



**TECNOLOGIA
SETÚBAL**

ESCOLA SUPERIOR
POLITÉCNICO SETÚBAL

VITOR MANUEL
CHULA
MARREIROS

**ABSORÇÃO DIRETA DE ENERGIA
SOLAR POR UM NANOFLUIDO**

Relatório de Projeto do Mestrado em
Engenharia e Gestão de Energia na Indústria e
Edifícios

ORIENTADOR

Professor Doutor Luís Manuel Rodrigues
Coelho

Dezembro 2024

VITOR MANUEL
CHULA
MARREIROS

**ABSORÇÃO DIRETA DE ENERGIA
SOLAR POR UM NANOFLUIDO**

JÚRI

Presidente: Professor Doutor Paulo Fontes,
ESTSetúbal-IPS

Orientador: Professor Doutor Luís Coelho,
ESTSetúbal-IPS

Arguente: Professor Doutor Nuno Pereira,
ESTSetúbal-IPS

Dezembro 2024

Agradecimentos

Escrever um relatório de projeto torna-se um trabalho solitário, que exige dedicação, renúncia e resiliência, por isso agradeço o apoio de várias pessoas pois sem elas não seria possível ter chegado ao fim desta “maratona”.

Gostaria de agradecer, em particular, ao meu orientador Professor Luís Coelho e ao co-orientador Professor Amândio Rebola que aceitaram o desafio de me orientar e que ao longo deste percurso me aconselharam, encorajaram e encaminharam para que materializasse este projeto.

Aos professores João Francisco, Paulo Fontes e Nuno Pereira pela insistência e incentivo na conclusão desta tarefa final.

À Vanda pelo apoio incondicional, por me injetar confiança, por me ouvir, por acreditar e por me ter feito acreditar que tudo é possível. Às minhas duas sobrinhas pela inspiração.

Resumo

O trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um coletor solar térmico que utilize um nanofluido como meio para a absorção direta da radiação solar. Consistiu no desenvolvimento e construção de um pré-protótipo, realização de testes de otimização, caracterização das principais dificuldades e limitações para produção de um coletor solar que realize a absorção direta de energia através de um nanofluido. Pretendeu-se também comparar os valores de eficiência obtidos pelos pré-protótipos desenvolvidos, com os valores típicos alcançados pelos coletores solares planos comercialmente disponíveis, tendo-se verificado que os valores de eficiência obtidos nos ensaios realizados foram inferiores aos valores típicos, sendo que existe muita margem de melhoria no pré-protótipo utilizado.

Palavras-chave: Energia solar, Coletor solar térmico, Nanofluido.

Abstract

The aim of this thesis was to develop a nanofluid based direct absorption solar collector. It consisted of developing and building a pre-prototype, carrying out optimization tests, characterizing the main difficulties and limitations for producing a solar collector that directly absorbs energy through a nanofluid. The objective was also to compare the efficiency values obtained by the pre-prototypes developed, with the typical values achieved by commercially available flat solar collectors, concluding that the efficiency values obtained in the tests were lower than typical values, and the pre-prototype used have a lot of room for improvement.

Keywords: Solar energy, Solar collector, Nanofluids.

Índice

| | |
|----------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Agradecimentos | iii |
| Resumo | iv |
| Abstract | v |
| Lista de Figuras | viii |
| Lista de Tabelas | ix |
| Lista de Siglas e Acrónimos | x |
| Lista de Símbolos | xi |
| 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Enquadramento e motivação | 2 |
| 1.2 Objetivos | 2 |
| 1.3 Metodologia | 3 |
| 2 Estado da arte | 4 |
| 2.1 Nanofluidos | 5 |
| 2.1.1 <i>Composição</i> | 5 |
| 2.1.2 <i>Preparação</i> | 5 |
| 2.1.3 <i>Propriedades relevantes</i> | 5 |
| 2.1.4 <i>Utilização de nanofluidos em coletores solares térmicos</i> | 6 |
| 2.2 Coletores solares térmicos | 6 |
| 2.2.1 <i>Coletores solares planos</i> | 7 |
| 2.2.2 <i>Coletores parabólicos compostos</i> | 8 |
| 2.2.3 <i>Coletores de tubos de vácuo</i> | 9 |
| 2.3 Eficiência dos coletores solares térmicos | 10 |
| 3 Desenvolvimento do pré-protótipo | 16 |
| 3.1 O Nanofluido | 17 |
| 3.2 Pré-protótipos | 17 |
| 3.2.1 <i>Canal de escoamento</i> | 18 |
| 3.2.1.1 <i>Construção</i> | 18 |
| 3.2.1.2 <i>Ensaio do canal de escoamento</i> | 21 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.2 <i>Tubo de PVC transparente múltiplo U</i> | 24 |
| 3.2.2.1 Ensaio do permutador em tubo de PVC | 25 |
| 3.2.3 <i>Permutador em poliuretano com múltiplas passagens</i> | 28 |
| 3.2.3.1 Construção | 28 |
| 3.2.3.2 Ensaio do coletor de múltiplas passagens | 30 |
| 4 Conclusão | 36 |
| 4.1 Conclusões | 37 |
| 5 Desenvolvimentos futuros | 38 |
| 5.1 Construção de bancada de ensaio | 39 |
| 5.2 Sistema de aquisição de dados | 40 |
| 5.3 Materiais especializados | 41 |
| Bibliografia | 42 |

Lista de Figuras

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1 – Representação da constituição básica de um coletor solar plano (adaptado de [9]). | 7 |
| Figura 2.2 – Representação da constituição básica de um coletor CPC (adaptado de [11]). | 8 |
| Figura 2.3 – Representação de um coletor solar de tubos de vácuo (adaptado de [12]). | 9 |
| Figura 2.4 – Eficiência de um coletor solar térmico (adaptado de [15]). | 14 |
| Figura 3.1 – Representação do conceito inicial idealizado. | 17 |
| Figura 3.2 – Representação esquemática do sistema de testes inicial. | 18 |
| Figura 3.3 – Modelo tridimensional do canal de escoamento. | 19 |
| Figura 3.4 – Vista explodida dos componentes que constituem o canal de escoamento. | 19 |
| Figura 3.5 – Maquinação do canal de escoamento. | 20 |
| Figura 3.6 – Sistema de testes iniciais completo. | 21 |
| Figura 3.7 – Perda de homogeneidade do nanofluido. | 22 |
| Figura 3.8 – Aderência de partículas às tubagens. | 22 |
| Figura 3.9 – Precipitação e aglomeração de partículas no caudalímetro. | 23 |
| Figura 3.10 – Precipitação e aderência de partículas ao canal de escoamento. | 23 |
| Figura 3.11 – Quebra do vidro de cobertura do canal de escoamento. | 24 |
| Figura 3.12 – Coletor solar em mangueira de PVC. | 25 |
| Figura 3.13 – Evolução da temperatura do nanofluido e irradiância solar no ensaio 1. | 26 |
| Figura 3.14 – Coletor solar em mangueira com cobertura de vidro. | 27 |
| Figura 3.15 – Evolução da temperatura do nanofluido e irradiância solar no ensaio 2. | 27 |
| Figura 3.16 – Maquinação de coletor solar em poliuretano com múltiplas passagens. | 29 |
| Figura 3.17 – Montagem de coletor solar em poliuretano com múltiplas passagens. | 29 |
| Figura 3.18 – Ensaio do coletor solar em poliuretano com múltiplas passagens. | 30 |
| Figura 3.19 – Evolução da temperatura do nanofluido e irradiância solar no ensaio 3. | 31 |
| Figura 3.20 – Esquema da montagem para ensaio de eficiência do pré-protótipo. | 32 |
| Figura 3.21 – Montagem para ensaio de eficiência do pré-protótipo. | 33 |
| Figura 3.22 – Evolução da temperatura do nanofluido e irradiância solar no ensaio do pré-protótipo. | 33 |
| Figura 3.23 – Valores de eficiência do pré-protótipo obtidos nos ensaios. | 34 |
| Figura 5.1 – Bancada de ensaios projetada. | 39 |
| Figura 5.2 – Montagem para medição de energia coletada. | 41 |

Lista de Tabelas

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 3.1 – Principais propriedades do fluido base. | 17 |
| Tabela 3.2 – Propriedades do material de prototipagem utilizado (extraído de [16]). | 20 |

Lista de Siglas e Acrónimos

| | |
|-------|----------------------------------------------|
| CINEA | Centro de Investigação em Energia e Ambiente |
| CPC | Coletor parabólico composto |
| IPS | Instituto Politécnico de Setúbal |
| LNEG | Laboratório Nacional de Energia e Geologia |
| PC | Personal computer (computador pessoal) |
| UOI | Universidade de Ioannina |

Lista de Símbolos

| | |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| α | Coefficiente de absorção do meio absorsor. |
| Δt | Intervalo de tempo entre medições [s]. |
| ΔT | Diferença de temperaturas entre o fluido solar e o ambiente ($^{\circ}\text{C}$). |
| η | Eficiência do coletor solar. |
| η_0 | Rendimento ótico. |
| λ | Comprimento de onda - radiação (μm). |
| τ | Coefficiente de transmissão do elemento de cobertura do coletor solar. |
| | |
| A | Área de captação do coletor solar (m^2). |
| C_p | Calor específico do fluido solar [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$] |
| $C_{p(2)}$ | Calor específico do fluido secundário [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]. |
| I_{in} | Irradiância solar (W/m^2). |
| $I_{in(\text{med})}$ | Irradiância solar média no intervalo Δt considerado [W/m^2]. |
| m | Massa de fluido secundário [kg]. |
| \dot{m} | Caudal mássico de fluido solar [kg/s]. |
| q_{abs} | Potência térmica absorvida no coletor solar(W). |
| q_{perdas} | Potência térmica perdida pelo coletor solar(W). |
| q_{util} | Potência térmica útil coletada (W). |
| Q_{util} | Energia térmica útil transferida para o fluido secundário [J]. |
| T_1 | Temperatura do fluido secundário no instante inicial ($^{\circ}\text{C}$). |
| T_2 | Temperatura do fluido secundário no instante final ($^{\circ}\text{C}$). |
| T_i | Temperatura de entrada do fluido solar no coletor ($^{\circ}\text{C}$). |

| | |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| T_o | Temperatura de saída do fluido solar do coletor ($^{\circ}\text{C}$). |
| U | Coefficiente global de perdas [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]. |
| U_1 | Coefficiente perdas para $T_{\text{fluido}} - T_{\text{amb}} = 0$ [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]. |
| U_2 | Coefficiente de perdas dependente da temperatura [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^2)$]. |

1 Introdução

Neste capítulo será realizado o enquadramento do tema desenvolvido neste estudo, fazendo referência à sua importância no atual panorama de consumo de energia, onde a utilização de fontes de energia renovável assume uma importância cada vez maior.

Serão também descritos os objetivos que o desenvolvimento deste estudo pretendeu alcançar e será feita a descrição da metodologia seguida na elaboração do trabalho.

1.1 Enquadramento e motivação

Ao longo dos últimos anos tem-se verificado um aumento da frequência de ocorrência de fenómenos climáticos extremos, situação que tem contribuído significativamente para aumentar a consciência da necessidade de tomar medidas concretas com vista a travar o avanço das alterações climáticas. Tornou-se cada vez mais evidente que é necessário reduzir o consumo de energia com origem em combustíveis fósseis e diminuir as emissões de gases com efeito de estufa, nomeadamente o CO₂.

A diminuição do consumo de energia e da emissão de gases com efeito de estufa pode ser conseguida de várias formas, de onde se destacam, a utilização racional de energia, a redução do desperdício energético, o aumento da eficiência energética dos sistemas e a substituição do consumo de combustíveis de origem fóssil por fontes de origem renovável.

A utilização de fontes de energia renovável tem crescido significativamente nos últimos anos, por um lado devido ao crescente interesse e preocupação geral com as questões ambientais, como também devido ao desenvolvimento tecnológico que tem permitido reduzir os custos e tornar a utilização de energia de fontes renováveis mais atrativa.

Ao nível da União Europeia têm sido traçadas metas ambiciosas para a substituição das fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis por fontes de energia renovável, em 2014 o conselho europeu definiu para um futuro relativamente próximo, 2030, a meta de utilização de pelo menos 27% de energia de fonte renovável na União Europeia [1].

