



**Joel Ribeiro  
Casalinho**

**Rendimento de painéis solar térmicos poliméricos  
*unglazed e glazed***



**Joel Ribeiro  
Casalinho**

**Rendimento de painéis solar térmicos poliméricos  
*unglazed e glazed***

dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Física, realizada sob a orientação científica do Doutor António Ferreira da Cunha, Professor Auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Aveiro e a co-orientação do Doutor Engenheiro Manuel Pedro Fernandes Graça, Investigador Auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Aveiro.

dedico este trabalho ao meu pai, mãe e irmão que sempre me ajudaram durante toda a minha carreira escolar.

## **o júri**

presidente

**Professor Doutor João de Lemos Pinto**  
Professor Catedrático do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

**Professor Doutor António Ferreira da Cunha**  
Professor Auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

**Doutor Manuel Pedro Fernandes Graça**  
Investigador Auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

**Professora Doutora Isabel Maria das Mercês Ferreira**  
Professora Auxiliar do Departamento de Ciências dos Materiais da Universidade Nova de Lisboa

## **agradecimentos**

agradeço aos responsáveis pelo curso de Engenharia Física, que permitiram a formação no curso no ramo das energias renováveis. Quero deixar um agradecimento ao Eng.º Luís Godinho, director técnico da PRIREV, Engenharia de Superfícies Lda., que proporcionou este estudo, pelas condições de trabalho, pelo equipamento e disponibilidade dos colaboradores da PRIREV. Gostaria de agradecer especialmente ao meu orientador, o Professor Doutor António Ferreira da Cunha e ao co-orientador o Doutor Engenheiro Manuel Pedro Graça pela disponibilidade e dedicação, pois sem eles a realização deste trabalho não seria possível.

## palavras-chave

energias renováveis, sistemas solares térmicos, aquecimento de água a baixa temperatura, *unglazed*, *glazed*, absorvedor polimérico, *epdm*, rendimento

## resumo

As energias renováveis representam uma solução limpa para a diminuição da dependência da nossa sociedade nos combustíveis fósseis. Recentemente verificou-se um aumento na procura de combustíveis fósseis em todo mundo, levando a um acentuado aumento no seu preço. Considerando que uma fracção considerável do nosso consumo energético é usado para aquecimento de água, a conversão solar térmica torna-se um tema de elevado interesse. Actualmente, existem vários sistemas solares térmicos para aquecimento de água com eficiências e tempos de recuperação de investimento razoáveis. Aqueles que usam absorvedores poliméricos, apresentam ser uma solução economicamente eficiente para aplicações de aquecimento de água a baixa temperatura.

Neste trabalho apresentam-se os resultados da análise do desempenho de um painel comercial solar térmico polimérico sem cobertura, *unglazed*, usado primariamente para o aquecimento de piscinas, que usa como absorvedor tiras de *epdm* (*ethylene propylene diene monomer*). Este polímero tem boas propriedades mecânicas e boa resistência aos UV. O objectivo principal deste trabalho é comparar a eficiência e as alterações físicas no colector quando é introduzida uma cobertura transparente e estruturada de PC (policarbonato), transformando-o num painel solar térmico *glazed*

**keywords**

renewable energies, solar thermal systems, low temperature water heating, *unglazed*, *glazed*, polymeric absorbers, epdm, efficiency

**abstract**

renewable energies represent a clean solution to decrease the dependence of our societies on fossil fuels. In recent times we have witnessed an increase in the demand for fossil fuels worldwide, leading to ever increasing prices. Considering that a considerable fraction of our energy consumption goes to water heating applications, solar thermal conversion becomes a relevant approach. Presently, several solar water heating systems with reasonable efficiencies and with acceptable payback times are available. Those using polymeric solar absorbers can be an economical and efficient solution for low temperature water heating applications.

This work presents the results of the performance analysis of an unglazed commercial polymeric solar thermal collector, primarily used for swimming pool heating, made from epdm (ethylene propylene diene monomer). This polymer shows good mechanical properties and good UV resistance. The main goal of this work is to compare the efficiency and the changes on material physical properties when this unglazed collector is covered with a transparent PC (polycarbonate) structured sheet, transforming it into a glazed solar thermal collector.

## Índice

<b>1.</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1	Introdução e Objectivos .....	1
1.2	Energias renováveis .....	1
1.3	Energia solar .....	3
1.4	Solar térmico.....	5
1.5	Solar térmico de baixa temperatura .....	8
<b>2.</b>	<b>Fundamentos teóricos .....</b>	<b>11</b>
2.1	A fonte de energia.....	11
2.2	Interacção da radiação com a matéria.....	12
2.3	Perdas de energia .....	13
2.4	Sistema Sol-Terra-painel .....	15
2.5	Maximizar o rendimento.....	16
2.6	Efeito de estufa .....	19
2.7	Rendimento de um colector solar térmico .....	20
<b>3.</b>	<b>Descrição experimental.....</b>	<b>23</b>
3.1	Condições experimentais .....	23
3.2	O colector solar .....	25
3.3	Procedimento .....	26
<b>4.</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>28</b>
4.1	Caracterização óptica .....	28
4.2	Calibração dos termopares.....	30
4.3	Painel unglazed .....	32
4.4	Painel glazed .....	33
4.5	Funcionamento nocturno dos painéis .....	35
<b>5.</b>	<b>Análise dos resultados.....</b>	<b>38</b>
<b>6.</b>	<b>Conclusões.....</b>	<b>43</b>
<b>7.</b>	<b>Trabalho futuro .....</b>	<b>44</b>
<b>8.</b>	<b>Referências.....</b>	<b>45</b>

## 1. Introdução

### 1.1 Introdução e Objectivos

Este trabalho parte de uma proposta lançada pelo departamento de energias renováveis da empresa PRIREV, Engenharia de Superfícies, Lda.<sup>1</sup>, com o objectivo de analisar comparativamente a eficiência de um painel solar térmico de absorvedor polimérico com e sem uma cobertura de policarbonato estruturado transparente<sup>2</sup>.

São vários os factores que tornam as energias renováveis um tema actual e de crescente investigação em todo o mundo, não só por as reservas de combustíveis fósseis serem limitadas, mas também devido à crescente preocupação que o Homem desenvolveu em relação ao ambiente e em particular ao aquecimento global. Uma das áreas do sector das renováveis de maior interesse económico na actualidade é o solar térmico, pois através deste é possível efectuar o aquecimento de fluidos a baixos custos e a partir de fontes limpas e inesgotáveis.

O objectivo principal deste trabalho consiste na concepção de um painel solar térmico polimérico, e posteriormente comparar o rendimento entre uma versão sem cobertura (*unglazed*) e uma versão com uma cobertura transparente (*glazed*).

O trabalho apresentado encontra-se dividido em duas partes. Na primeira parte é feito o estudo teórico que permite uma melhor compreensão do tema, começando pelas energias renováveis, focando no solar térmico e acabando nos princípios físicos que envolvem esta tecnologia. Na segunda parte do trabalho é descrito, apresentado, analisado e discutidos os resultados do trabalho desenvolvido.

### 1.2 Energias renováveis

O sector energético apresenta elevada importância em toda a economia/bem-estar mundial. Na figura 1 podemos verificar que as previsões apontam para um aumento da necessidade energética mundial e que grande parte dessa energia provém de combustíveis fósseis, cujas reservas sabemos mais cedo ou mais tarde esgotar-se-ão<sup>3</sup>.

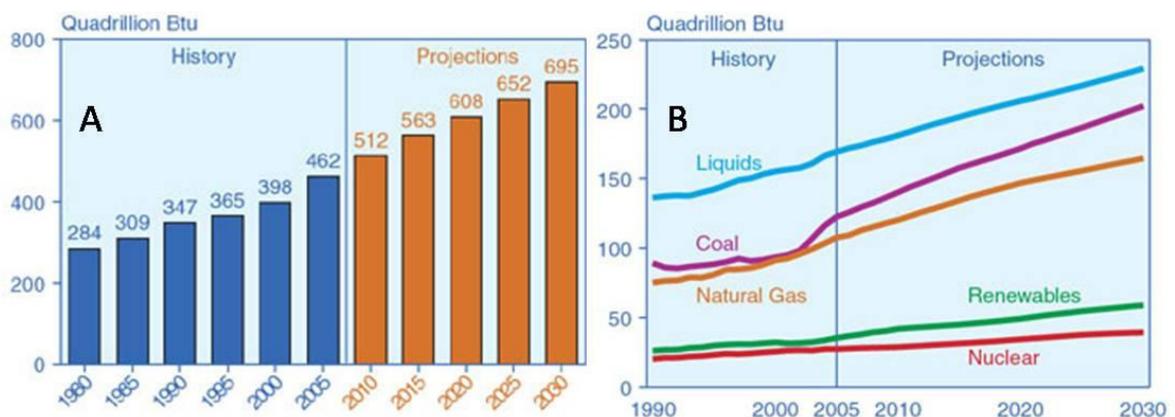
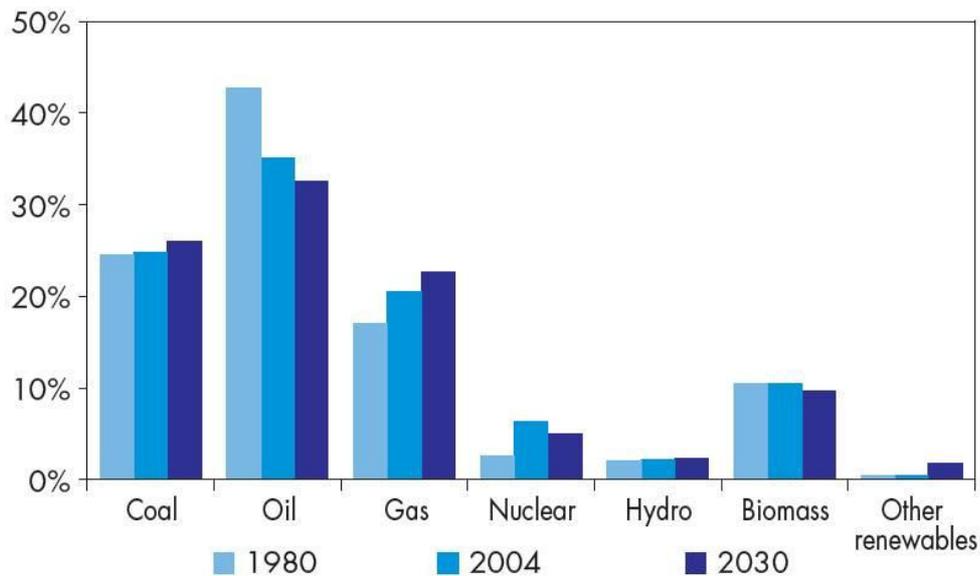


Figura 1: A- Consumo mundial de energia, B- Consumo mundial de energia por tipos de fontes (Btu: British thermal unit, que equivale a 1060 Joules no sistema SI)<sup>4</sup>.

Para além do problema da escassez/dependência, a Humanidade enfrenta, ainda, outro grave problema associado ao consumo de combustíveis fósseis. O sua combustão implica libertação de CO<sub>2</sub> que é um conhecido gás de efeito de estufa<sup>5</sup>. Ainda em relação a problemas ambientais, a combustão dos resíduos fósseis liberta também outros gases que geram problemas respiratórios nos seres vivos tais como o monóxido de carbono ou enxofre. Também a movimentação de largas quantidades de combustíveis implica um risco de acidente que pode gerar graves catástrofes naturais. Por seu lado a energia nuclear apresenta o risco de fugas ou catástrofes, bem como o difícil processo de armazenamento de resíduos radioactivos<sup>6</sup>.

Num futuro próximo o petróleo irá certamente tornar-se demasiado precioso para o seu uso como combustível energético<sup>7</sup>, isto é, nem só para fins energéticos se usa o petróleo. Existe toda uma larga gama de produtos essenciais que são obtidos a partir da sua refinação, tais como polímeros lubrificantes e até mesmo alguns produtos alimentares. É neste contexto que surgem as energias renováveis. A figura 2 revela que apesar das renováveis ainda ocuparem uma fatia muito pequena no mundo das energias, tem vindo a aumentar. Também é visível o decréscimo do consumo de petróleo.

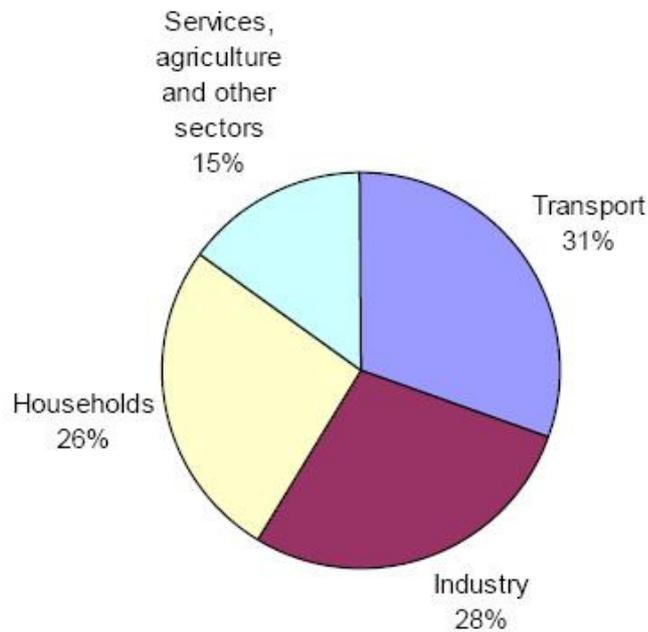


**Figura 2: Principais fontes de energia mundial<sup>8</sup>.**

Poderia pensar-se que a solução seria simples, onde seria apenas necessário construir várias e enormes infra-estruturas de aproveitamento de fontes renováveis capazes de satisfazer toda a procura, libertando assim o mundo da dependência energética de fontes poluentes e esgotáveis. Mas o problema não é assim tão simples, existem muitas desvantagens associadas às energias renováveis.

Um factor de elevado peso são os sectores onde essa energia é consumida e em que forma necessitam da mesma. Na figura 3 verifica-se que os transportes são, actualmente, o maior consumidor de energia da União Europeia. Assim, com base no modelo actual, que usa basicamente a combustão de derivados do petróleo para a obtenção de energia, prevê-se uma difícil adaptação das renováveis para este sector, pois exigiria toda uma modificação da estrutura dos motores. Também outros sectores apresentam inconvenientes no uso de energias renováveis, tais como os picos de consumo de electricidade no sector doméstico.

Estes picos são difíceis de suportar até mesmo usando os actuais sistemas de geração de electricidade que permitem aumentar ou diminuir o fluxo de geração de electricidade. Usando as energias renováveis não é possível aumentar a produção para além da disponibilidade do recurso, disponibilidade essa que depende das condições naturais.



**Figura 3: Consumo final de energia por sector na EU-25, em 2009.**

Para além dos sectores de aplicação, existe o factor económico, que está relacionado com o custo de geração da energia e disponibilidade do recurso que a gera. Actualmente existem alternativas mais viáveis economicamente para a maioria dos sectores que as renováveis<sup>10</sup>, embora seja previsível, devido à depleção das fontes que actualmente dominam o mercado de produção energética, que os preços se tornem menos atractivos quando comparados com as fontes inesgotáveis.

Embora sejam muitas as desvantagens do uso de energias renováveis, o facto de serem fontes ilimitadas e limpas, fazem com que o seu uso seja uma opção consciente e sustentável. O uso de energias renováveis não irá acontecer de um dia para o outro, mas com apoios governamentais<sup>11</sup>, a consciencialização dos problemas ambientais e a escassez energética que a Humanidade enfrenta, prevê-se que lentamente as energias renováveis assumam um papel cada vez mais dominante no mundo, pois as com as previsões de aumento do consumo energético associado à previsão das fontes dessa energia, que mostram que a grande maioria será de origem fóssil, que produzem elevados níveis de poluição, prevê-se assim também um aumento significativo da poluição provocada, sendo que actualmente já se vive uma crise ambiental acentuada, esta previsão indica que se estão a ultrapassar os limites que o planeta poderá tolerar.

### 1.3 Energia solar

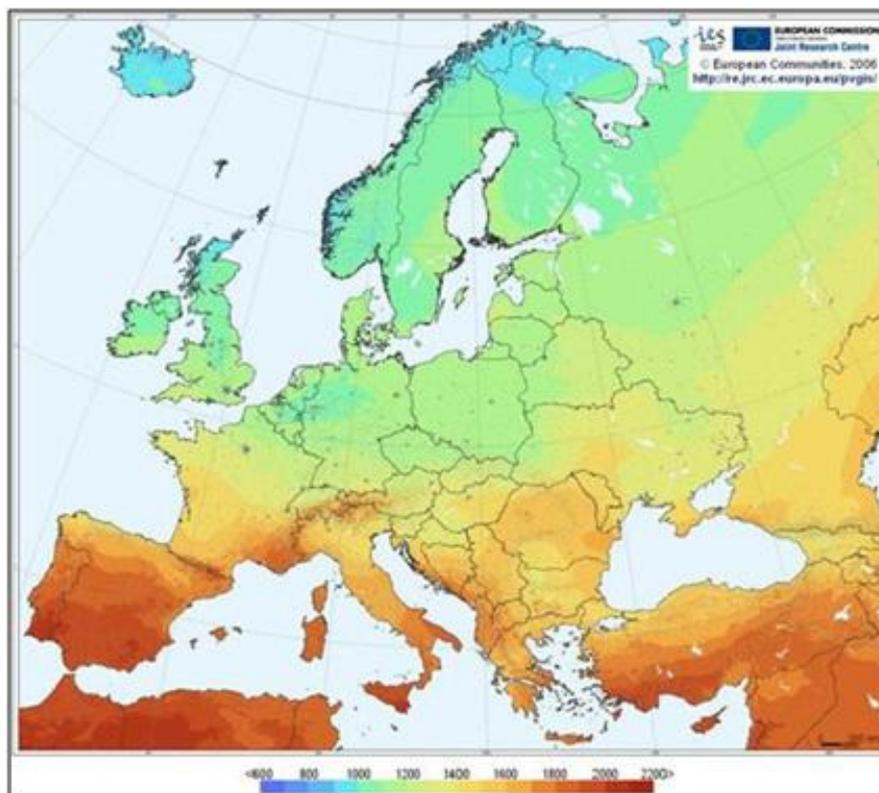
A radiação solar é uma das fontes limpas e ilimitadas de energia (limitada ao tempo de vida do Sol). É também a maior fonte de energia que o Homem dispõe, pois calcula-se que o globo terrestre receba em apenas uma hora mais energia do Sol que aquela que é actualmente consumida em todo o mundo durante um ano<sup>12</sup>, tornando assim a energia solar a mais promissora das energias renováveis.

