficiente de transferência de calor por convecção; A é a área de superfície onde ocorre a transferência de calor por convecção; T_s é a temperatura dessa superfície; e T_∞ refere-se à temperatura do fluido que está suficientemente afastado da superfície. Note-se que à superfície, a temperatura do fluido é igual à temperatura da superfície do sólido.

Ao contrário da condutividade térmica, o coeficiente de calor por convecção, h , não é uma propriedade do fluido mas um parâmetro experimental cujo valor depende de todas as variáveis que influenciam a convecção: geometria da superfície, natureza do escoamento do fluido (laminar ou turbulento), a velocidade e propriedades do fluido (viscosidade dinâmica, μ , condutividade térmica, k , densidade, ρ e calor específico, c_p). Processos que envolvam mudança de fase de um fluido são também considerados convectivos devido ao movimento induzido durante o processo – ascensão de bolhas durante a ebulição ou queda de gotas durante a condensação.

É prática comum, em estudos de convecção, remover as unidades das equações e combinar variáveis numa série de grupos adimensionais, de modo a reduzir o número total de variáveis. Isto ocorre no coeficiente de transferência de calor por convecção, h , com o número de Nusselt, Nu .

Considerando uma camada de um fluido com espessura L entre duas temperaturas distintas, a transferência de calor será por condução caso o fluido esteja parado, e por convecção se este estiver em movimento. O número de Nusselt é a razão entre estes dois fluxos. Portanto, o número de Nusselt representa a melhoria da transferência de calor através de uma camada de fluido como resultado da convecção em relação à condução através da mesma camada de fluido.

$$\frac{\dot{q}_{conv}}{\dot{q}_{cond}} = \frac{h\Delta T}{k\Delta T/L} = Nu = \frac{hL}{k} \quad (4)$$

onde k é a condutividade térmica do fluido; e L é a espessura da camada de fluido.

Quanto maior for o fluxo por convecção em relação ao fluxo por condução, maior será o número de Nusselt. Se $Nu=1$, equivale à transferência de calor através da camada por condução pura.

Outros números adimensionais associados ao mecanismo de transferência de

calor por convecção são o Reynolds e o Prandtl. O regime de escoamento depende principalmente da razão entre as forças de inércia e as viscosas. Essa razão é número de Reynolds:

$$Re = \frac{\text{Forças de inércia}}{\text{Forças viscosas}} = \frac{VL_c}{\nu} = \frac{\rho VL_c}{\mu} \quad (5)$$

no qual V é a velocidade a montante; L_c é o comprimento característico da geometria; e $\nu = \mu/\rho$ é viscosidade cinemática do fluido.

Relativamente ao número de Prandtl, este descreve a espessura relativa das camadas limite da velocidade e térmica, e é definido por:

$$Pr = \frac{\text{Difusividade molecular da quantidade de movimento}}{\text{Difusividade molecular do calor}} = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu C_p}{k} \quad (6)$$

3.3. Radiação

A radiação é a energia emitida pela matéria na forma de ondas eletromagnéticas por alteração na configuração electrónica de átomos ou moléculas. Qualquer corpo com uma temperatura absoluta acima do zero absoluto emite radiação térmica. Neste tipo de mecanismo não é necessário a presença de um meio de intervenção como nos outros dois mecanismos. A transferência de energia por radiação é mais rápida (à velocidade da luz) e não sofre qualquer atenuação no vácuo. Esta é a forma como a energia do Sol atinge a Terra.

A radiação é um fenómeno volumétrico, e todos os sólidos, líquidos e gases emitem, absorvem ou transmitem radiação em diferentes graus. No entanto, a radiação é considerada como sendo um fenómeno de superfície dos sólidos que são opacos à radiação térmica tais como a madeira, os metais e as pedras, visto que a radiação emitida do interior do material nunca atinge a superfície, e a radiação incidente em tais corpos é normalmente absorvida dentro de alguns microns da superfície.

A superfície ideal que emite radiação numa taxa máxima é o corpo negro, e a sua radiação é a radiação do corpo negro. A radiação emitida por todas as superfícies reais é inferior à do corpo negro à mesma temperatura, e é expressa por:

$$\dot{Q}_{emit} = E\sigma AT_a^4 \quad (7)$$

Em que E é a emissividade da superfície; σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$); e T_a é a temperatura absoluta.

A emissividade varia entre o intervalo de 0 a 1, e é uma medida de quão perto uma superfície se aproxima de um corpo negro, no qual a sua emissividade é 1.

Outra importante propriedade da radiação é a absorvidade, α , que é a fracção da radiação incidente numa superfície que é absorvida por essa superfície. Como a emissividade, o seu valor varia entre 0 e 1. O corpo negro absorve completamente toda a radiação incidente ($\alpha=1$). Portanto, um corpo negro é um perfeito absorvedor e emissor.

Quando uma superfície de emissividade E e uma área de superfície A , a uma temperatura absoluta T_a é completamente fechada por uma superfície muito maior (ou preta) a uma temperatura absoluta T_{viz} separada por um gás (como o ar) que não interfira com a radiação, a taxa líquida de transferência de calor por radiação entre essas duas superfícies é dada pela seguinte expressão:

$$\dot{Q}_{rad} = E\sigma A(T_a^4 - T_{viz}^4) \quad (8)$$

A troca de calor por radiação entre duas superfícies depende das propriedades das superfícies, da sua orientação relativa e do meio que as separa.

A transferência de calor por radiação, para ou a partir de uma superfície circundada por um gás, ocorre geralmente em paralelo com a condução ou a convecção (se houver movimento do gás). Assim, a quantidade total de calor transferida é determinada adicionando as contribuições de ambos os mecanismos. Para simplificar, define-se um coeficiente de transferência de calor, h_{comb} , que inclui os efeitos da convecção e da radiação. Portanto, a taxa total de transferência de calor, para ou a partir de uma superfície, por convecção e radiação é expressa como:

$$\dot{Q}_{total} = h_{comb}A(T_a - T_{\infty}) \quad (9)$$

4. COLETORES SOLARES

Visto o objetivo deste estudo ser a construção e teste de um coletor solar, o presente capítulo aborda sucintamente aos coletores solares existentes e às suas aplicações, dando ênfase ao tipo de coletor em estudo, o coletor estacionário de placa plana.

Este capítulo é baseado parcialmente no artigo científico do autor Kalogirou (2004), que tem como título: “*Solar Thermal Collectors and Applications*”.

O componente mais importante de qualquer sistema de aquecimento solar é o coletor solar. Este dispositivo absorve a radiação solar, converte-a em calor e transfere-o para um fluido, normalmente ar, água ou óleo.

Existem dois tipos de coletores: os estacionários (ou não concentradores) e os concentradores. Os estacionários têm a mesma área de intercepção e de absorção de energia solar. Ao contrário dos coletores concentradores que têm, geralmente, superfícies refletoras côncavas que interceptam e concentram a radiação solar num feixe com área de recepção menor, aumentando assim o fluxo de radiação.

Na figura seguinte estão apresentados os diferentes coletores solares existentes, sendo o primeiro e o terceiro estacionários e os restantes concentradores. O coletor de placa plana (FPC) é dos coletores mais utilizados juntamente com os CPC e os ETC.

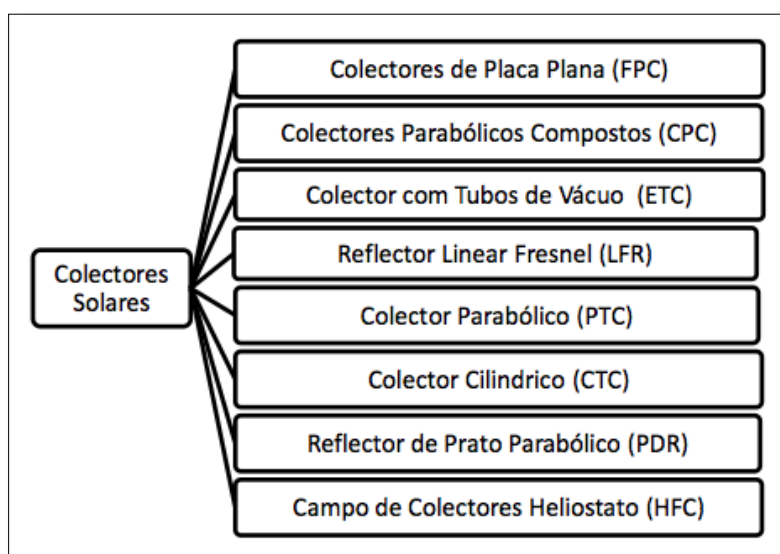


Figura 3. Tipos de coletores solares (Pecêgo, 2012)

4.1. Coletor Solar Com Matriz Porosa

O coletor em estudo é considerado como um coletor de placa plana já que o princípio de funcionamento é semelhante. A diferença, entre o estudado e o de placa plana, encontra-se no uso, por parte do primeiro, de uma matriz porosa metálica como meio absorvedor em vez da placa plana absorvedora utilizada por parte do FPC.

Este tipo de coletor tem como vantagens a utilização da energia direta e difusa, não precisa de orientação em direção ao Sol e requer pouca manutenção. São mecanicamente mais simples do que os coletores concentradores (Duffie e Beckman, 2006).

O objetivo deste tipo de coletor é receber a máxima energia solar com o menor custo possível. É espetável que tenha uma vida útil longa, apesar dos efeitos adversos como a radiação ultravioleta do Sol, a deposição de poeiras ou humidade sobre o vidro ou a quebra deste por granizo, expansão térmica ou até mesmo vandalismo. Problemas de corrosão e de fugas são menos graves em comparação com sistemas solares de aquecimento de líquidos.

Como foi mencionado anteriormente, a principal desvantagem de um coletor tradicional para aquecimento de ar é o pobre coeficiente de transferência de calor entre a placa de absorção e o ar, o que resulta numa baixa eficiência térmica do coletor. Assim sendo, a temperatura do absorvedor torna-se muito mais alta do que a do ar. O aumento da temperatura do absorvedor, aumenta as perdas de calor por radiação e por convecção para o ambiente (Mohamad, 1997).