De entre as várias formas de energia renovável disponíveis, a energia solar é talvez a forma que se apresenta globalmente com maior disponibilidade e uma das mais fáceis de aproveitar, no entanto existem alguns entraves à sua adoção generalizada. Os coletores solares disponíveis atualmente apresentam eficiências relativamente elevadas de até 70% [2], no entanto um custo ainda elevado, situação que dificulta uma adoção massiva do aproveitamento de energia solar. A abundância do recurso solar e o potencial de melhoria existente tanto ao nível da eficiência dos coletores, como ao nível do seu custo, representam uma oportunidade de investimento na investigação e desenvolvimento de novas soluções.

1.2 Objetivos

O trabalho realizado inseriu-se no âmbito do projeto Nano-Sol, cujo desenvolvimento foi iniciado por parte do Centro de Investigação em Energia e Ambiente (CINEA) do IPS. Este projeto teve por objetivo o desenvolvimento e caracterização de um coletor solar térmico baseado na absorção direta da energia dos fotões da radiação solar por um nanofluido.

Pretendeu-se estudar a possibilidade de construir um coletor solar, que através da circulação de nanofluido com capacidade de absorção direta de radiação, consiga obter níveis de rendimento de captação de energia superiores aos atualmente obtidos pelos coletores solares planos de construção tradicional. Com este estudo pretendeu-se verificar se a utilização de nanofluidos poderia conduzir a uma

melhoria de rendimento face à utilização de fluidos tradicionais como sejam a água, o etilenoglicol ou o propilenoglicol.

No âmbito do projeto, pretendia-se também desenvolver um sistema de monitorização e aquisição de dados que permitisse medir com rigor as principais grandezas relevantes na avaliação do desempenho dos coletores solares. O sistema deverá possibilitar a ligação de um conjunto de sensores variado que permita a sua adaptação futura a outros projetos que possam vir a ser desenvolvidos.

1.3 Metodologia

O trabalho foi composto por diversas atividades de onde se destacam o desenvolvimento e construção de um pré-protótipo, a realização de testes de otimização e o desenvolvimento de um sistema para registo e aquisição de dados que permitam aferir o seu desempenho.

O desenvolvimento e construção do pré-protótipo foi realizado tendo em consideração a facilidade de alteração e melhoria, tentando garantir que o pré-protótipo pode ser facilmente alterado de forma permitir a simulação de diferentes condições de operação ao nível dos principais parâmetros relacionados com o escoamento do fluido de trabalho.

Na fase de testes foram realizados vários ensaios de otimização para determinar quais são as condições de caudal, velocidade de escoamento e espessura da lâmina de nanofluido mais favoráveis e com maior eficiência na absorção de energia. Esta fase teve também como objetivo identificar eventuais limitações na movimentação do nanofluido, possível formação de depósitos no coletor e eventuais incompatibilidades com os materiais tipicamente utilizados na construção de coletores solares.

Para verificação do desempenho do pré-protótipo, foi definido um sistema de monitorização que permitiu medir as principais grandezas relevantes na avaliação do desempenho dos coletores solares. O desenvolvimento deste sistema teve também como objetivo determinar com maior rigor os parâmetros que deverão ser monitorizados e qual a instrumentação mais adequada para o sistema de aquisição de dados a instalar numa bancada de ensaio de coletores solares térmicos.

2 Estado da arte

Neste capítulo será realizada uma breve descrição dos nanofluidos mais comuns, dando especial atenção aos normalmente utilizados para absorção e transporte de energia térmica e será apresentado o estado atual de desenvolvimento dos coletores solares térmicos, especialmente os utilizados em aplicações de baixa temperatura.

Relativamente aos nanofluidos será feita uma apresentação das propriedades dos nanofluidos mais comuns no transporte de energia térmica, dando uma perspectiva do seu potencial de utilização como fluido primário num coletor solar térmico.

Ao nível dos coletores solares térmicos será realizada a apresentação dos tipos de coletores solares térmicos mais comuns, discutindo vantagens e desvantagens de cada tipo de construção. Será também abordada a metodologia de ensaio de coletores térmicos, dando atenção aos procedimentos que devem ser respeitados tendo em conta as normas atualmente em vigor.

2.1 Nanofluidos

2.1.1 Composição

Os nanofluidos basicamente consistem em fluidos compostos por uma mistura entre um fluido base como por exemplo água ou o óleo e uma determinada quantidade de partículas em suspensão. As partículas adicionadas apresentam normalmente um diâmetro inferior a 100 nm [3], podem assumir diversas formas e podem ser obtidas a partir de diversos materiais. A produção de nanofluidos tem como objetivo a melhoria das propriedades dos fluidos base e podem ser classificados como metálicos, ou não metálicos. Os nanofluidos de origem metálica são obtidos através da dispersão de partículas metálicas no fluido base, por exemplo partículas de cobre (Cu), alumínio (Al), titânio (Ti), prata (Ag), ouro (Au), ou outros metais, ao passo que os não metálicos utilizam partículas de outros materiais como óxido de cobre (CuO), o óxido de alumínio, ou os nanotubos de carbono.

2.1.2 Preparação

Para produção dos nanofluidos existem dois tipos de métodos principais que podem ser utilizados [4], o método mais usual consiste em realizar a preparação prévia das nanopartículas numa primeira fase e numa segunda fase misturá-las com o fluido base. De forma a garantir a estabilidade da mistura e tentar evitar a tendência de aglomeração das partículas podem ser utilizados aditivos surfactantes e a homogeneização do nanofluido pode ser realizada com recurso à agitação por ultrassons ou magnética. Um segundo método mais complexo e dispendioso, que atualmente ainda apresenta pouca viabilidade para utilização à escala industrial, consiste em produzir as nanopartículas diretamente no fluido base, este método tende a produzir nanofluidos mais estáveis e com menor tendência de aglomeração das nanopartículas.

2.1.3 Propriedades relevantes

Com base em vários estudos publicados [3], é possível verificar que os nanofluidos apresentam melhorias significativas de algumas propriedades termofísicas importantes para as aplicações em coletores solares, nomeadamente a condutividade térmica e a absorvidade. A maioria dos estudos publicados [5], abordou a adição de partículas metálicas em fluidos à base de água, no entanto também foram realizados estudos com resultados promissores em fluidos à base de óleo, tendo sido possível verificar uma melhoria das propriedades termofísicas do fluido base. Estudos efetuados com o objetivo de realizar a caracterização das propriedades óticas dos nanofluidos [4], concluíram que a adição de nanopartículas ao fluido base (no caso água) melhora significativamente a capacidade de absorção da radiação solar, especialmente nos comprimentos de onda mais curtos.

2.1.4 Utilização de nanofluidos em coletores solares térmicos

Os nanofluidos são um tema que tem despertado muito interesse, existem por isso vários estudos publicados que abordam o tema da utilização de nanofluidos, com o objetivo de obter melhorias de eficiência em sistemas de armazenamento e transporte de energia através de fluidos. Grande parte dos estudos experimentais publicados [5], aborda a utilização de nanofluidos em coletores planos e incide especialmente na melhoria das capacidades do fluido térmico para conduzir e transportar a energia térmica coletada. De uma forma geral estes estudos [6] contabilizam os acréscimos de eficiência obtidos pelo sistema a funcionar com nanofluido, face aos valores obtidos com fluidos convencionais.

A generalidade dos coletores solares planos utiliza fluidos à base de água, sendo essa uma das razões para que a maioria dos nanofluidos testados seja obtida a partir da água, através da adição de nano partículas metálicas ou nanotubos de carbono. Os estudos realizados, indicam de uma forma geral que a utilização de nanofluidos permite aumentar a eficiência dos coletores solares, sendo que em alguns casos foram conseguidas melhorias de eficiência superiores a 20%.

A realização de ensaios experimentais utilizando nanofluidos como meio para a absorção direta de radiação, que é o objetivo do presente projeto, está pouco documentada. Alguns estudos [7] confirmam a maior capacidade que os nanofluidos apresentam para absorver diretamente a radiação, quando comparados com os fluidos tradicionais, no entanto os valores de eficiência global dos coletores solares a funcionar sobre o princípio de absorção direta de radiação são modestos quando comparados com um coletor solar plano típico.

2.2 Coletores solares térmicos

Nas aplicações de baixa temperatura são utilizados vários tipos de coletores solares térmicos. A maioria dos coletores solares normalmente utilizados, apresentam um mesmo princípio de funcionamento em que a radiação solar é absorvida por uma superfície e a sua energia é depois transferida para um fluido. Nas aplicações mais comuns normalmente é utilizada água como fluido circulante, podendo ser misturada com um fluido com propriedades anticongelantes ou de proteção ao material do coletor, no entanto algumas aplicações específicas podem utilizar óleo ou ar.

Existem vários tipos de coletores solares, sendo que nas aplicações de baixa temperatura os tipos de utilização mais generalizada são o coletor solar plano, coletor parabólico composto, normalmente designado por coletor CPC e o coletor de tubos de vácuo [8].

2.2.1 Coletores solares planos

Este tipo de coletor é o mais utilizado uma vez que apresenta eficiências razoáveis e uma construção relativamente simples, permitindo assim apresentar um custo mais competitivo. Na figura 2.1 é possível visualizar uma representação genérica da constituição de um coletor solar plano.

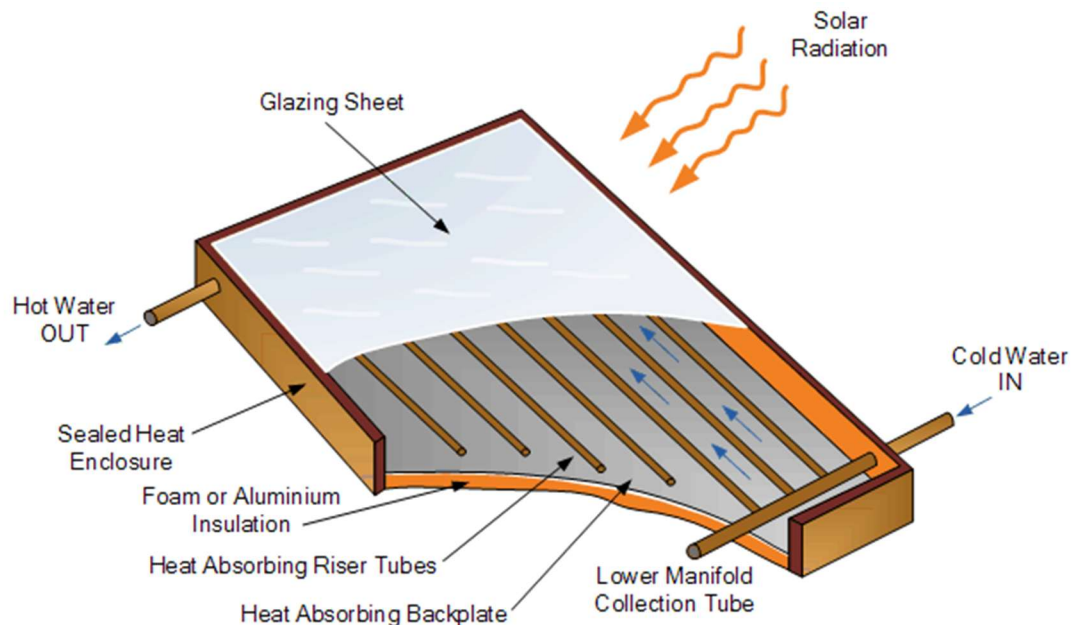


Figura 2.1 – Representação da constituição básica de um coletor solar plano (adaptado de [9]).

Nestes coletores existem 3 elementos que são fundamentais para a sua eficiência energética, a placa de cobertura, a placa absorvedora e o isolamento térmico.

Na cobertura transparente do coletor pretende-se que o material utilizado apresente um coeficiente de reflexão mínimo e um coeficiente de transmissão da radiação tão elevado quanto possível, utilizando-se normalmente vidro com baixo teor de ferro que pode apresentar um coeficiente de transmissão de até 91% [10]. É normal a utilização de vidro com tratamentos especiais na superfície exterior com objetivo de diminuir a radiação refletida pela cobertura, da mesma forma que também se utilizam tratamentos na superfície interior da cobertura, muitas vezes texturas rugosas que visam diminuir a radiação a partir do interior do coletor, diminuindo assim as perdas.

A placa absorvedora é um elemento muito importante do coletor solar, pois é neste elemento que é captada a radiação solar. Normalmente é construída num metal com boas características de condução térmica como o alumínio ou o cobre, de forma a maximizar a transferência de energia térmica para o fluido de trabalho que circula nos tubos do coletor solar. De forma a garantir a máxima eficiência, a superfície exterior das placas absorvedoras, tipicamente apresenta um tratamento superficial com um revestimento seletivo que lhe permite melhorar as características de absorção da radiação e diminuir a emissividade térmica da superfície, de forma a reduzir as perdas.