Para além da sua dimensão, a energia solar apresenta dois outros factores a seu favor. Em primeiro, ao contrário dos combustíveis fósseis ou da energia nuclear, é uma fonte não poluente, em segundo é uma fonte livre e disponível para todos.

Contudo existem desvantagens associadas ao seu uso. O problema principal é o facto de se tratar de uma fonte de energia diluída por todo o globo, isto é, mesmo nas regiões de maior fluxo de radiação, esta raramente excede os  $1\text{kW}/\text{m}^2$  e a radiação total de um dia não excede os  $7\text{kWh}/\text{m}^2$ . Consequentemente são necessárias enormes áreas de recolha, tornando os custos de aproveitamento elevados quando comparados com os actuais provenientes das fontes convencionais. Ainda associado às desvantagens da energia solar, temos que a sua disponibilidade varia ao longo do tempo num ponto fixo do globo. Esta variação de disponibilidade acontece devido ao ciclo dia-noite e também devido ao ciclo sazonal da rotação da Terra em volta do Sol. Ocorrem ainda variações aleatórias em cada local específico devido a factores climatéricos.

Assim, torna-se necessário armazenar a energia suficiente para quando a fonte não está disponível. A necessidade de armazenar energia tem a si associada a questão da minimização das perdas energéticas o que, de acordo com os modelos actuais, tem grande influência no custo económico dos sistemas.

Pode assumir-se que o verdadeiro problema do uso de energia solar é de natureza económica, pois é necessário desenvolver métodos mais eficientes de recolha e armazenamento energia e também materiais mais baratos. Contudo, no contexto de disponibilidade solar, tal como mostra a figura 4, Portugal apresenta-se como um dos países com maior disponibilidade solar da Europa, e por isso é nosso dever aproveitar este recurso.



**Figura 4: Radiação Solar média anual incidente sobre a Europa<sup>13</sup>.**

O aproveitamento da energia solar actualmente é feito de duas formas distintas. O fotovoltaico, que usa células feitas de material semiconductor, usualmente silício, para converter a radiação solar directamente em electricidade<sup>14</sup>, e o solar térmico onde a energia da radiação é convertida em calor e transferida para um fluido<sup>15</sup>.

#### **1.4 Solar térmico**

Desde o início dos tempos que o Homem percebeu que os objectos expostos directamente à radiação solar aqueciam. Já os gregos antigos construía alguns dos seus edifícios de modo a aproveitarem a luz e o calor solar, e posteriormente os romanos perceberam que podiam cobrir as aberturas da parte sul dos seus edifícios com vidro ou mica de modo a aprisionar o calor do Sol de inverno de maneira mais eficiente. Mas foi Auguste Mouchout que, no século 19 inventou o primeiro sistema solar que funcionava de maneira activa. Ele questionava já nesse tempo a duração das reservas de combustíveis fósseis, mas o elevado preço do sistema que desenvolveu condenou a sua invenção<sup>16</sup>.

Com a crise energética no final da década de 70, percebeu-se que era necessário recorrer ao desenvolvimento de tecnologias energéticas alternativas inesgotáveis, de modo a libertar o preço/produção de energia de factores políticos. As energias renováveis representam uma parte dessas alternativas. Dentro das energias renováveis, o solar térmico, que é o aproveitamento da radiação solar para gerar calor, mostrou-se um dos sectores que mais proliferou no ramo.

Um dos resultados imediatos da absorção da radiação é o aumento da temperatura. Existem dois tipos de sistemas que usam este princípio onde esse calor pode ser aproveitado. O

solar térmico para geração de electricidade, e o solar térmico para aquecimento de fluidos. Na figura 5 encontra-se ilustrado como é convertida a radiação solar em calor. No interior do painel existe um material designado de absorvador, que usualmente é de cor negra, cor que permite uma maior absorção, que é exposto directamente à radiação solar, e no seu interior circula um fluido que recolhe o calor que é libertado pelo absorvador.

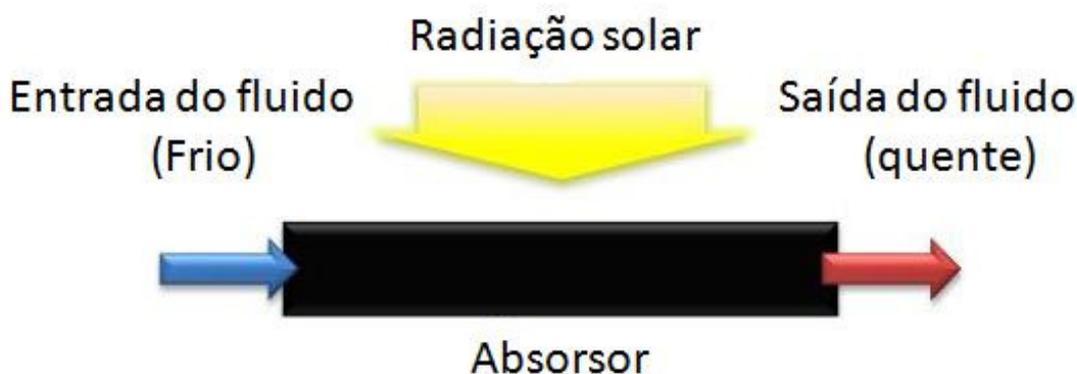


Figura 5: Ilustração do funcionamento do absorvador num painel solar térmico.

O solar térmico para aquecimento de fluidos usa o calor convertido nessa mesma forma, ou seja, aquece fluidos. Existem várias configurações destes sistemas desde os mais simples e baratos aos mais complexos e caros, dependendo dos materiais que usam e das temperaturas que se pretendem atingir.

Na figura 6 encontram-se imagens de alguns dos tipos mais usuais de painéis solares para aquecimento de fluidos actualmente no mercado. Os painéis planos são os mais vulgares devido ao seu frequente uso no sector doméstico e trabalham usualmente a temperaturas inferiores a  $80^{\circ}\text{C}$ <sup>17</sup>. Usam uma superfície absorvadora metálica que se encontra protegida dos elementos da natureza por uma caixa isoladora com uma cobertura transparente no topo, que também reduz as perdas de energia para o exterior. Os *Compound parabolic collectors* – *CPC*, usam uma disposição de espelhos que permite maximizar as reflexões internas obrigando a que os raios dentro de uma larga gama de ângulos de incidência converjam numa superfície absorvadora aumentando a concentração de radiação incidente e permitindo atingir temperaturas superiores. Por fim os painéis que usam tubos de vácuo, que têm como principal diferença a redução nas perdas de energia por condução e convecção para o meio, e como são cilíndricos a área do absorvador exposta à radiação é praticamente independente da posição do Sol, tendo sido já atingidas temperaturas de  $185^{\circ}\text{C}$  que permitiriam que fossem inclusive usados para geração de electricidade a 7% de eficiência (55% da eficiência actual de uma célula fotovoltaica)<sup>18</sup>.

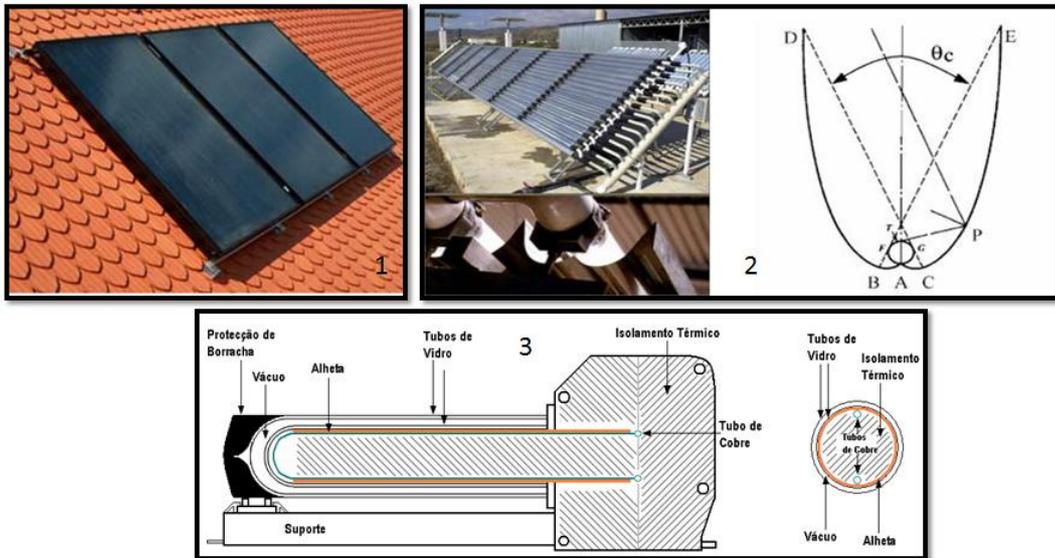


Figura 6: Alguns tipos de painéis Solares para aquecimento de fluido (1-Painel solar plano<sup>19</sup>; 2-Compound parabolic collectors – CPC<sup>20</sup> e esquema de espelhos; 3- Esquema de um painel de tubos de vácuo).

Anteriormente descreveram-se sistemas que convertem a radiação solar em calor e onde a energia é usada nesta forma, mas existem sistemas que podem converter esse calor em trabalho e posteriormente em electricidade. É possível converter o calor em trabalho, usando máquinas que realizam trabalho a partir das transformações termodinâmicas sofridas pelo fluido com a variação da temperatura e converter posteriormente esse trabalho em electricidade.

Existem alguns tipos de sistemas capazes de converter o calor de um fluido em electricidade. Os mais usuais são a produção de vapor a temperaturas de 450°C das centrais convencionais com o ciclo termodinâmico associado e os motores de *stirling*<sup>21</sup> que já necessitam de temperaturas na ordem dos 700°C<sup>22</sup>.

Para que estes sistemas consigam ter rendimentos satisfatórios é necessário atingir temperaturas muito elevadas quando comparados com os sistemas para aquecimento de fluidos, é então necessário usar painéis e sistemas ópticos complexos e delicados. Na figura 7 podem observar-se alguns painéis e centrais de geração de electricidade actualmente em uso.

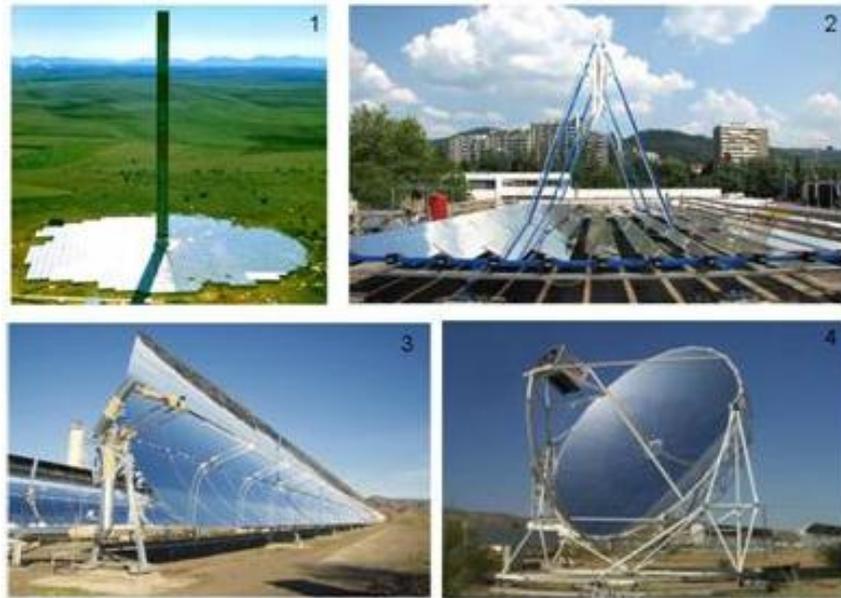


Figura 7: Alguns tipos de painéis solares para geração de electricidade (1-Torre central<sup>23</sup>; 2- Fresnel<sup>24</sup>; 3- parabólico linear<sup>25</sup>; 4- prato parabólico<sup>26</sup>).

Existe já uma vasta oferta de sistemas capazes de converter a energia solar em calor ou electricidade. Mas a escolha de cada sistema depende muito de cada caso, limitações económicas, maior/menor necessidade de temperaturas ou caudais mais elevados e características geográficas ou climatéricas de cada zona.

Na figura 8 apresentam-se curvas que mostram que tipo de painel apresenta melhores rendimentos para determinados valores de ganho na temperatura, e a dependência do rendimento com a radiação incidente e com a diferença entre a temperatura do painel e a ambiente.

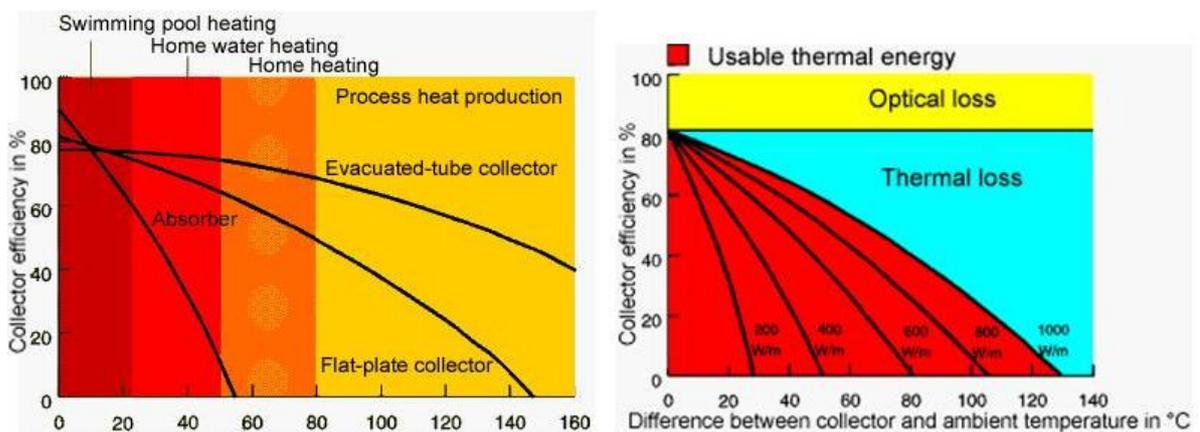


Figura 8: Esquerda: Curvas de rendimento em relação aos ganhos na temperatura, para cada tipo de painel; Direita: Rendimento em relação à diferença da temperatura ambiente e do painel, para diferentes índices de radiação<sup>27</sup>.

### 1.5 Solar térmico de baixa temperatura

Neste ponto é analisado e descrito com mais profundidade o tipo de painel que foi usado neste estudo, os painéis solares térmicos de baixa temperatura e pressão e elevado

rendimento (Fig.8), cujo princípio de funcionamento que permite aquecer fluidos é o mesmo dos referidos anteriormente.

Estes sistemas, embora tenham configurações mais simples e usem materiais mais baratos, são usados especialmente para aquecimento de fluidos cujo ganho de temperatura exigido seja baixo ( $\Delta T < 20^{\circ}\text{C}$ ). A maior parte destes painéis usam como absorvedor um material polimérico de cor negra estabilizados para as radiações ultra-violeta. São painéis de elevado rendimento quando trabalham com fluidos a baixas temperaturas.

Existem duas configurações possíveis para este tipo de painéis, a sem cobertura (*unglazed*), onde o material absorvedor está directamente exposto à radiação e ao ambiente. Como podemos ver pela figura 9 são compostos por tiras de absorvedor e podem ser assentes numa estrutura para o efeito ou nalguns casos adaptar-se à morfologia dos telhados. Por estarem em contacto directo com as condições ambientais e com a superfície onde assentam sem qualquer isolador ou protector, perdem muito calor para o ambiente que os rodeia. Mesmo assim são uma excelente solução para aplicações que necessitem de aquecimento de fluidos a baixas temperaturas, como por exemplo a água de piscinas ( $26^{\circ}\text{C}$  a  $32^{\circ}\text{C}$ ).



Figura 9: Exemplo de painéis *unglazed*<sup>28</sup>.

A outra configuração possível é o coberto (*glazed*) onde o absorvedor está no interior de uma caixa isolada dos elementos e com uma cobertura transparente, reduzindo assim as perdas de calor, e por esta razão esta configuração permite ganhos de temperatura superiores.

Estes colectores, também devido à sua configuração são menos afectados por variáveis como vento ou temperaturas exteriores muito baixas. Para aquecimento de piscinas, estes colectores não são tão vulgares como os *unglazed*, mas são especialmente úteis para sistemas de piscinas interiores que são usadas durante todo o ano ou para piscinas exteriores que se localizam em climas mais frios, em alguns casos podem ainda ser usados para aquecimentos de espaços ou até mesmo para águas domésticas. Na figura 10 apresenta-se um exemplo de painéis *glazed* para um sistema de aquecimento de água para piscinas interiores.



**Figura 10: Colector *glazed* para aquecimento de piscinas interiores<sup>29</sup>.**

Os absorsores poliméricos são considerados uma alternativa promissora para os painéis solares de baixa temperatura devido ao seu baixo custo. O impacto visual que um painel causa num telhado de uma casa é um factor negativo, que pode muitas vezes influenciar a escolha de um determinado painel. Assim sendo possível pintar o absorsores, pode-se melhorar visualmente este tipo de painéis tornando-os uma escolha mais apelativa. Mas as tintas selectivas não servem apenas para efeitos de estética, servem também como protecção para a radiação ultra-violeta e em alguns casos podem mesmo melhorar as propriedades ópticas do absorsores.

Existe ainda o desafio de encontrar polímeros adequados para trabalhar em temperaturas altas, particularmente para as aplicações *glazed*, existem casos em que se atingem valores de temperatura críticos em períodos de estagnação, que levam o polímero a deformar-se morfológicamente e estruturalmente alterando assim as propriedades mecânicas e ópticas, na maioria das vezes de maneira irreversível<sup>30</sup>.

## 2. Fundamentos teóricos

### 2.1 A fonte de energia

A fonte de energia dos painéis solares é a radiação solar. O Sol pertence à classe das estrelas anãs amarelas. A radiação é libertada a partir do núcleo, que representa apenas 3% de todo o volume do Sol, e funciona de maneira semelhante a um reactor termonuclear gigante onde ocorrem reacções de fusões de núcleos leves formando núcleos mais pesados, e são estas reacções que produzem a radiação.