Com a finalidade de aumentar a transferência de calor entre o absorvedor e o ar, sugere-se neste estudo uma matriz porosa metálica para substituir a placa de absorção. Utilizando a matriz porosa tem-se uma maior área de transferência de calor, sem que o fluido tenha grandes quedas de pressão ao longo do escoamento, o que conduz a um aumento do coeficiente do mesmo. Consequentemente a transferência de calor entre a matriz e o ar melhorará, diminuindo assim as perdas para o exterior (Mohamad, 1997). Com este tipo de matriz, há um aumento do desempenho térmico, permitindo a construção de coletores mais compactos sem comprometer o seu bom funcionamento, levando a custos de construção mais baixos (Tadrist *et al.*, 2004).

O mecanismo de funcionamento consiste na passagem da radiação solar através

de uma ou mais superfícies transparentes chegando à matriz porosa que tem uma superfície escura, com absorvidade elevada; grande parte da energia é absorvida pela matriz e em seguida é transferida para o fluido. Este posteriormente será armazenado ou utilizado numa eventual aplicação. A parte inferior e as partes laterais da estrutura do coletor devem ser bem isoladas para reduzir as perdas térmicas por condução. A cobertura transparente é utilizada para reduzir as perdas térmicas para o ambiente exterior devido ao efeito da radiação e da convecção.

Este tipo de coletor é geralmente fixo numa posição e não acompanha o movimento do Sol. Deve estar direcionado para o Equador, ou seja para Sul no Hemisfério Norte, e em direção ao Norte no Hemisfério Sul; o ângulo de inclinação mais favorável do coletor é igual à latitude do local, com variações angulares de 10 a 15 graus, dependendo da aplicação.

4.2. Aplicações

Segundo Kalogirou, os coletores solares têm vindo a serem utilizados em diversas aplicações tais como:

- Sistemas solares de aquecimento de água;
- Aquecimento e arrefecimento de espaços;
- Refrigeração solar;
- Produção de calor no processo industrial;
- Sistemas solares de dessalinização;
- Sistemas solares de energia térmica;
- Fornos solares;
- Aplicações solares na química.

O coletor solar em estudo enquadra-se no segundo ponto pois é utilizado como gerador de ar quente. Esta aplicação subdivide-se em oito sistemas diferentes:

- Aquecimento de espaços e de água sanitária;
- Sistemas de ar;
- Sistemas de água;
- Sistemas de bomba de calor;

- Sistemas de absorção;
- Adsorção de arrefecimento;
- Sistemas mecânicos.

Vão-se abordar apenas os dois primeiros pontos já que estes estão relacionados com o presente estudo.

Em relação ao primeiro - aquecimento de espaços e de água sanitária – podem-se considerar diferentes modos de funcionamento. Quando a energia é interceptada pelo coletor, se necessária, pode ser utilizada para aquecer o local pretendido, ou pode ser armazenada, caso não seja precisa. Quando a energia solar é necessária e não está disponível, por exemplo durante o período noturno, pode-se usar a energia armazenada para o aquecimento do espaço.

Outros modos de funcionamento podem ser utilizados de maneira a proporcionar água quente sanitária. Também é possível combinar os modos para operar mais do que um modo de cada vez. Na Europa, os sistemas solares para aquecimento simultâneo de espaços e de água, são conhecidos como sistemas combinados.

No caso dos sistemas de ar, não é prático combinar ao mesmo tempo os modos de adicionar energia ao local de armazenamento e remove-la do mesmo. Portanto, a energia auxiliar pode ser combinada com a energia armazenada ou fornecida a partir do coletor a fim de cobrir as necessidades de ar quente do edifício.

A principal vantagem de usar ar como fluido de aquecimento é o facto de este não necessitar de ser protegido do congelamento ou da ebulição, não ser corrosivo e ser gratuito. Outra vantagem é a utilização de uma unidade de armazenamento formada por um leito de seixos que possibilita a entrada de ar no coletor a temperaturas mais baixas.

As desvantagens passam pela grande necessidade de espaço para instalar os equipamentos do sistema de ar e pelas dificuldades na deteção de fugas de ar e na adição de ar condicionado solar para os sistemas.

4.2.1. Secadores Solares

Este estudo pretende avaliar o desempenho térmico do coletor solar, que funciona através de um processo convectivo forçado, podendo este vir a integrar um sistema designado por secador solar, sendo o seu principal objetivo a secagem de produtos

agroalimentares. Em seguida abordar-se-á esta aplicação, caracterizando alguns dos diferentes tipos de secadores solares.

Segundo Norton, 1992 (citado por Gordon, 2001), os secadores solares têm sido usados na indústria agrícola, e têm como finalidade a redução do teor de humidade dos alimentos para prevenir a sua deterioração dentro de um período de tempo considerado como o período de armazenamento seguro.

Norton acrescenta que a secagem é um processo duplo: de transferência de calor para o produto a partir da fonte de calor; e de transferência de massa (humidade) do interior do produto para a sua superfície e desta para o ar circundante.

O objetivo de um secador solar é fornecer ao produto mais calor do que aquele que está disponível sob as condições ambiente, o que permite, por um lado, aumentar suficientemente a pressão de vapor da humidade do interior da cultura e por outro, diminuir significativamente a humidade relativa do ar de secagem. A capacidade de transporte de humidade é assim aumentada, garantindo um teor de humidade em equilíbrio suficientemente baixo (Ekechukwu e Norton, 1999).

Os secadores solares podem ser muito úteis do ponto de vista de conservação de energia. Permitem economizar energia, poupar muito tempo, melhorar a qualidade do produto, tornar o processo de secagem mais eficiente, ocupar uma área menor e proteger o meio ambiente (VijayaVenkataRaman *et al.*, 2012).

Os secadores solares podem ou não utilizar coletores para captar a energia solar e aquecer o fluido. Podem ser classificados em duas categorias: ativo ou de convecção forçada (normalmente referidos como híbridos) e passivo ou de circulação natural. Estas, por sua vez, subdividem-se em três tipos, que diferem principalmente na disposição dos componentes do sistema e no modo de utilização do calor solar: integral (direto), distribuído (indireto) e misto (Ekechukwu e Norton, 1999; Gordon, 2001; Kalogirou, 2004).

Os secadores passivos utilizam o movimento natural do ar. Podem ser construídos facilmente com baixo custo. No secador passivo direto a comida é exposta diretamente à radiação solar, ideal para a secagem de pequenos lotes de frutas e legumes (Sharma *et al.*, 2009).

Nos sistemas ativos são incorporados ventiladores para movimentar a energia solar na forma de ar aquecido, do coletor para o local de secagem. Portanto, para além da

energia solar, os secadores ativos necessitam de outra fonte de energia para alimentar os ventiladores que realizam a circulação forçada do ar ou para obter um aquecimento auxiliar (Kalagirou, 2004; Sharma *et al.*, 2009). Estes tipos de secadores são designados por híbridos, e surgem para suprimir a dependência energia do Sol. Podem funcionar com combinação de fontes renováveis e não renováveis. Se estes sistemas forem bem projetados, podem ser mais rentáveis e fiáveis do que aqueles que utilizam apenas um fonte de energia renovável (Baños et al, 2010; Fudholi *et al.*, 2010).

Como se pode verificar pela análise da figura 4, os secadores do tipo direto não usam coletores para captar a energia solar, uma vez que a própria câmara de secagem realiza essa função juntamente com a secagem dos alimentos.

Este tipo de secador contém o material a ser seco dentro de uma câmara de secagem com uma cobertura transparente, normalmente o vidro. Parte da radiação solar é refletida pelo vidro para a atmosfera e a restante é transmitida para a câmara. Parte desta última é refletida pela cultura e a restante absorvida pela mesma. Portanto, o calor é gerado pela absorção da radiação pelo próprio produto assim como pelas superfícies internas da câmara. O aumento da temperatura na câmara levará à ocorrência de perdas por evaporação e perdas convectivas da cultura aquecida, que libertará humidade. Esta irá ser removida juntamente com o movimento do ar (Sharma *et al.*, 2009).

Este secador, utilizado normalmente pelos agricultores rurais, requer uma grande área de espaço aberto, tornando-se mais susceptível à contaminação de poeiras e mais exposto a aves, insetos, roedores e a ataques de fungos (Ekechukwu e Norton, 1999; Fudholi *et al.*, 2010). Para além destas desvantagens, este secador tem outras limitações como a descoloração da cultura devido à exposição solar direta e a redução da transmitância do vidro devido à condensação da humidade (Sharma *et al.*, 2009).

No secador do tipo indireto, a radiação não incide diretamente nos produtos a serem secos, minimizando a ocorrência de descoloração e quebra da superfície dos mesmos (Sharma *et al.*, 2009). Neste caso, o coletor e a câmara de secagem são unidades separadas, com funções distintas: a primeira capta energia solar e a segunda, que contém a cultura, serve para a passagem do ar aquecido pelo coletor, secando os produtos. Neste tipo de secador há um melhor controlo da secagem e o produto obtido é de melhor qualidade (Sharma *et al.*, 2009).

