



Estudo da transferência de calor de nanofluidos em painéis solares térmicos

UMinho | 2021

Miguel Granja Pinheiro Coelho



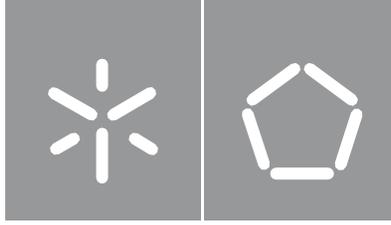
Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Miguel Granja Pinheiro Coelho

**Estudo da transferência de calor de nanofluidos em painéis solares térmicos**

Março de 2021





**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Miguel Granja Pinheiro Coelho

**Estudo da transferência de calor de  
nanofluidos em painéis solares térmicos**

Dissertação de Mestrado  
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica  
Energia e Ambiente

Trabalho efetuado sob a orientação do(s)  
**Professor Doutor Rui Alberto Madeira Macedo de  
Lima**  
**Professor Doutor Manuel Eduardo Cardoso  
Ferreira**

## DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença **abaixo** indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.



**Atribuição-NãoComercial**  
**CC BY-NC**

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Work supported by :



This work results partially of the project NORTE-01-0145-FEDER-030171, NFsCoolingSystem, supported by Programa Operacional Regional do Norte - Norte Portugal Regional Operational Programme (NORTE 2020), under the PORTUGAL 2020 Partnership Agreement, through the European Regional Development Fund (ERDF) and by Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), IP, project reference PTDC/EME-SIS/30171/2017.



## AGRADECIMENTOS

Apesar da individualidade do trabalho, gostaria de deixar uma mensagem de apreço a diversas pessoas que tornaram possível esta caminhada através da sua confiança, conhecimento e ajuda.

Ao Professor Doutor Rui Lima e ao Professor Doutor Eduardo Ferreira, orientadores desta dissertação de mestrado, que agradeço pela disponibilidade, esclarecimento de dúvidas, orientação e transmissão de conhecimentos ao longo deste trabalho.

Ao Doutor Reinaldo Souza e ao Engenheiro Filipe Marques por todo o apoio técnico desenvolvido ao longo do projeto.

À Universidade do Minho e à empresa Vimasol pela disponibilização dos recursos necessários à realização do projeto.

A todos os meus amigos, que sem propósito teórico, demonstraram todo o apoio necessário nesta caminhada.

Aos meus pais e irmã, um especial obrigado, por todo o apoio incondicional na minha jornada académica, onde sempre demonstraram toda a compreensão e apoio, motivando-me a atingir os meus objetivos da melhor forma possível.

## **DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE**

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

## RESUMO

A necessidade de desenvolvimento de novas tecnologias para o aquecimento de fluidos é cada vez maior, sendo nesse campo que se enquadra este trabalho. Assim, o presente trabalho baseia-se no estudo de painéis solares térmicos e na incorporação e desempenho de nanofluidos.

Numa primeira fase, realizaram-se num painel solar térmico dois ensaios experimentais distintos. Inicialmente, realizou-se um teste de aquecimento com água destilada para avaliar a eficiência do sistema em função do caudal e um outro na qual se estudou o aquecimento do fluido circulante com um volume de três litros para diferentes percentagens de propileno glicol. Os resultados demonstraram que o incremento da fração volumétrica de propileno glicol na mistura proporcionou um aumento da temperatura final do volume de fluido aquecido. No entanto, foi também verificado que o sistema tem uma elevada dependência da temperatura ambiente, apresentando-se inconclusivos os ensaios quanto à eficiência, não havendo proporcionalidade entre o caudal e a potência de aquecimento.

Numa segunda fase, começou por realizar-se um estudo da condutividade, na qual se verificou um incremento da condutividade em função do aumento percentual de nanopartículas de alumina no nanofluido. Posteriormente, estudou-se, através de um escoamento num milicanal, a incorporação de nanopartículas de alumina, na fração volumétrica de 0,05%, 0,1% e 0,2%, nos fluidos água e PPGW50 (50% propileno glicol e 50% água), que demonstrou um incremento do coeficiente de transferência de calor por convecção para as percentagens de 0,05% e 0,1% e uma queda para a percentagem de 0,2%. Estes últimos resultados podem ser explicados pela sedimentação das nanopartículas na base do milicanal que proporcionou uma redução da transferência da calor. Por este motivo, foi realizado no final um estudo da sedimentação na qual se verificou que a introdução de propileno glicol leva a uma sedimentação mais rápida.

**PALAVRAS-CHAVE:** Águas Quentes Sanitárias (AQS); Nanofluidos; Nanopartículas; Painel Solar Térmico; Transferência de Calor.

## ABSTRACT

The need to develop new technologies for water heating is increasing, therefore it is in this field that this work takes part, based on the study of solar thermal panels and the incorporation of nanofluids.

Firstly, it was conducted two different types of experiments with a solar thermal panel. For the first experiment, it was studied the heating process of water, to evaluate the efficiency of the system as function of the flow rate, and other where it was studied the heating process of three liters of fluid for different percentages of propylene glycol. The results showed that the introduction of propylene glycol in the mixture of the fluid induces an increase of the final temperature of the volume of the heating fluid. In addition, for the second experiment, the process of heating showed that this system is highly dependent of the room temperature and the results were inconclusive for the efficiency, not having any proportionality between the flow rate and the heating power.

Secondly, it was done an analysis of the thermal conductivity, which showed that there is a proportional increase between the thermal conductivity and the volumetric percentage of alumina nanoparticles (NPs). After that, it was studied the heat transfer of a nanofluid flowing in a milli channel, with NPs of alumina, with different percentages of alumina (0,05%, 0,1% and 0,2%) in the base fluids water and PPGW50 (50% propylene glycol and 50% water). The results have shown that there was an increase in the convective of heat transfer for the percentages of 0,05% and 0,1% and a decrease for the percentage of 0,2%. The main reason of the latter result can be explained by the fact that there was a deposition of alumina NPs in the bottom part of the milli channel. Finally, a sedimentation study was carried out and it was found that the introduction of propylene glycol leads to faster sedimentation.

**KEYWORDS:** Domestic Hot Water (DHW); Heat Transfer; Nanofluids; Nanoparticles; Solar Thermal Panels.

# ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	MOTIVAÇÃO.....	3
1.2	OBJETIVOS.....	3
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	4
2.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	6
2.1	TRANSFERÊNCIA DE CALOR .....	6
2.1.1	CONDUÇÃO .....	6
2.1.2	CONVECÇÃO .....	8
2.1.3	RADIAÇÃO .....	11
2.2	ENERGIA SOLAR.....	12
2.2.1	POTENCIAL DA RADIAÇÃO SOLAR .....	13
2.2.2	DADOS CLIMATOLÓGICOS .....	14
2.3	SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS.....	16
2.3.1	ÁREAS DE UTILIZAÇÃO DOS SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS.....	16
2.3.2	FUNCIONAMENTO DE SISTEMAS AQS .....	16
2.3.2	PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM SISTEMA AQS .....	17
2.4	CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS .....	22
2.4.1	CARACTERIZAÇÃO DE UM SISTEMA SOLAR QUANTO AO TIPO DE CIRCULAÇÃO .....	22
2.4.2	CARACTERIZAÇÃO DE UM SISTEMA SOLAR QUANTO AO TIPO DE COLETOR.....	25
2.5	COLETORES SOLARES PLANOS COM COBERTURA.....	30
2.5.1	COBERTURA DE VIDRO.....	31
2.5.2	PLACA ABSORSORA.....	32

2.5.3	TUBAGEM.....	33
2.5.4	PLACA ISOLANTE.....	34
3.	ESTADO DA ARTE DOS NANOFLUIDOS .....	36
3.1	VANTAGENS .....	39
3.2	APLICAÇÕES.....	40
3.2.1	APLICAÇÕES EM PAINÉIS SOLARES TÉRMICOS.....	43
3.3	MECANISMOS DE GANHO TÉRMICO .....	44
3.3.1	MOVIMENTO BROWNIANO.....	44
3.3.2	AGLOMERAÇÃO DAS PARTÍCULAS .....	45
3.3.3	NATUREZA DE TRANSPORTE DAS NANOPARTÍCULAS .....	46
3.3.4	ESTRATIFICAÇÃO DA INTERFACE LÍQUIDO-SÓLIDO .....	46
3.4	PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM OS MECANISMOS .....	48
3.5	DESAFIOS DOS NANOFLUIDOS.....	54
3.6	PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DOS NANOFLUIDOS.....	56
3.6.1	CONDUTIVIDADE TÉRMICA.....	56
3.6.2	MASSA VOLÚMICA.....	60
3.6.3	CALOR ESPECÍFICO .....	61
3.6.4	VISCOSIDADE .....	61
3.7	PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DE UMA MISTURA.....	62
3.7.1	CONDUTIVIDADE TÉRMICA.....	63
3.7.2	CALOR ESPECÍFICO .....	63
3.7.3	VISCOSIDADE .....	64
4.	ESTUDO DO AQUECIMENTO DO FLUIDO CIRCULANTE NO SISTEMA SOLAR DESENVOLVIDO.....	65
4.1	MATERIAIS E MÉTODOS .....	65

4.1.1	CONSTRUÇÃO DO COLETOR SOLAR .....	66
4.1.2	HOLOFOTE.....	69
4.1.3	BOMBA DE ÁGUA.....	70
4.2	ESTUDO DO AQUECIMENTO DO FLUIDO CIRCULANTE ÁGUA SEM RESERVATÓRIO.....	71
4.3	ESTUDO DO AQUECIMENTO DO FLUIDO CIRCULANTE ÁGUA COM RESERVATÓRIO.....	72
4.4	ESTUDO DO AQUECIMENTO DO FLUIDO CIRCULANTE ÁGUA E PROPILENO GLICOL COM RESERVATÓRIO .....	74
5.	ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR DE NANOFLUIDOS.....	77
5.1	ESTUDO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE NANOFLUIDOS.....	77
5.1.1	MÉTODO DE FONTE PLANA TRANSIENTE (FPT) .....	78
5.2	ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR À MILIESCALA COM NANOFLUIDOS .....	79
5.2.1	MATERIAIS E MÉTODOS .....	79
5.2.2	ANÁLISE TEÓRICA AO COEFICIENTE DE CALOR POR CONVECÇÃO ..	83
5.2.3	ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COEFICIENTE DE CALOR POR CONVECÇÃO.....	88
5.2.4	ANÁLISE TEÓRICA DA QUEDA DE PRESSÃO .....	90
5.3	SEDIMENTAÇÃO DOS NANOFLUIDOS .....	92
5.3.1	CARACTERIZAÇÃO E PREPARAÇÃO DOS NANOFLUIDOS.....	93
6.	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	95
6.1	ESTUDO DO AQUECIMENTO DO FLUIDO CIRCULANTE NO SISTEMA SOLAR DESENVOLVIDO.....	95
6.1.1	ESTUDO DO AQUECIMENTO DO FLUIDO CIRCULANTE ÁGUA SEM RESERVATÓRIO.....	95