O isolamento tem como função limitar as perdas de calor do coletor solar para o ambiente, sendo utilizado na face posterior do coletor entre a placa absorvedora e a caixa. Os materiais mais utilizados são as fibras minerais e o poliuretano, no entanto o poliuretano não pode estar em contacto direto com a placa absorvedora em painéis que alcancem temperaturas de estagnação acima de 130 °C.

2.2.2 Coletores parabólicos compostos

Os coletores parabólicos compostos, normalmente designados por coletor CPC, são coletores solares onde se procura concentrar a radiação solar numa placa absorvedora, sendo o sistema de absorção de energia realizado de duas formas, parte da energia é absorvida a partir da radiação que incide diretamente na placa absorvedora e a outra parte a energia é absorvida da radiação que é refletida da superfície parabólica refletora para a superfície inferior da placa absorvedora. Na figura 2.2 é possível visualizar uma representação esquemática da constituição de um coletor CPC, onde se podem identificar claramente as superfícies parabólicas para reflexão da radiação solar e a placa absorvedora sobre os tubos de circulação do fluido térmico.

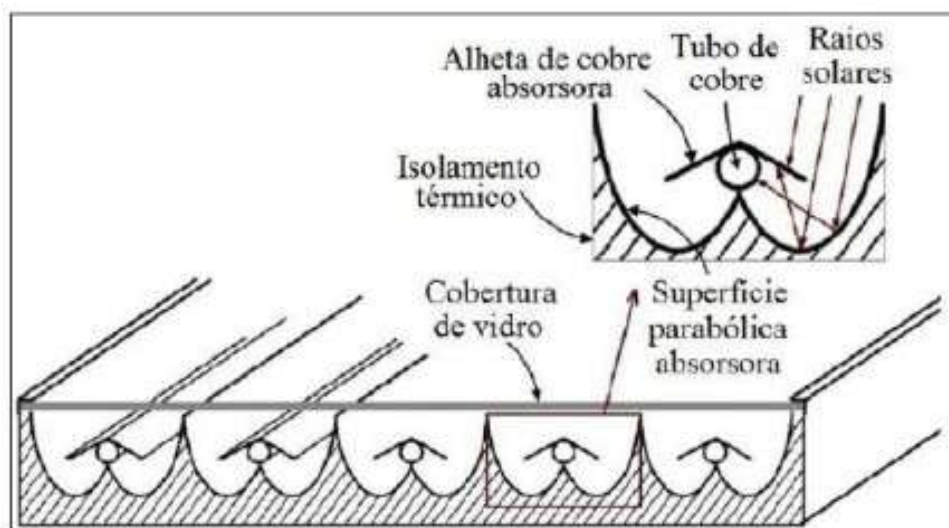


Figura 2.2 – Representação da constituição básica de um coletor CPC (adaptado de [11]).

A concentração da radiação realizada nos coletores CPC permite obter temperaturas de trabalho mais elevadas e melhor eficiência em situações de baixa radiação, ao mesmo tempo que o facto de apresentar uma área de absorção inferior à dos coletores solares planos, permite diminuir as perdas de energia, aumentando assim a eficiência global do coletor.

Os coletores CPC apresentam maior eficiência do que os coletores solares planos, no entanto têm custos de produção mais elevados devido à sua maior complexidade de construção.

2.2.3 Coletores de tubos de vácuo

O coletor de tubos de vácuo é o tipo de coletor solar corrente que apresenta melhores índices de eficiência, conseguindo manter um bom nível de eficiência mesmo quando a diferença de temperatura entre o coletor solar e o ambiente é elevada.

Este tipo de coletor é bastante eficiente porque ao proteger o elemento absorvente numa câmara de vácuo reduz muito significativamente as perdas de calor, permitindo que o elemento absorvedor se encontre a uma temperatura muito superior à temperatura ambiente, sem que se registem perdas significativas de calor [8]. Na figura 2.3 é possível visualizar uma representação simplificada da constituição de um dos tipos de coletor solar de vácuo mais comuns.

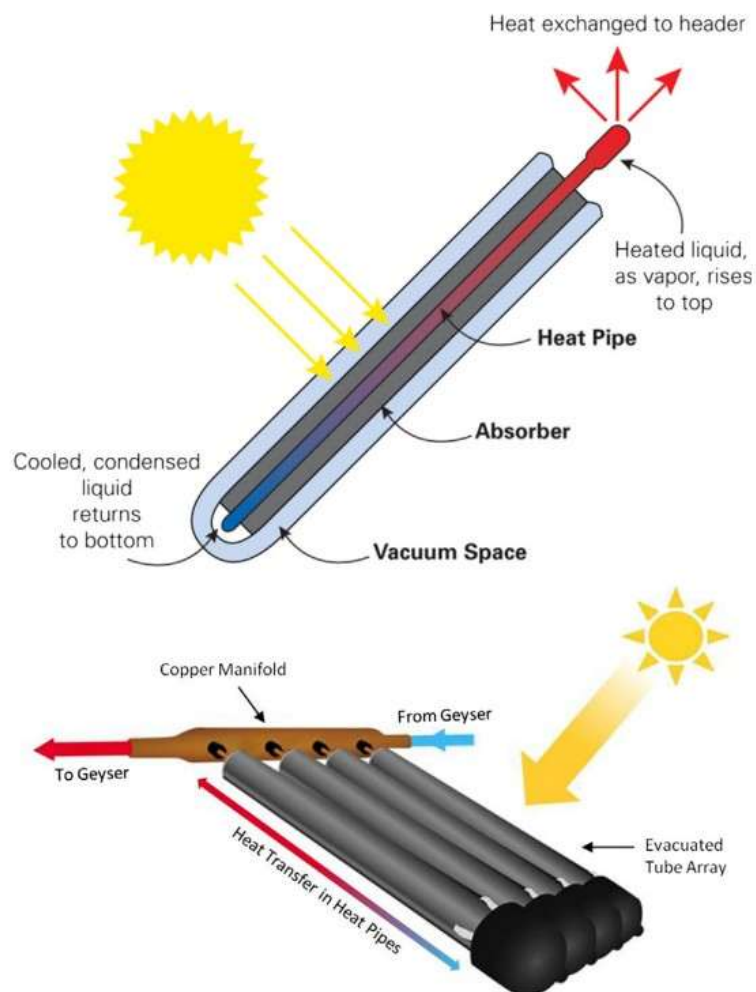


Figura 2.3 – Representação de um coletor solar de tubos de vácuo (adaptado de [12]).

Este tipo de coletor solar requer um processo de construção mais elaborado, de forma a garantir a estanqueidade dos tubos e o nível de vácuo adequado. A maior complexidade do processo construtivo faz com que este tipo de coletores seja significativamente mais caro que os coletores solares planos.

2.3 Eficiência dos coletores solares térmicos

A eficiência dos coletores solares térmicos é definida pela razão entre a energia coletada e a energia total incidente [10]. As características construtivas dos coletores solares influenciam a sua eficiência e a forma como esta varia para diferentes condições de radiação solar, temperatura ambiente e temperatura do fluido solar.

Existem vários os artigos publicados [13], que abordam as técnicas mais testadas com vista à melhoria da eficiência dos coletores solares térmicos de baixa temperatura. Uma das áreas de desenvolvimento é utilização de nanofluidos, tal como abordado no capítulo 2.1.4, sendo que ainda é uma área pouco desenvolvida e atualmente sem aplicação comercial. Os outros aspetos mais estudados prendem-se com questões práticas da construção dos coletores solares, nomeadamente utilização de geometrias que maximizem a transferência de energia para o fluido solar e a utilização de revestimentos especializados nas placas absorsoras que permitam o aumento da energia absorvida e a diminuição das perdas.

Em termos de geometrias de construção, as experiências realizadas demonstraram que a introdução de alhetas e outras inserções no interior dos tubos dos coletores solares aumenta a transferência de calor para o fluido. Estas inserções permitem aumentar a área de troca de calor e promover uma melhoria do coeficiente de transmissão térmica devido à maior turbulência do escoamento, no entanto têm como inconveniente o aumento das perdas de carga, que poderá anular os ganhos obtidos com o aumento da troca de energia. Os estudos [13] concluem que os ganhos obtidos dependem fortemente das condições de operação dos coletores, não existindo um padrão que indique as modificações que devem ser realizadas em função das condições pretendidas. A maior complexidade e os maiores custos de produção, limitam a utilização desta tecnologia em coletores solares correntes de baixa temperatura.

A utilização de tratamentos superficiais nas placas absorsoras dos coletores solares tem sido um tema muito estudado e que tem evoluído bastante ao longo dos anos. Vários artigos [13] sugerem que a utilização de revestimentos seletivos na superfície exterior das placas absorsoras pode melhorar significativamente a eficiência dos coletores solares térmicos. Os revestimentos seletivos permitem melhorar significativamente as características de absorsividade para comprimentos de onda curtos típicos da radiação solar incidente (0,3 a 2,5 μm), diminuindo ao mesmo tempo bastante a emissividade para comprimentos de onda longos ($> 0,7 \mu\text{m}$), típicos das temperaturas de operação dos coletores solares, reduzindo as perdas de energia. Os estudos [13] concluem que apesar destes revestimentos aumentarem significativamente a eficiência dos coletores solares, a sua adoção generalizada depende da redução da complexidade e do seu custo de produção. Em termos globais a eficiência de um coletor solar pode ser calculada através da expressão (2.1).

$$\eta = \frac{q_{util}}{A \cdot I_{in}} \quad (2.1)$$

Em que: η – Eficiência do coletor solar.

q_{util} – Potência térmica útil coletada [W].

A – Área de captação [m^2].

I_{in} – Irradiância solar [W/m^2].

A potência útil coletada depende da potência efetivamente absorvida no fluido solar e das perdas ocorridas no coletor, podendo ser calculada pela expressão (2.2).

$$q_{util} = q_{abs} - q_{perdas} \quad (2.2)$$

Em que: q_{util} – Potência térmica útil coletada [W].

q_{abs} – Potência térmica absorvida no coletor solar [W].

q_{perdas} – Potência térmica perdida pelo coletor solar [W].

A potência absorvida é dependente da transmissividade (τ) da cobertura do coletor solar e do coeficiente de absorção do meio absorvedor (α), podendo ser calculada pela expressão (2.3).

$$q_{abs} = A \cdot I_{in} \cdot \tau \cdot \alpha \quad (2.3)$$

Em que: q_{abs} – Potência absorvida pelo fluido solar [W].

A – Área de captação [m^2].

I_{in} – Irradiância solar [W/m^2].

τ – Coeficiente de transmissão da cobertura do coletor.

α – Coeficiente de absorção do meio absorvedor.

Para coletores solares de baixa temperatura as perdas térmicas assumem um comportamento aproximadamente linear com a diferença de temperatura entre o absorvedor e o ambiente, podendo a potência de perdas ser calculada através da expressão (2.4).

$$q_{perdas} = A \cdot U \cdot \Delta T \quad (2.4)$$

Em que: q_{perdas} – Potência térmica perdida pelo coletor solar [W].

A – Área de captação [m²].

U – Coeficiente global de perdas [W/(m².K)].

ΔT – Diferença de temperaturas entre o fluido solar e o ambiente (°C).

Com base nas expressões (2.1) a (2.4), podemos deduzir a expressão geral da eficiência de um coletor solar de baixa temperatura, dada pela expressão (2.5).

$$\eta = \tau \cdot \alpha - U \cdot \frac{T_{fluido} - T_{amb}}{I_{in}} \quad (2.5)$$

Em que: η – Eficiência do coletor solar.

τ – Coeficiente de transmissão da cobertura do coletor.

α – Coeficiente de absorção do meio absorvor.

U – Coeficiente global de perdas [W/(m².K)].

I_{in} – Irradiância solar [W/m²].

T_{fluido} – Temperatura do fluido solar (°C).

T_{amb} – Temperatura ambiente (°C).

Considerando que o produto entre o coeficiente de absorção do meio absorvor e o coeficiente de transmissão da cobertura do coletor solar normalmente é designado por rendimento ótico (η_0), podemos obter uma expressão simplificada da eficiência do coletor solar de acordo com a expressão (2.6).

$$\eta = \eta_0 - U \cdot \frac{T_{fluido} - T_{amb}}{I_{in}} \quad (2.6)$$

Em que: η – Eficiência do coletor solar.