À medida que a radiação se propaga até à superfície vai sofrendo alterações profundas. Começou como raios gama, mas rapidamente passa a raio-X devido às colisões com a matéria, perdendo assim alguma da sua energia. Na superfície a temperatura é já baixa o suficiente para permitir a existência de matéria na forma atómica. Os átomos vão interagir com a radiação proveniente do núcleo de maneira a que os seus electrões ocupem camadas atómicas mais interiores ou exteriores. O electrão ao regressar a um estado energeticamente mais baixo liberta novamente radiação numa frequência característica dessa transição, sendo libertada para o espaço. O espectro da radiação solar é bastante semelhante ao de um corpo negro à temperatura de 5500°C. Passados aproximadamente 8 minutos de deixar a superfície do Sol, a radiação atinge a atmosfera terrestre. Mas nem toda essa radiação chega à superfície terrestre, pois existe interacção da radiação com as partículas da atmosfera<sup>31</sup>. Estas interacções para além de reduzirem intensidade da radiação também provocam profundas alterações no espectro de radiação, a figura 11 mostra o espectro solar fora da atmosfera terrestre, que é semelhante ao espectro de radiação de um corpo negro à temperatura de 5800K e o espectro ao nível do mar, indicando também os respectivos elementos ou fenómenos responsáveis pela absorção da radiação na atmosfera. Já a figura 12 ilustra estes fenómenos, que absorvem cerca de 49% da radiação.

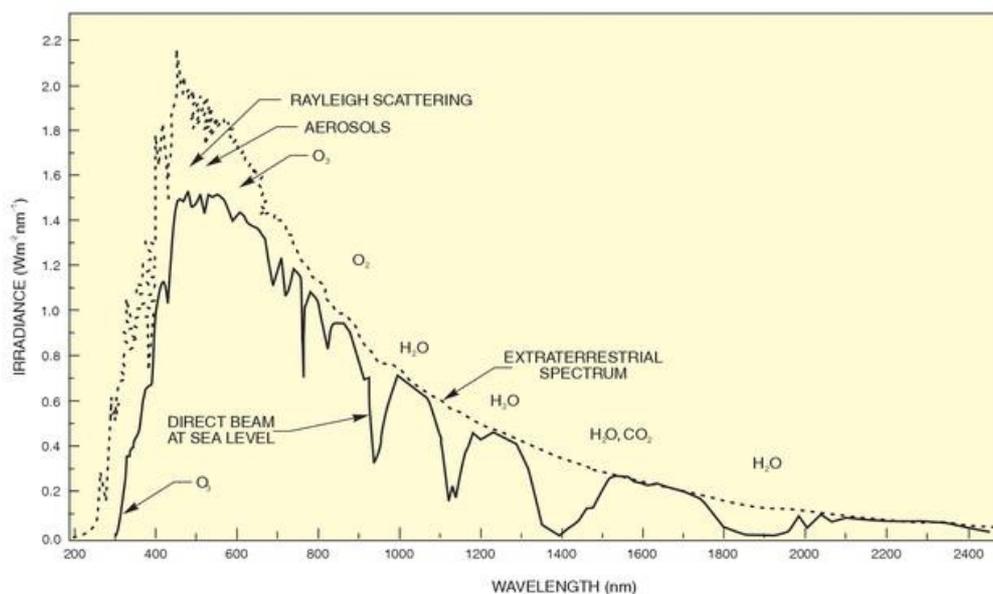


Figura 11: Espectro Solar fora da atmosfera e ao nível do mar<sup>32</sup>.

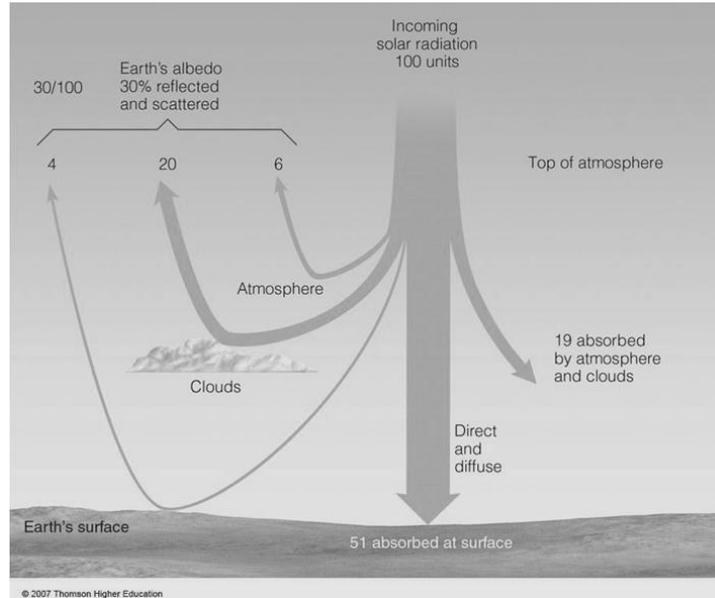


Figura 12: Ilustração dos fenômenos de absorção ou reflexão da radiação Solar<sup>33</sup>.

## 2.2 Interação da radiação com a matéria

Toda a matéria é constituída por átomos, constituídos por um núcleo de carga positiva de neutrões e prótons e rodeado por uma nuvem de electrões de carga negativa. A um conjunto de átomos ligados podemos chamar corpo e à sua estrutura rede. Ao incidir radiação sobre um corpo acontecem três tipos de interações diferentes, a transmissão, a reflexão e a absorção<sup>34</sup>, e à fracção de radiação a que corresponde a cada acontecimento chama-se respectivamente transmitância, reflectância e absorvância, valores que são únicos para cada tipo de material. Na figura 13 pode observar-se uma ilustração representativa destes três tipos de interacção da radiação com um corpo<sup>35</sup>.

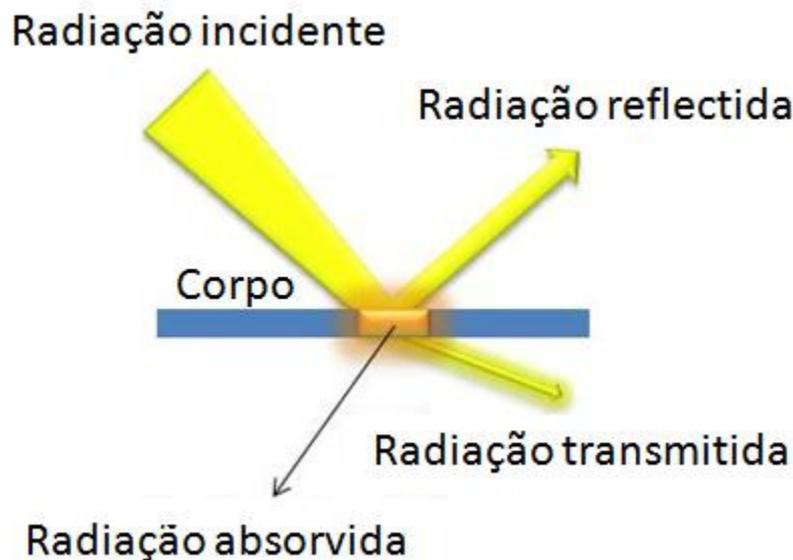


Figura 13: Ilustração da interacção da radiação com a matéria.

Apenas a radiação que é absorvida interessa neste ponto, pois é a que provoca aumento da temperatura nos materiais, a restante parte da radiação são considerada perdas, pois não interferem com a matéria, as perdas dos painéis serão analisadas em maior detalhe posteriormente.

Para melhor compreender a maneira como a radiação interage com a matéria é mais fácil se assumirmos que a radiação se comporta como partículas discretas, os fotões, que têm uma quantidade fixa de energia, ou *quantum* de energia. Neste modelo, a energia de um fóton é inversamente proporcional ao comprimento de onda da radiação que representa, dada pela equação 1, com a energia do fóton representada por  $E_{fotão}$ ,  $h$  representa a constante de Planck ( $6,626 \cdot 10^{-34}$  (J.s)),  $c$  a velocidade da luz no vácuo ( $3 \cdot 10^8$  (m/s<sup>2</sup>)) e  $\lambda$  o comprimento de onda da radiação.

$$E_{fotão} = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (1)$$

A grande maioria da intensidade da radiação solar, chega à superfície terrestre com comprimentos de onda situados entre 200nm e 2000nm. A energia destes fotões não é suficiente para vencer as forças nucleares e atingir o núcleo de um átomo, implicando assim que a interacção apenas ocorra com as partículas exteriores ao núcleo, isto é, apenas existe interacção fóton-electrão no fenómeno de absorção. Apenas pode existir interacção neste par se a energia dos fotões coincidir com a energia que um electrão necessita para mudar de estado de acordo com as regras da mecânica quântica. Num corpo constituído por vários átomos, onde chamamos rede à sua organização espacial, existem também vários níveis de energia possíveis para um electrão ocupar, e como resultado, os sólidos não mostram linhas distintas de absorção, mas sim um espectro contínuo de comprimentos de onda.

Quando um corpo absorve radiação, este adquire um estado superior de excitação, e consequentemente vibrações de rede mais vigorosas, aumentando assim a energia interna do corpo. Com o aumento das vibrações internas de um corpo aumentam também as colisões entre as partículas que o constituem, sendo através destas colisões que a temperatura do corpo aumenta. Como as partículas procuram sempre ocupar o estado mais baixo de energia, um corpo que sofre um aumento de temperatura, vai trocar calor com as partículas próximas cuja temperatura seja inferior à sua<sup>36</sup>.

### 2.3 Perdas de energia

Considera-se perda de energia em painéis solares toda a energia que o sistema dispõe e não converte em calor.

Nem toda a radiação que incide sobre um corpo é directamente convertida em calor, no ponto anterior já foi referido que parte da radiação não chega a interagir com o corpo. A radiação ao incidir sobre uma superfície, dependendo do ângulo de incidência, é mais ou menos reflectida de novo para a atmosfera<sup>37</sup>. Para além da radiação que é reflectida existe a radiação transmitida, que consiste na parte de radiação que atravessa o corpo sem interagir com o mesmo, isto é, a energia desses fotões não corresponde à energia necessária para provocar qualquer interacção com o corpo.

Até agora foram estudados apenas os fenómenos directamente ligados com a radiação incidente, agora vai-se estudar o que acontece à energia que foi absorvida.

Num painel solar térmico nem toda a radiação que é absorvida é convertida em calor, e também nem todo o calor convertido é transferido para o fluido que circula no interior do absorvedor. Existem três fenómenos de perdas associados à transferência de energia em forma de calor, as perdas por convecção, por condução e por radiação.

As perdas por convecção referem-se a trocas de calor nos fluidos. Se a temperatura de um fluido que está em contacto directo com o absorvedor for menor que do que a temperatura do absorvedor, dá-se uma troca de calor no sentido do absorvedor para o fluido, aumentando assim a temperatura do fluido.

As perdas por condução devem-se ao contacto do absorvedor com outro sólido que está a uma temperatura inferior. É devido a este fenómeno que o calor é transferido do absorvedor para o fluido, mas acontece também com todas as outras superfícies de temperatura inferior com que o absorvedor esteja em contacto. Muitas vezes usam-se materiais de baixa condutividade térmica, que é a quantidade de calor necessário para elevar a temperatura de um corpo um grau, para estar em contacto directo com a parte exterior do absorvedor, de modo a reduzir ao máximo a perdas de calor por condução.

Por fim existe as perdas por radiação. Este fenómeno deve-se à emissão natural de radiação de todos os corpos, conforme a sua temperatura. Assim tal como o Sol, também o absorvedor emite radiação mediante a temperatura a que se encontra. Para conhecer o espectro de radiação de um corpo, podemos assumir que este se comporta como um corpo negro. A lei de Planck (1901) permite descrever o espectro de radiação de um corpo negro em função do comprimento de onda e da temperatura do corpo. A lei pode descrever-se pela equação 2, onde  $I(\lambda, T)$  é a irradiância do corpo negro,  $\lambda$  o comprimento de onda da radiação emitida,  $T$  a temperatura a que o corpo se encontra,  $h$  a constante de Planck ( $6,626 \cdot 10^{-34}$  (J.s)),  $c$  a velocidade da luz no vácuo ( $3 \cdot 10^8$  (m/s<sup>2</sup>)) e  $k$  a constante de Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  (J/K)).

$$I(\lambda, T) = \frac{2 \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{(h \cdot c / \lambda \cdot k \cdot T)} - 1} \quad (2)$$

É através da emissão de radiação que um corpo mantém o equilíbrio térmico. Embora o absorvedor não seja um corpo negro ideal, esta aproximação torna-se válida ao usar um absorvedor de cor negra, e com uma espessura tal que a radiação que atravessa o absorvedor possa ser considerada desprezável quando comparada com a quantidade de radiação absorvida e reflectida. Na figura 14, encontram-se ilustradas as interacções que ocorrem entre um absorvedor e o meio.

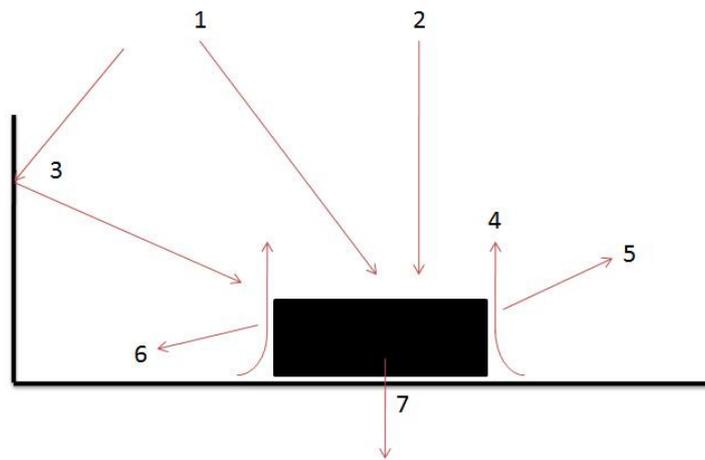


Figura 14: Interação de um absorvedor com o meio envolvente (1-radiação difusa; 2-radiação directa; 3-radiação reflectida nos objectos próximos; 4-perdas por convecção; 5-radiação incidente reflectida; 6-perdas por condução; 7-radiação incidente transmitida).

## 2.4 Sistema Sol-Terra-painel

Para além da intensidade da radiação solar e das perdas que o painel sofre, a geometria de todo o sistema é um factor de elevada importância no solar térmico, e uma das formas de aumentar a eficácia do processo, é maximizar a intensidade de radiação que incide sobre o painel que é absorvida, ou seja, minimizar a reflectida.

O Sol não emite radiação de forma constante, quer em termos de espectro quer em termos de intensidades, pois embora não seja ainda completamente compreendido, sabe-se que acontecem máximos de actividade solar de forma cíclica a cada 11 anos<sup>38</sup>. Também o movimento Terra-Sol, faz com que a proximidade entre ambos os corpos altere de forma cíclica ao longo do tempo, assim quanto mais próximo estiver da fonte maior será a intensidade de radiação incidente por unidade de área, este movimento encontra-se ilustrado na figura 15<sup>39</sup>. Também a rotação da Terra associada com a inclinação do eixo em relação à eclíptica implica que exista variação na duração de horas de sol durante um dia tal como a variação no ângulo que a radiação solar faz com o plano tangente ao globo em determinado ponto.

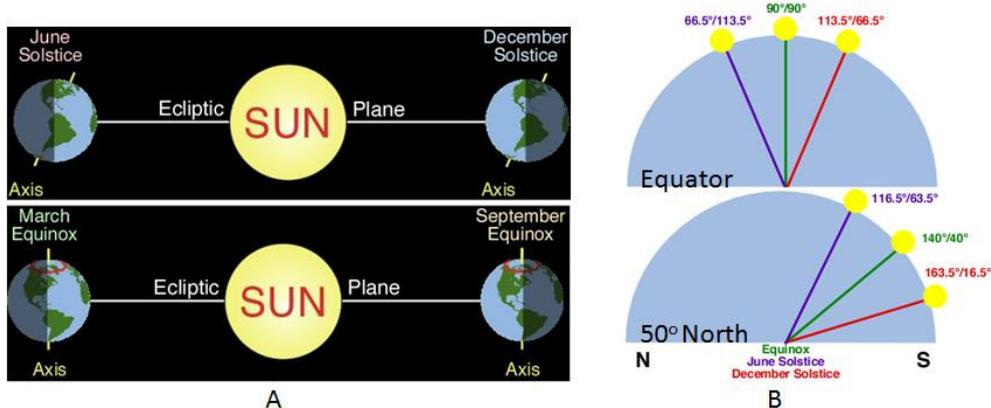
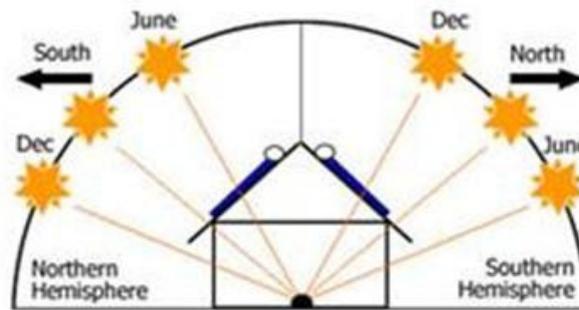


Figura 15: A: Ilustração dos solstícios e dos equinócios; B: Variação da altura solar no meio-dia solar (N/S).

Assim, um painel solar térmico deverá ser montado de modo a aproveitar o máximo possível da radiação, isto é, fazer um ângulo o mais próximo de  $90^{\circ}$  com a direcção de propagação da radiação solar. Para tal a orientação do painel deve acompanhar os movimentos da Terra. Assim ao longo do ano, o ângulo do painel deveria ser ajustado de modo a acompanhar a variação de altura do sol, como se encontra ilustrado na figura 16.