6.1.2 ESTUDO DO AQUECIMENTO DO FLUIDO CIRCULANTE ÁGUA COM RESERVATÓRIO .....	97
6.1.3 ESTUDO DO AQUECIMENTO DO FLUIDO CIRCULANTE ÁGUA E GLICOL COM RESERVATÓRIO.....	98
6.2 ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR COM NANOFLUIDOS .....	102
6.2.1 ESTUDO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DOS NANOFLUIDOS .....	102
6.2.2 ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR À MILIESCALA COM NANOFLUIDOS .....	103
6.2.3 ESTUDO DA SEDIMENTAÇÃO DOS NANOFLUIDOS.....	112
7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....	116
7.1 CONCLUSÕES.....	116
7.2 TRABALHOS FUTUROS .....	119
BIBLIOGRAFIA .....	120
ANEXO I – TRANSFERÊNCIA DE CALOR À MILIESCALA COM NANOFLUIDOS (EXPERIMENTAL) .....	127
ANEXO II – TRANSFERÊNCIA DE CALOR À MILIESCALA COM NANOFLUIDOS (TEÓRICO).....	129
ANEXO III – DESENHOS TÉCNICOS.....	132

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema da transferência de calor num corpo com duas faces a diferentes temperaturas [3] .....	7
Figura 2.2 - Condutividade térmica de diferentes estados da matéria e alguns materiais [3].....	8
Figura 2.3 - Esquema das correntes de convecção durante o aquecimento de água numa chaleira [3] .....	8
Figura 2.4 - Esquema dos diferentes tipos de convecção (forçada e natural) [3]...	9
Figura 2.5 - Transferência de calor de uma superfície quente para um fluxo de ar [3] .....	10
Figura 2.6 - Espectro da radiação solar que chega à superfície da Terra (ao nível do mar) [4].....	12
Figura 2.7 - Balanço energético da radiação solar incidente na Terra [5].....	13
Figura 2.8 - Radiação solar horizontal anual <b>(a)</b> na Europa <b>(b)</b> na Península Ibérica (kWh/m <sup>2</sup> ) [5] .....	15
Figura 2.9 - Mapa de Portugal da <b>(a)</b> radiação solar anual <b>(b)</b> insolação solar anual [5] .....	15
Figura 2.10 - Esquema de aquecimento de águas sanitárias com recurso a painéis solares térmicos [67].....	18
Figura 2.11 - Esquema de um sistema solar térmico com circulação natural (termossifão) [6].....	23
Figura 2.12 - Esquema de um sistema solar térmico com circulação forçada [6]	24
Figura 2.13 - Coletor plano sem cobertura <b>(a)</b> esquema <b>(b)</b> exemplo [8] .....	26
Figura 2.14 - Coletor solar plano <b>(a)</b> esquema <b>(b)</b> exemplo [10] .....	27
Figura 2.15 - Coletor parabólico composto <b>(a)</b> exemplo <b>(b)</b> esquema [8].....	28
Figura 2.16 - Coletor de tubos de vácuo <b>(a)</b> esquema <b>(b)</b> exemplo [11] .....	29
Figura 2.17 - Componentes básicos de um coletor solar plano com cobertura [12] .....	30
Figura 2.18 - Tubagem com configuração em paralelo [14].....	34

Figura 2.19 - Tubagem com configuração em serpentina [14].....	34
Figura 3.1 - Número de publicações com a palavra "nanofluido(s)" como tópico, de 2000 até 2017 [17] .....	36
Figura 3.2 - Tipo de nanopartículas e percentagem de utilização em trabalhos de investigação [18] .....	37
Figura 3.3 - Percentagem de utilização de diferentes fluidos bases em trabalhos de investigação [18] .....	38
Figura 3.4 - Variação da condutividade térmica em função da temperatura e fração volumétrica utilizando um nanorefrigerante ( $Al_2O_3/R-141b$ ) [21] .....	41
Figura 3.5 - Variação da condutividade térmica do nanofluido água- $TiO_2$ em função da fração volumétrica de nanopartículas [22] .....	42
Figura 3.6 - Esquema do valor multifuncional das nanopartículas combinando no mesmo nanosistema diagnóstico e terapia [68] .....	42
Figura 3.7 - Imagens microscópicas de um nanofluido contendo nanotubos de carbono (CNT): (a) amostra congelada $-70^{\circ}C$ ; (b) amostra a temperatura ambiente; (c) amostra a $100^{\circ}C$ [33] .....	45
Figura 3.8 - Aumento da condutividade térmica efetiva de acordo com a interface líquido/sólido gerada pela presença de uma nanopartícula [34] .....	47
Figura 3.9 - Variação da condutividade térmica em função do tamanho das nanopartículas para diferentes valores de concentração [35] .....	48
Figura 3.10 - Variação da condutividade térmica em função do temperatura do nanofluido para diferentes valores de concentração [35].....	49
Figura 3.11 - Efeito da agregação de nanopartículas na condutividade térmica [39] .....	50
Figura 3.12 - Efeito do tempo de agitação acústica num nanofluido de EG e nanopartículas de CuO em que: a) Sem agitação; b) 30min; c)60min [35] .....	53
Figura 3.13 - Amostras de nanofluidos de $Al_2O_3$ , sem qualquer tipo de estabilizador [39].....	55
Figura 3.14 - Comportamento dos diferentes modelos de previsão da condutividade de um nanofluido em função da fração volúmica [50] .....	60

Figura 4.1 - Sistema solar térmico utilizado (1 - Painel solar térmico; 2 - Holofote; 3 – Bomba de água).....	65
Figura 4.2 - Coletor solar Schuco utilizado no projeto .....	66
Figura 4.3 - Coletor solar Schuco com o topo superior aberto .....	66
Figura 4.4 - Serpentina 1 (a) esboço (b) real .....	67
Figura 4.5 - Serpentina 2 (a) esboço (b) real .....	67
Figura 4.6 - Ligação feita para unir a chapa absorvedora à chapa traseira .....	68
Figura 4.7 - Montagem do coletor solar Schuco .....	68
Figura 4.8 - Coletor solar por camadas .....	69
Figura 4.9 - Placa de lã de rocha utilizada .....	69
Figura 4.10 - Bomba JECOD DCP 1200 .....	70
Figura 4.11 - Valores medidos para o caudal da bomba (a) e respetivo gráfico de calibração (b) .....	71
Figura 4.12 - Esquema do sistema solar 1 .....	72
Figura 4.13 - Esquema do sistema solar 2 .....	73
Figura 5.1 - Esquema da instalação para medição de condutividade térmica por método Fonte Plana Transiente [59] .....	78
Figura 5.2 - Esquema da instalação utilizada para realizar os ensaios experimentais .....	79
Figura 5.3 - Instalação utilizada para realizar os ensaios experimentais .....	80
Figura 5.4 - Gráfico de calibração da bomba peristáltica.....	83
Figura 5.5 - Número de Nusselt para escoamentos laminares desenvolvidos [60] .....	85
Figura 5.6 - Comparação do número de Nusselt em função do caudal para dois métodos diferentes .....	86
Figura 5.7 - Posicionamento dos termopares no tubo .....	88
Figura 5.8 - Aspeto do tubo de escoamento do sistema micro após vários ensaios com nanofluidos .....	92
Figura 5.9 - Banho de ultrassons utilizado na preparação dos nanofluidos .....	94

Figura 6.1 - Diferença de temperatura entre a entrada e saída do sistema solar ao longo do tempo para diferentes caudais .....	96
Figura 6.2 - Energia transferida para o fluido circulante ao longo do tempo para diferentes caudais .....	97
Figura 6.3 - Temperatura de saída da água do sistema solar ao longo do tempo para diferentes caudais .....	98
Figura 6.4 - Temperatura de saída do fluido circulante com diferentes percentagens de PPG ao longo do tempo (caudal de 1,10 L/min).....	99
Figura 6.5 - Taxa de aquecimento do fluido circulante para diferentes percentagens de PPG ao longo do tempo (caudal de 1,10 L/min).....	100
Figura 6.6 - Condutividade térmica em função da fração volumétrica de AL2O3 .....	103
Figura 6.7 - Coeficiente de convecção em função do caudal da bomba.....	104
Figura 6.8 - Coeficiente de transferência de calor por convecção em função da fração volumétrica de PPG para diferentes caudais a) 5 mL/min, b) 10 mL/min e c) 15 mL/min .....	105
Figura 6.9 - Quantidade de energia transferida para o fluido em função da fração volumétrica de PPG para diferentes caudais .....	106
Figura 6.10 - Valor da queda de pressão em função do caudal da bomba para os diferentes fluidos circulantes .....	107
Figura 6.11 - Número de Reynolds em função do caudal da bomba para os diferentes fluidos circulantes .....	108
Figura 6.12 - Número de Reynolds em função da fração volumétrica de PPG para diferentes caudais .....	109
Figura 6.13 - Coeficiente de convecção em função do caudal da bomba.....	110
Figura 6.14 - Coeficiente de convecção em função do caudal da bomba.....	110
Figura 6.15 - Sedimentação das partículas de alumina na ligação do tubo .....	111
Figura 6.16 - Número de Nusselt em função do caudal da bomba.....	111
Figura 6.17 - Número de Nusselt em função do caudal da bomba.....	112

Figura 6.18 - Ensaio de sedimentação com os nanofluidos utilizados no escoamento com milicanal ..... 113

Figura 6.19 - Ensaio de sedimentação em função da introdução de propileno glicol na mistura ..... 114