η_0 – Rendimento ótico.

U – Coeficiente global de perdas [W/(m².K)].

I_{in} – Irradiância solar [W/m²].

T_{fluido} – Temperatura do fluido solar (K).

T_{amb} – Temperatura ambiente (K).

Para coletores solares capazes de atingir temperatura mais elevadas é necessário dividir as perdas térmicas em duas parcelas, passando a curva de eficiência a ser calculada com base em dois coeficientes de perdas [10],[14], neste caso a expressão simplificada de cálculo da eficiência do coletor solar toma a forma da expressão (2.7).

$$\eta = \eta_0 - U_1 \cdot \frac{T_{\text{fluido}} - T_{\text{amb}}}{I_{\text{in}}} - U_2 \cdot \frac{(T_{\text{fluido}} - T_{\text{amb}})^2}{I_{\text{in}}} \quad (2.7)$$

Em que: η – Eficiência do coletor solar.

η_0 – Rendimento ótico.

U_1 – Coeficiente perdas de primeira ordem [W/(m² .K)].

U_2 – Coeficiente de perdas de segunda ordem, dependente da temperatura [W/(m² .K²)].

I_{in} – Irradiância solar [W/m²].

T_{fluido} – Temperatura do fluido solar (K).

T_{amb} – Temperatura ambiente (K).

Pela expressão, é possível concluir que, coletores que apresentem um coeficiente de perdas de segunda ordem relativamente elevado, irão apresentar uma maior perda de eficiência com o aumento da diferença de temperatura entre o fluido solar e o ambiente. Este comportamento será traduzido por uma curva de eficiência com um formato arredondada descendente mais pronunciado.

Na figura (2.4) pode ser visualizada a representação gráfica da curva de eficiência de um coletor plano comercial, de acordo com os dados do fabricante apresenta um rendimento ótico de 0,794, um coeficiente de perdas U_1 de 3,863 W/(m².K) e um coeficiente de perdas U_2 de 0,013 W/(m².K²).

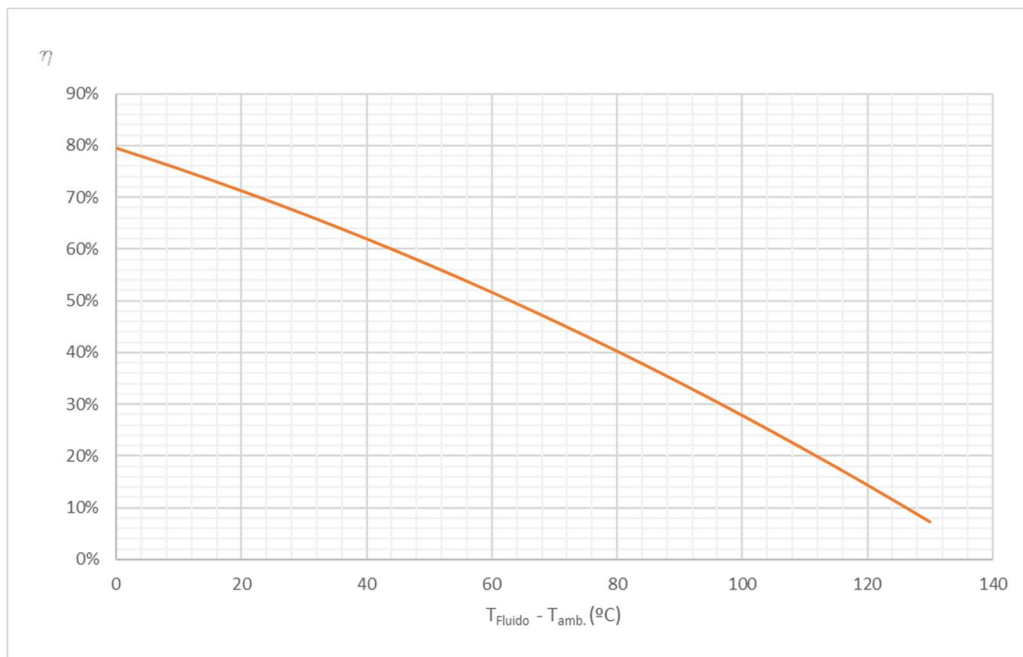


Figura 2.4 – Eficiência de um coletor solar térmico (adaptado de [15]).

Analisando as expressões (2.6 e 2.7) e a figura (2.4), facilmente se verifica que para condições estáveis de temperatura ambiente e nível irradiância solar, a eficiência do coletor solar irá diminuir com o aumento da temperatura do fluido solar. Uma maior temperatura do fluido solar implicará uma maior diferença de temperatura entre o coletor solar e a temperatura ambiente, resultando perdas de energia superiores.

A certificação de coletores solares envolve vários testes relativos à sua eficiência, resistência mecânica e durabilidade, de forma a garantir que os coletores disponibilizados no mercado respeitam um padrão mínimo de qualidade.

Na Europa os coletores solares térmicos são certificados de acordo com as normas 12975/76 que define os procedimentos e os ensaios a realizar para certificação dos coletores.

Experimentalmente a potência útil coletada pode ser calculada diretamente com base no caudal do fluido solar e nas suas temperaturas de entrada e saída no coletor solar, de acordo com a expressão (2.8), no entanto este método requer o conhecimento exato das propriedades do fluido solar, assim como a instalação de instrumentos com elevada exatidão e precisão que permitam determinar as várias variáveis com o mínimo de erro.

$$q_{\text{util}} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_o - T_i) \quad (2.8)$$

Em que: q_{util} – Potência térmica útil coletada [W].

\dot{m} – Caudal mássico de fluido solar [kg/s].

C_p – Calor específico do fluido solar [J/(kg.K)].

T_i – Temperatura de entrada do fluido solar no coletor (°C).

T_o – Temperatura de saída do fluido solar do coletor (°C).

Uma forma alternativa de determinar da energia útil coletada poderá ser a que foi utilizada neste estudo, consiste em calcular a energia útil dissipada numa determinada massa de fluido secundário conhecido, neste caso água, durante um determinado período. Assim podemos calcular a energia coletada através da expressão (2.9) sem necessidade de recorrer a instrumentos especializados, nomeadamente um caudalímetro de elevada exatidão, instrumento tipicamente bastante dispendioso.

$$Q_{util} = m \cdot C_{p(2)} \cdot (T_2 - T_1) \quad (2.9)$$

Em que: Q_{util} – Energia térmica útil transferida para o fluido secundário [J].

m – Massa de fluido secundário [kg].

$C_{p(2)}$ – Calor específico do fluido secundário [J/kg.K].

T_1 – Temperatura do fluido secundário no instante inicial (°C).

T_2 – Temperatura do fluido secundário no instante final (°C).

Neste caso a eficiência do coletor, será calculada com base na relação entre a energia térmica transferida para o fluido secundário durante um determinado intervalo de tempo (Δt) e a irradiação média incidente no coletor durante o mesmo período, de acordo com a expressão (2.10).

$$\eta = \frac{Q_{util}}{A \cdot I_{in(med)} \cdot \Delta t} \quad (2.10)$$

Em que: η – Eficiência do coletor solar.

Q_{util} – Energia térmica útil coletada [J].

A – Área de captação [m²].

$I_{in(med)}$ – Irradiância solar média no intervalo Δt considerado [W/m²].

Δt – Intervalo de tempo entre medições [s]

3 Desenvolvimento do pré-protótipo

Neste capítulo serão apresentadas as várias fases de estudo e desenvolvimento realizadas, com vista à construção de um pré-protótipo funcional que permita testar a capacidade de absorção de energia por parte do nanofluido. Serão também indicadas as principais dificuldades sentidas no processo de desenvolvimento do pré-protótipo e as opções tomadas de forma a procurar contornar os problemas encontrados.

3.1 O Nanofluido

Para o desenvolvimento do trabalho foi utilizado um nanofluido constituído por um óleo base comercialmente disponível e nanopartículas de carbono. O fluido base utilizado tem um aspeto translúcido, não apresenta odor, é não tóxico, não infamável e ambientalmente neutro. Na tabela 3.1 são apresentadas as propriedades físicas básicas do fluido base utilizado no trabalho.

Tabela 3.1 – Principais propriedades do fluido base.

| FLUIDO BASE | |
|------------------------------------------------------|-----|
| Massa volumétrica a 20°C (kg/m ³) | 805 |
| Viscosidade cinemática a 40 °C (mm ² /s) | 9,9 |
| Viscosidade cinemática a -30 °C (mm ² /s) | 523 |

O nanofluido utilizado foi previamente preparado por um investigador parceiro, o professor Georgios Evangelakis, da Universidade de Ioannina (UOI), sendo ele responsável pela definição da composição das partículas, a sua concentração e método de preparação utilizado.

3.2 Pré-protótipos

Numa primeira análise foi considerado que o conceito mais promissor seria a utilização de um coletor aberto de forma a maximizar a área de fluido exposta à radiação, maximizando assim o potencial de captação de radiação solar. O conceito inicial consistia num coletor solar totalmente aberto com uma conduta de distribuição na parte inferior e outra de recolha no topo, de forma a ter um fluxo o mais homogéneo possível e a evitar zonas de estagnação. Na figura 3.1 é possível observar um esboço do conceito inicial de coletor idealizado.

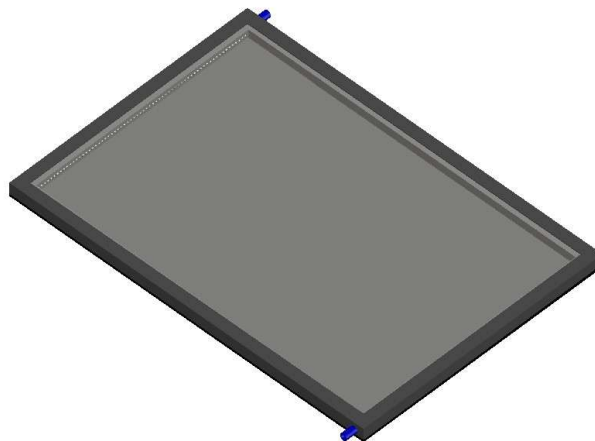


Figura 3.1 – Representação do conceito inicial idealizado.

A viabilidade deste conceito depende fortemente do comportamento do nanofluido a baixas velocidades, apesar de estarem previstos muitos pontos de injeção de fluido para evitar zonas de estagnação, pode ocorrer que a velocidade de deslocamento seja muito baixa e ocorram problemas de precipitação das nanopartículas. Caso existam problemas devido à baixa velocidade de deslocamento do nanofluido, existe a possibilidade de dividir o coletor em várias secções, obrigando o nanofluido a realizar múltiplas passagens com uma velocidade mais elevada.

3.2.1 Canal de escoamento

Para validar o conceito base e de forma a realizar os primeiros testes, procurou-se construir um sistema simples, que permitisse visualizar o comportamento do nanofluido em circulação quando exposto à radiação solar. Desenvolveu-se um sistema composto por um canal de escoamento, uma bomba (B) para circulação do fluido, um caudalímetro (C) com válvula para verificação e ajuste do caudal de circulação e um sistema para medição da temperatura do fluido circulante (T). Na figura 3.2 apresenta-se a representação esquemática do sistema inicial de testes.

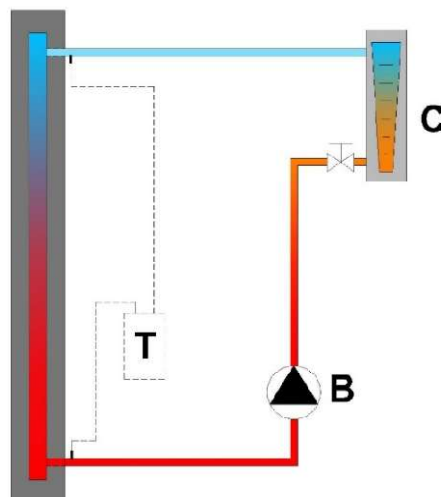


Figura 3.2 – Representação esquemática do sistema de testes inicial.

3.2.1.1 Construção

Tentando desenvolver um sistema que fosse de fácil utilização e procurando aproveitar os equipamentos de fabrico disponíveis no laboratório de tecnologia mecânica, foi decidido construir um canal com 500 mm de comprimento, 20 mm de largura e 10 mm de profundidade, resultando numa área de captação de energia solar de 0,01 m² e num volume de fluido no canal de 1,0 x 10⁻⁴ m³. Por simplicidade de construção, foi decidido desenvolver um canal de escoamento com uma única face transparente à radiação solar, face esta que é constituída por uma lâmina de vidro incolor suportada por uma moldura em acrílico, tal como representado na figura 3.3.