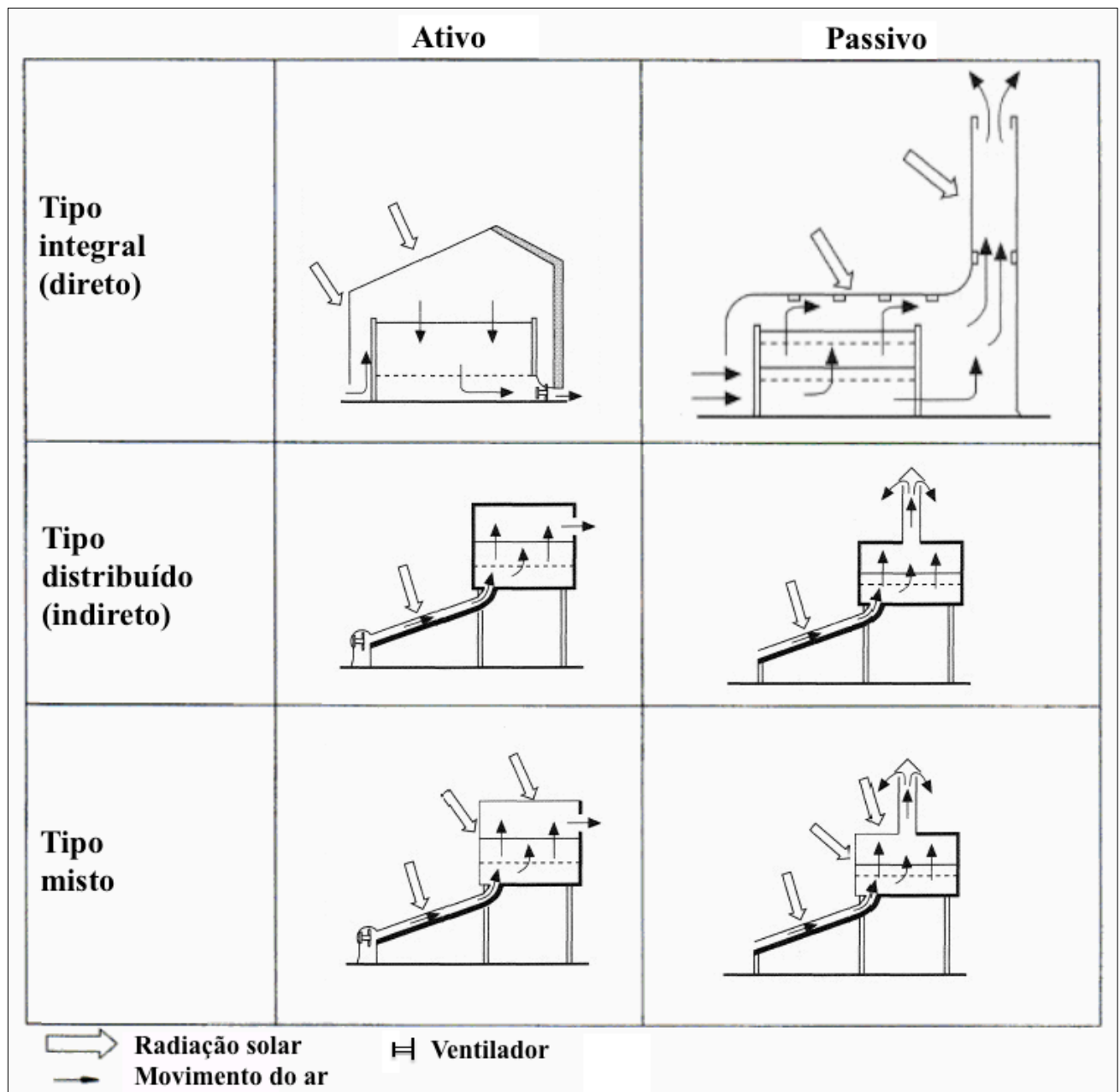


Figura 4. Classificação dos secadores solares (adaptada de Gordon, 2001)

Nos secadores do tipo misto são combinados os dois sistemas mencionados anteriormente, ou seja, a câmara de secagem capta a energia solar mas o processo de secagem é melhorado utilizando o coletor solar.

O coletor solar nos secadores indiretos ou mistos, deve ser posicionado com um ângulo apropriado para otimizar a energia solar recebida. Incliná-lo torna-se mais eficaz do que colocá-lo horizontalmente, por duas razões: a primeira, é porque há

mais energia solar recebida quando a superfície do coletor é perpendicular aos raios solares; a segunda, com a inclinação do coletor, o ar aquecido, menos denso, tem tendência a subir naturalmente, movimentando-se mais facilmente para a câmara de secagem (Sharma *et al.*, 2009).

5. COLETOR SOLAR EM ESTUDO

5.1. Enquadramento

O coletor solar em estudo é do tipo ativo e estacionário, e terá como finalidade incorporar um secador solar para secagem de produtos agroalimentares. Este coletor é altamente inovador visto que utiliza como elemento absorvedor uma matriz porosa constituída por palha de aço.

O presente trabalho dá seguimento a outros realizados em anos anteriores, onde foram efetuados diversos ensaios ao coletor assim como à componente principal do mesmo, a matriz porosa metálica.

Para caraterizar o comportamento do mesmo foi necessário avaliar algumas propriedades como a permeabilidade e a capacidade de absorção da matriz e quantificar a transferência de calor entre esta e o ar que a atravessa, calculando o valor do coeficiente de transferência de calor.

Com a finalidade de verificar a viabilidade da aplicação da palha de aço como meio absorvedor, foram realizados ensaios experimentais e foi desenvolvido um modelo teórico para prever o comportamento térmico da palha de aço quando sujeita a um escoamento no seu seio (Calçada 2011).

A palha-de-aço mostrou ter um coeficiente de atenuação na ordem de $0,8 \text{ cm}^{-1}$, apesar de ter ocorrido algumas divergências nos valores obtidos devido à heterogeneidade da mesma. Com este coeficiente e com a espessura da matriz, foi possível calcular o coeficiente de absorção. Pessêgo (2010) pôde concluir que cerca 6 cm de espessura são suficientes para que a radiação que atravessa o meio seja toda intersetada, já que o coeficiente de absorção por camada (1,5 cm de espessura) foi de 0,7, atingindo os 100% na quarta camada.

Após a realização dos ensaios e a respetiva comparação com os dados fornecidos pelo modelo, chegou-se a um valor do coeficiente de transferência de calor da matriz aproximadamente igual a $10 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ (Pecêgo, 2012).

Efetuaram-se ensaios que permitiram determinar o valor da pressão do fluido em escoamento, em vários pontos de medição colocados ao longo da conduta da instalação

experimental. Foi possível, a partir desses valores, o cálculo de outro parâmetro que permite a caracterização da matriz porosa, o coeficiente de permeabilidade, que neste caso é aproximadamente igual a $2,48 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ (Pecêgo, 2012).

Foi também desenvolvido um protótipo do coletor solar em polietileno extrudido de alta densidade. Apesar de este material ser um bom isolante térmico, teve uma degradação muito rápida. Concluiu-se que, à medida que a matriz porosa absorve radiação, ocorre transferência de calor entre esta e o ar que a atravessa, tornando-o progressivamente mais quente. Comprovando-se assim que o coletor obteve valores de aquecimento de ar bastante satisfatórios, aumentando a temperatura em cerca de 38°C em apenas 4 metros (Pessêgo, 2010).

Neste trabalho abandonou-se este protótipo e construiu-se um novo coletor, mais evoluído e definitivo, e realizaram-se novos ensaios para obter valores mais concludentes, caracterizando-se assim o seu comportamento térmico para uma possível integração num sistema de secagem solar.

O coletor foi montado numa das oficinas do Laboratório de Aerodinâmica Industrial em Coimbra (latitude 40° N), e os ensaios ao mesmo foram efetuados no terraço do mesmo edifício.

5.2. Descrição do Coletor

Para a construção do coletor foi utilizado aglomerado de madeira para a parte inferior da estrutura, para as laterais e para os separadores internos que estão distribuídos uniformemente ao longo do comprimento do coletor (figura 5). A madeira tem duas funcionalidades: dar suporte ao coletor, é o próprio esqueleto do mesmo, e isolar a transferência de calor para o exterior, reduzindo as perdas térmicas por condução.

Os separadores ou deflectores, para além de criarem um escoamento turbulento, têm como finalidade aumentar o percurso do ar ao longo do coletor, mantendo-o mais tempo em contato com a matriz, o que conduz a uma melhoria da transferência de calor da matriz para o ar.

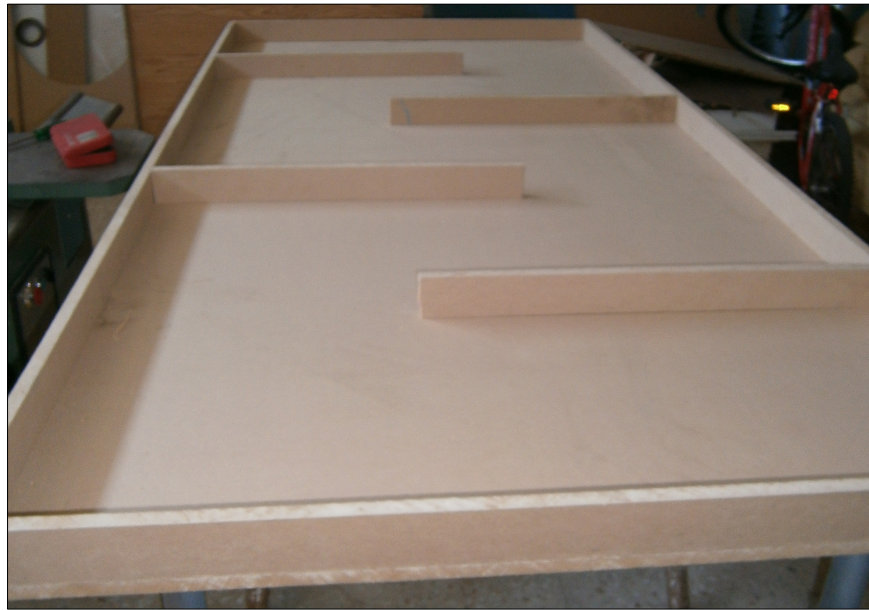


Figura 5. Estrutura do coletor com os deflectores

O esquema do coletor, assim como o percurso efetuado pelo ar ao longo do mesmo, encontra-se na figura seguinte.