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Vantagens e desvantagens dos sistemas solares quanto ao tipo de circulação.....	25
Tabela 2.2 - Vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de coletores solares .....	29
Tabela 2.3 - Índice de transmissão dos diferentes materiais utilizados para a cobertura de um coletor solar plano [13].....	31
Tabela 2.4 - Condutividade térmica dos diferentes metais utilizados na placa absorvora [13].....	32
Tabela 2.5 - Absorbância de diferentes cores utilizadas [13].....	33
Tabela 2.6 - Materiais isolantes e respectivas condutividades térmicas [16] .....	35
Tabela 3.1 - Levantamento bibliográfico de aplicações de nanofluidos em painéis solares térmicos .....	43
Tabela 3.2 - Levantamento bibliográfico de investigações realizadas com nanofluidos de alumina.....	52
Tabela 4.1 - Variação da temperatura de solidificação para diferentes concentrações de Therfluid 100Y.....	74
Tabela 4.2 - Variação do calor específico em função da concentração de propileno glicol na mistura.....	76
Tabela 5.1 - Dimensões do tubo utilizados nos ensaios experimentais .....	80
Tabela 5.2 - Fluidos utilizados e suas propriedades termofísicas .....	81
Tabela 5.3 - Tipo de regime de escoamento em função do número de Reynolds [60] .....	84
Tabela 5.4 - Coeficiente de convecção teórico para os diferentes fluidos circulantes .....	87
Tabela 5.5 - Propriedades das nanopartículas de óxido de alumínio [58] .....	93
Tabela 6.1 - Temperatura ambiente de cada ensaio em função da percentagem de PPG.....	99

Tabela 6.2 - Aumento da condutividade térmica em função da fração volumétrica de  $Al_2O_3$ .....102

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

<b>Símbolos romanos</b>	<b>Definição</b>	<b>Unidade</b>
h	Coeficiente de transferência de calor por convecção	W/(m <sup>2</sup> K)
k	Condutividade térmica	W/(m.K)
$\dot{m}$	Caudal mássico	kg/s
m	Massa	kg
n	Fator de forma	
q''	Energia transferida por unidade de área	W/m <sup>2</sup>
r	Raio	m
w	Fator de esfericidade	
x	Posição longitudinal	m
A	Área	m <sup>2</sup>
A <sub>s</sub>	Área superficial	m <sup>2</sup>
C <sub>p</sub>	Calor específico	J/(kg.K)
D	Diâmetro	m
DB	Difusão Browniana	m/s
L	Comprimento	m
Nu	Número adimensional de Nusselt	
P	Perímetro	m

Pr	Número adimensional de Prandtl	
Q	Energia calorífica	J
$\dot{Q}$	Calor (por unidade de tempo)	W
Re	Número adimensional de Reynolds	
T	Temperatura	°C ou K
U	Velocidade de escoamento	m/s
V	Volume	m <sup>3</sup>

<b>Símbolos gregos</b>	<b>Definição</b>	<b>Unidade</b>
$\alpha$	Absorbância	
$\Delta P$	Queda de pressão	Pa
$\Delta T$	Diferença de temperatura	K
$\Delta x$	Espessura	m
$\mu$	Viscosidade	Pa.s
$\rho$	Massa volúmica	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann	W/(m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )
$\tau$	Índice de transmissão	
$\phi$	Concentração de nanopartículas	%

## Abreviaturas e acrónimos

AQS	Águas quentes sanitárias
CPC	Coletor parabólico composto
EG	Etileno Glicol
FPT	Fonte plana transiente
PPG	Propileno glicol
PPG25W75	Fluido composto por 25% propileno glicol e 75% água
PPG75W25	Fluido composto por 75% propileno glicol e 25% água
PPGW50	Fluido composto por 50% propileno glicol e 50% água
TEA	Trietanolamina
UV	Ultravioleta
WMO	World Metereological Organization

# 1. INTRODUÇÃO

Desde há vários anos que se verifica um aumento na procura mundial de energia, tornando-se cada vez mais imprescindível o desenvolvimento de formas de produção energética mais sustentáveis através de soluções que permitam conciliar a redução dos consumos energéticos com a miniaturização dos equipamentos, aumentando a eficiência dos sistemas de transferência de calor atuais [1].

Desta forma, um dos grandes pesos do consumo energético numa habitação, cerca de 45% segundo um inquérito realizado ao consumo de energia no sector doméstico em Portugal [2], é o aquecimento de águas e o aquecimento do ambiente. É, portanto, de extremo empenho que se conceba um sistema energético futuro que tenha em conta as soluções renováveis, acelerando assim a mudança dos combustíveis fósseis no sector de aquecimento para tecnologias renováveis.

Como já conhecido atualmente, os painéis solares térmicos desempenham um papel muito importante neste campo, sendo utilizados para o aquecimento de água quentes sanitárias em habitações. A evolução do desempenho destes componentes tem como um dos seus pilares o desenvolvimento de novos fluidos de trabalho, visto que os fluidos convencionais carecem de condutividades térmicas elevadas, proporcionando transferências de calor não tão eficientes quanto se desejaria. Assim, em vista a aumentar a condutividade térmica dos fluidos convencionais surgiu a ideia de dispersar partículas no fluido base utilizado correntemente. Após várias tentativas com partículas à escala milimétrica e micrométrico verificou-se que esta tecnologia só seria viável à escala nanométrica, derivado da elevada sedimentação e aglomeração, surgindo então os nanofluidos. Este termo, nanofluido, foi empregue pela primeira vez por Choi (1995) para definir suspensões coloidais de alta condutividade térmica contendo partículas de

dimensões nanométricas. O desenvolvimento destes novos fluidos ainda se encontra numa fase embrionária, existindo alguns entraves face à sua utilização, destacando-se a estabilidade das nanopartículas a longo prazo, que tendem em formar aglomerados que por sua vez se depositam, promovendo a erosão e o entupimento dos canais onde circulam.

Todavia, a inclusão de nanopartículas num fluido base, como é expectável, não leva a alteração apenas da condutividade térmica, existindo outras alterações nas propriedades termofísicas que induzem alterações no processo de transferência de calor, como são exemplo o calor específico e a viscosidade. No presente relatório será realizada uma análise crítica ao processo de transferência de calor de vários nanofluidos com diferentes fluidos bases e, além disso, irá apresentar-se uma análise de um sistema solar através da avaliação da sua potência de aquecimento com diferentes caudais e diferentes fluidos circulantes.

## **1.1 MOTIVAÇÃO**

A possibilidade de estudar uma tecnologia que se encontra num estado tão embrionário e com tantas vantagens é bastante aliciante. A busca pela transição energética recorre à área das energias renováveis, em particular à energia solar, encontrando soluções que possam trazer contributos significativos para a sociedade é também muito motivador. Assim, o compromisso de conjugar os conhecimentos adquiridos ao longo do curso, incidente principalmente nas áreas de transferência de calor e mecânica de fluidos, em conjunto com a possibilidade de aprofundar o estudo de uma das áreas mais vastas das energias renováveis levou-me a escolher este tema.

Atualmente, são diversos os temas relacionados com o desenvolvimento sustentável da sociedade, aquecimento global e poluição do meio ambiente, e como engenheiros, torna-se imprescindível o nosso contributo nessas mesmas questões. A procura de soluções mais sustentáveis, económicas e amigas do ambiente serão cada vez mais exigidas durante o nosso percurso como engenheiros. Desta forma, o projeto procura cruzar-se com essas novas necessidades.

## **1.2 OBJETIVOS**

O projeto tem como objetivo principal o estudo da transferência de calor de nanofluidos em painéis solares térmicos. Pretendendo-se avaliar em particular os seguintes objetivos:

- Desenvolver um sistema solar térmico;
- Avaliar a potência de aquecimento do sistema solar térmico;
- Avaliar o aquecimento de diferentes fluidos circulantes no sistema solar térmico;

- Estudar a variação de condutividade de térmica em função da introdução de nanopartículas;
- Estudar a transferência de calor de um escoamento com diferentes nanofluidos num milicanal;
- Estudar a sedimentação dos nanofluidos.

### **1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

O presente relatório encontra-se dividido em sete capítulos, cada um deles constituídos por diversos subcapítulos, que exploram de forma mais incisiva o tema do respetivo capítulo.

O capítulo 1 introduz o tema da dissertação, realizando um enquadramento da mesma.

No capítulo 2 apresentam-se os fundamentos teóricos que baseiam este relatório. Iniciando-se por uma breve análise dos mecanismos de transferência de calor, seguindo-se um estudo da energia solar e respetiva radiação solar e por final uma apreciação dos sistemas solares.

No capítulo 3 realiza-se um levantamento bibliográfico dos nanofluidos, debruçando-se sobre as vantagens desta tecnologia, as suas aplicações, os mecanismos de ganho térmico, os seus desafios e também são apresentados os modelos capazes de descrever as propriedades termofísicas.

O capítulo 4 apresenta um estudo do aquecimento de diferentes fluidos circulantes realizado num sistema solar térmico desenvolvido a partir de um modelo de exposição.

O capítulo 5 introduz o estudo da transferência de calor com nanofluidos subdividindo-se em três grandes grupos: o primeiro apresenta o estudo da condutividade térmica dos nanofluidos, o segundo apresenta o estudo da

transferência de calor através de um escoamento num milicanal e o terceiro demonstra uma análise da sedimentação dos diferentes nanofluidos.

O capítulo 6 compila a avaliação e discussão dos resultados obtidos em relação ao capítulo 4 e 5.

Por final, o capítulo 7 reúne as conclusões do trabalho e expõe algumas propostas para trabalhos futuros.

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

No presente capítulo serão apresentados os fundamentos teóricos de transferência de calor, servindo de base a toda a explicação realizada posteriormente no relatório, e fundamentos básicos da energia solar, bem como de sistemas solares térmicos.

### 2.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

O calor é uma forma de energia que pode ser transferido de um corpo para o outro quando há diferença de temperatura entre eles. A transferência de calor tenta prever a transferência de energia entre dois pontos (ou dois corpos) resultante de uma diferença de temperatura, sendo que esta pode ocorrer de três formas: condução, convecção e radiação.

#### 2.1.1 CONDUÇÃO

O processo de transferência de calor por condução é um processo na qual o calor flui de uma região com maior temperatura para outra de temperatura inferior, dentro de um meio sólido, líquido, gasoso ou entre meios em contacto físico direto. Por outras palavras, o processo de condução ocorre quando dois corpos estão “encostados” um ao outro no qual não existe movimento global da matéria na escala macroscópica.