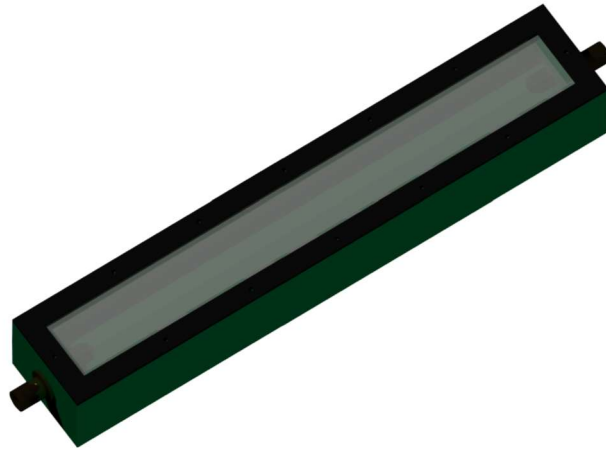


Figura 3.3 – Modelo tridimensional do canal de escoamento.

Na figura 3.4 estão representados os vários elementos que constituem o canal de escoamento, nomeadamente a moldura em material acrílico para suporte do vidro, o vidro de cobertura do canal de escoamento, o bloco de poliuretano com o canal esculpido e as ponteiros para ligação das tubagens do sistema.

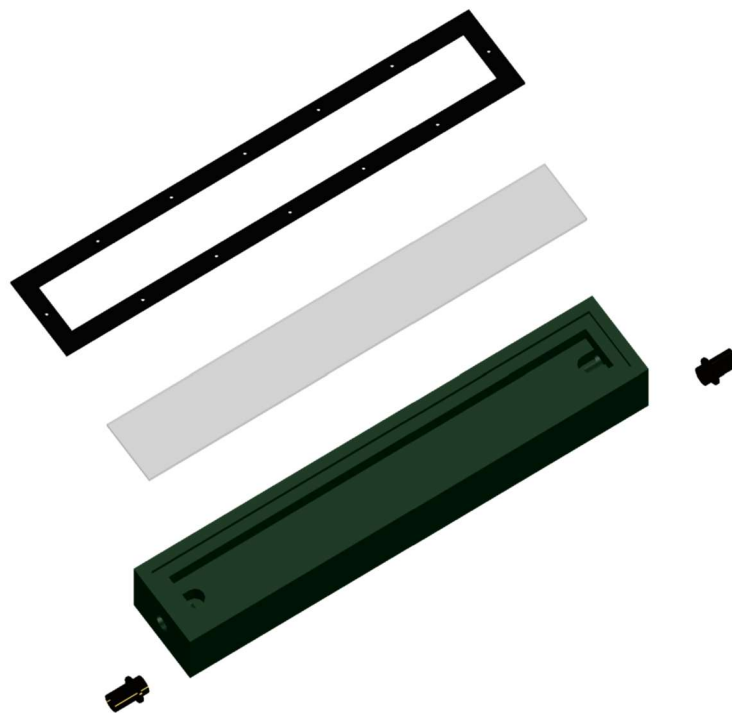


Figura 3.4 – Vista explodida dos componentes que constituem o canal de escoamento.

O canal foi construído a partir de um bloco de poliuretano maquinável, material próprio para construção de protótipos, que apresenta elevada resistência, é facilmente maquinável, permite um bom acabamento superficial e resiste com facilidade às temperaturas de trabalho previstas. Na tabela 3.2 são apresentadas as principais propriedades do material utilizado na construção do pré-protótipo.

Tabela 3.2 – Propriedades do material de prototipagem utilizado (extraído de [16]).

| Poliuretano maquinável SIKABLOC KM960 | |
|------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Densidade | 1,2 |
| Dureza Shore | D 78 |
| Resistência à flexão (MPa) | 80 |
| Modulo E (MPa) | 2200 |
| Resistência à compressão (MPa) | 70 |
| Resistência ao impacto (kJ/m²) | 30 |
| Temperatura de deformação sob carga (°C) | 80 |
| Coefficiente de dilatação Térmica linear (K⁻¹) | 85 x 10 ⁻⁶ |

Na figura 3.5 está representado o processo de maquinação do canal de escoamento a partir de um bloco de poliuretano já regularizado, processo realizado com recurso a fresa existente no laboratório de tecnologia mecânica.



Figura 3.5 – Maquinação do canal de escoamento.

Após construção do canal de escoamento e dos respectivos acessórios para ligação das mangueiras e instalação dos termopares para medição de temperatura, foi realizada a montagem do sistema completo com a bomba de circulação, o caudalímetro e o equipamento para medição de temperatura do fluido circulante. Na figura 3.6 é apresentada uma imagem do sistema pronto para a realização dos primeiros ensaios.



Figura 3.6 – Sistema de testes iniciais completo.

3.2.1.2 *Ensaio do canal de escoamento*

Nos primeiros ensaios foram utilizadas tubagens transparentes sem isolamento, de forma a permitir a visualização do comportamento do fluido, dando especial atenção à homogeneidade e à ocorrência de depósitos, ou aglomeração de partículas.

Logo nos ensaios iniciais foi possível verificar que existia tendência para a perda de homogeneidade do fluido, ocorrendo precipitação das nanopartículas em zonas de baixa velocidade e em locais com maior rugosidade ou acidentes que constituem obstáculos ao escoamento.

Na figura 3.7 é possível verificar a existência de uma separação clara entre parte das nanopartículas e o fluido base, fazendo com que o nanofluido deixe de ser homogêneo, passando a assumir um aspeto bastante mais translúcido que irá permitir que grande parte da radiação solar o consiga atravessar, sem que exista absorção de energia.



Figura 3.7 – Perda de homogeneidade do nanofluido.

Durante a interrupção da circulação de fluido no sistema, foi possível verificar que as nanopartículas tinham tendência a separar-se do fluido base e aderiam às paredes das tubagens como representado na figura 3.8. Após vários ensaios concluiu-se que depois de interromper a circulação de fluido por um longo período era muito difícil voltar a colocar todas as partículas em circulação de forma a manter as propriedades do nanofluido.



Figura 3.8 – Aderência de partículas às tubagens.

A paragem prolongada do sistema provocou também um efeito não desejado e com forte impacto nas características do nanofluido que foi a agregação das nanopartículas em conjuntos de partículas de grande dimensão como apresentado na figura 3.9. Estes conjuntos de partículas têm tendência a manter-se coesos durante a circulação através do sistema, prejudicando fortemente a homogeneidade do nanofluido e a sua capacidade de absorção de radiação solar.

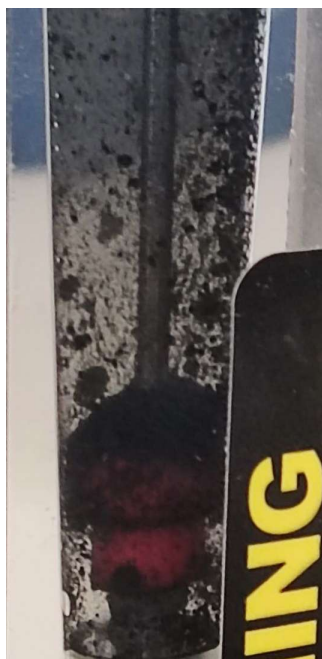


Figura 3.9 – Precipitação e aglomeração de partículas no caudalímetro.

As características de viscosidade do nanofluido ensaiado dificultaram bastante o arrastamento das partículas precipitadas no canal de escoamento, a interrupção da circulação de fluido no sistema provocou uma precipitação considerável de partículas que depois ficaram depositadas no fundo do canal e não voltaram a entrar em circulação porque a velocidade de circulação utilizada não foi suficiente para provocar o arrastamento das mesmas, tal como é possível verificar na figura 3.10.

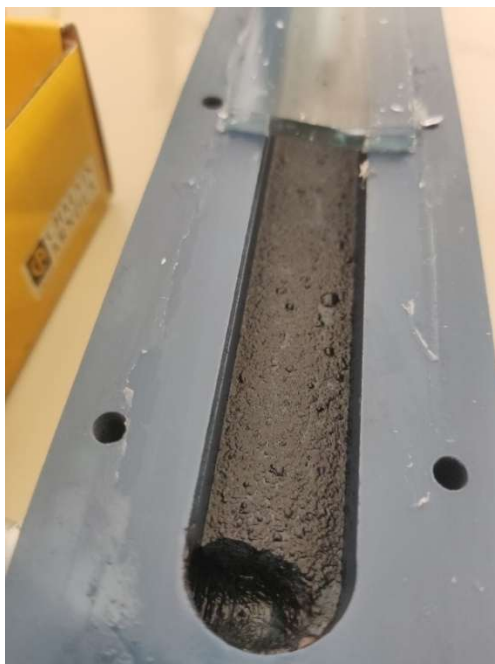


Figura 3.10 – Precipitação e aderência de partículas ao canal de escoamento.

Durante o primeiro ensaio realizado com exposição do sistema à radiação solar registou-se a quebra do vidro de cobertura do canal de escoamento, este acidente foi atribuído ao excesso de rigidez na ligação entre o vidro e o canal de escoamento e à grande disparidade nos coeficientes de dilatação térmica. Para as temperaturas atingidas durante o ensaio (cerca de 50 °C), o vidro tipicamente apresenta um coeficiente de dilatação térmica próximo de $9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [17], valor muito inferior aos $85 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ apresentado pelo poliuretano utilizado para a construção do canal de escoamento. A disparidade nos coeficientes de dilatação dos materiais aliada à utilização de uma película muito fina de material selante e à grande rigidez aplicada na fixação da cobertura de vidro resultaram no aparecimento de uma fissura em toda a largura do canal e conseqüente perda do fluido. Na figura 3.11 é possível observar a fissura referida.



Figura 3.11 – Quebra do vidro de cobertura do canal de escoamento.

Tendo em conta que a precipitação das partículas constituía um problema importante, de forma a manter uma velocidade de escoamento mais elevada, foi decidido abandonar o canal de escoamento e testar um sistema com maior velocidade de escoamento.

3.2.2 Tubo de PVC transparente múltiplo U

Para garantir que atingíamos uma velocidade de escoamento mais elevada e com baixa perda de energia montou-se um coletor constituído por mangueira transparente de PVC flexível com diâmetro interior de 8 mm, disposta sobre uma placa rígida de espuma de poliestireno extrudado, conforme a figura 3.12. Para monitorização do caudal circulado e da temperatura do nanofluido adaptou-se a mesma instrumentação que já tinha sido utilizada no canal de escoamento.



Figura 3.12 – Coletor solar em mangueira de PVC.

3.2.2.1 *Ensaio do permutador em tubo de PVC*

Após realização dos primeiros ensaios, verificamos que a precipitação de partículas continuava a ocorrer quando ocorria interrupção da circulação de fluido e que mesmo utilizando uma maior velocidade de escoamento não era possível arrastar todas as partículas precipitadas. De forma a tentar garantir a homogeneidade do nanofluido, foi decidido recolher todo o fluido no final de cada ensaio, assegurando assim que as propriedades do mesmo se mantinham consistentes.

Apesar da construção deste coletor ser muito simples e apresentar grandes limitações de eficiência, foi decidido realizar um ensaio e verificar quais as temperaturas de nanofluido que seriam possíveis obter, assim como a rapidez com que isso iria ocorrer. Na figura 3.13 encontra-se representada a evolução de temperatura do nanofluido durante o ensaio e a radiação solar total incidente no plano onde estava instalado o coletor solar.