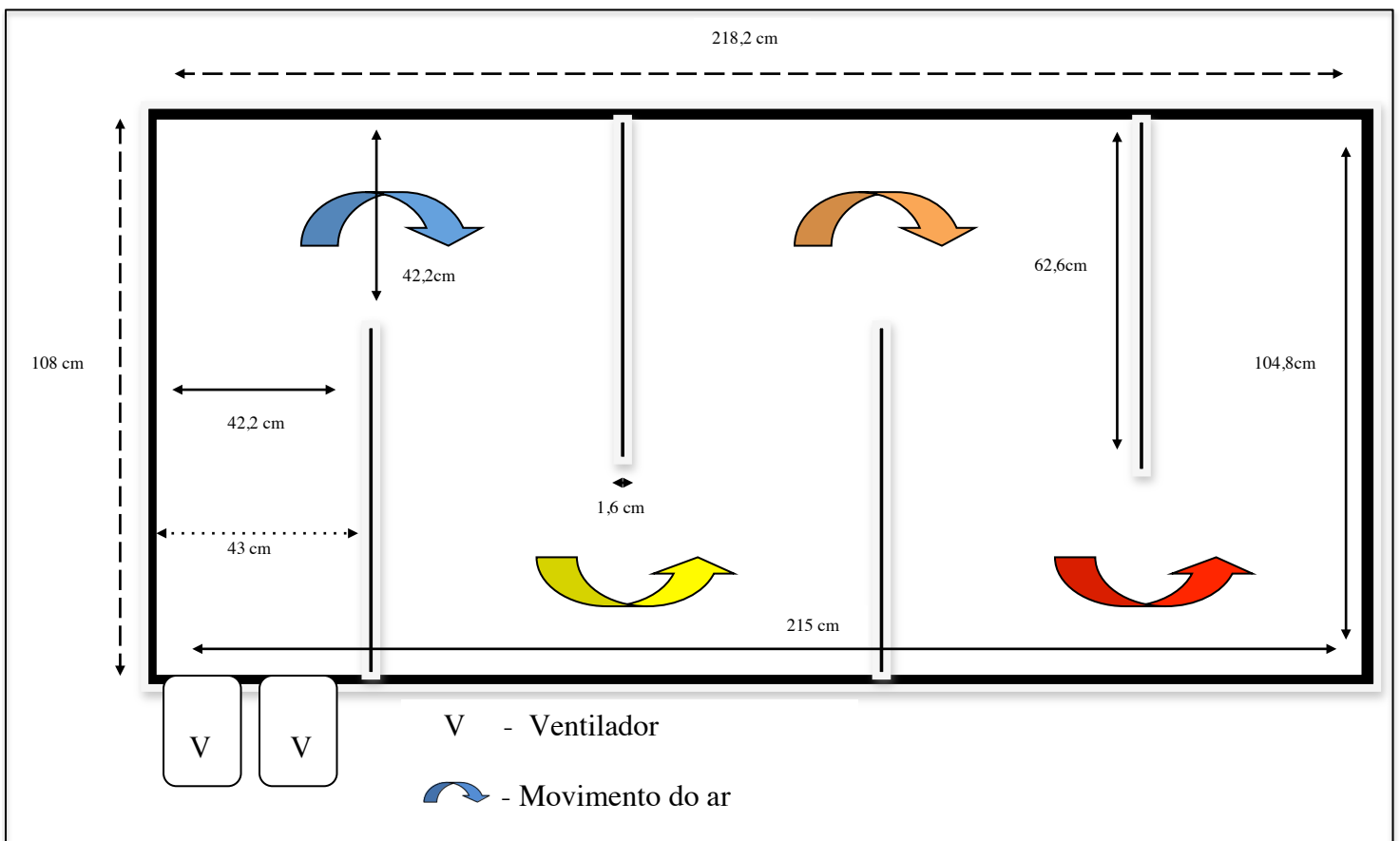


Figura 6. Esquema ilustrativo do coletor solar (vista em planta)

O coletor tem como medidas internas 1,048 m de largura por 2,15 m de comprimento por 0,06 m de altura, o que equivale a uma área interna de 2,25 m². Como a área dos deflectores é de 0,04 m², resulta em 2,21 m² e 0,13 m³ de área efetiva e volume efetivo do coletor, respetivamente. Com isto, o valor aproximado para a distância percorrida pelo ar ao longo do coletor é de 5,24 m.

Como mencionado anteriormente, o coletor em estudo utiliza como elemento absorvedor uma matriz porosa metálica, a palha de aço (n.º 3). Esta é um material biodegradável, abundante e relativamente acessível em termos de custos de aquisição. É constituída por filamentos de aço de pequeno diâmetro.

O uso da matriz da porosa tem como intuito absorver a máxima radiação solar possível incidente no coletor. Neste sentido, todo o coletor (0,13 m³) foi preenchido por este material com uma espessura de 6 cm (figura 7). Estes 6 cm correspondem às quatro camadas de palha de aço necessárias para que a radiação seja toda intersetada. A matriz, após ter sido colocada, foi revestida com *spray* preto para potenciar a absorção da radiação. Não foi colocada qualquer placa absorvedora na superfície inferior do coletor, reduzindo assim substancialmente os custos.

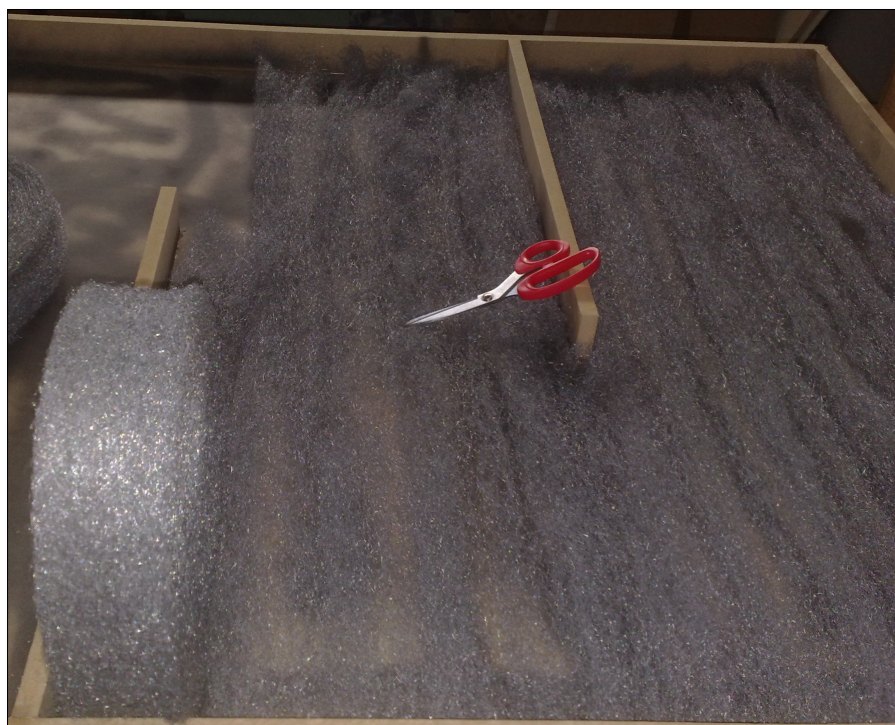


Figura 7. Enchimento do coletor com palha de aço

Na tabela seguinte apresentam-se algumas características da palha de aço.

Tabela 1. Parâmetros físicos e termofísicos da palha de aço

ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg.K)	k (W/m.K)	$d_{\text{médio}}$ (mm)	ϵ	A_{transf} (m ² /m ³)
7830	430	52,9	0,08985	0,99	44517,9

Apesar da heterogeneidade da palha de aço, o seu diâmetro foi calculado, sendo este um valor médio entre 90 fios. As medições necessárias para os cálculos do diâmetro, da porosidade e da área de transferência de calor da palha de aço foram realizadas através de uma montagem experimental feita em trabalhos anteriores. O valor calculado da área de transferência de calor é um valor máximo, visto que foi considerado a não existência de pontos de contacto que na prática existem.

Na parte superior da estrutura colocou-se um vidro transparente, de forma a permitir a máxima penetração da radiação solar na matriz e de reduzir as perdas térmicas por convecção. Reduz simultaneamente perdas por radiação da matriz aquecida visto que o vidro é transparente à radiação de pequenos comprimentos de onda recebidos pelo Sol, mas é praticamente opaco aos longos comprimentos de onda da radiação térmica emitida pela mesma quando aquecida. Sendo o vidro opaco a esses comprimentos de onda, a radiação que penetra no local fica retida no seu interior, aquecendo-o (efeito de estufa) (Kalogirou, 2004; Duffie e Beckman, 2006; Sharma *et al.*, 2009). Isto conduz a temperaturas mais elevadas na matriz e, portanto, potencia o aumento das temperaturas do ar à saída.

Na entrada do coletor foram inseridos dois ventiladores para insuflar o ar que será aquecido no interior do mesmo (figura 8) a uma velocidade de 3,6 m/s. A circulação forçada de ar proporciona uma maior transferência de calor por convecção entre a matriz e o ar. À saída colocou-se uma caixa para direccionar o escoamento do ar para o local da aplicação pretendida.



Figura 8. Ventiladores

A seguinte imagem ilustra o coletor solar no local dos ensaios.



Figura 9. Coletor solar

5.3. Instrumentação e Ensaio Experimentais

Para medição das temperaturas e da radiação solar utilizou-se a interface *PICO TC-08 (Picolog Technology)* de oito canais e os dados foram registados através do *software Picolog Recorder* para posterior tratamento.

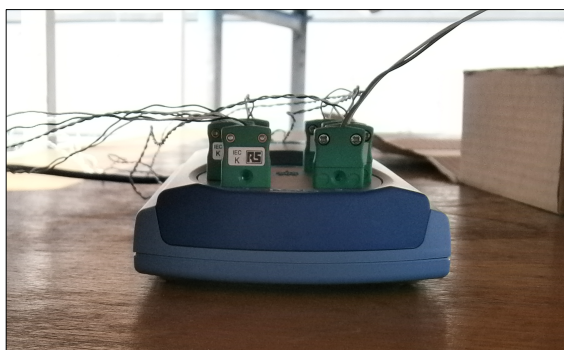


Figura 10. Interface PICO TC-08

Foram colocados sete termopares em posições distintas ao longo do coletor para a medição das temperatura (figura 11):

- Um à entrada (posição 1) que mede a temperatura do ambiente;
- Três no interior do coletor para a medição da temperatura do ar ao longo do mesmo: posições 2 (1,57 m), 3 (2,62 m) e 4 (3,67 m). Cada um destes termopares é dividido em três extremidades que são ligadas ao coletor nas posições a, b e c, registrando assim um valor médio para o caso da existência de escoamento preferencial;
- Dois na superfície externa do vidro: posições 5 (1,57 m) e 6 (3,67 m);
- E o último à saída (posição 7) que registra a temperatura do ar que sai do coletor que passou pelo percurso de 5,24 m;

O oitavo canal da interface foi reservado para o piranómetro que mede a radiação solar (zona 8).