Na figura 2.1 pode-se observar um corpo com duas faces a diferentes temperaturas, em que  $T_1$  é superior a  $T_2$  e assim o calor fluirá da face esquerda para a face direita até que o equilíbrio seja atingido.

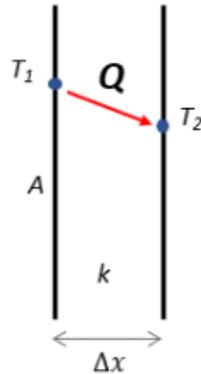


Figura 2.1 - Esquema da transferência de calor num corpo com duas faces a diferentes temperaturas [3]

A taxa de transferência de calor é dada pela Lei de Fourier, apresentada pela equação 1 no caso da condução de calor unidimensional.

$$Q = kA \frac{(T_1 - T_2)}{\Delta x}, \quad \text{em que } T_1 > T_2 \quad (1)$$

Assim pode-se verificar que a taxa de transferência de calor,  $Q$ , é linearmente dependente da área da face do corpo,  $A$ , da condutividade térmica,  $k$ , respetiva para cada material e da diferença de temperatura entre os pontos ( $T_1 - T_2$ ) e inversamente proporcional a espessura do corpo onde ocorre a transferência de calor,  $\Delta x$ .

Como a condutividade térmica é uma propriedade exclusiva do material, é possível de concluir que o material em que ocorre o processo de transferência de calor é de extrema importância face à proporcionalidade direta com a taxa a que o processo ocorre.

Na figura 2.2 é possível observar a ordem de grandeza da condutividade térmica de alguns materiais, para o caso verifica-se a baixa condutividade dos gases e líquidos quando comparados com os sólidos. Além disso, constata-se a boa condutividade térmica dos metais e das respetivas ligas.

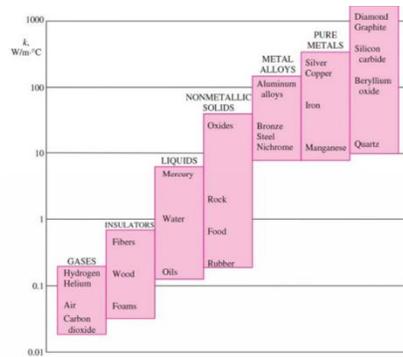


Figura 2.2 - Condutividade térmica de diferentes estados da matéria e alguns materiais [3]

## 2.1.2 CONVECÇÃO

O processo de transferência de calor por convecção é uma das formas de propagação do calor que ocorre nos líquidos e gases. Difere da condução pelo facto da propagação do calor se dar através do movimento do fluido envolvendo transporte de matéria. Tal acontece porque as moléculas do fluido ao serem aquecidas movem-se mais rapidamente, ocupando maior volume e por consequência diminuindo a sua massa volúmica.

Por natureza, a massa de fluido menos densa ascende e a mais densa, e mais fria, desce e aproxima-se da fonte de calor, de seguida esta passará a ser aquecida enquanto a mais quente arrefecerá devido à distância da fonte de calor. Este processo repete-se inúmeras vezes enquanto o aquecimento ocorre, originando correntes de convecção como representado na figura 2.3.

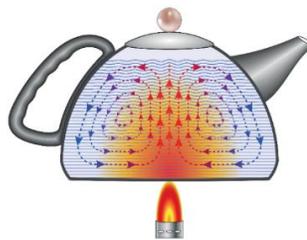


Figura 2.3 - Esquema das correntes de convecção durante o aquecimento de água numa chaleira [3]

De notar que quando o fluido não tem espaço para criar correntes de convecção considera-se que se comporta como um sólido, estudando-se a transferência de calor sob a forma de condução, como é exemplo do ar no espaçamento das janelas de vidro duplo.

Existem dois tipos de convecção: natural e forçada. A convecção forçada é o resultado da indução do escoamento do fluido sob uma superfície por ação humana através de uma bomba ou um ventilador. A convecção natural ocorre por ação da gravidade, em que a diferença de temperatura origina uma diferença de massa volúmica e por consequência criam-se correntes convectivas como apresentado anteriormente. Na figura 2.4 pode-se observar os dois tipos de convecção em questão.

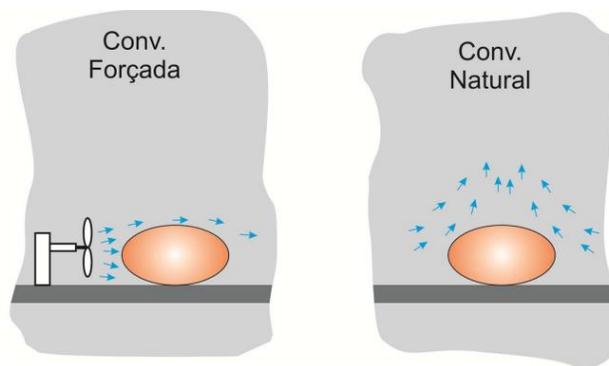


Figura 2.4 - Esquema dos diferentes tipos de convecção (forçada e natural) [3]

Em muitos dos casos, a transferência de energia por convecção ocorre entre uma superfície quente e um fluido adjacente, onde se cria um escoamento do fluido que é o principal responsável pelo aumento da transferência de calor existente, uma vez que quanto maior a velocidade do fluido em questão maior será a taxa de transferência de calor.

Apresenta-se na figura 2.5 uma representação esquemática do anteriormente descrito, em que se pode observar a formação de camadas limite no fluido pelo escoamento da superfície.

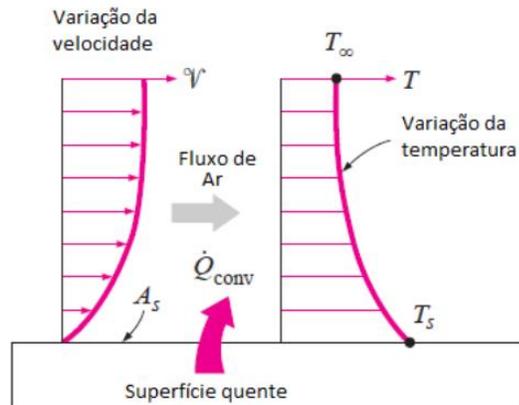


Figura 2.5 - Transferência de calor de uma superfície quente para um fluxo de ar [3]

É de notar a caracterização de um escoamento completamente desenvolvido hidrodinâmica e termicamente, em que os respectivos perfis de velocidade e temperatura deixam de sofrer variação, em que a evolução gradual dos perfis, inicialmente homogêneos, se deve à ação de forças viscosas no caso da hidrodinâmica e pela convecção no caso da temperatura.

A transferência de calor por convecção obedece à lei de Newton, apresentada de seguida (Equação 2).

$$Q = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

Para o caso, a taxa de transferência de calor,  $Q$ , é linearmente proporcional à área em que ocorre a transferência de calor,  $A_s$ , à diferença de temperatura entre a superfície e a temperatura ambiente ( $T_s - T_\infty$ ) e ao coeficiente de convecção,  $h$ , que ao contrário da condutividade térmica que apenas depende do material, neste caso o coeficiente de convecção depende também do escoamento do fluido, como é exemplo a velocidade de escoamento, as propriedades do fluido e a geometria da superfície.

### 2.1.3 RADIAÇÃO

Toda a matéria com temperatura superior a 0 K emite radiação térmica sob a forma de ondas eletromagnéticas, como resultado de mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas. Esta radiação térmica tem um comprimento de onda mais vasto que o da luz visível e por oposição aos dois mecanismos mencionados (condução e convecção), a radiação não necessita de meio para se propagar.

Esta radiação quando atinge um corpo parte dela é absorvida, parte dela é refletida e, caso o corpo seja semitransparente, parte da radiação é transmitida pelo corpo. A cada um destes efeitos associa-se uma grandeza: a absorvidade; a refletividade; e a transmissividade, respetivamente.

Na maioria dos problemas, a transferência de calor é realizada entre dois corpos com temperaturas de superfícies distintas, uniformes ao longo do tempo. Assim sendo, é através da Lei de Stefan-Boltzman, descrita na Equação 3, que é possível determinar o balanço da radiação trocada entre ambas as superfícies.

$$Q = \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_{ss}^4) \quad (3)$$

Para o caso, existe um corpo pequeno de superfície de temperatura  $T_s$  com emissividade  $\varepsilon$  e área  $A$ , e outro corpo com uma superfície muito maior, de temperatura  $T_{ss}$ . Notando, que neste contexto a emissividade é a mesma para ambos, sendo que este fator varia entre 0 (corpo totalmente refletor) e 1 (corpo negro), e  $\sigma$  representa a constante de Stefan-Boltzman ( $5,67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$ ).

## 2.2 ENERGIA SOLAR

O Sol, estrela central do Sistema Solar, é a nossa principal fonte de energia, sendo responsável pela manutenção das várias formas de vida existentes na Terra. No centro desta estrela, numa região denominada de fotosfera solar (camada com aproximadamente 300 km de espessura e temperatura superficial da ordem dos 5800 K), a energia resultante das reações de fusão dos núcleos dos átomos de hidrogénio, originando núcleos de hélio, é radiada para o espaço sobre a forma de energia eletromagnética, a uma velocidade próxima dos 300 000 km/s.

Dados recentes da WMO (World Meteorological Organization) indicam que a radiação solar incidente sobre uma superfície perpendicular ao eixo Terra-Sol, situada nas camadas superiores da atmosfera, é e aproximadamente 1367 W/m<sup>2</sup>. Este valor médio é utilizado como referência, sendo designado por constante solar. Contudo, após atravessar a atmosfera, num dia de céu relativamente limpo, a radiação solar incidente perpendicular à direção dos raios solares que atinge a superfície terrestre é cerca de 30% inferior à apresentada anteriormente, registada no topo da atmosfera terrestre, rondando os 1000 W/m<sup>2</sup>.

A figura 2.6 apresenta as diferenças na radiação solar incidente descritas anteriormente em função do comprimento de onda. De notar que, a distribuição espectral da radiação é constituída por radiação na gama dos raios ultravioletas (5 %), da luz visível (42 %) e dos raios infravermelhos (53 %).