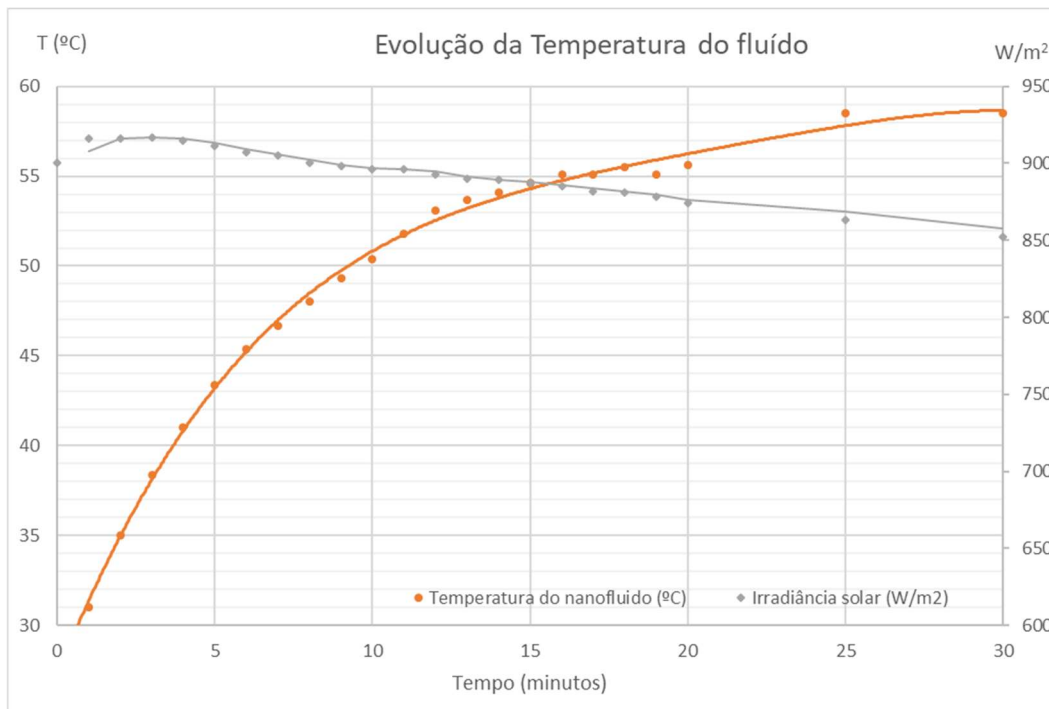


Figura 3.13 – Evolução da temperatura do nanofluido e irradiância solar no ensaio 1.

Após trinta minutos de ensaio e partindo de uma temperatura ambiente de 27 °C foi possível elevar a temperatura do nanofluido até cerca de 59 °C, indicando que existe potencial para que se possa utilizar o nanofluido para absorver diretamente energia da radiação solar, mesmo considerando as limitações do permutador utilizado. Por um lado, a mangueira plástica em que foi construído o permutador tem uma transmissividade inferior ao vidro e por outro lado a forma arredondada da mangueira aumenta a percentagem de radiação refletida, dado que esta não incide perpendicularmente em toda a superfície da mangueira.

Num segundo ensaio foi decidido alterar o permutador de forma a isolar os tubos de forma a diminuir as perdas por convecção para o meio ambiente e verificar se o maior isolamento oferecido por esta configuração permitia atingir temperaturas mais elevadas.

Foi montado um permutador com construção semelhante à inicial, no entanto com os tubos embutidos numa placa de poliestireno extrudido e protegidos superiormente com uma placa de vidro incolor. Esta montagem permitiu garantir que velocidade do ar na envolvente dos tubos era muito baixa e não era influenciada pela velocidade do vento, reduzindo assim as perdas térmicas por convecção, conforme ilustrado na figura 3.14.



Figura 3.14 – Coletor solar em mangueira com cobertura de vidro.

Para verificar o efeito das alterações realizadas, foi realizado um ensaio em condições de temperatura ambiente e incidência de radiação semelhantes ao ensaio 1, tendo-se obtido os resultados que estão apresentados na figura 3.15.

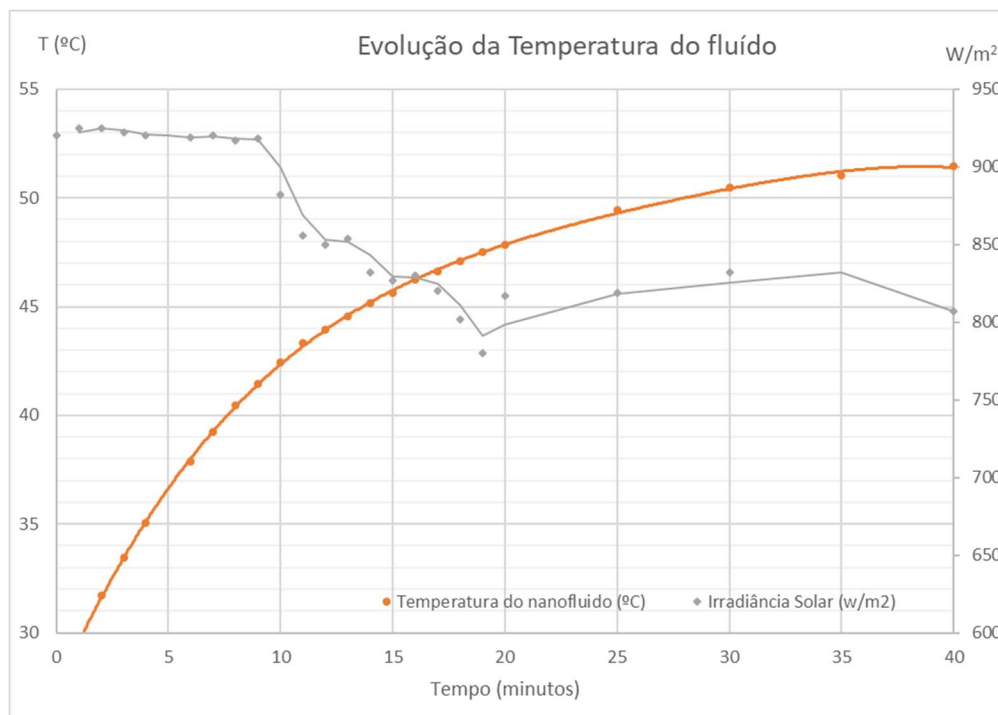


Figura 3.15 – Evolução da temperatura do nanofluido e irradiância solar no ensaio 2.

No ensaio realizado com esta versão do permutador verificou-se que a subida de temperatura do nanofluido era mais lenta que na versão inicial e que a quase estagnação ocorria para valores de temperatura inferiores. As condições de irradiância durante o ensaio não foram as melhores, no entanto a colocação da cobertura de vidro aparenta ser a principal responsável pela redução da energia captada. O vidro utilizado apesar de ser incolor não é um vidro especializado para este tipo de aplicação e deste modo não apresenta um coeficiente de transmissividade suficientemente elevado, funcionando como uma barreira à radiação que deste modo encontra duas barreiras antes de atingir o nanofluido, o vidro e a parede do tubo de PVC. A redução da taxa de captação de energia também estará ligada à redução da área de tubo exposta, diminuindo a quantidade de energia que consegue atingir o nanofluido.

Este ensaio foi realizado a uma temperatura ambiente de 25 °C e após quarenta minutos o nanofluido atingiu uma temperatura de aproximadamente 52 °C, mostrando sinais de quase estagnação. Para este valor de diferença de temperatura face ao ar ambiente, não foi possível comprovar o benefício da melhoria do isolamento do permutador com vista à redução de perdas térmicas, tendo-se notado mais o efeito de barreira à radiação que a cobertura de vidro provocou.

3.2.3 Permutador em poliuretano com múltiplas passagens

Procurando construir um coletor mais próximo do conceito inicial, mas com o intuito de manter uma velocidade de escoamento elevada, foi decidido construir um coletor de múltiplas passagens com um canal de dimensão semelhante ao dos permutadores em tubo PVC.

3.2.3.1 Construção

A construção do canal foi realizada a partir de um bloco de poliuretano maquinável, semelhante ao utilizado para o canal de escoamento, tendo as dimensões sido adaptadas à capacidade dos equipamentos de fabrico disponíveis no laboratório de tecnologia mecânica. O coletor foi construído com uma dimensão de 420x120 mm e consiste em 12 passagens de um canal de 8 mm de largura e 6 mm de profundidade, sendo cada passagem separada por uma aba de 1 mm de espessura, perfazendo uma área útil de captação de radiação solar de 393,4 cm².

Tal como no canal de escoamento, foi mantido o conceito de ter uma única face transparente à radiação solar, face esta que é constituída por uma lâmina de vidro incolor diretamente colada à base do coletor com um selante. Na figura 3.16 está representada a fase maquinação do canal no bloco de poliuretano.



Figura 3.16 – Maquinação de coletor solar em poliuretano com múltiplas passagens.

Depois de concluída a montagem do coletor procedeu-se à ligação dos equipamentos para medição de temperatura e caudal, bem como de um dispositivo para o enchimento do sistema e purga de ar automática. Posteriormente adaptou-se o sistema a uma base para movimentação e ajuste de inclinação do conjunto de forma prática, de forma a garantir a perpendicularidade entre o coletor e o sol. Na figura 3.17 é apresentada uma imagem do sistema pronto para a realização dos primeiros ensaios.



Figura 3.17 – Montagem de coletor solar em poliuretano com múltiplas passagens.

3.2.3.2 *Ensaio do coletor de múltiplas passagens*

Para ensaio do coletor, este foi colocado sobre uma plataforma que permitia realizar a inclinação de todo o sistema de forma que a radiação direta incidisse perpendicularmente no coletor. O facto de o ensaio ter sido realizado no final de setembro, implicou a utilização de uma inclinação significativa uma vez que a altitude solar à hora do ensaio estava próxima de 40°. Na figura 3.18 é possível verificar o sistema em funcionamento.



Figura 3.18 – Ensaio do coletor solar em poliuretano com múltiplas passagens.

Durante o ensaio surgiram algumas contrariedades relacionadas com a elevada nebulosidade que se registava e não permitiu ter níveis de irradiância solar constantes. Na figura 3.19 é possível verificar os resultados que foram obtidos durante o ensaio.

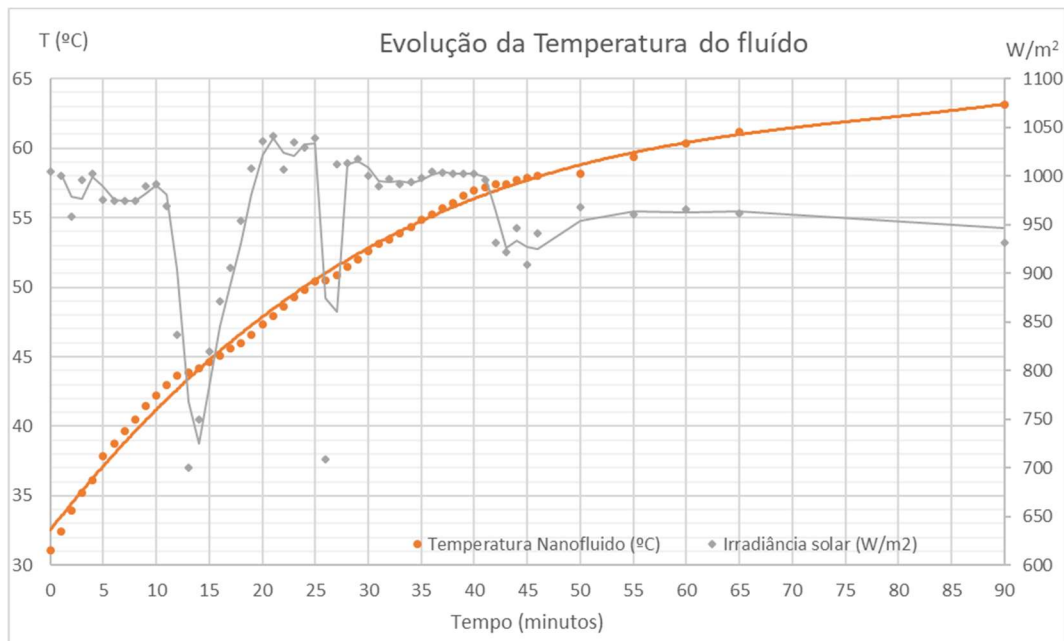


Figura 3.19 – Evolução da temperatura do nanofluido e irradiância solar no ensaio 3.

Tal como no ensaio com o permutador em tubo de PVC, verifica-se que é possível atingir temperaturas de fluido próximas de 60°C, indicando que o sistema poderá ser utilizado para o aquecimento de águas quentes sanitárias, ou outra utilização de temperatura moderada. Após noventa minutos de ensaio o nanofluido atingiu uma temperatura de 63°C e o comportamento da evolução da temperatura indica que a temperatura ainda iria subir ligeiramente até que fosse atingida a estagnação.

Pela observação da evolução de temperatura nota-se que esta é mais lenta do que a conseguida com o permutador de PVC, provavelmente porque o coletor foi esculpido num bloco de poliuretano e tem uma massa significativa que necessita ser aquecida em conjunto com o nanofluido. A área de coletor exposta sem isolamento contribui também para que exista uma perda de energia significativa que impede a obtenção de temperaturas mais elevadas.