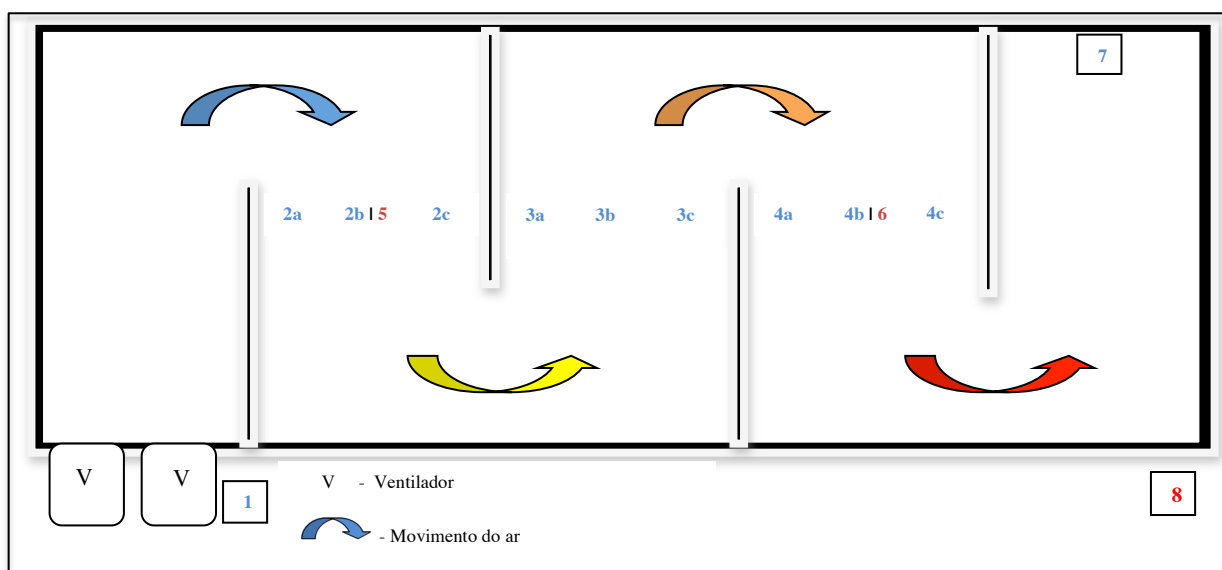


Figura 11. Esquema representativo das zonas de colocação dos termopares no coletor e do piranómetro

A radiação solar foi medida ao longo dos dias com diferentes intensidades com o auxílio de um piranómetro que foi posicionado ao lado do coletor solar, no mesmo plano de inclinação. Este aparelho tem um sensor fotoelétrico que recebe a radiação global – radiação que o coletor recebe - em mV e depois converte-a em W/m^2 . Os valores foram registados pelo *software* mencionado anteriormente e este foi preparado para efetuar o registo das temperaturas e da radiação em intervalos de 60 segundos.

A secção de saída é circular com um diâmetro de 7,33 cm, e destina-se à canalização do escoamento para medição da velocidade do ar realizada por um anemómetro integrado num medidor multifunções *Omega X-ATP* (Stamford, United Kingdom).

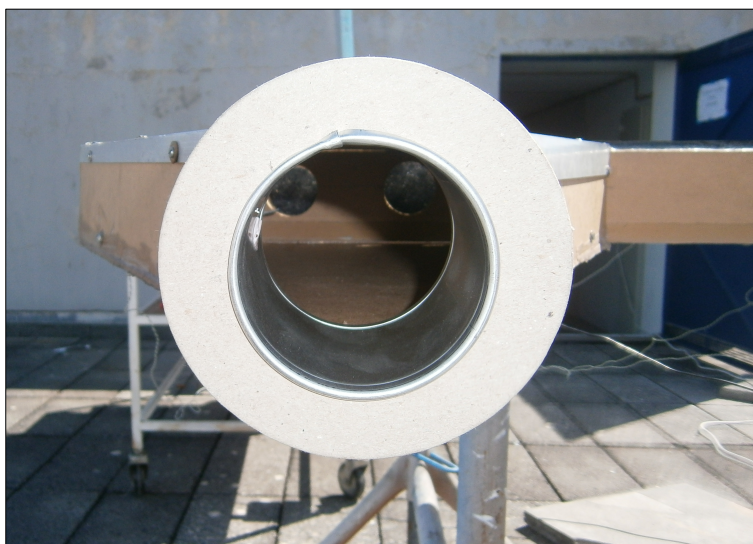


Figura 12. Secção de saída



Figura 13. Medidor multifunções com anemómetro integrado

Sabendo a velocidade do ar (u) é possível calcular o caudal mássico através da seguinte equação:

$$\dot{m} = u\rho_{ar}\pi\left(\frac{d_c}{2}\right)^2 \quad (10)$$

onde ρ_{ar} é a densidade do ar e d_c é o diâmetro da secção de saída.

Este trabalho experimental foi realizado em três dias distintos. Nos três ensaios foram registadas diferentes variáveis como a radiação solar, as temperaturas em diferentes pontos e a velocidade do ar à saída. O caudal mássico utilizado foi de 0,015 kg/s. Na tabela seguinte encontram-se as informações relativas a cada ensaio.

Tabela 2. Dados dos ensaios realizados

Ensaio	Dia	Condições Meteorológicas	Início	Fim	T _{máx} (°C)	T _{min} (°C)
E1	5 de Junho	Muito pouco nublado	9h40	19h10	25,7	15,4
E2	13 de Junho	Pouco nublado mas com constante passagem de nuvens	9h18	19h30	27,0	20,0
E3	24 de Junho	Céu limpo	9h14	19h39	37,3	20,8

5.4. Resultados e Discussão

Os resultados experimentais estão apresentados na forma de gráficos que descrevem a radiação solar ao longo do dia; o aumento da temperatura do ar ao longo do coletor; a diferença de temperaturas do ar à saída e à entrada em função da radiação solar; o efeito da radiação no rendimento térmico e por último a relação entre a radiação e as perdas térmicas.

Nas figuras seguintes estão representados os dados obtidos durante os três ensaios das temperaturas e das radiações.

No gráfico seguinte, relativo ao primeiro ensaio, a radiação está representada a vermelho, as temperaturas do ar estão a preto e as temperaturas do vidro a cinza. A radiação solar foi aumentando desde manhã até um valor máximo de 976 W/m² às 13h33, e diminuindo até ao final do ensaio. O valor médio foi de 690 W/m². Existem algumas

oscilações na radiação, estas variações ocorrem sobretudo no início do ensaio e novamente a partir das 15h, podendo ocorrer por aparecimento de nuvens. A temperatura máxima do ar à saída foi cerca de 70,0°C pelas 13h47.

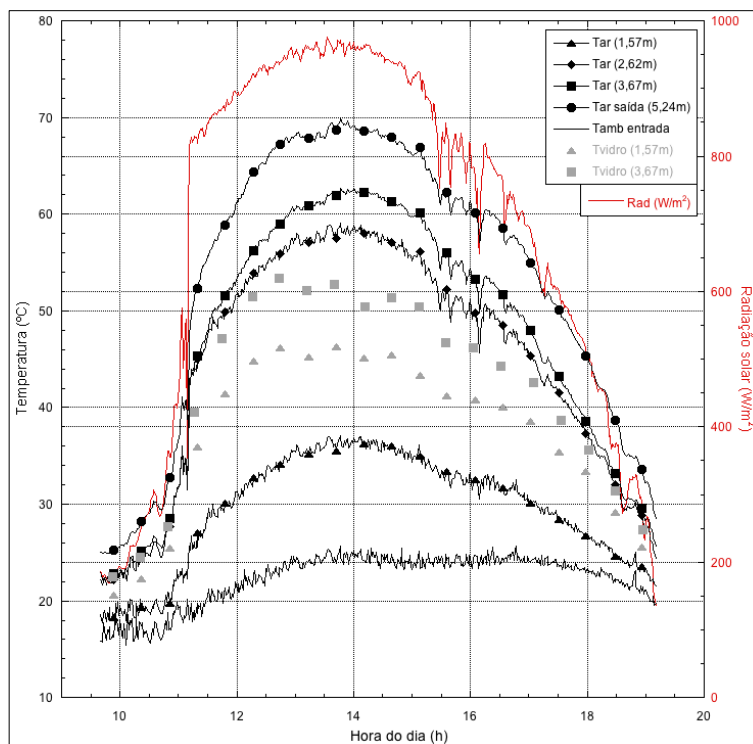


Figura 14. Variação das temperaturas e da radiação ao longo do dia (E1)

No E2 houve uma constante passagem de nuvens como se pode constatar pelas frequentes oscilações da radiação ao longo do dia (figura 15). Em dias como este a análise gráfica é bastante complicada.

Além das condições meteorológicas pouco estáveis, observou-se outro problema: no início do ensaio houve uma fuga pela extremidade lateral na zona central do coletor devido ao descolamento do vidro da estrutura. Isto ocorreu por razões de humidade que atingiu a madeira e fê-la descair nessa zona. Este sucedido ocorreu das 9h18 às 9h40 e foi de seguida retificado.

Selecionando um intervalo estável de radiação (por exemplo a partir das 16h) pode-se observar as descidas das temperaturas com a diminuição da radiação. Neste dia a radiação máxima atingiu valores a rondar os 1282 W/m², sendo o valor médio de 610 W/m².