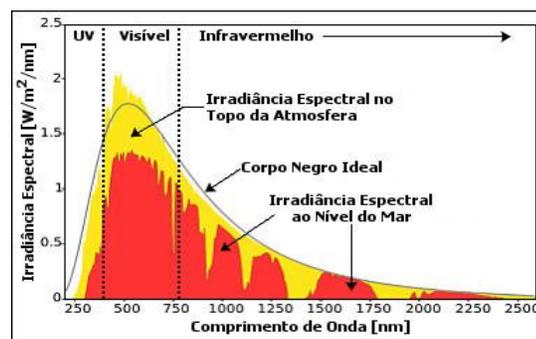


Figura 2.6 - Espectro da radiação solar que chega à superfície da Terra (ao nível do mar) [4]

O decréscimo existente entre a radiação no topo da atmosfera e no solo terrestre é consequente da absorção e reflexão devido às nuvens e à atmosfera. Discrimina-se na figura 2.7 o balanço energético da radiação solar incidente na Terra.

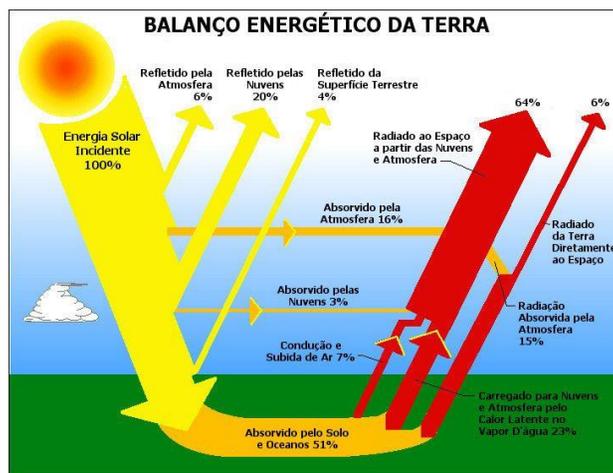


Figura 2.7 - Balanço energético da radiação solar incidente na Terra [5]

A radiação recebida em cada ponto do planeta não é constante, já que depende de diversos fatores, nomeadamente da época do ano, da latitude geográfica, das condições atmosféricas e da altitude. Devido à inclinação do eixo da Terra, os dias de Verão são maiores que os dias de Inverno e as altitudes solares que o Sol atinge são mais elevadas nos meses de Verão que no Inverno. A variação da radiação é da ordem dos 5 %, sendo cerca de 3,3 % devido à variação da distância Terra - Sol e de 1,5 % devido à própria atividade solar.

### 2.2.1 POTENCIAL DA RADIAÇÃO SOLAR

O Sol fornece anualmente, para a atmosfera terrestre, uma quantidade de energia correspondente a cerca de 10 000 vezes o consumo mundial de energia verificado nesse mesmo período.

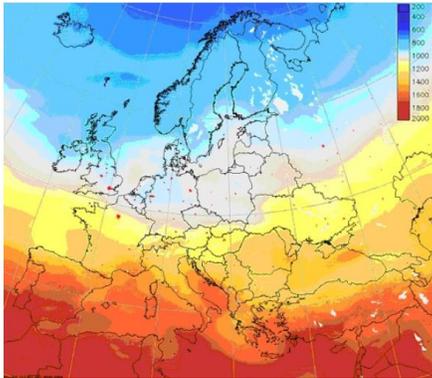
No entanto, esta fonte é considerada demasiado dispersa, com as vantagens e os inconvenientes daí decorrentes. Entre os inconvenientes refira-se, sem dúvida, a necessidade da existência de grandes superfícies de captação para o seu aproveitamento. Como grandes vantagens residem o facto de se tratar de uma fonte de energia repartida equitativamente e considerada inesgotável.

Em Portugal, o potencial disponível é bastante considerável, sendo um dos países da Europa com melhores condições para o aproveitamento deste recurso, dispondo de uma média anual de horas de Sol variável entre 2.200 e 3.000 horas, no Continente, e de 1.700 e 2.200 horas, respetivamente, para os arquipélagos dos Açores e da Madeira. Na Alemanha, por exemplo, este indicador varia entre 1.200 e 1.700 horas.

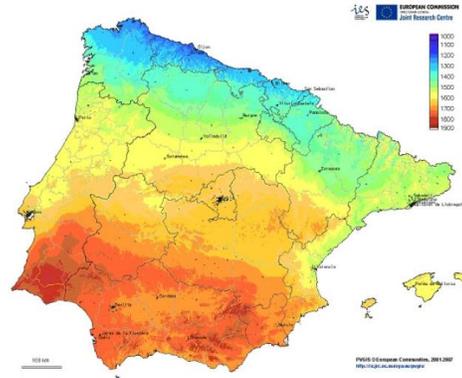
Ao contrário do que é comum pensar-se, a variação da radiação solar útil entre o Sul e o Norte de Portugal (considerada no aproveitamento para aquecimento de águas) não é significativa, cifrando-se em aproximadamente 18 % entre o Porto e Faro. O aproveitamento da radiação solar nos sistemas solares térmicos é, portanto, válido tanto a Norte como a Sul de Portugal.

### **2.2.2 DADOS CLIMATOLÓGICOS**

As figuras 2.8 (a) e (b) mostra-se o potencial da radiação solar em Portugal em comparação com os restantes países europeus. Como é constatável, a radiação solar na península ibérica é superior aos restantes países da Europa, notando-se a diminuição à medida que se caminha para Norte.



(a)



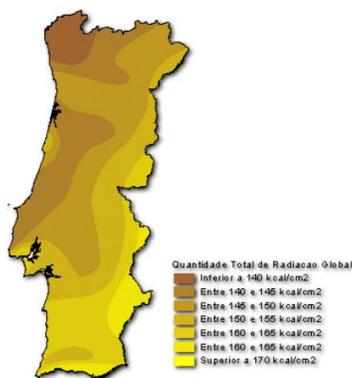
(b)

Figura 2.8 - Radiação solar horizontal anual (a) na Europa (b) na Península Ibérica (kWh/m<sup>2</sup>) [5]

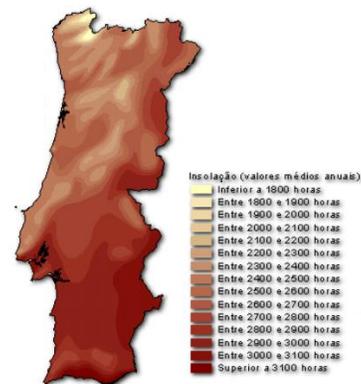
O valor do somatório da média anual da radiação solar encontra-se entre aproximadamente 1400 kWh/m<sup>2</sup> em Vila Real (Norte) e 1700 kWh/m<sup>2</sup> de Faro (Sul), com um incremento de 18 % de Norte para Sul, como se observa na figura abaixo (figura 2.9).

No entanto, a variação da radiação solar útil entre o Sul e o Norte de Portugal, aproveitada por um sistema solar para aquecimento de água, não é, como anteriormente referido, significativa.

Para além da radiação solar global, o número de horas de luz, insolação, é também frequentemente utilizado para o dimensionamento de sistemas solares. Em Portugal, estes valores variam entre 1.800 e 3.100 horas por ano.



(a)



(b)

Figura 2.9 - Mapa de Portugal da (a) radiação solar anual (b) insolação solar anual [5]

## **2.3 SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS**

Os sistemas solares térmicos captam energia solar e transformam-na em energia térmica (calor). Sendo que, diferem de sistemas fotovoltaicos responsáveis por transformar energia solar em energia elétrica.

### **2.3.1 ÁREAS DE UTILIZAÇÃO DOS SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS**

A energia solar é utilizada para aquecimento, iluminação de edifícios e produção de eletricidade. Contudo, esta energia voltada para os sistemas solares térmicos é utilizada, em síntese, para:

- produção de água quente sanitária (AQS);
- aquecimento de piscinas;
- aquecimento e arrefecimento de edifícios;
- produção de vapor a elevadas temperaturas para uso industrial;
- secagem e confeção de alimentos.

### **2.3.2 FUNCIONAMENTO DE SISTEMAS AQS**

Visto que a utilização de instalações solares térmicas é principalmente direcionada para produção de água quente sanitária (AQS), em particular através da utilização de coletores solares, apresenta-se de seguida o funcionamento base de um sistema AQS.

Atualmente, um sistema AQS com recurso a painéis solares térmicos é constituído por dois circuitos: o circuito primário, responsável por recolher a energia solar e transferi-la para um tanque onde é armazenada; e o circuito secundário que transfere o calor absorvido no tanque pelo circuito primário para

um sistema de abastecimento de água quente sanitária onde será mais tarde consumida.

Raramente, os circuitos primários e secundários são constituídos pela mesma água, conhecida como configuração de sistema direto, neste caso a água circulante no coletor solar é a mesma que no tanque e no abastecimento de água para consumo. Posto isto, na maior parte dos sistemas solares, os circuitos primário e secundário utilizam diferentes fluidos, transferindo o calor de um líquido para o outro através de um permutador de calor, denominando-se este arranjo de sistema indireto. Este sistema é o mais usual pois o fluido térmico procedente dos coletores solares não deve ser utilizado como água quente sanitária de consumo por conter, normalmente, agentes de proteção dos tubos internos e externos aos painéis e anticongelante para evitar o congelamento no Inverno.

Como a radiação solar varia com as estações do ano e ao longo do dia, é necessário um sistema de aquecimento de apoio que garante as necessidades de consumo que podem não ser atingidas totalmente pela instalação solar térmica. Estes sistemas de apoio podem ser caldeiras ou resistências térmicas instaladas no próprio tanque de armazenamento de água. A maior parte destes sistemas são controlados a partir de um termóstato onde pode ser ajustado um limite de temperatura mínimo, havendo ainda a possibilidade de ser desligado se o sistema solar estiver a produzir calor suficiente para suprir as necessidades.