Após a realização dos primeiros ensaios para verificar o comportamento do protótipo, foi decidido realizar algumas melhorias no pré-protótipo e efetuar uma montagem que permitisse avaliar a eficiência de coleta de energia do sistema. Foi decidido diminuir a espessura da placa de poliuretano do coletor e aplicar isolamento em poliestireno expandido tanto na base do coletor como na periferia, de forma a diminuir as perdas de energia. Para avaliação da energia coletada, foi realizada uma montagem simples em que a energia coletada era dissipada num depósito com uma massa conhecida de água, de acordo com a figura (3.20).

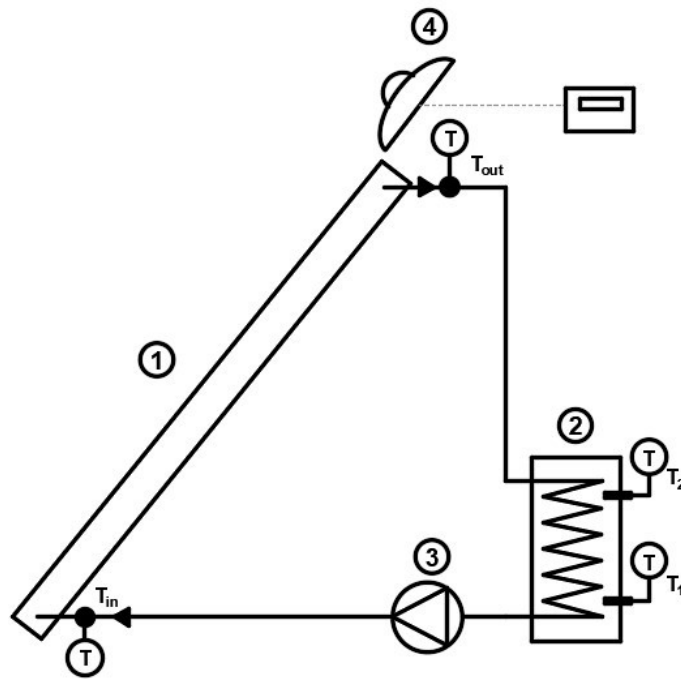


Figura 3.20 – Esquema da montagem para ensaio de eficiência do pré-protótipo.

A montagem apresenta quatro componentes principais, o coletor solar (1) equipado com sondas de temperatura para medir as temperaturas de entrada e saída do nanofluido, um depósito de acumulação (2) equipado no seu interior com um permutador de cobre alhetado para dissipação da energia coletada pelo fluido solar, uma bomba circuladora (3) para garantir a circulação do nanofluido através do circuito e um piranómetro (4) para medir a irradiância solar. O depósito de acumulação foi devidamente isolado com uma manga de poliuretano expandido com 32 mm de espessura, de forma a diminuir as perdas de energia ao máximo e equipado com duas sondas de temperatura instaladas a cotas distintas para garantir uma leitura mais exata da temperatura média do fluido secundário.

De forma a garantir que a radiação solar ao longo do ensaio incide perpendicularmente no coletor solar, foi construído um suporte que permite facilmente ajustar a orientação e a inclinação do mesmo.



Figura 3.21 – Montagem para ensaio de eficiência do pré-protótipo.

Utilizando a montagem apresentada, foram realizados alguns ensaios para verificar o comportamento do sistema quando exposto à radiação solar e avaliar a eficiência de coleta de energia do sistema, tendo-se obtido no último ensaio os resultados que estão com a figura (3.22).

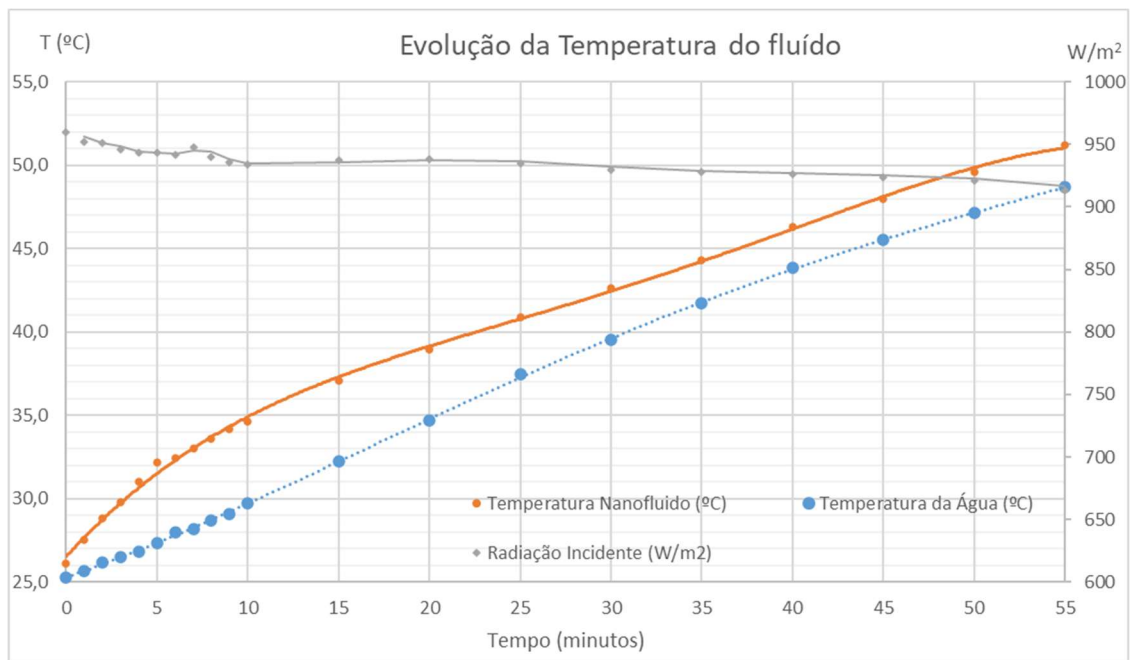


Figura 3.22 – Evolução da temperatura do nanofluido e irradiância solar no ensaio do pré-protótipo.

O ensaio foi realizado sob condições de irradiância solar quase constantes, tendo-se notado uma pequena redução ao longo do ensaio, situação normal dado o ensaio ter sido realizado após as 12h. A temperatura ambiente também não apresentou uma variação significativa, sendo que inicialmente era de aproximadamente 26 °C e durante o ensaio foi subido ligeiramente até aos 28 °C. Para contabilização da energia coletada pelo sistema encheu-se parcialmente o depósito de acumulação com uma massa de 0,606 kg de água, a uma temperatura de aproximadamente 25° C.

Tal como previsto, o aumento de temperatura do nanofluido neste ensaio foi mais lenta do que no ensaio anterior quando o sistema não estava equipado com depósito de acumulação. Neste ensaio parte da energia coletada pelo sistema foi transferida para a água do depósito de acumulação, reduzindo a taxa de aumento da temperatura do nanofluido ao longo do ensaio, no entanto a temperatura ultrapassou os 50 °C não mostrando sinais de estar prestes a atingir a estagnação.

Com base nos resultados obtidos no ensaio e de acordo com a expressão (2.10), foi possível calcular a eficiência de coleta de energia do sistema, tendo-se obtidos os resultados que estão representados na figura (3.23).

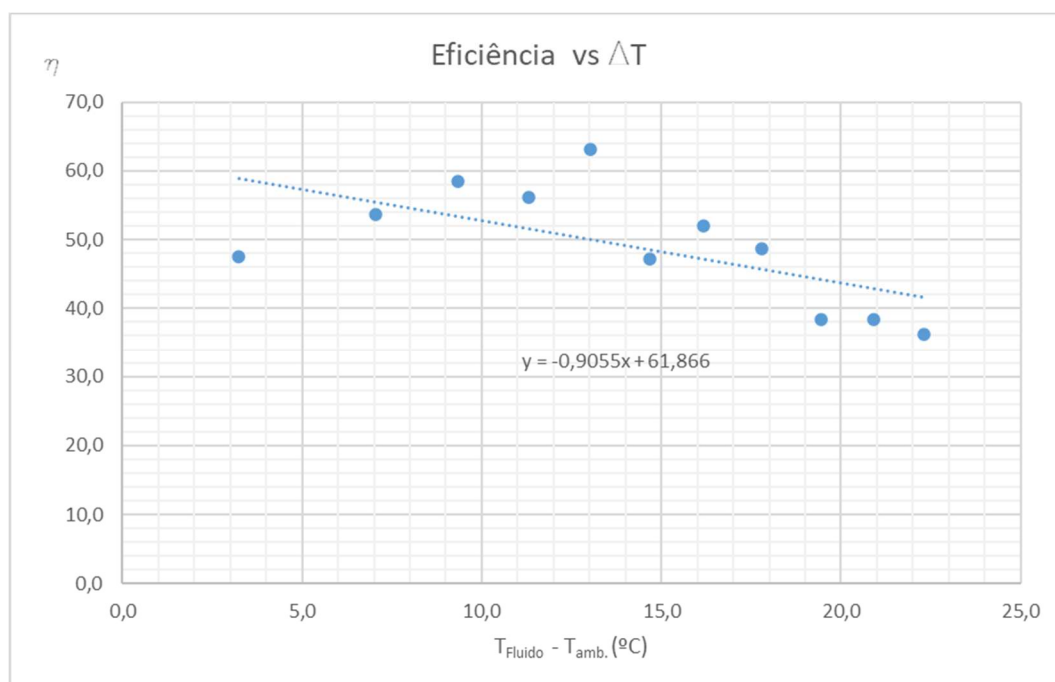


Figura 3.23 – Valores de eficiência do pré-protótipo obtidos nos ensaios.

Os valores de eficiência obtidos em ensaio são bastante modestos quando comparados com os valores de eficiência obtidos por coletores solares planos comuns. No ensaio realizado para uma temperatura do fluido solar cerca de 20 °C acima da temperatura ambiente, foi obtida uma eficiência próxima de 40%, valor que é muito inferior aos 70% de eficiência que um coletor solar plano comercialmente disponível apresenta [13]. Não foi possível, com os testes efetuados e com o pré-

protótipo utilizado, obter valores de eficiência que comprovem que os valores de eficiência, sejam superiores aos tipicamente obtidos com coletores solares planos a funcionar com fluidos solares comuns.

Tratando-se de um protótipo inicial, que tem uma grande margem de aperfeiçoamento, será necessário no futuro, melhorar o protótipo e fazer um conjunto de testes mais alargados, para efetivamente chegar a conclusões mais sólidas relativamente à viabilidade técnica da solução.

Uma das limitações importantes que contribuem para a limitação do rendimento do pré-protótipo é a utilização de um vidro corrente, seria importante utilizar um vidro com baixo teor de ferro e tratamento superficial adequado de forma a maximizar a transmissividade da radiação incidente e diminuir as perdas de energia.

A utilização de instrumentação com leitura não automatizada e baixa resolução também introduz erros importantes na contabilização da eficiência do protótipo, erros esses que assumem maior importância devido à utilização de protótipos de pequena escala. A utilização de protótipos de pequena escala obriga a ter instrumentação de elevada resolução e preparada para medir com exatidão grandezas de pequena dimensão, de forma a garantir a contabilização de pequenas variações nas variáveis em análise.

O conceito utilizado para o pré-protótipo, em que o nanofluido se encontra separado do ambiente exterior apenas por uma cobertura de vidro, também limita o rendimento do coletor, especialmente quando o nanofluido atinge temperaturas mais elevadas, dado que nesta situação as perdas térmicas aumentam significativamente. Durante os ensaios foi testada uma cobertura envidraçada suplementar com o objetivo de criar efeito de estufa e diminuir as perdas por convecção para o ambiente exterior, no entanto verificou-se que nas condições em que foram realizados os ensaios, a cobertura suplementar tinha um efeito negativo devido à diminuição acentuada da transmissividade, atribuindo-se esse efeito negativo à utilização de um vidro corrente sem as propriedades de transmissividade e tratamentos superficiais adequados à função. Apesar de não ter sido possível testar, acreditamos que a utilização de uma cobertura transparente adequada poderá promover o efeito de estufa e poderá ser benéfica especialmente em condições de baixa temperatura ambiente ou elevada velocidade do vento.

4 Conclusão

Neste capítulo serão apresentadas as principais conclusões do estudo realizado, apontando as potencialidades demonstradas pelo nanofluido ensaiado na absorção direta de radiação solar e as principais dificuldades sentidas.