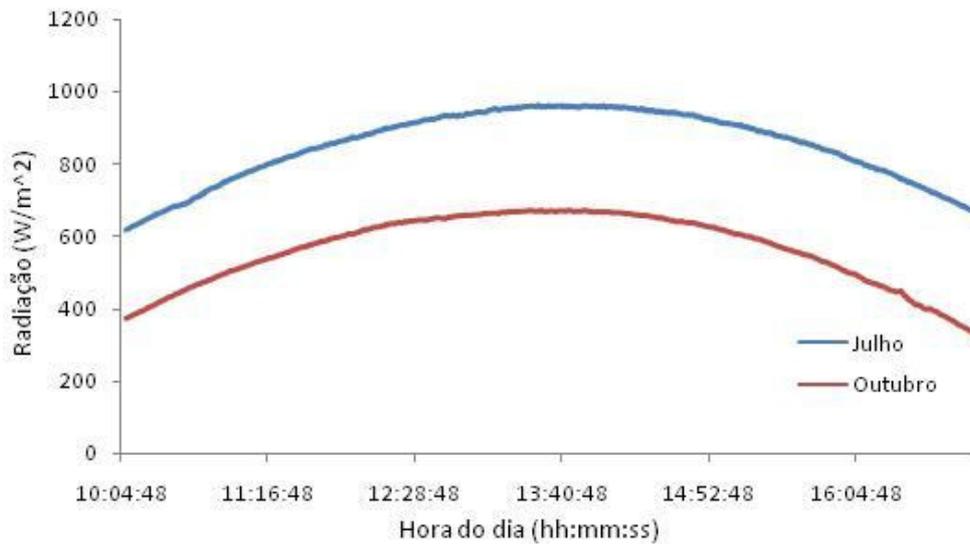


**Figura 16:** Ilustração do ângulo ideal de orientação de um painel solar ao longo do ano, para ambos os hemisférios<sup>40</sup>.

## 2.5 Maximizar o rendimento

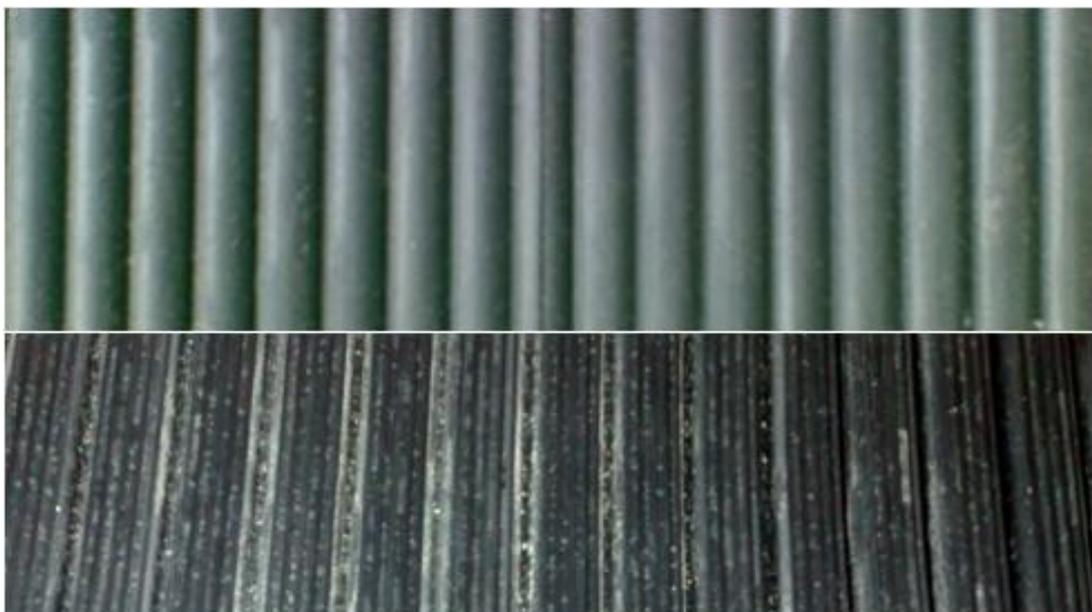
Já foi discutido como maximizar a radiação incidente e quais as perdas associadas a um painel solar térmico, neste ponto discute-se como se podem reduzir essas perdas, e outros processos que possam aumentar o rendimento de um painel. Um dos processos, já foi referido anteriormente, e tem a ver com o ângulo que os raios solares fazem com a superfície do painel. Uma maneira de garantir que o ângulo entre a radiação e o painel se mantém perto dos  $90^{\circ}$  durante todo o dia e ano, seria criar um sistema bidireccional de movimentação que fosse ajustado através de um sensor de radiação, um seguidor solar. Embora seja a solução que permita obter o maior aproveitamento da radiação, não é para a maioria dos casos a viável devido à sua complexidade e custos associados.

Usualmente o painel é deixado numa posição fixa intermédia, isto é, como no Verão a intensidade/disponibilidade de radiação é superior à do Inverno, como pode ser observado na figura 17 que mostra que níveis de radiação para os meses de Julho e Outubro do ano de 2008, pode colocar-se o painel com um determinado ângulo de forma a aproveitar melhor a radiação durante o Inverno, ou seja numa posição mais vertical, Contudo a configuração depende sempre do(s) objectivo(s) principais que levam à aplicação deste tipo de sistema. De referir que os dados de base para a figura 17 foram retirados no decorrer deste estudo.



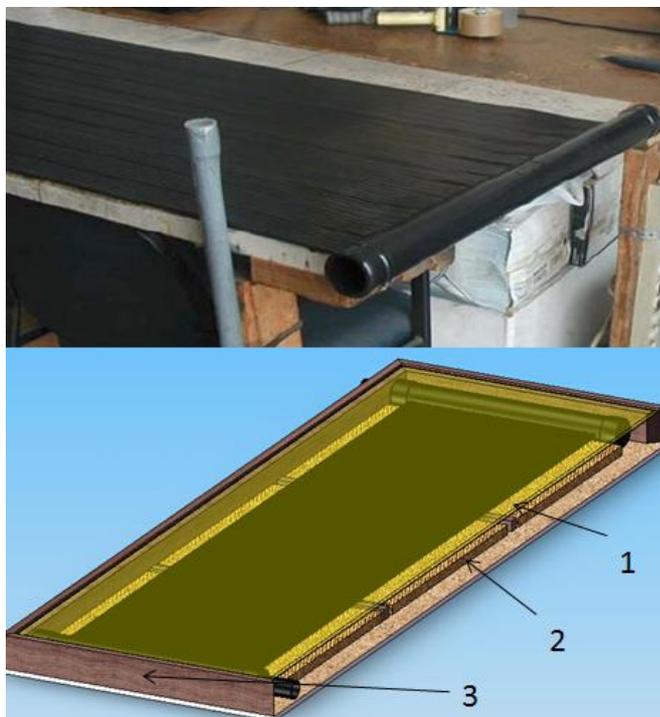
**Figura 17:** Curvas de radiação para os meses de Julho e Outubro, obtidas a partir dos dados da experiência.

Outro factor que pode aumentar ou diminuir a quantidade de radiação absorvida é a rugosidade da superfície absorvora. Uma superfície lisa, quando comparada com uma superfície rugosa, tem uma menor área de contacto com a radiação por área de absorvora, o que implica que uma maior quantidade de radiação seja reflectida de novo para a atmosfera. Assim, usando uma superfície rugosa é possível aumentar a área de superfície do absorvora que entra em contacto directo com a radiação. Na figura 18 podemos observar duas fotografias, uma de um absorvora liso, idêntico ao que foi usado no painel de testes, e outra de um absorvora rugoso que deverá ser testado em trabalhos futuros.



**Figura 18:** Em cima absorvora liso idêntico ao usado no painel de testes; Em baixo absorvora rugoso.

Uma maneira usual de atenuação de grande maioria das perdas de energia que existem num painel solar térmico encontra-se ilustrada na figura 19, que representa dois painéis planos, um simples, e outro no interior de um caixa com uma cobertura transparente e cujo absorvedor assenta numa base de material isolador térmico.



**Figura 19:** Em cima: Exemplo de um painel polimérico típico para aquecimento de água para piscinas, *unglazed*; Em baixo: Esboço de um painel *glazed* (1-cobertura transparente; 2-material isolador; 3-caixa protectora)<sup>41</sup>.

As perdas por condução podem ser reduzidas usando uma base isoladora de calor. Ao assentar o absorvedor num material isolador, podemos reduzir a quantidade de calor que é transferida do painel para a base onde este assenta, isto porque um material isolador possui má condutividade térmica o que induz uma lenta dissipação de calor, tais como lã de vidro ou lã de rocha.

As perdas convectivas que o vento provoca têm um elevado impacto no rendimento de um painel<sup>42</sup>. Mas podem ser também consideravelmente reduzidas evitando que o absorvedor esteja em contacto directo com a atmosfera. Usando uma cobertura transparente à radiação pode evitar-se o contacto entre o absorvedor e o vento, que vai recolher calor apenas da cobertura. Já as perdas por convecção que acontecem no fluido, podem ser reduzidas se a área de contacto entre o fluido e o absorvedor por unidade de volume de fluido for aumentada, isto é, reduzir o tamanho dos tubos por onde o fluido circula, assim as correntes de convecção no interior do fluido são praticamente inexistentes.

Por fim as perdas que acontecem por radiação também podem ser reaproveitadas de modo a aumentar o rendimento de um painel. Ao usar uma cobertura transparente podemos criar efeito de estufa no ambiente que rodeia o absorvedor. Este efeito, devido à sua importância para este estudo, será explicado detalhadamente no ponto seguinte.

## 2.6 Efeito de estufa

O objectivo principal deste trabalho é estudar qual o impacto da introdução de uma cobertura num painel. A consequência mais evidente é a “criação” do efeito de estufa na caixa-de-ar entre o absorvedor e a parte inferior da cobertura. O efeito de estufa é um fenómeno já conhecido há muito tempo, e a sua implicação mais evidente é o aumento da temperatura no interior do espaço onde o efeito ocorre.

O efeito é facilmente observado no dia-a-dia, embora a sua percepção seja ignorada. Por exemplo, uma divisão de um edifício com muitas janelas viradas para sul numa quente tarde de verão, se as suas janelas tiverem fechadas, a temperatura da divisão é largamente superior à temperatura de outras divisões e do exterior. Outro uso diário do efeito de estufa, desta vez na agricultura, acontece quando se constrói sobre as culturas cultivadas uma estufa, onde a temperatura no seu interior é superior à temperatura exterior mesmo nos meses mais frios, que permite, para algumas culturas, maximizar a produção. Também o excesso de libertação de dióxido de carbono para a atmosfera implica que parte da radiação emitida pela superfície da Terra, que costumava escapar para o espaço, seja reflectida para a superfície novamente, aumentando assim a temperatura no interior da atmosfera terrestre. A figura 20 ilustra o fenómeno do efeito de estufa no interior de um painel solar térmico *glazed*, onde a radiação emitida pelo absorvedor volta a ser reflectida na cobertura.

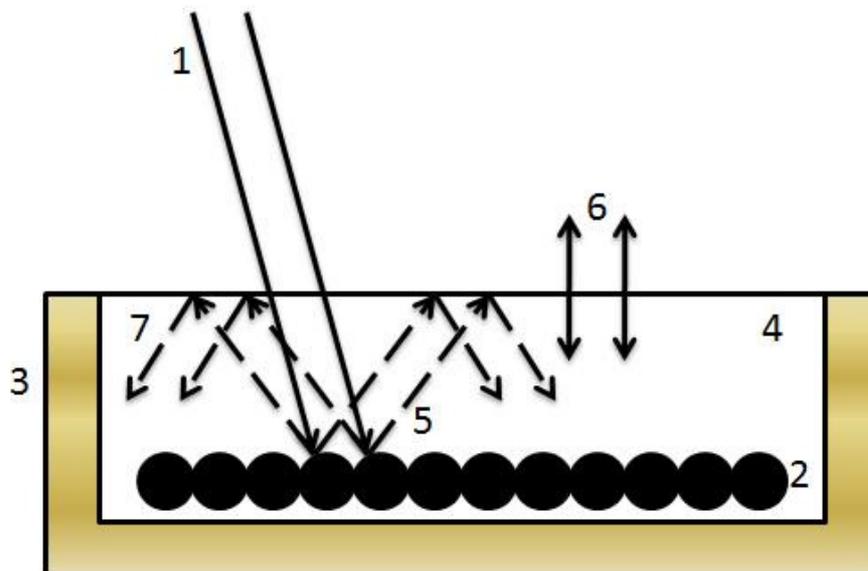


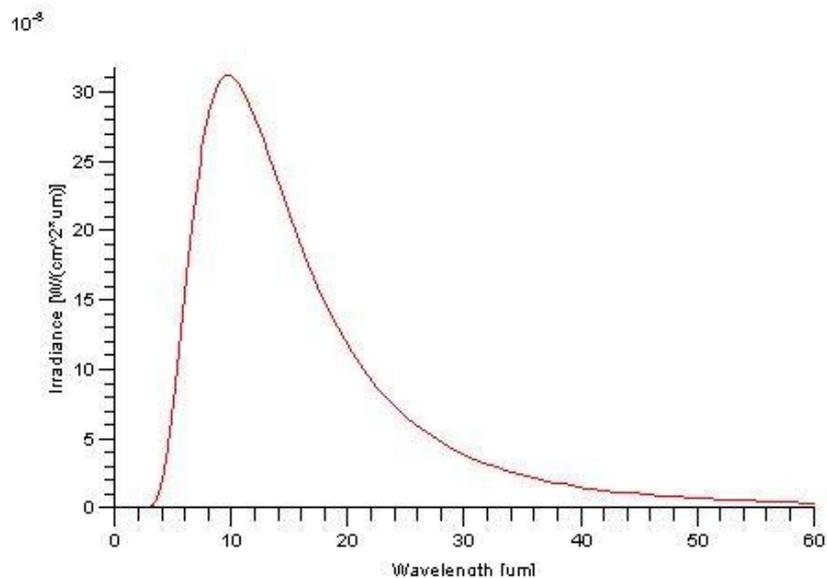
Figura 20: Ilustração do efeito de estufa num painel solar térmico plano do tipo *glazed* (1-Radiação solar incidente; 2- Absorvedor de cor negra; 3- Caixa protectora; 4- Cobertura transparente; 5- Emissão de radiação do absorvedor devido ao seu aumento de temperatura; 6- Emissão de radiação da cobertura devido ao seu aumento de temperatura; 7- Radiação emitida reflectida na cobertura).

O efeito de estufa acontece porque existe uma camada transparente sobre o corpo que recebe radiação. Já foi explicado, que um corpo ao absorver radiação vai aumentar a sua temperatura, e em consequência desse aumento liberta radiação novamente para o exterior, radiação cujo espectro depende unicamente da temperatura a que o corpo se encontra. A radiação que o corpo emite vai localizar-se numa zona espectral de comprimento de onda

algumas ordens de grandeza superior à radiação que provocou o aquecimento do corpo, à qual a cobertura era transparente.

A fonte de radiação nos painéis solares é o Sol, onde a grande maioria da intensidade da radiação se situa entre os 200nm e os 2000nm, zona espectral em que a maioria dos plásticos ou vidros são transparentes. A maioria desses plásticos torna-se opaca para comprimentos de onda na ordem dos  $\mu\text{m}$ , sendo alguns, inclusive, usados para fins ópticos de modo a bloquear radiações destas ordens<sup>43</sup>.

Para um painel solar térmico de baixa temperatura, a temperatura do absorvedor situa-se na ordem dos 25°C aos 45°C, e como podemos ver pela figura 21, um corpo negro a estas temperaturas tem um espectro de radiação entre os 2 $\mu\text{m}$  e os 40 $\mu\text{m}$ , comprimentos de onda para os quais a maioria dos plásticos ou vidros transparentes são opacos.



**Figura 21: Espectro de radiação de um corpo negro à temperatura de 300K<sup>44</sup>.**

Ao usar coberturas opacas na zona do espectro que o absorvedor emite, podemos aumentar a temperatura no interior da caixa-de-ar, fazendo com que o funcionamento de um painel solar seja melhorado aproveitando o efeito de estufa.

## 2.7 Rendimento de um coletor solar térmico

O parâmetro de comparação que mais relevância tem neste trabalho, é o rendimento do coletor. A questão a responder é: qual a alteração no rendimento com a introdução de uma cobertura transparente de policarbonato estruturado?

Quando se calcula um parâmetro, devem ser seguidas normas, de modo que seja possível comparar esse parâmetro para todos os painéis deste tipo sobre as mesmas condições de teste. O método que foi usado para determinar o rendimento do coletor solar térmico encontra-se descrito na Norma Europeia EN 12975-2:2006, usada para certificar colectores solares térmicos<sup>45</sup>, que é descrita sumariamente em seguida.

O rendimento de um painel é calculado pelo quociente entre a potência útil efectiva extraída para o fluido e a energia solar captada pelo painel.

A potência útil efectiva extraída,  $\dot{Q}$ , é calculada a partir do produto entre a massa efectiva,  $\dot{m}$ , (que é obtida a partir do caudal volúmico),  $C_p$  a capacidade térmica à temperatura média do fluido e a variação de temperatura sofrida pelo fluido ao atravessar o absorvedor,  $\Delta T$  (equação 3):

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (3)$$

A energia solar captada por um painel de área  $A$ , que no caso dos painéis usados coincide com a área de abertura do colector, é  $G \cdot A$ , onde  $G$  é a potência de radiação incidente no painel por unidade de área. Podemos assim calcular o rendimento,  $(\eta)$ , como mostra a equação 4:

$$\eta = \frac{\dot{Q}}{G \cdot A} \quad (4)$$

Como referido anteriormente, neste trabalho, o objectivo é calcular o rendimento do painel solar térmico em duas situações diferentes, unglazed e glazed. O cálculo do rendimento foi feito com base na equação 4. Embora na norma seja descrito como calcular o rendimento instantâneo e os respectivos factores de perdas do colector. Para a caracterização do colector incluindo o valor do rendimento instantâneo e de perdas associadas seria necessário efectuar ensaios de uma forma diferente daquela estruturada por nós, necessitando aí de valores de entrada fixos e fazendo ensaios para cada valor de entrada (radiação, temperatura de entrada do fluido, temperatura ambiente e caudal).

O método para calcular o rendimento instantâneo pode ser descrito sumariamente, da seguinte forma: É necessário conhecer a temperatura média do fluido,  $T_m$ , e obtêm-se com base na temperatura de entrada,  $T_{in}$ , e a variação de temperatura,  $\Delta T$  (equação 5). Pode-se então calcular-se uma nova variável, a diferença de temperatura reduzida,  $T_m^*$ , com base na temperatura média do fluido, temperatura ambiente,  $T_a$ , e a radiação  $G$ . A variável  $T_m^*$  permite analisar a resposta do colector em relação à radiação incidente e temperatura ambiente, como podemos verificar na equação 6.

$$T_m = T_{in} + \frac{\Delta T}{2} \quad (5)$$

$$T_m^* = \frac{T_m - T_a}{G} \quad (6)$$

Usualmente o rendimento de um colector é descrito através de três parâmetros ( $n_o$ ,  $a_1$  e  $a_2$ ), que são obtidos através do ajuste estatístico da curva do rendimento em função da  $T_m^*$ . O parâmetro  $n_o$  representa o rendimento óptico do colector e os índices  $a_1$  e  $a_2$  são denominados factores de perdas, de primeira e segunda ordem, respectivamente. A equação 7 representa a expressão de ajuste.

$$\eta_{(T_m^*)} = \eta_0 - a_1 \cdot T_m^* - a_2 \cdot G \cdot (T_m^*)^2 \quad (7)$$

Resta acrescentar que, a norma indica que para estes cálculos serem considerados válidos, é necessário garantir que o ângulo entre a normal da superfície do colector e a direcção de incidência dos raios solares não pode ser superior a 20°.