### **2.3.2 PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM SISTEMA AQS**

Os componentes integrantes dos sistemas AQS com recurso a painéis solares térmicos, apresentado na figura 2.10, podem ser divididos em nove grupos:

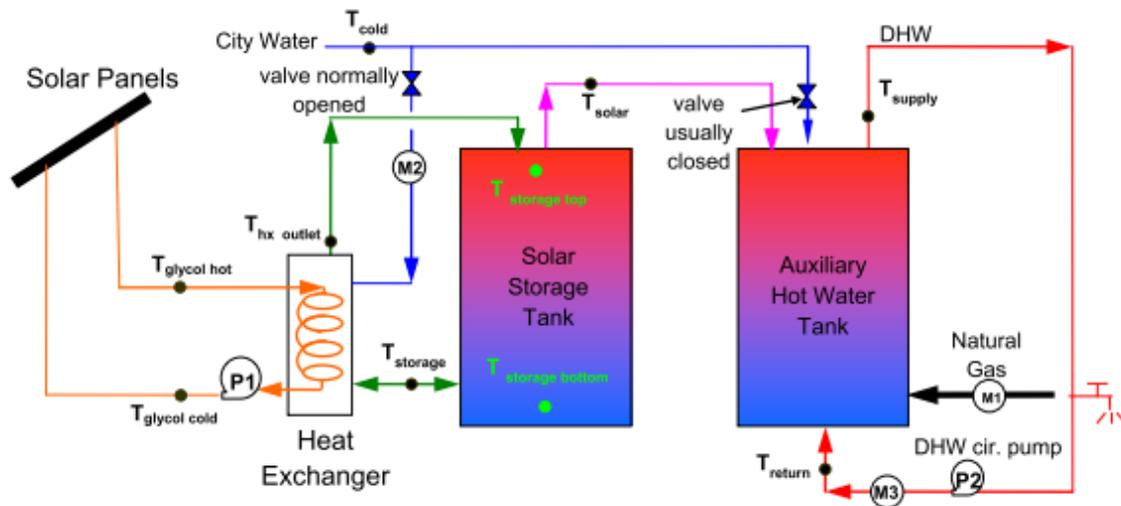


Figura 2.10 - Esquema de aquecimento de águas sanitárias com recurso a painéis solares térmicos [67]

## Coletores solares térmicos

A conversão da energia solar, sob a forma de radiação solar, em energia térmica é realizada por intermédio de um dispositivo capaz de captar a radiação solar e transferi-la para um fluido circulante. A esse dispositivo dá-se o nome de coletor solar térmico, sendo este o principal componente, e com maior peso económico, numa instalação de captação de energia solar para o aquecimento de água.

## Fluido circulante

De forma a evitar o congelamento e a evaporação do fluido circulante, é adicionado à água um anticongelante e um anticorrosivo criando uma mistura que circula na tubagem dos coletores solares e é responsável por, posteriormente, aquecer a água para consumo do tanque de abastecimento. Muitas das vezes, utiliza-se propileno glicol em percentagens variadas de forma a evitar o congelamento, pois pode diminuir a temperatura de fusão da mistura até  $-50^{\circ}\text{C}$  e

aumenta também a temperatura de ebulição até 150°C (quando utilizado numa porção de 50%).

### **Estruturas de suporte**

Construídas em metal, estes componentes tem como função garantir a estabilidade e proteção dos coletores solares face a eventuais condicionantes atmosféricas como vento e neve.

### **Acumulador**

A finalidade das instalações térmicas de AQS é aquecer água da rede através dos coletores expostos ao sol, para tal é necessário acumular a água para que esta possa, ao longo do tempo, ser aquecida e armazenada para posterior utilização. Para tal, utiliza-se um acumulador/tanque normalmente cilíndrico onde esta água é armazenada para consumo.

### **Permutador de calor**

De forma a transferir o calor presente no fluido circulante para a água do acumulador utiliza-se um permutador de calor, normalmente instalado dentro do acumulador.

### **Sistema de apoio**

As instalações solares térmicas não são suficientes para suprir as demandas do sistema de AQS ao longo de todo o ano, por exemplo a água para banhos caseiros ronda os 40°C, o que num dia nublado e frio de Inverno será muito difícil ser atingida tal temperatura pela instalação solar térmica. Para responder a esta

fragilidade do sistema utilizam-se sistemas de apoio, muitas das vezes resistências térmicas colocadas no interior do acumulador. Outra hipótese, praticamente sempre descartada, seria sobredimensionar o sistema na estação de Verão de forma a que as necessidades na estação de Inverno fossem suprimidas apenas pelos coletores solares, contudo tanto por razões económicas como físicas dos equipamentos, pois estes ao serem sobredimensionados vão sofrer um maior desgaste por estarem sujeitos a temperaturas mais elevadas e o que leva também a custos mais elevados tanto de investimento como de substituição, é desaconselhável esta prática.

### **Grupo hidráulico**

É constituído por um conjunto de acessórios destinados a facilitar a movimentação dos fluidos térmicos entre os coletores solares e o permutador de calor. Fazem parte deste grupo uma bomba de circulação alimentada por energia elétrica que impulsiona o fluido através do circuito hidráulico; um vaso de expansão instalado com o propósito de absorver as variações de densidade que se produzem no líquido do circuito primário como consequência das variações da temperatura; e ainda, um conjunto de válvulas de diferentes tipos intercaladas nas tubagens para acionar o controlo do líquido. As válvulas de corte impedem a circulação do fluido, as válvulas de segurança permitem a extração de fluido no caso da pressão do líquido em circulação ser superior a um valor predeterminado e as válvulas de retenção, que são do tipo antirretorno, evitam que o fluido circule no sentido contrário.

Apenas faz sentido referir a bomba de circulação nos sistemas de circulação forçada, pois nos sistemas termossifão o fluido circula através de convecção natural, tema abordado posteriormente.

## **Central de controlo**

A água quente fornecida pelo sistema solar necessita de controlo para manter a temperatura da água no acumulador e para arrancar o sistema de apoio quando o sistema solar não satisfaz a procura.

Para controlar estas ações, as instalações solares incorporam um regulador eletrónico, denominado de controlador diferencial, ao qual são transmitidas informações das temperaturas dos pontos mais significativos mediante sondas introduzidas no circuito hidráulico. No sistema solar térmico, o controlador diferencial controla a bomba de circulação através de duas sondas de temperatura. A primeira é colocada na zona do circuito solar onde é atingida a temperatura mais elevada, ou seja, à saída dos coletores, enquanto que a segunda sonda mede a temperatura no depósito acumulador abaixo do permutador de calor associado ao recurso solar. A bomba de circulação é acionada quando o diferencial de temperatura pré-definido é atingido.

## **Canalização e acessórios**

Este grupo envolve tubagens entre os coletores solares e o acumulador, tubagens de água fria de entrada, tubagens de saída de água quente e outras ligações auxiliares, por exemplo para o esvaziamento do sistema. Este último grupo inclui também isolamento térmico para as tubagens de água quente, evitando assim perdas energéticas, sondas de temperatura e manómetros instalados em diferentes pontos do circuito hidráulico, diferentes tipos de válvulas (corte, misturadoras, expansão) e ainda purgadores manuais ou automáticos para extrair o ar do circuito.

## 2.4 CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS

As instalações solares térmicas classificam-se segundo diferentes critérios, sendo comum distinguirem-se quanto ao tipo de circulação e tipo de coletor solar térmico utilizado.

### **Tipo de circulação**

- Circulação natural ou termossifão;
- Circulação forçada.

### **Tipo de coletor solar térmico**

- Coletores planos sem cobertura
- Coletores planos com cobertura
- Coletores parabólico composto (CPC)
- Coletores de tubos de vácuo

### 2.4.1 CARATERIZAÇÃO DE UM SISTEMA SOLAR QUANTO AO TIPO DE CIRCULAÇÃO

A caracterização de um sistema solar face ao tipo de circulação define-se pela existência ou inexistência de bombeamento do fluido circulante entre o painel solar térmico e o acumulador.

Normalmente em habitações unifamiliares utiliza-se a circulação natural ou termossifão, em que não existe eletrobomba e o movimento do fluido circulante dá-se de forma natural, através da diferença de densidade criada pelo aumento de temperatura. Por outro lado, em sistemas de maiores dimensões ou quando o sistema solar obriga a uma distância entre o painel solar térmico e o acumulador é utilizada a eletrobomba que permite a circulação do fluido de forma forçada.

## Circulação natural (termossifão)

Este tipo de circulação, que não necessita de eletrobomba, funciona por convecção natural, derivado do aumento da temperatura do fluido circulante à medida que aquece pela exposição à radiação solar, induzindo uma diferença de densidades no próprio fluido. Como foi abordado no capítulo 2.1.2, criam-se correntes de convecção em que a parte mais quente do fluido circulante sobe para o acumulador e a mais fria desce para o painel, criando assim um movimento contínuo. Por esse motivo, é necessário que o acumulador seja colocado a um nível superior em relação ao painel solar térmico, como se observa na figura 2.11.

De notar que o caudal de circulação é proporcional à intensidade da radiação solar, visto que quanto mais rápido a água no coletor aquece mais rápido será a circulação entre o depósito e o coletor.

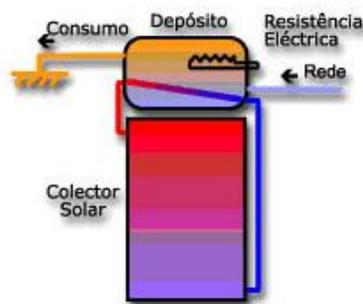


Figura 2.11 - Esquema de um sistema solar térmico com circulação natural (termossifão) [6]

## Circulação forçada

Os sistemas solares térmicos com circulação forçada, tal como o nome indica, possuem circulação induzida por uma eletrobomba circuladora com intuito de forçar o movimento do fluido circulante entre o painel e o acumulador.

A eletrobomba é normalmente comandada por um sistema de comando diferencial que reage a diferença de temperatura entre a água a saída dos coletores e a temperatura da água na parte mais baixa do depósito. Quando é atingida

normalmente uma diferença de 5°C a eletrobomba atua e o fluido circulante no coletor circula para o depósito de acumulação de água, onde o calor é transferido para a água através de permutador de calor (figura 2.12).