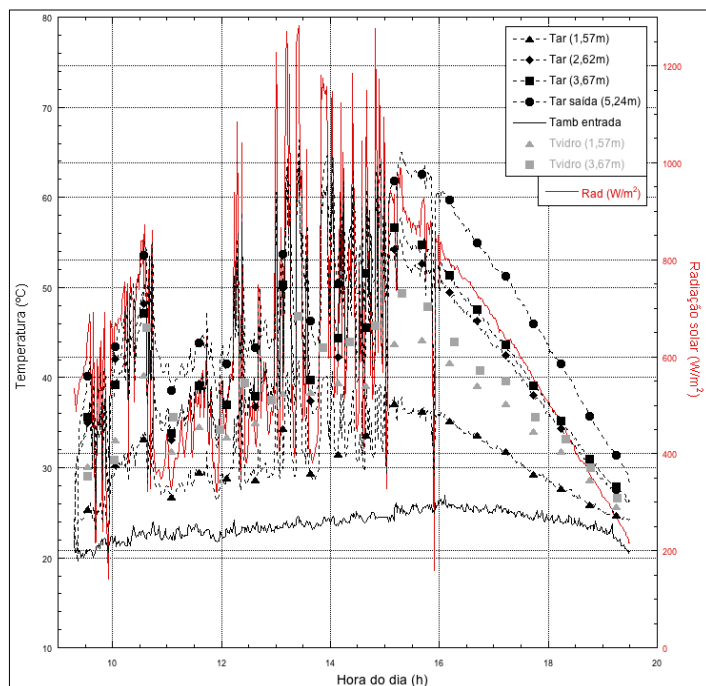


Figura 15. Variação das temperaturas e da radiação ao longo do dia (E2)

Como se pode verificar pela figura 16 (E3) a radiação solar manteve-se estável ao longo do dia, sem oscilações, descrevendo um perfil parabólico. O seu pico foi atingido por volta das 13h50 com o valor de 1005 W/m^2 . A média ao longo do dia foi de 752 W/m^2 . A temperatura máxima do ar à saída foi atingida pelas 14h32 com o valor de $75,4^\circ\text{C}$, sendo a temperatura à entrada de $32,8^\circ\text{C}$.

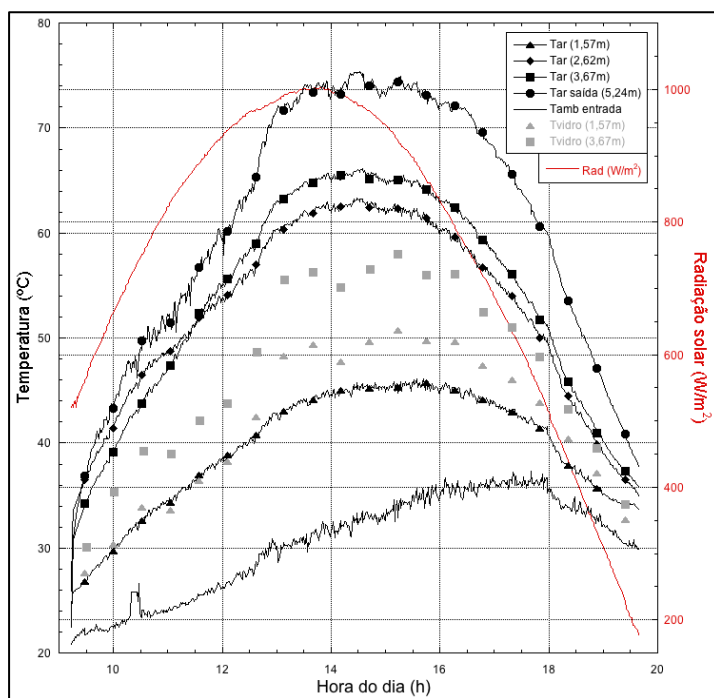


Figura 16. Variação das temperaturas e da radiação ao longo do dia (E3)

Seguidamente é apresentado o gráfico relativo à evolução da temperatura ao longo do coletor nos três ensaios. Foram selecionados os instantes em que as temperaturas máximas foram atingidas, às 13h47, 13h26 e 14h32 nos ensaios E1, E2 e E3, respetivamente.

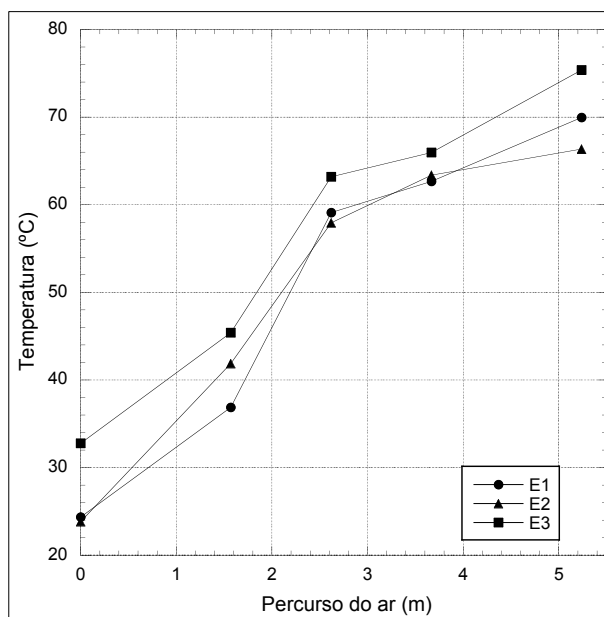


Figura 17. Perfil de temperatura do ar dos três ensaios ao longo do coletor

Como se pode observar há um aumento da temperatura do ar ao longo do coletor. A partir de 1,57 m de distância - zona que corresponde ao espaço entre o primeiro e o segundo separador - a subida da temperatura do ar é mais acentuada. Após os 2,62 m a temperatura do ar continua a subir mas mais devagar. Isto ocorre provavelmente devido ao facto da existência de maiores perdas térmicas na zona do coletor onde o ar se encontra mais quente.

De seguida apresenta-se o gráfico comparativo entre a radiação solar incidente e a diferença de temperaturas à saída e à entrada do coletor ao longo do dia relativo ao E1.

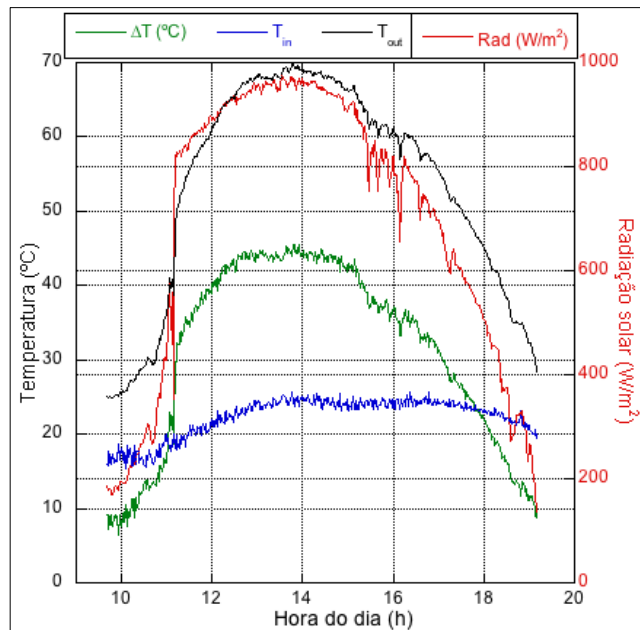


Figura 18. Diferença de temperaturas e radiação ao longo do dia

No sentido de conhecer o grau de correlação entre estas duas variáveis foi traçado um gráfico de regressão linear (figura 19). O valor obtido $R^2 = 0,985$ permite concluir assim que existe uma forte relação entre elas.

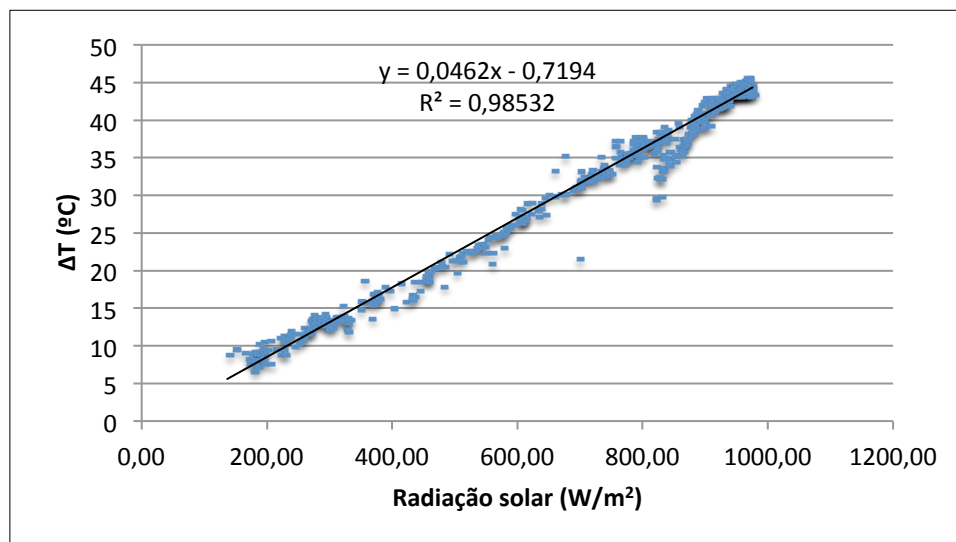


Figura 19. Efeito da radiação solar na diferença de temperaturas (E1)

Nos ensaios 2 e 3 este coeficiente também foi determinado e obtiveram-se valores de 0,767 e 0,840, respetivamente. Nestes casos a relação não é tão forte o que indica que existem outros fatores dos quais esta relação é dependente.

Estando o coletor em funcionamento, pode-se determinar o rendimento térmico instantâneo do mesmo circulando o ar dentro deste e medindo-se as temperaturas de entrada e de saída assim como a radiação incidente em cada instante. A quantidade de calor útil obtido é determinada multiplicando o caudal mássico (\dot{m}) pelo o calor específico do ar (c_p) e pela diferença de temperatura entre a saída e a entrada do coletor ($T_o - T_i$). Portanto, o rendimento térmico do coletor é a razão entre a energia útil (taxa de transferência de calor para o ar) e a energia solar incidente na superfície do coletor, e é dado por:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_c}{A_c S} \quad (11)$$

onde A_c é a área exposta do coletor e S a radiação solar global incidente no coletor por unidade de área.