### 3. Descrição experimental

#### 3.1 Condições experimentais

Este trabalho foi realizado na zona industrial da região de Vagos (40°33'N e 8°40'W), distrito de Aveiro, Portugal. Apresenta um clima temperado mediterrânico de feição marítima, tendo temperaturas médias anuais que rondam os 14°C, fracas amplitudes térmicas anuais e precipitações rondando os 1000mm, a maior parte da região situa-se abaixo dos 40 metros de altitude em relação ao nível do mar. A colecção de dados decorreu entre os meses de Maio e Outubro do ano de 2008.

O sistema foi montado no edifício da empresa Prirev, Lda. A figura 22, ilustra os componentes que foram usados para os testes de ensaio dos painéis solares térmicos poliméricos.

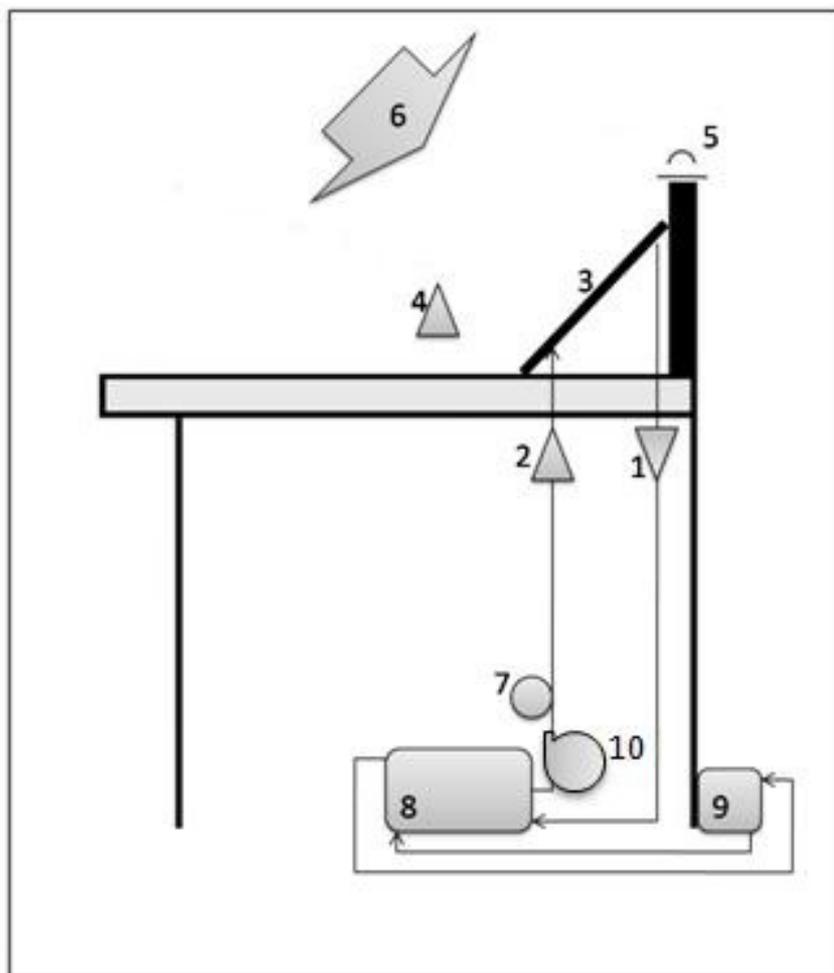


Figura 22: Esquema de ensaios dos colectores solar térmicos da empresa Prirev (1-Sensor de temperatura do fluido de saída (Tout); 2-Sensor de temperatura do fluido de entrada (Tin); 3-Painel térmico polimérico; 4-Sensor de temperatura ambiente (Tamb); 5-Piranómetro (G); 6-Radiação Solar incidente; 7-Medidor de caudal (C); 8-Tanque de armazenamento do fluido; 9-Refrigerador do fluido; 10-Bombas de circulação eléctricas).

Um painel de 1.2 m<sup>2</sup> encontra-se a uma altura de 7.5 m do solo, no telhado do edifício, virado para sul com uma inclinação de 45° em relação à vertical. Foi escolhido este ângulo com base na latitude e no período durante o qual os testes foram feitos, de modo a respeitar os requisitos da Norma Europeia EN 12975-2:2006, que implica que os testes sejam feitos dentro de um limite máximo de 20° de diferença entre a perpendicular à superfície do painel e a direcção dos raios solares. Certificou-se que não existia possibilidade de quaisquer sombras incidirem sobre o painel.

De modo a poder caracterizar o rendimento do painel, é necessário registar os valores da temperatura do fluido à entrada do painel e à saída (Tin e Tout), a radiação total incidente sobre o painel (G), a temperatura ambiente a que o painel se encontra (Tamb) e o caudal do fluido que atravessa o painel (C).

Para medir o valor da radiação foi usado um piranómetro, que estava localizado ao lado do painel de modo a medir toda a radiação que nele incide com o menor erro possível, incluindo a que possa ser reflectida nas superfícies próximas.

Foram usados sensores de temperatura, do tipo PT100, 2 no topo do edifício que mediam a temperatura ao sol e à sombra, e dois junto ao depósito que mediam a temperatura de entrada e de saída do fluido usado, que foi água. Houve o cuidado de inserir os sensores afastados de curvas ou estrangulamentos nas tubagens, pois estas causam normalmente turbulência que poderia afectar as medições.

O medidor de caudal foi também instalado numa zona longe de turbulência de modo a medir com maior rigor possível o caudal volumétrico. Foram usadas 2 bombas de recirculação para garantir um caudal dentro dos padrões da norma, gerando um caudal máximo de 140 litros/minuto.

O fluido usado foi água, que se encontrava num reservatório com um volume de 1000 litros, isolado, a partir do qual as bombas bombeavam a água para o painel, e posteriormente voltava de novo para o mesmo reservatório.

De modo a garantir que as condições de teste eram mantidas aproximadamente constantes, um sistema refrigerador ar-água, de funcionamento idêntico aos radiadores dos automóveis, encontra-se anexado ao sistema e é accionado sempre que a temperatura do fluido no reservatório excedia os 30°C.

Todas as tubagens foram envolvidas com uma espuma isoladora, minimizando as perdas de calor no transporte do fluido entre o reservatório e o painel.

Através de um sistema informático todos os dados eram registados num intervalo de 1s.

As figuras 23 e 24 mostram fotografias de todos os componentes usados na experiência.



**Figura 23: Fotografias dos componentes usados 1 (da esquerda para a direita: painel *unglazed*, painel *glazed*, reservatório de água, PC de aquisição de dados, refrigerador).**



**Figura 24:** Fotografias dos componentes usados 2 (da esquerda para a direita: piranómetro, tubagens revestidas, sensores de temperatura, medidor de caudal, bombas eléctricas).

### 3.2 O colector solar

O principal componente de qualquer sistema solar térmico é o painel solar. Neste trabalho, o objectivo é comparar dois tipos de configurações de um painel, uma onde o absorvedor se encontra directamente exposto à radiação solar e outra onde o painel é coberto por uma estrutura de policarbonato estruturado transparente especialmente construído para gerar efeito de estufa<sup>46</sup>. Esta tinha uma espessura de 8mm e foi submetida a um tratamento UV. Embora a cobertura cubra a totalidade do painel, este não se encontra hermeticamente isolado, fazendo com que a pressão no interior do painel se mantenha constante e que as dilatações que os polímeros sofrem com as variações de temperatura não danifiquem o funcionamento do painel. O colector solar em estudo é constituído por dois distribuidores de polipropileno aos quais se conectou o material absorvedor, já o absorvedor é feito de *epdm* (*ethylene propylene diene monomer*) preto e liso<sup>47</sup>. As especificações técnicas do painel encontram-se apresentadas na tabela 1.

**Tabela 1:** Características técnicas do painel solar usado.

Rendimento óptico ( $n_0$ )	0.86
Coefficiente de perdas lineares ( $a_1$ )	17.7 (W/m <sup>2</sup> .°C)
Dimensões exteriores	Largura: variável; comprimento: variável
Composição	Dois distribuidores ligados a quatro mangas de absorvedor de 18 canais/cada.
Composição dos distribuidores	Polipropileno resistente à radiação UV, com 72 conectores.
Dimensões dos distribuidores	Comprimento: 71.12 (cm); diâmetro: 5.08 (cm)
Composição do colector	EPDM (flexível) resistente ao UV e Ozono
Capacidade volumétrica	2.37 L/m <sup>2</sup>
Dimensões interiores	Largura: 60 (cm); comprimento: variável
Dimensões dos canais de água	Øinterior: 1.9(mm); Øexterior: 3.3 (mm)
Peso	Vazio: 4.9 (kg/m <sup>2</sup> ); cheio: 7.4 (kg/m <sup>2</sup> )
Temperatura máxima de operação	60°C
Pressão máxima de operação	2.75 bar
Caudal máximo	400 L/h m <sup>2</sup>

O painel foi colocado sobre uma base de contraplacado com algumas barras de madeira na horizontal, afastadas de modo a simular um telhado típico. Na figura 25 pode observar-se várias fotos com alguns dos detalhes dos painéis usados.

Na versão unglazed podemos observar como as tiras de *epdm* são ligadas a um distribuidor de alimentação e um de retorno, as ligação dos distribuidores às tubagens e a maneira como a ligação entre o *epdm* e os distribuidores é feita.

Na versão glazed os cantos da cobertura foram ligados por silicone transparente de modo a interferir o mínimo possível com o funcionamento da cobertura, a cobertura foi fixa à madeira de forma a possibilitar a sua dilatação térmica e foram deixados orifícios junto às ligações das tubagens com os distribuidores de modo a que a pressão se mantivesse constante no interior do painel.



**Figura 25:** Algumas fotos com pormenores dos painéis (em cima painel *unglazed*: as 4 tiras de *epdm*; a ligação do distribuidor com as tubagens; a ligação de cada tira ao distribuidor; em baixo painel *glazed*: o silicone transparente a unir a juntas da cobertura; fixação que permite a dilatação/compressão à cobertura; orifícios nas junções entre os tubos e os distribuidores).

### 3.3 Procedimento

Neste ponto apresentamos uma breve descrição do procedimento de medição usado nesta experiência. A aquisição de dados neste tipo de caracterizações deve ser feita de modo repetido e sempre nas mesmas condições. Antes de iniciar os testes foi feita uma calibração dos termopares de modo a conhecer qual a relação das temperaturas medidas entre eles.

A característica principal, e também exigida pela norma, é que, em qualquer ensaio a curva de radiação deve ser regular, isto é, todos os testes devem ser feitos em dias de céu limpo, pois a existência de sombras implica alteração das condições de teste devido à rápida diminuição ou aumento de radiação. Outra característica relacionada com o clima é o vento, os testes devem ser feitos sobre condições de baixo fluxo de ar, especialmente nos painéis *unglazed* pois o colector está em contacto directo com o ar.

Inicialmente começou por se registar dados do painel sem cobertura. Fizeram-se várias medições de modo a obter uma média, repetindo-se o procedimento para o painel com a cobertura. Em qualquer dos casos, as medições foram efectuadas no período temporal entre as 10h00 e as 17h00, com algumas excepções. Inicialmente era necessário “arrancar” o programa de aquisição de sinais e ligar todos os componentes do sistema. O último componente a ligar seriam sempre as bombas de recirculação, sendo o caudal controlado de modo a este atingir o valor mínimo necessário e permanecer constante.

De modo a determinar as condições mínimas dos parâmetros de entrada que o painel necessita para obter rendimentos positivos, foi deixado o sistema trabalhar durante a noite. Este teste também permitiu perceber quais as perdas do painel para o meio durante a noite devido apenas á circulação do fluido.

## 4. Resultados

### 4.1 Caracterização óptica

Para além da experiência realizada na empresa, foram feitas análises ópticas ao absorvedor polimérico e à cobertura, permitindo assim conhecer os níveis de transmissão da cobertura e absorção do polímero.

Foi usado um espectrofotómetro capaz de trabalhar com amostras sólidas, opacas e rugosas, com capacidade de detectar a radiação que é reflectida em todas as direcções, e ao mesmo tempo que essa intensidade não dependa do ângulo de detecção.

A reflectância do *epdm* foi obtida a partir de um shimadzu UV-3600, com uma esfera integradora que permite medir a radiação independentemente do ângulo em que esta é reflectida (figura 26).



Figura 26: Espectrofotómetro SHIMADZU UV-3600<sup>48</sup>.

Foram também analisadas amostras de *epdm* pintadas com tintas selectivas, especialmente concebidas para manter elevados níveis de absorção, adicionando protecção relativamente à radiação UV.

A partir da reflectância pode ser determinada a absorvância se for conhecida a transmitância. As três propriedades relacionam-se como mostra a equação 8, onde T, R e A são respectivamente os coeficientes de transmissão, reflexão e absorção, a soma destes coeficientes é igual à unidade.

$$1 = T + R + A \leftrightarrow A = 1 - (T + R) \quad (8)$$

Uma vez que a amostra é opaca e de cor escura, assume-se que o valor de transmissão seja desprezável, sendo então possível conhecer o valor da absorção apenas a partir da diferença entre a unidade e o coeficiente de reflexão.

Já para a cobertura de o policarbonato, pretendia-se conhecer o espectro de transmissão, uma vez que esta deve ser transparente para a largura de banda onde se situa a grande maioria da intensidade da radiação solar.

Devido a limitações do equipamento, apenas foi possível fazer análises entre os 220nm e os 1800nm, que embora permita conhecer a absorção do polímero e transmissão da

cobertura em relação à radiação solar, não permite conhecer a transmissão em relação aos valores de emissão do absorvedor, que se situa a partir dos 4000nm até aos 40000nm. Na figura 27 podemos encontrar/comparar o espectro de absorção para o *epdm* normal e pintado. Nestas curvas existe uma mudança de sensor aos 820 nm, que tem uma sensibilidade diferente, por isso as curvas apresentam uma maior oscilação nos valores a partir deste comprimento de onda. Por sua vez a figura 28 apresenta o espectro de transmissão da cobertura.

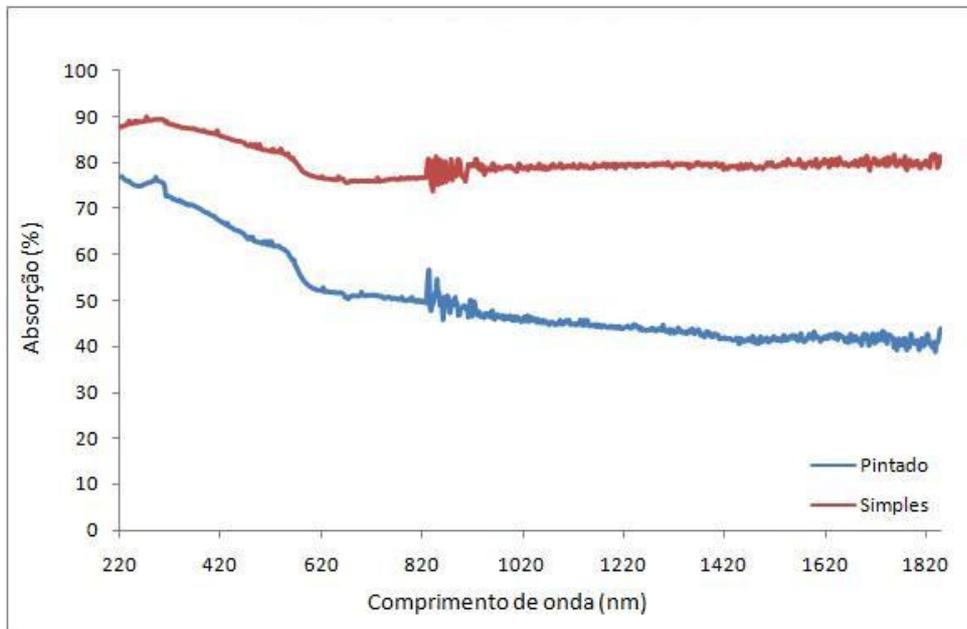


Figura 27: Espectros de absorção para o polímero simples e pintado.

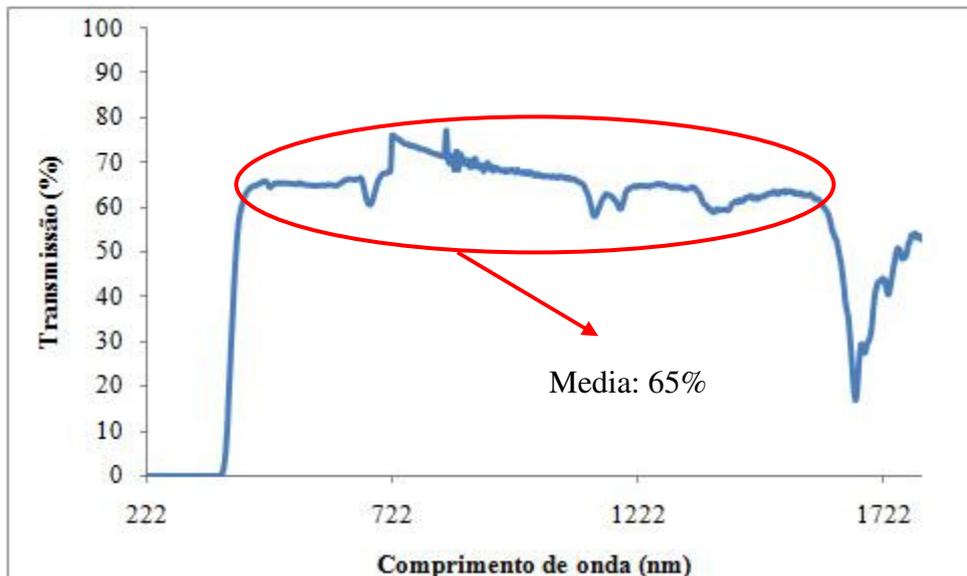
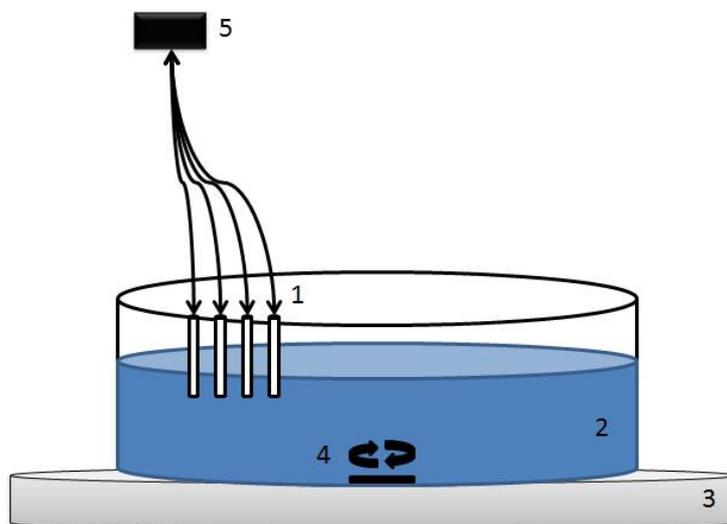


Figura 28: Espectro de transmissão para a cobertura de policarbonato.