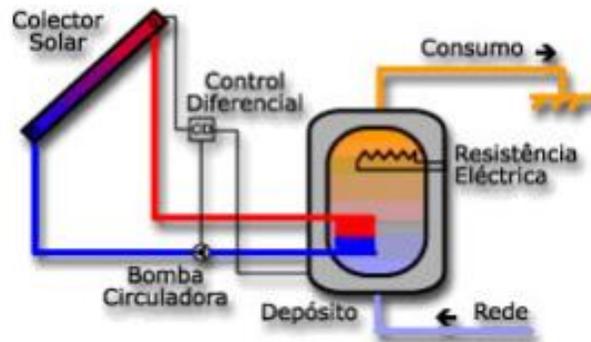


Figura 2.12 - Esquema de um sistema solar térmico com circulação forçada [6]

As vantagens e desvantagens dos tipos de sistemas solares térmicos quanto à seu tipo de circulação apresentam-se de seguida:

*Tabela 2.1 - Vantagens e desvantagens dos sistemas solares quanto ao tipo de circulação*

	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<b>Circulação Natural (Termossifão)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Simples e de baixo custo</li> <li>- Não necessita de energia elétrica</li> <li>- Utilização mais frequente em sistemas unifamiliares de baixa potência e em zonas de baixo risco de congelamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dificuldade de circulação em sistemas de média dimensão</li> <li>- Posição superior do acumulador em relação ao painel</li> <li>- Maiores perdas de energia pelo facto de o acumulador estar exposto ao ambiente</li> </ul>
<b>Circulação Forçada</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Circulação entre acumulador e painel assegurada em qualquer posicionamento</li> <li>- Utilização em sistemas de média/grande dimensão</li> <li>- Permite a regulação da temperatura do sistema mediante a ação da bomba circuladora</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Necessita de energia elétrica</li> <li>- Sistemas mais complexa e de custo mais elevado comparativamente à circulação natural</li> </ul>

## 2.4.2 CARATERIZAÇÃO DE UM SISTEMA SOLAR QUANTO AO TIPO DE COLETOR

Um sistema solar pode variar quanto ao tipo de painel solar térmico em quatro opções diferentes: coletores planos sem cobertura; coletores planos com cobertura; coletor parabólico composto; coletor de tubos em vácuo. A decisão de qual aplicar varia muito com o destino funcional do sistema solar, sendo que para

sistemas caseiros de AQS é mais comum a utilização de coletores planos com cobertura.

### Coletores planos sem cobertura

Este tipo de coletores é o mais básico de entre as diferentes opções, sendo composto todo por plástico (polipropileno, policarbonato ou polivinil), em que os seus tubos são colocados em forma de esteira e unidos por dois tubos de maior diâmetro nas partes superior e inferior, como se apresenta na figura 2.13.

Dada a sua simplicidade de fabrico e baixo custo do material são os mais acessíveis economicamente, contudo o tempo de retorno não varia assim tanto em comparação aos coletores planos com cobertura, visto que estes têm menor eficiência e são de utilização sazonal (Verão), o que leva a uma instalação com maior área de captação [7].

Utilizam-se essencialmente para o aquecimento de piscinas ao ar livre e a sua colocação deve ser abrigada do vento, dado que os mesmos são muito suscetíveis a velocidades do vento superiores a 1 m/s, conduzindo a uma diminuição drástica do seu rendimento.



Figura 2.13 - Coletor plano sem cobertura (a) esquema (b) exemplo [8]

## Coletores planos com cobertura

Este tipo de coletores é o mais convencional, sendo constituído por uma superfície absorvedora, fixada numa caixa com isolamento, cobertura transparente (normalmente vidro para diminuir as perdas por convecção para a atmosfera e criar efeito de estufa) e por tubos de circulação, como representado na figura 2.14.

Dependendo do tipo de pintura e material da placa absorvedora podem atingir diferentes temperaturas máximas, sendo exemplo os coletores com placa absorvedora pintada a negro-mate que atingem temperaturas na ordem dos 50°C e os chamados de revestimento seletivo que atingem temperaturas na ordem dos 70°C. Estes revestimentos da placa absorvedora obtêm-se através de um tratamento eletroquímico ou de uma pulverização catódica, que confere à placa propriedades óticas que reduzem a emissão da radiação infravermelha, mantendo a sua capacidade de absorção elevada, como a tinta negra [9].

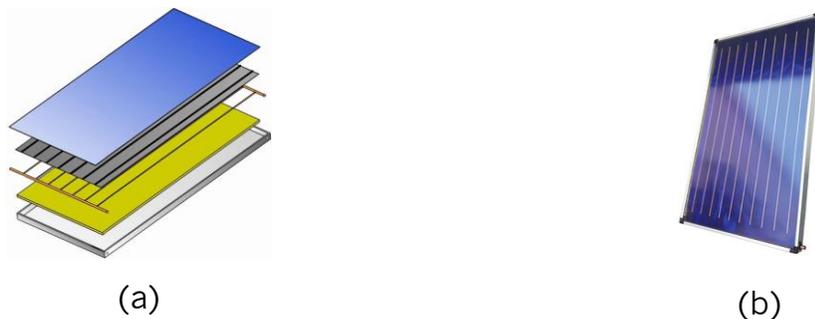


Figura 2.14 - Coletor solar plano (a) esquema (b) exemplo [10]

## Coletores parabólico composto (CPC)

Os coletores do tipo CPC (concentrador parabólico composto) têm como princípio de funcionamento base a concentração da radiação solar, na placa absorvedora, através de um sistema duplo de absorção da radiação, do seguinte modo: um sistema de absorvedores que permite absorver a radiação direta, de forma semelhante aos coletores planos; um sistema de reflexão da radiação que permite a absorção da radiação na parte inferior do absorvedor.

O uso de refletores permite a concentração da radiação solar sobre a superfície absorvedora, resultando numa menor área de absorção para a mesma quantidade de energia absorvida. Tendo em conta que as perdas térmicas são proporcionais à área superficial, absorvedores com menor área apresentam menores perdas térmicas. Acontece que, para o coletor funcionar com um bom rendimento tem de se manter sempre perpendicular aos raios solares, seguindo o sol no seu movimento diurno. Esta é uma desvantagem, pois o mecanismo de controlo para fazer o coletor seguir a trajetória do sol, é um pouco dispendioso.

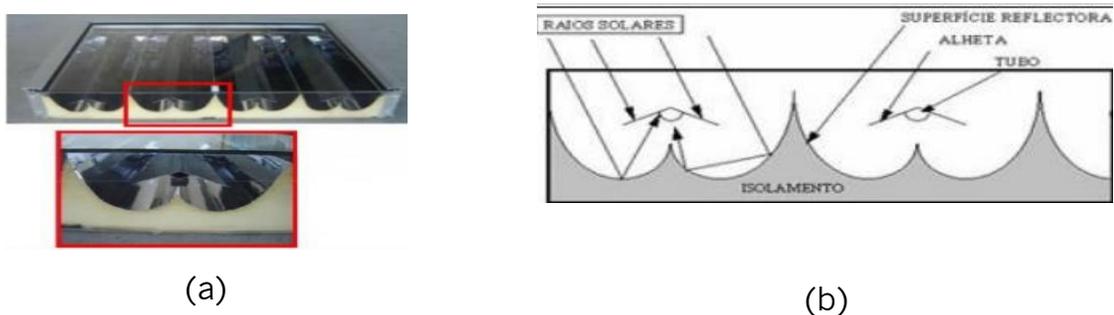
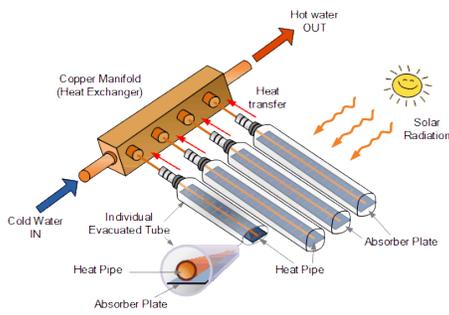


Figura 2.15 - Coletor parabólico composto (a) exemplo (b) esquema [8]

### Coletores de tubos de vácuo

Os coletores de tubos de vácuo, que recebem este nome derivado do isolamento que possuem, são constituídos por uma série de tubos de vidro dispostos paralelamente dentro dos quais se encontra o absorvedor que contém tubos por onde circula o fluido a aquecer (figura 2.16) [11]

Uma característica que distingue estes coletores é a maneira como a vedação do vácuo é feita. Um dos métodos consiste em duas paredes de vidro concêntricas que criam uma espécie de frasco de vácuo com um centro oco que contém o absorvedor à pressão atmosférica. No outro método, cria-se uma união na extremidade do tubo de vidro entre o tubo de metal e o de vidro de forma a que o absorvedor seja mantido no interior do vácuo.



(a)



(b)

Figura 2.16 - Coletor de tubos de vácuo (a) esquema (b) exemplo [11]

As vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de coletores solares apresentam-se na tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de coletores solares

	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<b>Coletor plano sem cobertura</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diversas formas disponíveis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baixo rendimento</li> </ul>
<b>Coletor plano com cobertura</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Boa relação custo/performance</li> <li>- Múltiplas opções de montagem</li> <li>- Montagem simples</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Limitado a temperaturas médias</li> <li>- Menor eficiência que os CPC's e que os coletores de tubos em vácuo</li> </ul>
<b>Coletor parabólico composto (CPC)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Funcionalidade a temperaturas elevadas</li> <li>- Boa eficiência com baixa radiação</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Custo superior aos coletores planos</li> <li>- Maior complexidade de montagem</li> </ul>
<b>Coletor de tubos em vácuo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Boa eficiência com baixa radiação</li> <li>- Funcionalidade a temperaturas elevadas</li> <li>- Maior facilidade de transporte e montagem</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Custo bastante superior aos coletores planos</li> <li>- Limitações em aplicações em cobertura/telhados</li> </ul>

## 2.5 COLETORES SOLARES PLANOS COM COBERTURA

Dado que o coletor solar utilizado no âmbito do projeto é um coletor plano com cobertura, apresenta-se de seguida um aprofundamento do estudo deste tipo de coletores.

Este tipo de coletores, como é conhecido atualmente, foi desenvolvido por Hottel e por Whillier na década de 50. Pode ser decomposto em diferentes componentes, de acordo com a sua função, como representado na figura 2.17 e que se apresentam de seguida:

- Cobertura de vidro (*glazing*) – Cobertura transparente normalmente em vidro colocada na parte frontal do coletor quando este é orientado para o sol;
- Placa absorvedora – responsável por absorver a radiação solar e convertê-la em calor e transferir esse calor para o fluido circulante de forma eficiente;
- Tubagem – permite o escoamento do fluido circulante;
- Placa isolante – colocada para diminuir as perdas de calor pela parte traseira e lateral do coletor solar;
- Invólucro – uma caixa a prova de água que permite colocar todos os componentes no seu interior, mantendo-os afastados de poeiras e humidades.