4.1 Conclusões

Nos ensaios realizados verificou-se que efetivamente o nanofluido tinha uma capacidade de absorção direta de radiação solar superior a um fluido solar típico, como a água, no entanto apresentava problemas de estabilidade importantes que à partida impedem a sua utilização de forma comercial. De acordo com a revisão bibliográfica realizada, é possível obter nanofluidos com elevada estabilidade e que não apresentem tendência de precipitação ou aglomeração das nanopartículas [5], fator que é essencial quer para desenvolver um estudo mais aprofundado do seu desempenho quando utilizados em coletores solares, quer para poder tornar a sua utilização comercialmente atrativa.

O nanofluido utilizado é produzido como base num óleo comercial, a utilização de um fluido deste tipo apresenta alguns desafios relativamente à realização de ensaios, o nanofluido é incompatível com a água, dificultando assim a limpeza dos protótipos e a realização de ensaios comparativos com fluidos convencionais. A partir dos ensaios realizados, foi também possível verificar que em caso de acidente ou eventuais atos que provoquem a quebra do vidro do coletor, irá verificar-se a fuga parcial ou total do fluido térmico, resultando na completa inoperacionalidade do coletor térmico.

A utilização de um nanofluido cujo fluido base é um óleo, apresenta também como desvantagem, a necessidade de utilização de uma maior potência de bombagem, resultante da elevada viscosidade do fluido. O nanofluido utilizado, é obtido a partir de um fluido base, que à temperatura de 40 °C, apresenta uma viscosidade cinemática cerca de 15 vezes superior à viscosidade da água.

Durante a pesquisa realizada, tentou-se identificar o tipo de instrumentação mais adequado à conceção de um sistema de medição e aquisição de dados para ensaio de coletores solares térmicos. É importante que o sistema apresente precisão, resolução e exatidão adequada à realização de ensaios de eficiência energética de coletores solares térmicos e seja compatível o fluido solar térmico utilizado. A compatibilidade dos instrumentos de medição com o fluido em análise, foi uma das dificuldades encontradas, uma vez que os instrumentos tipicamente utilizados, estão de uma forma geral preparados e calibrados para funcionarem com água ou fluidos à base de água.

Tendo em conta as dificuldades encontradas, será importante resolver os problemas de estabilidade do nanofluido e construir um novo protótipo de maior dimensão, com materiais mais adequados que permita uma aferição dos valores de eficiência mais exata.

5 Desenvolvimentos futuros

Neste capítulo serão abordados os principais passos que poderão ser dados no sentido de aprofundar o estudo sobre a utilização de nanofluidos em coletores solares térmicos. Serão também abordadas as necessidades de aquisição de equipamentos que facilitem a realização de ensaios a coletores solares, permitindo a recolha de dados de forma automatizada e com maior exatidão.

5.1 Construção de bancada de ensaio

Uma das necessidades sentidas durante a realização dos ensaios com os vários pré-protótipos foi a de encontrar um suporte que permitisse direcionar corretamente os coletores solares ensaiados relativamente ao sol. Desta forma será bastante importante construir uma bancada de ensaios que permita ajustar o azimute e a inclinação dos coletores solar em ensaio, de forma a permitir o melhor ajuste da posição do coletor de acordo com a posição do sol. É bastante importante conseguir ajustar de forma expedita e exata o azimute e a inclinação dos coletores solares de acordo com a altura solar em cada momento, de forma a maximizar a energia incidente.

No projeto da bancada foram tidos em consideração diversos fatores, tais como a versatilidade, o custo e a facilidade de construção. Tendo em conta as dimensões e a massa dos coletores comerciais mais comuns, projetou-se uma bancada de ensaio com uma estrutura inferior simples construída em tubo facar quadrado de 30 mm, assente sobre rodas e uma bandeja pivotante assente sobre um veio, constituída por um aro em cantoneira de 40 mm e um fundo em chapa perfurada que permite prender facilmente qualquer coletor, independentemente da sua dimensão, ou forma. Nos extremos do eixo onde está assente a bandeja, está previsto um mecanismo de aperto que permite regular com facilidade o ângulo dos coletores solares em ensaio, esta regulação permite simular diferentes ângulos de instalação dos coletores e também permite ajustar a posição dos coletores em ensaio, de forma a seguir o sol à medida que a sua altura solar se vai alterando. O ajuste do azimute é facilmente conseguido através da rotação da bancada, uma vez que esta está assente sobre rodas.

Na figura 4.1 é apresentado o desenho da bancada de ensaios projetada, esta apresenta uma dimensão de bandeja de 1400 x 2400 mm, de forma a permitir ensaiar com facilidade a maioria dos coletores solares disponíveis no mercado.



Figura 5.1 – Bancada de ensaios projetada.

5.2 Sistema de aquisição de dados

Para a realização de ensaios mais rigorosos é indispensável a existência de um sistema de aquisição de dados que permita a leitura e o registo dos principais parâmetros relevantes para a análise do desempenho do coletor solar de uma forma expedita.

Nos ensaios realizados foi feito um registo manual das condições de temperatura ambiente, temperatura do fluido térmico e radiação solar incidente ao longo do tempo. Este tipo de registo apesar de não ser ótimo e poder introduzir alguns erros nos valores das grandezas lidas, é adequado para os primeiros ensaios realizados, uma vez que não é necessária uma grande exatidão pois estávamos mais focados no comportamento do nanofluido e não tanto na eficiência de captação de energia conseguida pelo coletor.

Para a realização de ensaios rigorosos de eficiência dos coletores solares é necessário medir com exatidão as temperaturas do fluido solar, o caudal de fluido e a irradiância solar. A medição rigorosa da temperatura ambiente e das temperaturas do fluido solar não apresenta grandes desafios e poderá ser garantida tanto por um conjunto de termopares conectados a uma placa de aquisição de dados controlada por um computador pessoal (pc) para registo dos dados, ou por uma solução semelhante à que foi possível visualizar no Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG). No sistema de medição utilizado pelo LNEG a leitura dos valores de temperatura era assegurada por um conjunto de termoresistências de platina ligadas a um multímetro multicanal que realizava a leitura de valores que posteriormente eram registados num pc.

A medição de caudal de fluido solar apresenta um desafio maior, por um lado devido à natureza do nanofluido, cuja constituição é baseada num óleo e por outro lado devido à ordem de grandeza dos caudais utilizados. Os caudais nominais usuais têm valores muito reduzidos, normalmente abaixo de $40 \text{ dm}^3/(\text{h.m}^2)$ [11], situação que dificulta a escolha de um caudalímetro que possa realizar uma medição rigorosa na gama de caudais pretendida. No sistema de medição que o LNEG utiliza para a certificação de coletores solares são utilizados caudalímetros do tipo eletromagnético ou do tipo mássico que são aparelhos de elevada exatidão, mas apresentam um custo de aquisição bastante elevado. Na perspetiva de investigação do potencial da utilização de nanofluidos como fluido solar poderá ser utilizado um sistema de medição mais baseado na energia total coletada durante um determinado período e nesse caso poderá ser dispensada a utilização de um caudalímetro de elevada exatidão. Uma forma de medição da energia coletada poderá ser realizada por um sistema semelhante ao apresentado na figura 4.2.

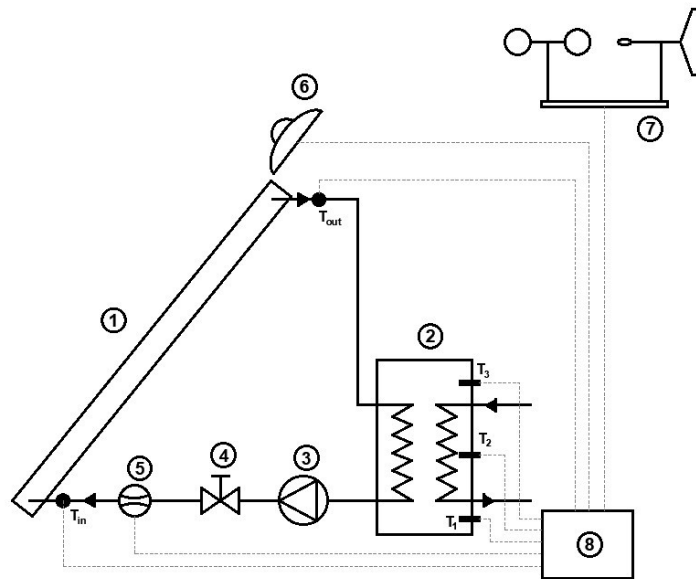


Figura 5.2 – Montagem para medição de energia coletada.

Na montagem apresentada estão assinalados os principais componentes, nomeadamente:

- 1- Coletor solar em ensaio.
- 2- Depósito de inércia com possibilidade de ligação a um equipamento de produção de água fria/quente para possibilitar a simulação de diferentes temperaturas à entrada do coletor solar.
- 3- Bomba circuladora.
- 4- Válvula para ajuste de caudal.
- 5- Caudalímetro.
- 6- Piranómetro para medição da irradiância solar.
- 7- Estação meteorológica para medição das condições de temperatura ambiente e velocidade do vento.
- 8- Sistema de aquisição e registo de dados.

5.3 Materiais especializados

Um dos avanços importantes para aprofundar o estudo do comportamento dos nanofluidos na absorção direta de energia solar será a melhoria dos materiais utilizados na construção dos pré-protótipos. De forma a maximizar os ganhos de radiação, será importante utilizar vidros especiais com tratamentos superficiais que permitam ter uma elevada transmissividade para a radiação solar que apresenta um baixo comprimento de onda ($0,25 < \lambda < 2,5 \mu\text{m}$) e uma boa refletividade para a radiação de elevado comprimento de onda, de forma a captar o máximo de irradiância solar disponível e a perder o mínimo de energia possível por radiação.

Bibliografia

- [1] European Council 2014. <http://www.europarl.europa.eu/factsheets/pt>; Última consulta em 10/2022.
- [2] S. Sathishkumar, T.Balusamy. Performance improvement in solar water heating systems - A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2014; 37:191–198
- [3] P.K.Nagarajan, J.Subramani, S.Suyambazhahan, Ravishankar Sathyamurthy. Nanofluids for solar collector applications: A Review. The 6th International Conference on Applied Energy – ICAE2014
- [4] Robert A Taylor, Patrick E Phelan, Todd P Otonicar, Ronald Adrian, Ravi Prasher. Nanofluid optical property characterization: towards efficient direct absorption solar collectors. Nanoscale Research Letters 2011; 6:225
- [5] Ahmed Kadhim Hussein, Applications of nanotechnology to improve the performance of solar collectors – Recent advances and overview. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2016; 62:767–792.
- [6] Quinbo He, Shequan Zeng, Shuangfeng Wang. Experimental investigation on the efficiency of flat-plate solar collectors with nanofluids – Applied Thermal Engineering 2015; 88:165–171
- [7] Otonicar T,PhelanP,PrasherR,RosengartenG,TaylorR. Nanofluid-based direct absorption solar collector. Renew Sustain Energy 2010; 2:1–13.
- [8] Soteris A. Kalogirou. Solar thermal collectors and applications. Progress in Energy and Combustion Science 2004; 30:231–295
- [9] Saeed Esfandeh, Mohammad Hemmat Esfe , Mohammad Hassan Kamyab. Chapter 11 - Applications of nanofluids in solar energy collectors focusing on solar stills. Advances in Nanofluid Heat Transfer. 2022; 341-373
- [10] Energia Solar Térmica – Manual sobre tecnologias, projeto e instalação – Projeto GREENPRO.
- [11] INETI – Conversão Térmica da Energia Solar.
- [12] Alec Shirazi, Robert A. Taylor, Graham L. Morrison, Stephen D. Whitec. Solar-powered absorption chillers: A comprehensive and critical review. Energy Conversion and Management 2018; 171:59–81
- [13] Siddharth Suman, Mohd. Kaleem Khan, Manabendra Pathak. Performance enhancement of solar collectors - A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2015; 49:192–210
- [14] EUROPEAN STANDART - EN 12975-2 Thermal solar systems and components – Solar collectors - Part 2: Test methods
- [15] Ficha Técnica Coletor Solar PremiumSun FKT-2S <https://www.vulcano.pt>; Última consulta em 11/2024.
- [16] Sika product Data Sheet. <https://industry.sika.com/en/home/transportation/modelling-and-prototyping/modelling/block-materials/boards-for-toolingandfoundryapplications/sikablock-m960.html>; Última consulta em 11/2024.
- [17] Coeficientes de expansão térmica para materiais sólidos comuns. https://www.engineeringtoolbox.com/linear-expansion-coefficients-d_95.html; Última consulta em 11/2024.