## 4.2 Calibração dos termopares

Os sensores de temperatura são os elementos que fornecem um dos dados com maior impacto no cálculo do rendimento, o  $\Delta T$ . Antes de iniciar a recolha de dados, e por existir no sistema de aquisição de dados a possibilidade de usar 2 (medição de  $T_{in}$  e de  $T_{out}$ ) de 4 termopares, foi feita uma experiência que nos permitiu calibrar a componente térmica do sistema.

Na figura 29 encontra-se ilustrada a experiência realizada. Usou-se um pequeno reservatório contendo água, inicialmente com algum gelo de modo a podermos medir temperaturas abaixo dos 10°C. A aquisição do valor de temperatura de cada sensor ocorreu em simultâneo e ao mesmo tempo que se aqueceu, muito lentamente ( $\sim 30^\circ\text{C}/\text{h}$ ), a água. De modo a garantir um valor de temperatura aproximadamente homogéneo em todo o reservatório foi usado um agitador magnético. A experiência foi repetida 3 vezes de modo a termos valores com maior grau de certeza.



**Figura 29:** Calibração dos termopares (1: termopares; 2: reservatório com água; 3: aquecedor; 4: agitador magnético; 5: recolha de dados).

Na figura 30 apresenta-se uma média dos valores de temperatura registados por cada sensor. Observam-se alguns saltos repentinos nas curvas de temperatura que se devem ao facto de ter sido usado um aquecedor com um sensor de temperatura que ligava e desligava à medida que a temperatura ia subindo, e por vezes o aquecedor estava ligado alguns segundos a mais.

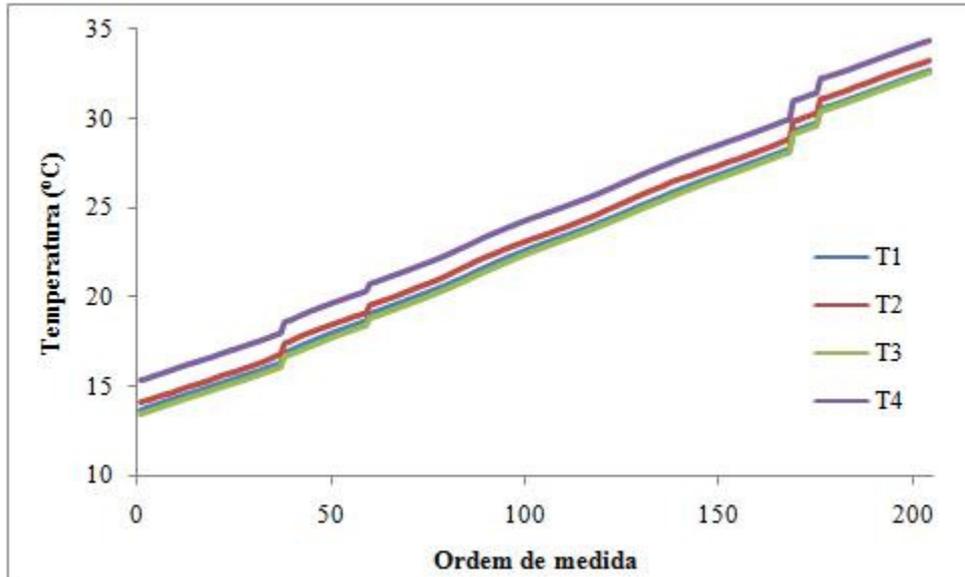


Figura 30: Comparação entre os 4 termopares dos valores de temperaturas registadas ao longo da experiência de calibração.

Pela análise destas curvas podemos verificar visualmente que existem diferenças nas leituras dos mesmos. Assim de modo a conhecer qual o par mais indicado, uma vez que estes não se encontram calibrados de maneira igual, deverá ser feita uma comparação entre todos os pares possíveis e verificar qual o par que faz as leituras mais próximas (figura 31). Também estes valores surgem de uma média entre os três testes efectuados.

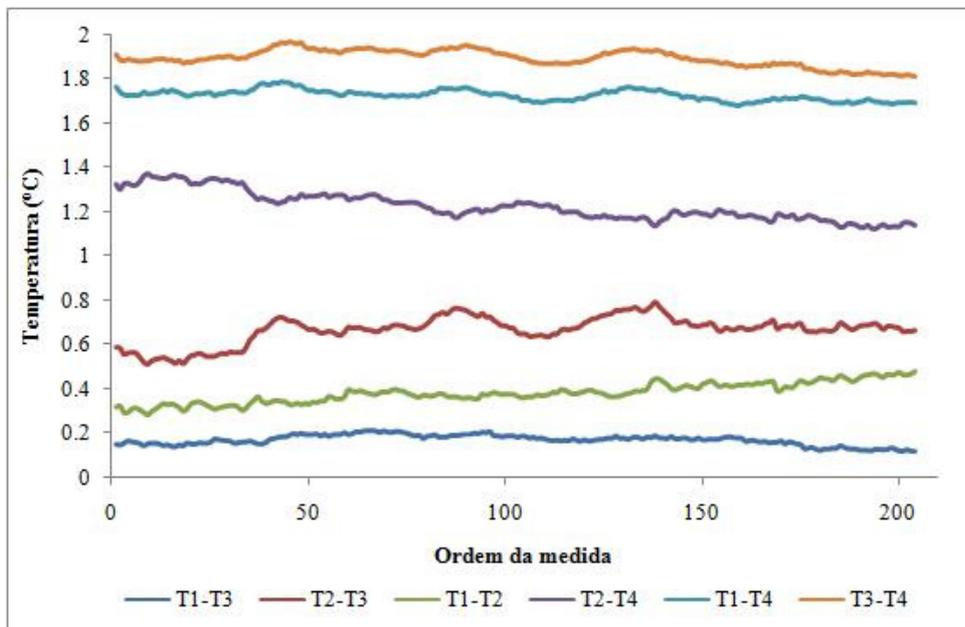


Figura 31: Gráficos com as diferenças das temperaturas entre os 6 pares possíveis de termopares.

Da análise comparativa entre as diferenças dos pares possíveis de formar com os 4 sensores de temperatura podemos verificar que existem diferenças entre os valores de

temperaturas que medem, diferença essa que é mínima para o par T1-T3. Ainda de referir que o software de aquisição de sinal permitia a introdução destes *offsets*.

### 4.3 Painel unglazed

Para o painel *unglazed* foram feitas séries de testes referentes a vários dias, e durante várias alturas do ano, desde o mês de Julho até ao mês de Outubro. O rendimento do painel foi calculado com base nos dados recolhidos da seguinte forma: a partir da temperatura de entrada e de saída, calculou-se a variação de temperatura; a partir da variação de temperatura do fluido e do caudal obteve-se o calor transferido para o fluido; por fim a partir do calor transferido, da área do painel e da radiação incidente no painel foi possível calcular o rendimento do painel. Os dados apresentados foram seleccionados entre muitos outros, cujos critérios de selecção passaram pela regularidade da curva de radiação, temperatura ambiente e de entrada do fluido aproximadamente constante.

A figura 32 mostra a curva da intensidade de radiação. Seleccionaram-se os dados para a gama de valores mais altos, entre 850 e 960  $W/m^2$ . Na figura 33 encontra-se os valores da temperatura ambiente, entrada e saída do fluido, podemos verificar que a temperatura ambiente na gama escolhida não varia muito, mantendo-se aproximadamente entre os 28 e 30°C. Por fim a figura 34 mostra a variação do rendimento ao longo da gama de dados escolhidos, sendo a média situada nos 9.53%.

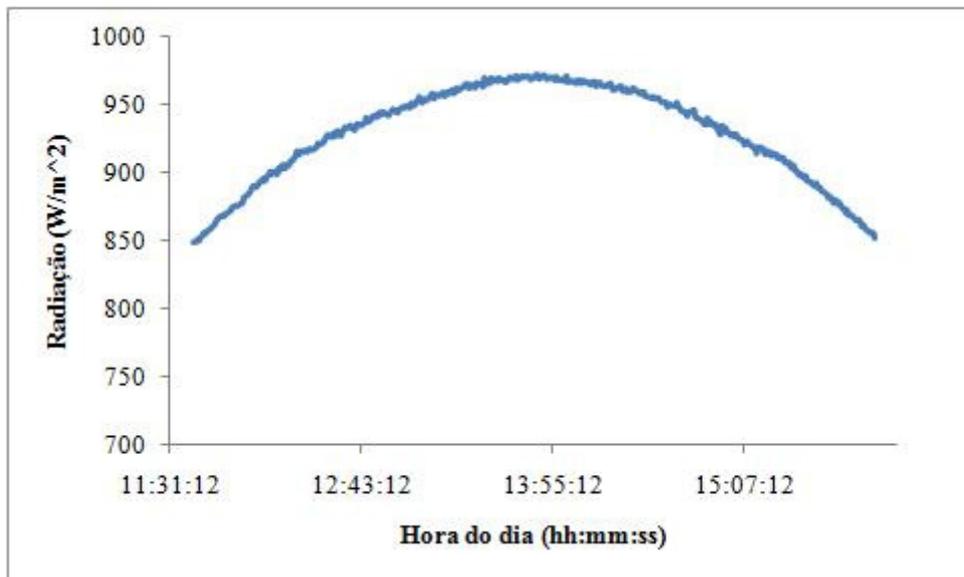


Figura 32: Gráfico da intensidade de radiação incidente ao longo do dia 25 de Julho.

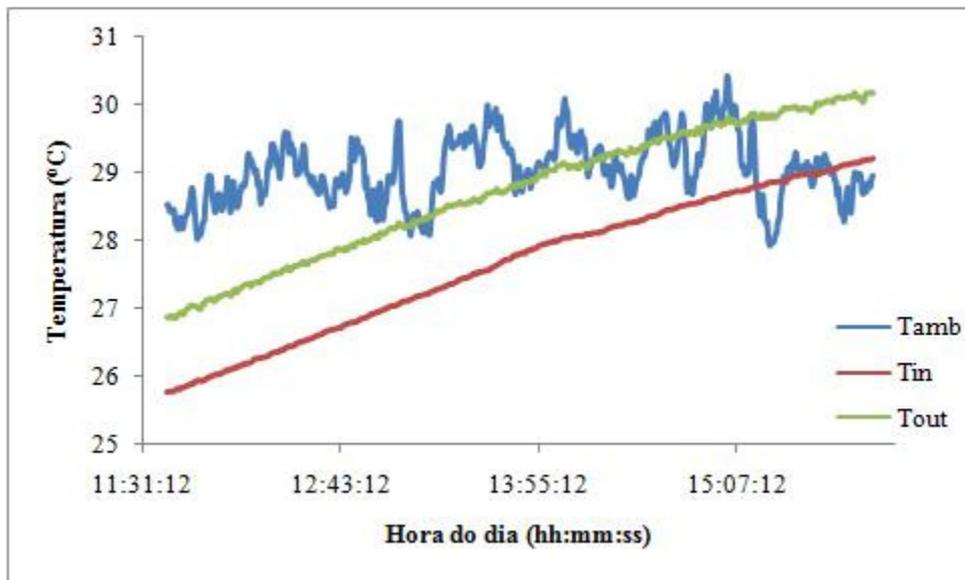


Figura 33: Curvas das temperaturas ambiente e de entrada e saída do fluido ao longo do dia 25 de Julho.

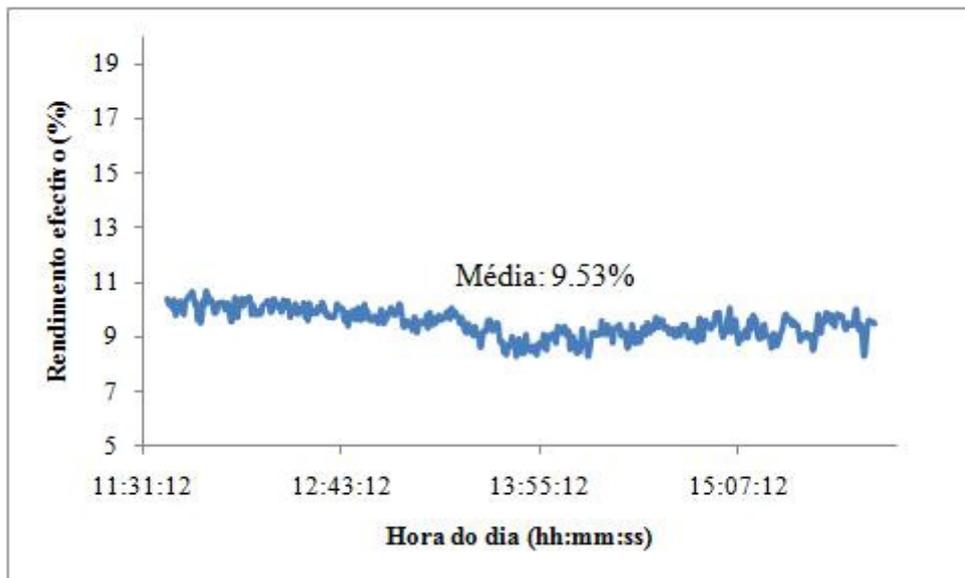


Figura 34: Rendimento ao longo do dia 25 de Julho.

#### 4.4 Painel glazed

Analogamente ao que foi feito no ponto anterior, neste caso apresentam-se os dados referentes à caracterização em condições semelhantes às anteriores para o painel na configuração *glazed*. A figura 35 mostra a curva da intensidade de radiação e seleccionaram-se os dados para a gama de valores mais altos, entre 730 e 870 W/m<sup>2</sup>. Na figura 36 encontra os valores da temperatura ambiente, entrada e saída do fluido, podemos verificar que a temperatura ambiente na gama escolhida não varia muito, mantendo-se

aproximadamente entre os 22 e 24 °C. Por fim a figura 37 mostra a variação do rendimento ao longo da gama escolhida, sendo a média situada nos 15.90%.

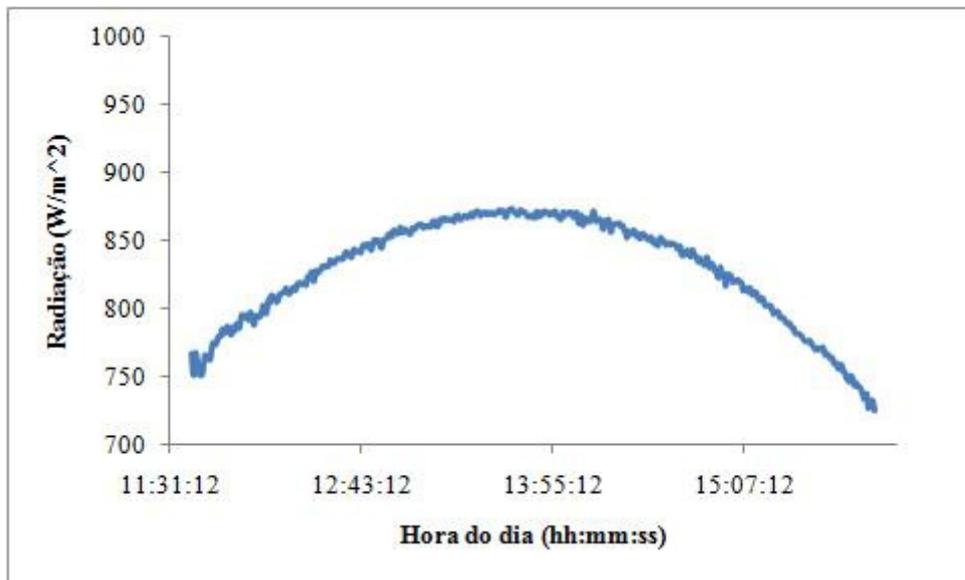


Figura 35: Gráfico da intensidade de radiação incidente ao longo do dia 26 de Agosto.

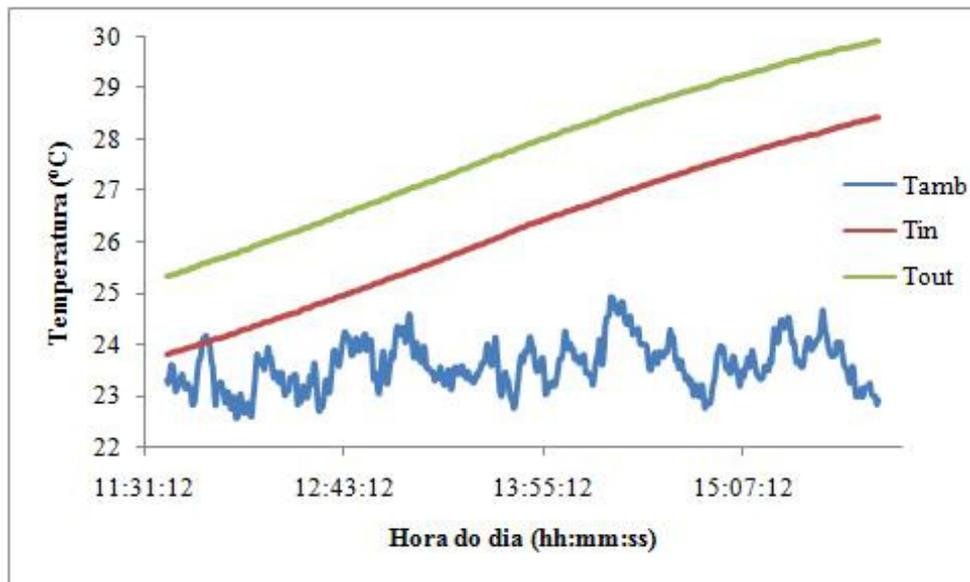


Figura 36: Curvas das temperaturas ambiente e de entrada e saída do fluido ao longo do dia 26 de Agosto.