A energia útil obtida pelo coletor exposto à radiação solar é expressa por:

$$\dot{Q}_c = \dot{m} c_p (T_o - T_i) \quad (12)$$

Os gráficos apresentados a seguir ilustram o comportamento do rendimento térmico do coletor e da radiação solar em função da hora do dia.

No E1 o rendimento máximo foi de 44,2% às 19h29. O rendimento médio ao longo do ensaio foi de 31,0% (figura 20).

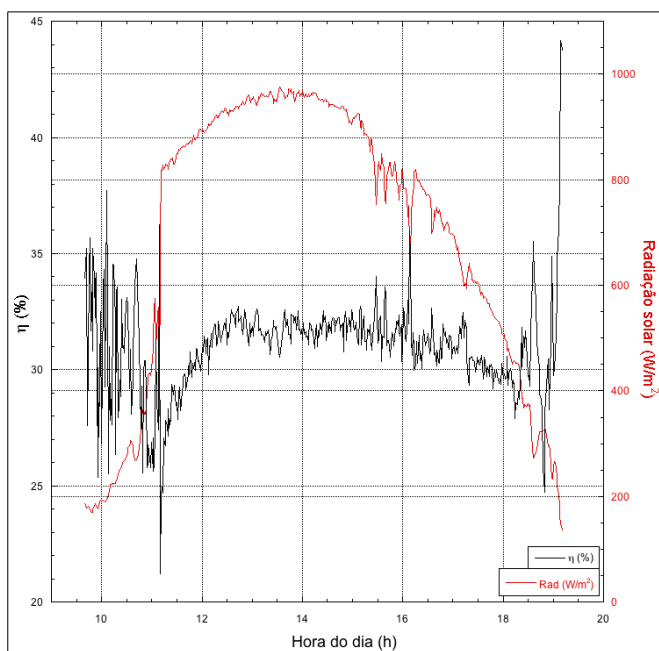


Figura 20. Rendimento térmico e radiação solar em função da hora do dia (E1)

No E2 foram retirados os dados relativos ao intervalo de tempo onde ocorreram as fugas, referido anteriormente. Portanto, só foram considerados os valores de rendimento a partir das 9h40, o valor máximo foi de 55,8% às 9h55 e o médio foi de 28,3%.

No E3 o rendimento médio foi de 27,8% e o máximo de 33,2%.

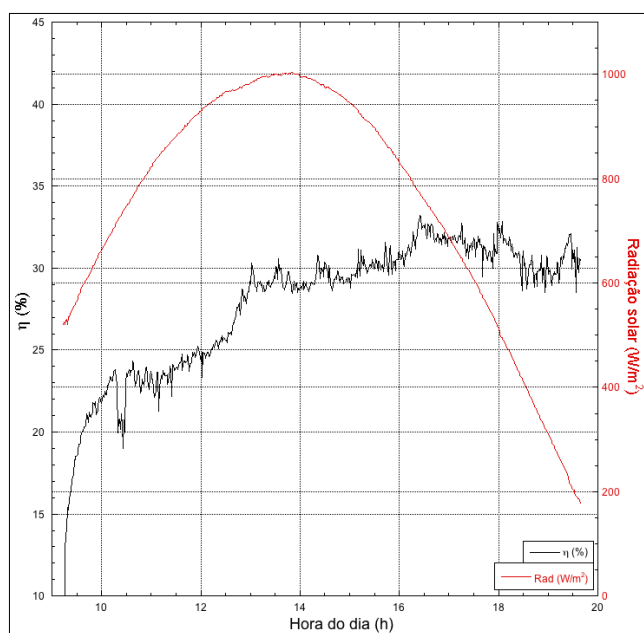


Figura 21. Rendimento térmico e radiação solar em função da hora do dia (E3)

Os resultados revelam que a diferença de temperaturas do ar à entrada e à saída (ΔT) tem uma forte relação com a radiação solar incidente no coletor, especialmente no E1. Contudo, quando há variações na radiação solar instantânea, a ΔT também varia mas não na mesma proporção devido à inércia térmica existente. Por exemplo, a passagem de uma nuvem num determinado intervalo de tempo leva a uma diminuição da radiação incidente mas o ar que circula no coletor como já se encontra quente não tem tempo para arrefecer ou pelo menos arrefece pouco nesse mesmo intervalo. Isto vem justificar a razão do rendimento térmico aumentar com a diminuição da intensidade da radiação.

Relativamente às perdas térmicas, que ocorrem maioritariamente pela superfície exterior do vidro, são determinadas subtraindo a radiação solar incidente pelo calor útil obtido. Com o intuito de conhecer a relação entre estas e a radiação solar incidente, foram traçados gráficos de regressão linear para cada ensaio. Verificou-se uma grande correlação em todos os ensaios, obtendo-se coeficientes de determinação de 0,997,

0,979 e 0,972 nos ensaios E1, E2 e E3, respetivamente. A figura 22 serve como exemplo, verificando-se essa correlação relativamente ao E1.

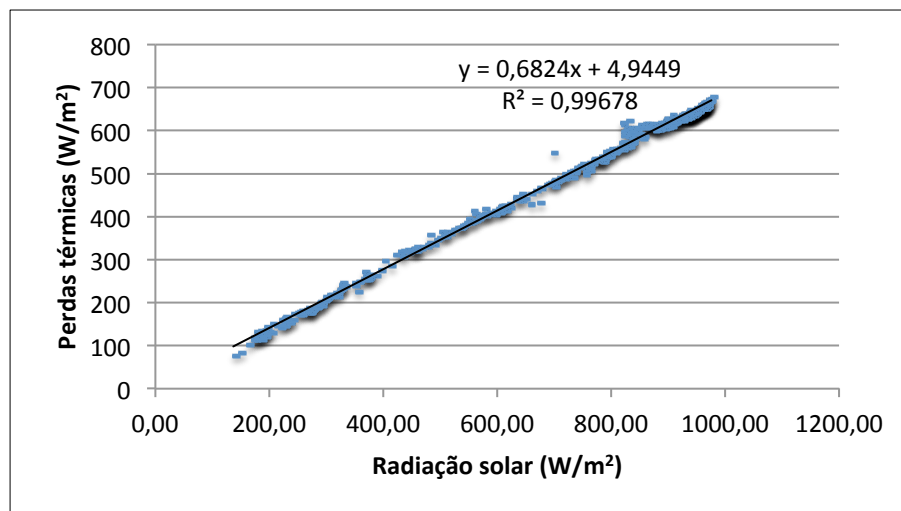


Figura 22. Efeito da radiação nas perdas térmicas (E1)

Na tabela 2 estão apresentados os diferentes valores médios e máximos dos parâmetros medidos e calculados neste estudo. Os valores máximos entre os três ensaios encontram-se destacados a negrito.

Tabela 3. Resumo dos resultados

Ensaio	Valores médios					Valores máximos				
	T _i (°C)	T _o (°C)	S (W/m ²)	ΔT (°C)	η (%)	T _i (°C)	T _o (°C)	S (W/m ²)	ΔT (°C)	η (%)
E1	22,3	53,4	690,0	31,0	31,2	25,7	70,0	975,7	44,2	44,2
E2	23,7	47,9	612,4	27,0	28,3	26,9	66,4	1281,7	44,9	55,8
E3	30,5	60,7	751,7	30,3	27,8	37,3	75,4	1004,6	44,5	33,2

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho consistiu na construção de um coletor solar para aquecimento de ar e avaliação do desempenho térmico do mesmo. Observou-se algumas variações dos parâmetros estudados nos três ensaios visto que foram em dias com diferentes condições meteorológicas. O coletor apresentou respostas diferentes em termos de rendimento conforme a combinação das proporções de radiação direta e de radiação difusa existentes em determinados momentos.

No final deste estudo, através dos ensaios realizados, determinou-se os perfis de temperatura do ar ao longo do coletor verificando-se que conforme o ar vai percorrendo o coletor a sua temperatura vai aumentando, como era de esperar.

Os resultados mostram que para o caudal mássico em causa (0,015 kg/s), há uma relação entre a ΔT e a radiação solar mas não é um relação linear pois a existência da inércia térmica presente no coletor permite que as oscilações da radiação não sejam instantaneamente sentidas.

O coletor atingiu intervalos de temperaturas na ordem dos 45°C. A temperatura de saída máxima obtida foi de 75°C no dia de céu limpo, podendo o coletor desta forma apresentar-se como uma boa solução para implementação em sistemas de secagem indiretos ou no desenvolvimento de secadores híbridos. O rendimento médio dos três ensaios situa-se pelos 29% e o máximo obtido foi aproximadamente 56% no E2. Addbbagh *et al.* (2010) obteve no coletor *single-pass* testado um rendimento de 24% com o mesmo caudal e utilizando camadas de rede de aço como elemento absorvedor.

Verificou-se também que há uma relação direta entre as perdas térmicas e a intensidade da radiação visto que as perdas aumentam com o aumento dessa intensidade. Estas surgem maioritariamente através do vidro para o exterior por convecção e por radiação. As perdas condutivas pela estrutura são mínimas e por isso desprezáveis. No ponto 6.1 abordar-se-á possíveis soluções para reduzir as perdas térmicas mencionadas.

A utilização da matriz porosa como elemento absorvedor mostrou-se bastante compensatória pois apresenta alta porosidade e baixas quedas de pressão. Esta permite que haja uma extensa área de transferência de calor e também aumenta a turbulência do ar que a atravessa. Consequentemente conduz a um aumento da transferência de calor para o ar,

melhorando assim o rendimento térmico do coletor. Sopian *et al.* (2009) constataram tal facto afirmando que o rendimento térmico aumentou 60% a 70% com a utilização de um meio poroso em relação ao meio não poroso. Os próprios resultados demonstram que a utilização da palha de aço como elemento absorvedor, impõe intervalos de temperatura muito interessantes, permitindo obter de forma eficiente caudais apreciáveis de ar aquecido a temperaturas numa ordem de grandeza ou mesmo superiores às exigidas em operações de secagem de produtos agroalimentares.