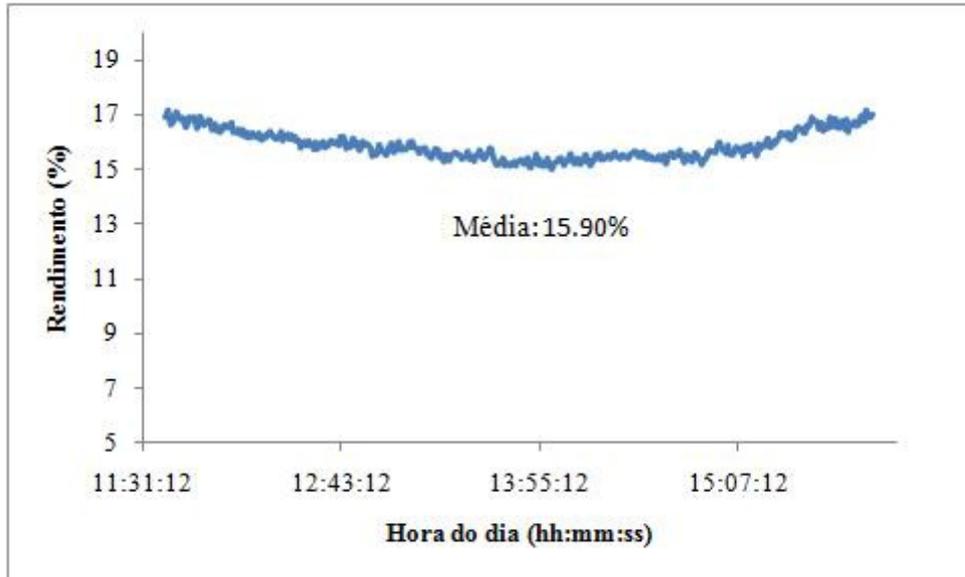


Figura 37: Gráfico da intensidade de radiação incidente ao longo do dia 26 de Agosto.

#### 4.5 Funcionamento noturno dos painéis

Nem sempre os painéis têm rendimentos positivos. Ao circular pelo painel, o fluido também perde calor para o meio, mas quando existe radiação suficiente, essas perdas são menores que os ganhos de calor. Assim ao deixar o sistema a funcionar durante a noite é possível estimar quais as perdas associadas ao painel devido à circulação do fluido durante a noite. Para que as condições de ambos os testes fossem semelhantes, os testes foram feitos em dias seguidos, garantindo assim, que o sol iria nascer aproximadamente à mesma hora. A figura 38 e 40 mostram a variação da temperatura ambiente durante a noite respectivamente para as figuras 39 e 41 que mostram os gráficos do calor transferido para o fluido durante a noite para o painel sem cobertura e com cobertura. Para o painel sem cobertura a média das perdas durante a ausência total de radiação é de 2334 Joules, já para o painel com cobertura a média de perdas situa-se nos 1288 Joules.

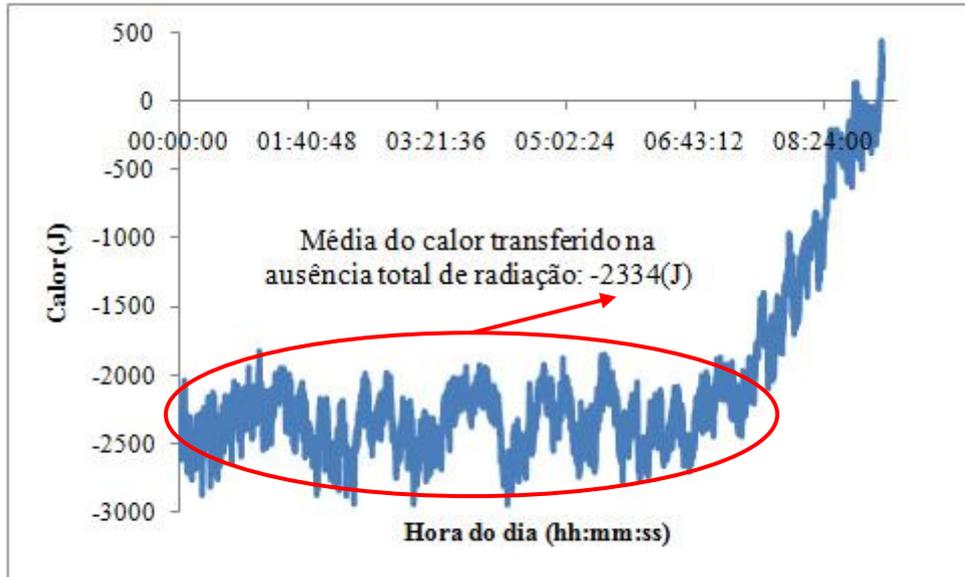


Figura 38: Transferência de calor do painel sem cobertura durante a noite de 22 de Outubro.



Figura 39: Temperatura ambiente para a noite de 22 de Outubro, painel na configuração *unglazed*.

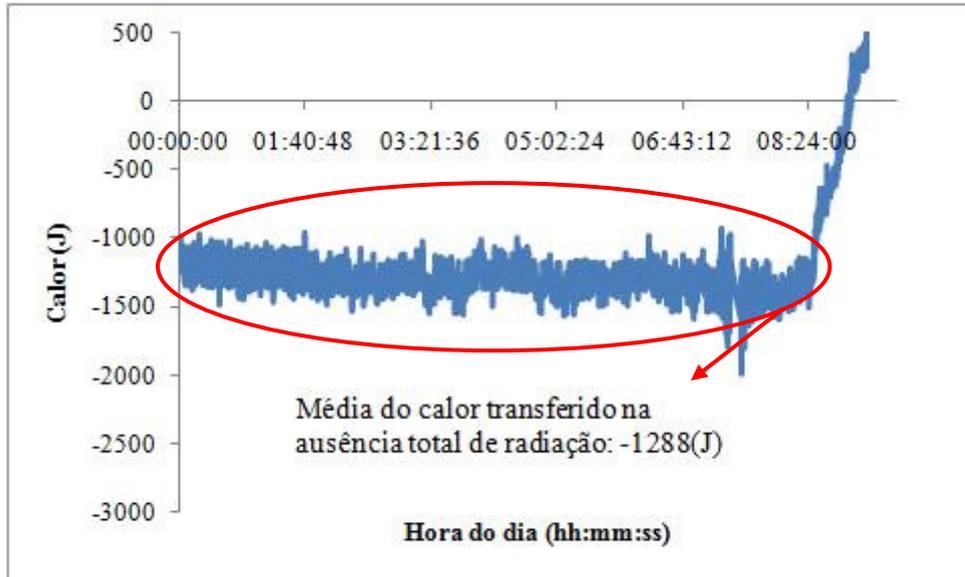


Figura 40: Transferência de calor do painel com cobertura durante a noite de 23 de Outubro.

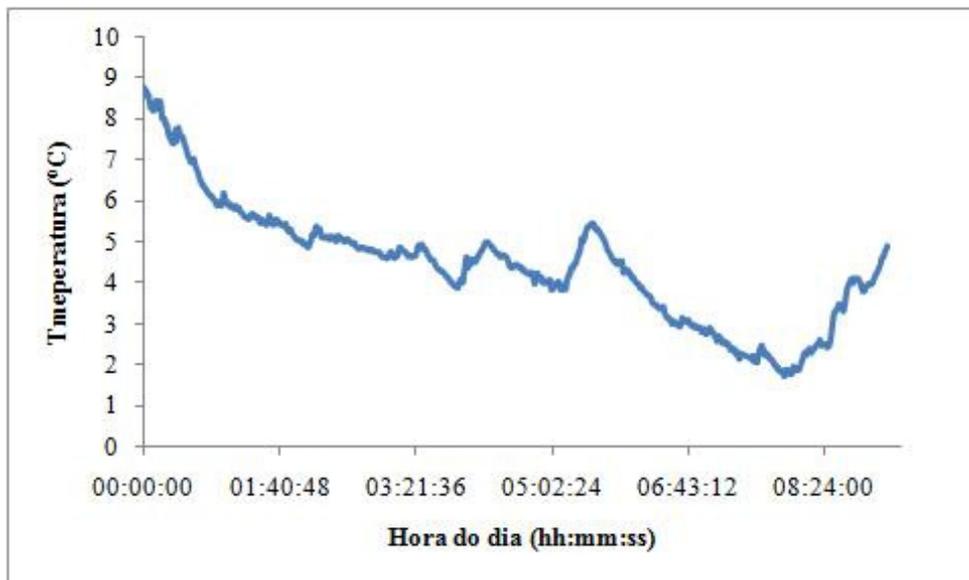


Figura 41: Temperatura ambiente para a noite de 23 de Outubro, painel na configuração *glazed*.

## 5. Análise dos resultados

A partir da caracterização óptica é possível verificar que o *epdm* é um polímero com boa absorção (acima de 80%) da radiação incidente entre os 220 e os 1850 nm, e o máximo de absorção situa-se na zona do visível-UV. O uso deste tipo de cobertura, que apenas transmite cerca de 65% da radiação que incide sobre a mesma no intervalo entre 390 e 1600nm, que é um factor de elevada importância para a possível aplicabilidade deste colector na forma glazed.

Ainda sobre as análises ópticas efectuadas e sendo já o início de um estudo futuro, o polímero foi pintado com uma tinta selectiva especialmente desenvolvida para estes materiais e aplicação. Dos resultados verificamos que existe uma diminuição da absorção em cerca de 10% para a zona do visível, diferença essa que vai aumentando para o infravermelho. Embora pintado com uma cor que não a negra (cor tijolo), o absorsor mantém ainda bons níveis de absorção, mostrando que as tintas poderão ser aplicáveis para este efeito.

Em relação ao painel propriamente dito, podemos verificar através da figura 42, a comparação entre os rendimentos do painel nas duas configurações. Na figura 43 encontra-se calculado o ganho médio do painel com cobertura em relação ao painel sem cobertura.

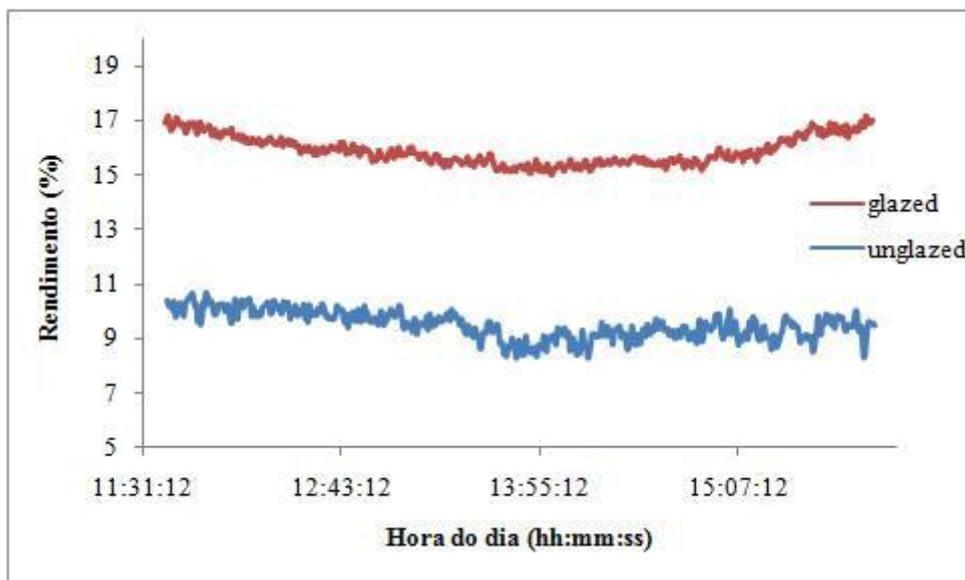


Figura 42: Comparação entre os rendimentos do painel polimérico em ambas as configurações.

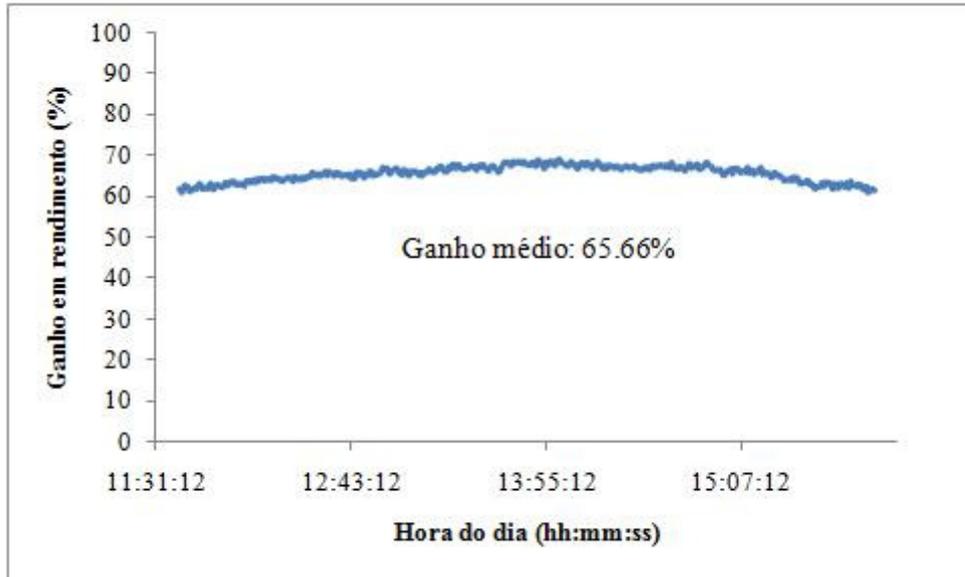


Figura 43: Ganho médio em rendimento, isto é a média da razão entre o rendimento do painel sem e com cobertura.

Com estes resultados pode afirmar-se que o rendimento da configuração *glazed* é superior em média 65.66% em relação à configuração *unglazed*. Ao analisar a curva do rendimento do painel com cobertura, pode ser feita uma observação experimental, onde o rendimento tem um comportamento inverso ao da radiação. Verifica-se que apesar de a cobertura apenas permitir a transmissão de 65% da radiação incidente, o painel na configuração *glazed* obtém ganhos superiores. Este facto deve-se à redução nas perdas e ao efeito de estufa criado no interior do painel.

Poderia estimar-se o erro associado ao rendimento comparando os vários testes, mas dado que o rendimento calculado neste trabalho varia com variáveis que não foram fixas como a temperatura ambiente e a temperatura de entrada do fluido, os valores obtidos para o rendimento entre cada teste vão variar não só devido ao seu erro associado, mas também devido a variações nestas variáveis de entrada, sendo impossível distinguir se um desvio se deve ou não a um erro. Novamente aqui deveria ser feita uma nova montagem que permita que sejam fixas as variáveis de entrada, e obter várias curvas de rendimento e calcular assim o respectivo erro associado.

De modo a tirar conclusões sobre as perdas durante a noite, é necessário analisar a dependência das perdas de calor com a temperatura do meio ambiente, pois as temperaturas não eram as mesmas. As figuras 44 e 45, mostram a dependência do calor de cada painel com a temperatura ambiente, e as figuras 46 e 47 as respectivas variações da temperatura da água (Tout-Tin).

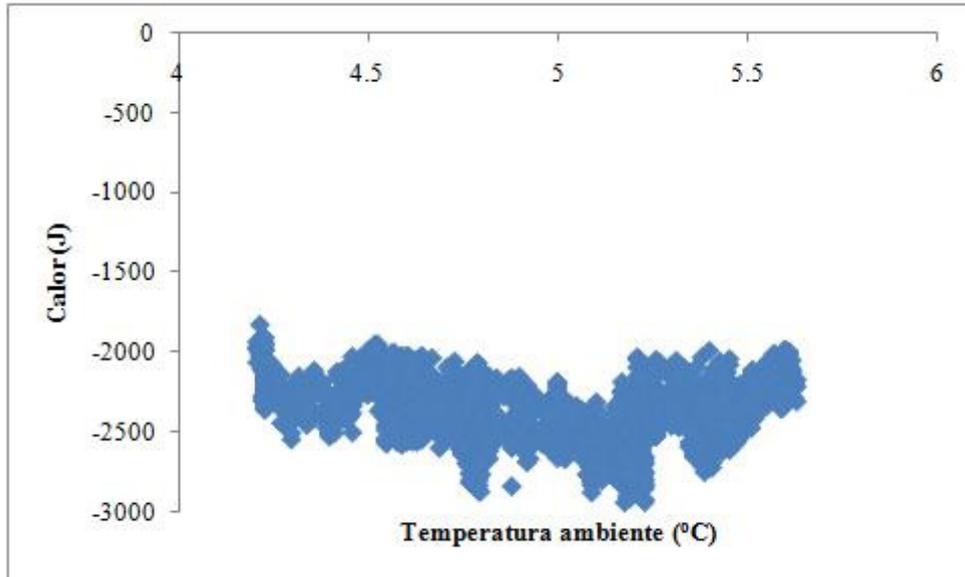


Figura 44: Dependência do calor transferido na temperatura ambiente para o painel sem cobertura.

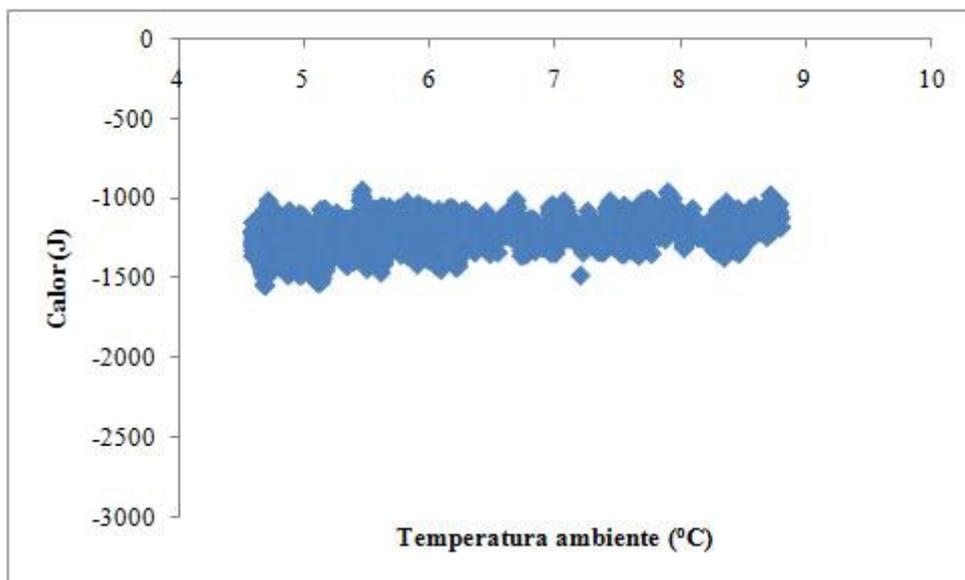


Figura 45: Dependência do calor transferido na temperatura ambiente para o painel com cobertura.