A simplicidade construtiva do coletor estudado neste trabalho acrescido à utilização de materiais de baixo custo, como o aglomerado de madeira e a palha de aço, torna-o bastante vantajoso para o tipo de utilização a que se destina, sendo ideal para pequenos produtores que têm interesse em instalações simples e de fácil transporte.

6.1. Trabalhos Futuros

Como ensaios futuros seria benéfico testar o coletor com uma inclinação de 40° (correspondente à latitude de Coimbra) orientado para Sul para otimizar a radiação solar incidente no vidro. Caso venha a integrar um secador solar, a inclinação também seria vantajosa, visto que o ar aquecido, menos denso, tem tendência a subir naturalmente, movimentando-se mais facilmente para a câmara de secagem.

Visto que as maiores perdas térmicas para o exterior ocorrem através do vidro, para minimiza-las e conseqüentemente aumentar o rendimento térmico, seria bom testar o coletor com a inclusão de um vidro duplo. Este tem como objetivo limitar as transferências térmicas por convecção e de tirar vantagem da baixa condutividade térmica do ar que é um excelente isolante térmico.

A construção de um novo coletor com passagem dupla do ar (*double-pass*) em contra fluxo também poderá reduzir as perdas como mencionado por vários autores. A título de exemplo, Addbbaigh *et al.* (2010) demonstrou experimentalmente que o rendimento térmico do *double-pass* é superior 34% a 45% em relação ao *single-pass*; Mohamad (1997) mencionou que as perdas diminuíram em 50% com a aplicação do contra fluxo.

Também seria interessante testar o coletor com diferentes caudais mássicos para verificar a sua influência no comportamento térmico do mesmo. Kurtbas e Durmus

(2004) utilizaram caudais de 0,012 kg/s e 0,028 kg/s e obtiveram temperaturas de saída superiores com o caudal mais baixo mas afirmaram que o rendimento térmico aumenta com o aumento do caudal. O mesmo conclui Aldabbagh *et al.* (2010) com caudais a variar entre 0,012 kg/s e 0,038 kg/s.

Referências Bibliográficas

- Aldabbagh, L., Egelioglu, F., Ikan, M. (2010), “*Single and double pass solar air heaters with wire mesh as packing bed*”. *Energy* 35, p. 3783–3787.
- Alvarez, G., Arce, J., Lira, L., Heras M. (2004), “*Thermal performance of an air solar collector with an absorber plate made of recyclable aluminum cans*”. *Solar Energy* 77, p. 107-113.
- Alves, N. E. (2008), “*Desenvolvimento para a certificação de um colector solar térmico plano de elevada eficiência*”. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Baños, R., Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F.G., Gil, C., Alcayde, A., Gomez, J. (2010), “*Optimization Methods Applied to Renewable and Sustainable Energy: A review*”, Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, p. 1753-1766.
- BP (2013), “*BP Statistical Review of World Energy June 2013*”. Acedido em Junho de 2013, em www.bp.com/content/dam/bp/pdf/statistical-review/statistical_review_of_world_energy_2013.pdf.
- Calçada, C. C. R. (2011), “*Caracterização da Interação Térmica entre um Escoamento e uma Matriz Porosa Metálica – Aplicação a um Coletor Solar*”. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente. Departamento de Engenharia Mecânica – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Casper, J. K. (2007), “*Energy – Powering the Past, Present, and Future*”, Chelsea House Publishers, p. 46, 114.
- Çengel, Yunus A. (2003), “*Heat Transfer – A Practical Approach*”, 2ª Ed., McGraw-Hill, p. 17-29, 333-343.
- Direção-Geral da Energia (Comissão Europeia) (2011), “*As energias renováveis marcam a diferença*”. Luxemburgo: Serviço das Publicações da União Europeia.
- DGEG (2013), Direção Geral de Energia e Geologia. Acedido a 23 de Fevereiro de 2013, em <http://www.dgeg.pt/>.
- Duffie, J., Beckman, W. (2006), “*Solar Engineering of Thermal Processes*”, 3ª Ed., John

Wiley & Sons, Inc.

- Ekechukwu, O. V., Norton, B. (1999), “*Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology*”. *Energy Conversion & Management* 40, p. 615-655.
- El-khawajah, M., Aldabbagh, L., Egeloioglu, F. (2011), “*The effect of using transverse fins on a double pass flow solar air heater using wire mesh as an absorber*”. *Solar Energy* 85, p. 1479-1487.
- El-Sawi, A., Wifi, A., Elsayed, E., Baily, B. (2010), “*Application of folded sheet metal in flat bed solar air collectors*”. *Applied Thermal Engineering* 30, p. 864-871.
- Esen, H. (2008), “*Experimental energy and exergy analysis of a double-flow SAH having different obstacles on absorber plates*”. *Build Environ* 43, p. 1046–1054.
- Fudholi, A., Sopian, K., Ruslan, M. H., Alghoul, M. A., Sulaiman, M.Y. (2010), “*Review of solar dryers for agricultural and marines products*”, Malaysia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, p. 1-30.
- Garg, H., Choundhury, C., Datta, G. (1991), “*Theoretical analysis of a new finned type solar collector*”. *Energy* 16, p. 1231–1238.
- Gordon, J. (2001), “*Solar Energy: The State of the Art*”, ISES Position Papers, England. *Solar Process Heat: distillation, drying, agricultural and industrial uses*, p. 477-479, 488-489.
- Henden, L., Rekstad, J., Meir, M. (2002), “*Thermal performance of combined solar systems with different collector efficiencies*”. *Solar Energy* 72 (4), p. 299–305.
- Hu, J.; Sun, X.; Xu, J.; Li, Z. (2103), “*Numerical analysis of mechanical ventilation solar air collector with internal baffles*”, China. *Energy and Buildings* 62, p. 230-238.
- Jain D, Jain R. (2004), “*Performance evaluation of an inclined multi-pass solar air heater with in-built thermal storage on deep-bed drying application*”, India. *Journal of Food Engineering* 65, p. 497-509.
- Kalogirou, S. A. (2004), “*Solar Thermal Collectors and Applications*”, Cyprus. *Progress in Energy and Combustion Science* 30, p. 231–295.
- Kaviany, M. (2009), “*Principles of Heat Transfer in Porous Media*”, Mechanical Engineering Series – 2nd Edition, Springer.
- Kolb, A., Winter, E.R.F., Viskanta, R. (1999), “*Experimental studies on a solar air*

- collector with metal matrix absorber*". Solar Energy 65 (2), p. 91–98.
- Kurtbas I., Durmus A. (2004), "*Efficiency and exergy analysis of a new solar air heater*". Renewable Energy 29, p. 1489–1501.
- Mittal, M.K., Varshney, L. (2006), "*Optimal thermal-hydraulic performance of a wire mesh packed bed solar air heater*". Solar Energy 80, p. 1112–1120.
- Mohamad, A.A. (1997), "*High efficiency solar air heater*". Solar Energy 60, p. 71–76.
- Naphon, P. (2005), "*Effect of porous media on the performance of the double-pass flat plate solar air heater*". International Communications Heat Mass Transfer 32, p. 140–150.
- Ozgen, F., Esen, M., Esen, H. (2009), "*Experimental investigation of thermal performance of a double-flow solar air heater having aluminum cans*". Renewable Energy 34, p. 2391–2398.
- Parker, B., Lindley, M., Colliver, D., Murphy, W. (1993), "*Thermal performance of three solar air heaters*". Solar Energy 6, p. 467–479.
- Pecêgo, J. R. M. (2012), "*Caracterização da Interação Térmica entre uma Matriz Porosa Metálica e um Escoamento – Aplicação a um Coletor Solar*". Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente. Departamento de Engenharia Mecânica – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Pessêgo, A. S. D. (2010), "*Coletor Solar Com Placa de Absorção Porosa para Aplicação em Operações de Secagem*". Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente. Departamento de Engenharia Mecânica – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Portal das Energias Renováveis, (2013). Acedido a 16 de Março de 2013, em http://www.energiasrenovaveis.com/DetailNoticias.asp?ID_conteudo=102&ID_area=15.
- Prasad, S., Saini, J., Singh Krishna, M. (2009), "*Investigation of heat transfer and friction characteristics of packed bed solar air heater using wire mesh as packing material*". Solar Energy 83, p. 773–783.
- Ramos, C., Ventura, J. (1997), "*A Energia Solar em Portugal: Potencialidades e Diferenciação Regional*", Portugal. III Congresso da Geografia Portuguesa, p. 453-461.
- Romdhane, B. (2007), "*The air solar collectors: Comparative study, Introduction of*

- baffles to favor the heat transfer*”, Tunisia. Solar Energy, p. 139–149.
- Sharma, A., Chen, C. R., Lan, N. V., (2009), “*Solar-Energy Drying Systems: A Review*”, Taiwan, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13, p. 1185- 1210.
- SolarGIS, (2013) – SolarGIS © 2013 GeoModel Solar s.r.o.. Acedido a 16 de Março de 2013, em <http://solargis.info/doc/71>.
- Sopian, K, Supranto, W.R.W., Daud, M.Y., Othman, B.Y.. (1999), “*Thermal performance of the double-pass solar collector with and without porous media*”. Renewable Energy, 18, p. 557–64.
- Sopian, K., Alghoul, M. A., Alfegi, E. M., Sulaiman, M. Y., Musa, E. A. (2009), “*Evaluation of a Thermal Efficiency of Double-pass Solar Colector with Porous-nonporous Media*”, Malaysia, Renewable Energy, 34, p. 640-645.
- Tadrist, L., Miscevic, M., Rahli, O., Topin, F. (2004), “*About the use of fibrous materials in compact heat exchangers*”, Experimental Thermal and Fluid Science 28, p. 193-199.
- VijayaVenkataRamana, S., Iniyar, S., Ranko Goic (2012), “*A review of solar drying technologies*”, Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, p. 2652-2670.