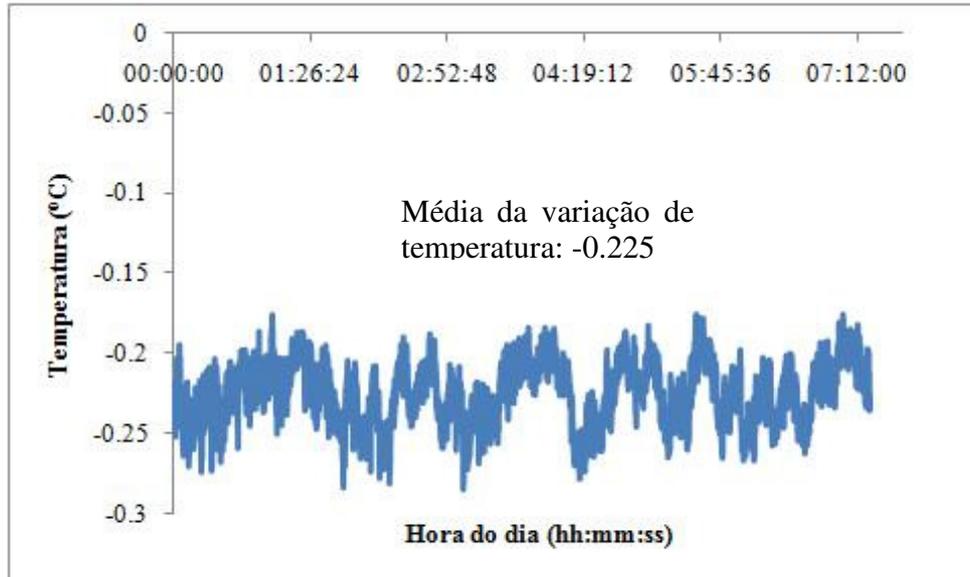


Figura 46: Variação da temperatura da água (Tout-Tin), para a noite 22 de Outubro, painel na configuração *unglazed*.

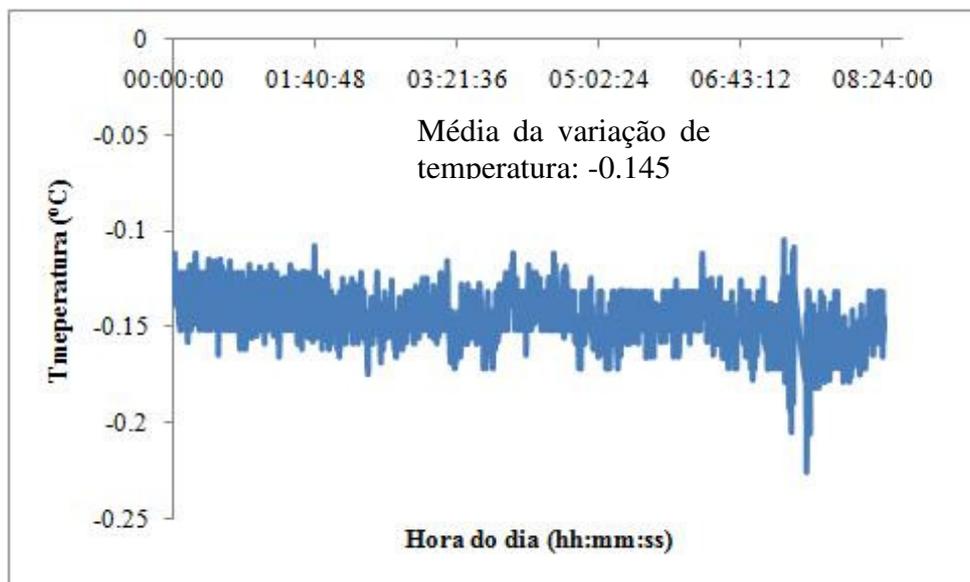


Figura 47: Variação da temperatura da água (Tout-Tin), para a noite de 23 Outubro, painel na configuração *glazed*.

Verifica-se que para o painel com cobertura o calor perdido apresenta um ligeiro decréscimo com o aumento da temperatura ambiente. Já para o painel sem cobertura, não se verifica qualquer tendência. Com base na amplitude da curva da variação do calor perdido, verificamos que para o caso do painel na versão *unglazed* a amplitude é superior, e a distribuição menos linear do que para o caso do painel na versão *glazed*. Embora as condições ambientais sejam diferentes, pensamos que a diferença se deve maioritariamente às diferenças nas perdas. Pelas figuras da variação de temperatura, podemos ainda acrescentar que a média da perda de temperatura do fluido ao circular pelo painel na ausência de radiação entre ambos os painéis, é consideravelmente superior para a versão *unglazed*.

Para perceber melhor qual sistema precisa de mais potência para igualar as perdas com os ganhos, podemos usar o valor para o qual o calor transferido iguala as perdas. Para a configuração *unglazed*, o zero obtêm-se para um valor de  $288 \text{ W/m}^2$  de radiação incidente e uma temperatura ambiente de  $7^\circ\text{C}$ , enquanto para a configuração *glazed* observa-se para uma radiação de  $45 \text{ W/m}^2$  e uma temperatura ambiente de  $4^\circ\text{C}$ .

Os resultados dos testes feitos durante a noite vêm reforçar a ideia que o uso da cobertura embora bloqueie parte da radiação incidente, permite obter melhores ganhos, diminuindo as perdas para o exterior e tendo menor dependência nas condições ambientais.

## 6. Conclusões

Um dos grandes problemas das renováveis deve-se à forma em que o Homem necessita da energia. Dado que grande parte da energia que o Homem necessita é na forma de calor, o solar térmico para aquecimento de fluidos surge como uma boa opção para fornecer energia em forma de calor, embora na maioria dos casos para climas mais frios ou alturas de menor radiação sejam necessários sistemas de suporte. Contudo no solar térmico para aquecimento de fluidos, os colectores de baixa temperatura mostram ter rendimentos acima dos 80% para diferenças de temperatura baixas.

O painel construído neste trabalho, usou como absorvedor um polímero (*epdm*). Análises espectroscópicas mostraram que este tipo de absorvedor apresenta bons níveis de absorção para a zona do espectro que contém a grande parte da energia da radiação solar, indicando assim que é um bom material para o efeito. Estas análises mostraram também que é possível pintar o polímero com tintas selectivas diminuindo a absorção em cerca de 10%, mas como diminui a absorção da radiação UV, apresenta potenciais ganhos no tempo de vida dos painéis.

Já a cobertura, que deveria ser o mais transparente possível à radiação solar, bloqueia cerca de 35% da radiação incidente, mostrando que devem ser testados outros tipos de coberturas com coeficientes de transmissão mais elevados.

Embora o nível de absorção do *epdm* seja elevado, o painel construído mostrou um rendimento mais baixo do que o esperado para este tipo de painéis, situando-se nos 9.53%. Através dos dados obtidos pode concluir-se que o uso da cobertura de policarbonato estruturado, aumenta o rendimento do colector em cerca de 66%. Assim, embora a cobertura bloqueie uma considerável percentagem da radiação, permite ganhos superiores, mostrando que a configuração *glazed* permite obter rendimentos muito superiores à configuração normal, onde a análise de dados permite concluir que a diferença de rendimentos entre ambas as configurações se deve principalmente à redução das perdas e ao efeito de estufa.

O teste nocturno mostra que o painel transfere calor do fluido para o exterior. Conclui-se que na ausência de radiação o painel sem cobertura perde mais calor, apoiando o fundamento de que a cobertura permite aumentar o rendimento em parte porque reduz as perdas.

O painel *unglazed* necessita de uma potência superior para conseguir igualar as perdas aos ganhos. Este valor tem particular importância quando este tipo de painéis é usado para aquecimento de águas para piscinas. Quando são atingidas determinadas condições de temperatura e radiação, o painel consegue obter rendimentos positivos, assim, para evitar que o painel funcione como dissipador de calor, deve ser usado um sistema controlador que determine as condições para as quais as bombas devem ou não trabalhar. Ainda com base nesta análise, podemos dizer que o painel com cobertura começa a funcionar mais cedo e funciona durante mais tempo.

O objectivo principal do trabalho, que era construção e comparação do rendimento de um painel na configuração *unglazed* e *glazed* foi atingido, sendo que a cobertura permite aumentar o rendimento do painel a partir da redução das perdas e a partir do efeito de estufa gerado.

## 7. Trabalho futuro

A característica principal de qualquer painel é o seu rendimento. Mas para além do uso de uma cobertura transparente, existem ainda estudos que devem ser feitos a este tipo de painel de modo a que o painel possa ser melhorado.

Neste trabalho ainda devem ser feitos os seguintes testes:

- Estudar o rendimento útil do painel nas duas versões. O modo como a experiência foi feita não permitia conhecer o rendimento útil, que é dado pelo rendimento em função da variável  $T_m^*$ .
- Dependência do rendimento com o ângulo de incidência da radiação. Neste trabalho o painel esteve sempre numa posição fixa,  $45^\circ$  virado para sul.
- Impacto do vento em ambas as configurações do painel. Embora os dados recolhidos neste trabalho não sejam conclusivos, sabe-se que existe dependência do rendimento do painel com o vento.
- Usar um absorvedor do mesmo tipo mas com uma superfície rugosa, pois a rugosidade aumenta a área da superfície em contacto com a radiação.
- Influência do caudal no rendimento do painel. O caudal neste trabalho foi mantido aproximadamente constante, mas existe dependência do rendimento com o caudal.
- Outros tipos coberturas, com coeficientes de transmissão superiores.
- Diferentes espessuras da caixa-de-ar entre o absorvedor e a cobertura. Neste trabalho a espessura da caixa-de-ar foi mantida constante, a 3,5cm, seria importante conhecer qual a espessura indicada para cada cobertura.
- Isoladores térmicos. Usualmente apenas para os painéis *glazed* usam isoladores situados na parte inferior por debaixo do absorvedor. Podendo assim reduzir-se as perdas de calor pela base do painel, e de modo a manter uma temperatura no interior da caixa superior.
- Tintas selectivas. Embora o teste tenha sido iniciado neste trabalho, falta determinar qual o impacto das tintas no rendimento e no tempo de vida do painel.
- Temperatura de estagnação. A temperatura de estagnação é a temperatura atingida no interior do painel quando não existe circulação do fluido. Principalmente para os painéis com cobertura, quando o fluido não circula, são atingidas temperaturas no seu interior muito altas. Essa temperatura deve ser conhecida, qual o impacto no tempo de vida do painel.

## 8. Referências

- 
- <sup>1</sup> [www.prirev.com](http://www.prirev.com)
  - <sup>2</sup> [www.sabic-ip.com/sfs/SFS/en/ProductsAndServices/ProductFamilyName/lexanzigzag.html](http://www.sabic-ip.com/sfs/SFS/en/ProductsAndServices/ProductFamilyName/lexanzigzag.html)
  - <sup>3</sup> “*Guia da Energia*”, J. Ramage, pp. 265-275, Abril 2003
  - <sup>4</sup> [www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/world.html](http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/world.html)
  - <sup>5</sup> A briefing from the Hadley Centre, *Climate change and the greenhouse effect*, Department for
  - <sup>6</sup> J. Dunderdale, “*Energy & The Environment*”, University of Leeds, No.81, April 1990
  - <sup>7</sup> B. J. Brinkworth, “*Solar Energy for Man*”, 1974, cap. 1
  - <sup>8</sup> [www.iea.org/textbase/nppdf/free/2006/weo2006.pdf](http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2006/weo2006.pdf)
  - <sup>9</sup> European Environment Agency, EN16 Final Energy Consumption by Sector
  - <sup>10</sup> “*Guia da Energia*”, J. Ramage, pp. 314-328, Abril 2003
  - <sup>11</sup> [www.iapmei.pt/iapmei-art-03.php?id=339](http://www.iapmei.pt/iapmei-art-03.php?id=339)
  - <sup>12</sup> [www.facts-about-Solar-energy.com/facts-about-Solar-energy.html](http://www.facts-about-Solar-energy.com/facts-about-Solar-energy.html)
  - <sup>13</sup> [www.Solarserver.de/Solarmagazin/news2007\\_04\\_e.html](http://www.Solarserver.de/Solarmagazin/news2007_04_e.html)
  - <sup>14</sup> “*Physics of Semiconductors Devices*”, S. M. Sze, 2<sup>nd</sup> edition
  - <sup>15</sup> “*Solar Thermal Energy Storage*”, H. P. Garg, S. C. Mullick, A. K. Bhargava, cap1
  - <sup>16</sup> [www.southface.org/Solar/Solar-roadmap/Solar\\_how-to/history-of-Solar.htm](http://www.southface.org/Solar/Solar-roadmap/Solar_how-to/history-of-Solar.htm)
  - <sup>17</sup> “*Solar thermal collectors and applications*, Progress in Energy and Combustion”, Soteris A. Kalogirou, Science Volume 30, Issue 3, 2004, P 231-295
  - <sup>18</sup> D. Mills, “*Advances in Solar thermal electricity technology*”, Solar Energy Volume 76, Issues 1-3, Solar World Congress 2001, January-March 2004, pp. 19-31
  - <sup>19</sup> [www.acru.hu/en/sun/Solarcollector.html](http://www.acru.hu/en/sun/Solarcollector.html)
  - <sup>20</sup> [www.rcsi.ie/sodis/partners/psa.htm](http://www.rcsi.ie/sodis/partners/psa.htm)
  - <sup>21</sup> [www.nmri.go.jp/eng/khirata/stirling/engines/general\\_e.html](http://www.nmri.go.jp/eng/khirata/stirling/engines/general_e.html)
  - <sup>22</sup> “*Energias Renováveis, A Opção Inadiável*”, Manuel Collares-Pereira, pp. 108-109, 2000
  - <sup>23</sup> <http://ecotecnologia.wordpress.com/page/3/>
  - <sup>24</sup> [www.Solarpaces.org/Tasks/Task4/task\\_iv.htm](http://www.Solarpaces.org/Tasks/Task4/task_iv.htm)
  - <sup>25</sup> [www.ncsustainableenergy.org/resources/renewable](http://www.ncsustainableenergy.org/resources/renewable)
  - <sup>26</sup> [www.speedace.info/Solar\\_power.htm](http://www.speedace.info/Solar_power.htm)
  - <sup>27</sup> [www.daviddarling.info/encyclopedia/S/AE\\_Solar\\_collector.html](http://www.daviddarling.info/encyclopedia/S/AE_Solar_collector.html)
  - <sup>28</sup> [www.powermat.com/ps/index.html](http://www.powermat.com/ps/index.html)
  - <sup>29</sup> [www.suntrader.co.uk/st\\_swimming\\_pool.html](http://www.suntrader.co.uk/st_swimming_pool.html)
  - <sup>30</sup> A. Olivares, J. Rekestad, M. Meir, S. Kahlen, G. Wallner, “A test procedure for extruded polymeric Solar thermal absorbers” *Solar Energy Materials & Solar Cells* 92(2008), pp. 445–452
  - <sup>31</sup> “*Solar Energy for Man*”, B. J. Brinkworth, 1974, cap. 2
  - <sup>32</sup> [www.newport.com/Introduction-to-Solar-Radiation/411919/1033/catalog.aspx#](http://www.newport.com/Introduction-to-Solar-Radiation/411919/1033/catalog.aspx#)
  - <sup>33</sup> [apollo.lsc.vsc.edu/classes/met130/notes/chapter2/sw\\_atm.html](http://apollo.lsc.vsc.edu/classes/met130/notes/chapter2/sw_atm.html)
  - <sup>34</sup> Apontamentos de Técnicas de Espectroscopia, Prof. Dr. Luís Rino, 2007-2008.
  - <sup>35</sup> “*Solar Energy for Man*”, B. J. Brinkworth, 1974, cap. 4
  - <sup>36</sup> “*Solar Energy for Man*”, B. J. Brinkworth, 1974, cap. 3
  - <sup>37</sup> “*Óptica e Fotónica*”, Mário Ferreira Cap.6, Lidel-edições técnicas, lda, Abril 2003.
  - <sup>38</sup> [http://science.nasa.gov/headlines/y2006/10mar\\_stormwarning.htm](http://science.nasa.gov/headlines/y2006/10mar_stormwarning.htm)
  - <sup>39</sup> [www.physicalgeography.net/fundamentals/6h.html](http://www.physicalgeography.net/fundamentals/6h.html)
  - <sup>40</sup> [www.sunmaxxsolar.com/sunmaxx-solar-hot-water-collector-tilt-information.php](http://www.sunmaxxsolar.com/sunmaxx-solar-hot-water-collector-tilt-information.php)
  - <sup>41</sup> ilustração feita em solidworks, Eng. Nuno Casalinho, 2007.
  - <sup>42</sup> B. A. Fleck, R. M. Meier and M. D. Matovic. “*A filed study of the wind effects on the performance of an unglazed transpired solar collector*”
  - <sup>43</sup> Apontamentos práticos de Técnicas de Espectroscopia, Prof. Dr. Luís Rino, 2007-2008.
  - <sup>44</sup> [en.citizendium.org/wiki/Black-body\\_radiation](http://en.citizendium.org/wiki/Black-body_radiation)
  - <sup>45</sup> CT 54 (INETI), Norma Portuguesa, EN 12975-1, “*Instalações solares térmicas e seus componentes*”, Fevereiro 2007
  - <sup>46</sup> [www.sabic-ip.com/sfs/SFS/en/ProductsAndServices/ProductFamilyName/lexanzigzag.html](http://www.sabic-ip.com/sfs/SFS/en/ProductsAndServices/ProductFamilyName/lexanzigzag.html)
  - <sup>47</sup> [www.novussealing.com.au/forms2/EPDM.pdf](http://www.novussealing.com.au/forms2/EPDM.pdf)
  - <sup>48</sup> [www.shimadzu.com.br/analitica/produtos/espectrofotometros/uv-vis/uv-3600.aspx](http://www.shimadzu.com.br/analitica/produtos/espectrofotometros/uv-vis/uv-3600.aspx)