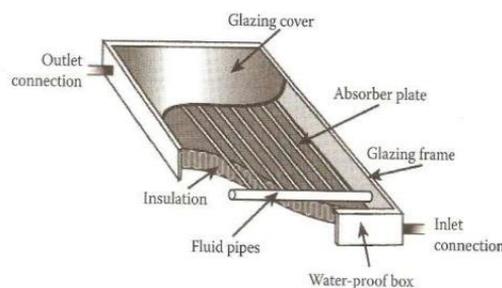


Figura 2.17 - Componentes básicos de um coletor solar plano com cobertura [12]

### 2.5.1 COBERTURA DE VIDRO

O objetivo deste componente é permitir a passagem de radiação solar de baixo comprimento de onda e bloquear a radiação solar de comprimento de onda mais elevado que é irradiado por parte da placa absorvedora e reduzir a perda de calor por convecção do topo do coletor [13]. A cobertura de vidro atua também como “tampa” na parte superior do invólucro.

O vidro é o material mais comum devido à baixa transmissão de radiação com comprimento de onda mais elevado e também permite que seja transmitida cerca de 90% das radiações de ondas baixas de entrada. O vidro comum disponível comercialmente terá uma transmissão de incidência normal de cerca de 0,87 a 0,90.

A tabela 2.3 apresenta os diferentes valores de transmissão da radiação quando a radiação solar incide perpendicularmente ao material. De notar que, apesar do vidro de cristal apresentar maior transmissão é muitas vezes utilizado vidro típico de janela devido a sua vasta comercialização e além de os materiais plásticos apresentarem valores de transmissão próximos do valor do vidro de janela, estes deterioram-se de forma rápida quando sujeitos a radiação ultravioleta, o que leva a serem pouco escolhidos para a função.

Tabela 2.3 - Índice de transmissão dos diferentes materiais utilizados para a cobertura de um coletor solar plano [13]

Material	Transmissão ( $\tau$ )
Vidro de cristal	0,90
Vidro normal	0,85
Acrílico	0,84
Policarbonato	0,84
Poliéster	0,84
Poliamida	0,80

## 2.5.2 PLACA ABSORSORA

A função primária deste componente é absorver o máximo de radiação possível que ultrapassa a cobertura de vidro e, ao mesmo tempo, perder o mínimo de radiação possível pela parte superior para a atmosfera e pela parte inferior e lateral do invólucro. Além disso, a radiação ganha pela placa absorvedora deve ser transferida com a melhor eficiência possível para a tubagem e posteriormente para o fluido circulante.

Nos coletores planos com cobertura, a placa absorvedora é sempre metálica, derivado da boa condutividade térmica dos metais, podendo variar entre alumínio, cobre ou aço [13]. Como se evidencia na tabela 2.4, o ideal a utilizar neste componente é cobre, sem esquecer que existem outros fatores na escolha do material como a durabilidade, o custo e a facilidade de manuseamento.

Tabela 2.4 - Condutividade térmica dos diferentes metais utilizados na placa absorvedora [13]

Metal	Condutividade térmica – k (W/m.K)
Alumínio	236
Cobre	401
Aço (0,5% Carbono)	54

De forma a aumentar a absorvência da radiação da placa absorvedora é normalmente aplicado um revestimento, quase sempre em tinta preta aplicada por spray que possui uma absorvência entre 0,92 e 0,98. Na tabela 2.5 apresentam-se os diferentes valores de absorvência para as diferentes cores colocados como revestimento.

Tabela 2.5 - Absorbância de diferentes cores utilizadas [13]

Cor do material	Absorbância ( $\alpha$ )
Branco	0,07
Cinzentos	0,75
Preto	0,92-0,98

### 2.5.3 TUBAGEM

A tubagem é responsável por transportar o fluido circulante durante o seu percurso, em que o mesmo se encontra em aquecimento. O principal cuidado a ter no dimensionamento deste componente é maximizar a sua área de contacto com a placa absorvora, visto que a transferência de calor é diretamente proporcional à área de contacto entre os dois componentes. De modo ao aquecimento ser promovido de forma mais eficiente possível utiliza-se cobre como material da tubagem dado que é o metal com melhor relação entre preço e condutividade térmica.

Existem dois tipos de configurações da tubagem utilizados nos coletores solares planos com cobertura: configuração em paralelo e a configuração em serpentina.

A maioria dos coletores planos com cobertura apresentam uma tubagem constituída por tubos de pequeno diâmetro alinhados paralelamente ligados a dois tubos principais de maior diâmetro, como se apresenta na figura 2.18 (configuração em paralelo). Os tubos principais são de maiores dimensões de forma a que a diferença de pressão seja moderada e o caudal o mais uniforme possível e, de notar que, o fluido apresenta maior pressão na zona inferior da tubagem comparativamente a zona superior.

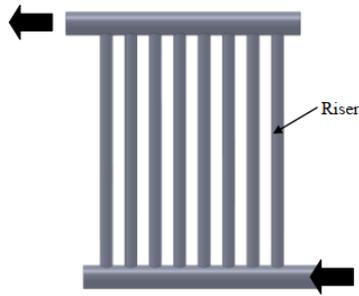


Figura 2.18 - Tubagem com configuração em paralelo [14]

Outra hipótese de configuração é em serpentina (figura 2.19), que consiste num tubo longo conformado de forma a aumentar a área de contacto com a placa absorvora. Esta configuração tem a particularidade de manter o caudal uniforme ao longo do escoamento, o que de certa forma uniformiza também o processo de transferência de calor. Apresenta maior facilidade de fabrico comparativamente à configuração em paralelo visto que não possui uniões que necessitam de ser soldadas.

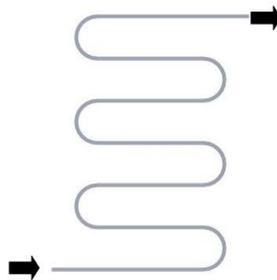


Figura 2.19 - Tubagem com configuração em serpentina [14]

#### 2.5.4 PLACA ISOLANTE

A placa isolante é colocada de forma a diminuir as perdas por condução e convecção pela parte traseira e lateral do coletor, “forçando” a energia absorvida a ser transferida para o fluido circulante. Os materiais escolhidos devem funcionar

como resistência térmica, devendo por esse motivo apresentar baixa condutividade térmica.

Ademais, grande parte dos materiais escolhidos como elemento isolante perdem as suas características em contacto com a água, pelo que é de extrema importância que este elemento seja mantido seco. Quando o coletor solar é montado, o ar preso no seu interior contém humidade que eventualmente irá condensar e parte será absorvida pela placa isolante. Ora, para prevenir isto de acontecer, os coletores solares planos com cobertura de qualidade apresentam dessecantes, sacos porosos de gel sílica. Além disso, o involucro tem também um papel importante pois deve apresentar o número mínimo de juntas de forma a evitar possíveis entradas de água ou humidade [15]

Na tabela 2.6 apresentam-se alguns dos materiais passíveis de serem escolhidos como elemento da placa isolante.

*Tabela 2.6 - Materiais isolantes e respetivas condutividades térmicas [16]*

<b>Material isolante</b>	<b>Condutividade térmica – k (W/m.K)</b>
Poliestireno expandido	0,04
Poliestireno extrudado	0,27
Espuma de poliuretano	0,018
Espuma fenólica	0,027
Lã de rocha mineral	0,045
Lã de vidro	0,040

### 3. ESTADO DA ARTE DOS NANOFLUIDOS

Os nanofluidos são uma classe relativamente nova de fluidos que consiste na adição de partículas de tamanho nano (1 a 100 nm) suspensas num fluido base. As partículas são geralmente um metal ou óxido de metal que têm como intuito aumentar a condutividade térmica permitindo uma transferência de calor mais eficiente.

A utilização de partículas sólidas deve-se ao facto de os materiais sólidos, quando comparados com fluidos, apresentarem condutividade térmica mais alta. Assim, continua a ser possível a utilização de um fluido circulante, contudo apresenta um incremento na condutividade térmica da solução.

A incerteza associada a esta tecnologia ainda é grande, contudo são cada vez mais os estudos realizados nesta área, podendo-se afirmar que é uma tecnologia com boa margem de progressão, mas com desafios que dificultam a sua afirmação. Na figura 3.1 pode-se constatar o aumento de publicações e estudos que se têm vindo a realizar neste campo.

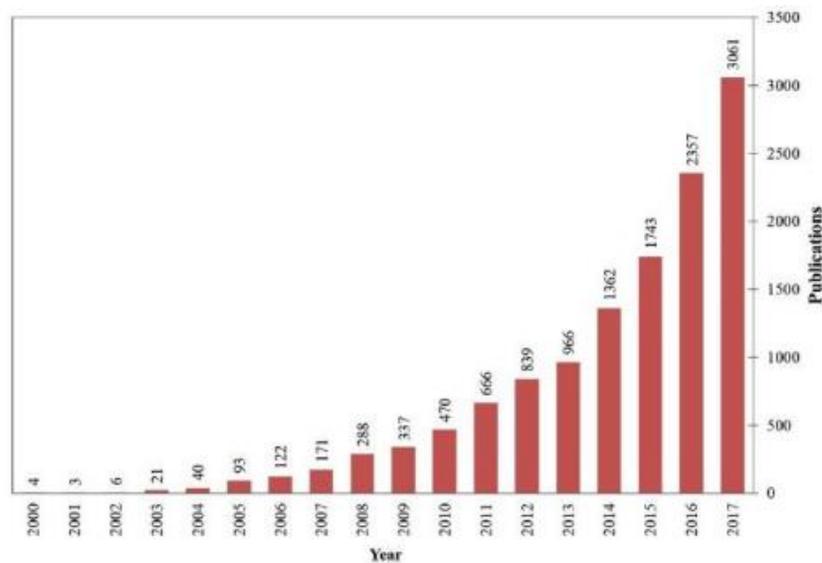


Figura 3.1 - Número de publicações com a palavra "nanofluido(s)" como tópico, de 2000 até 2017 [17]

Segundo o trabalho de pesquisa realizado [18] pode-se constatar que são utilizados diferentes tipos de nanopartículas. Onde é claro, através da figura 3.2, que os óxidos de alumínio são os mais correntemente utilizados devido a boa estabilidade no fluido base, fácil acesso, baixo preço e por possuírem propriedades termofísicas consideravelmente boas.

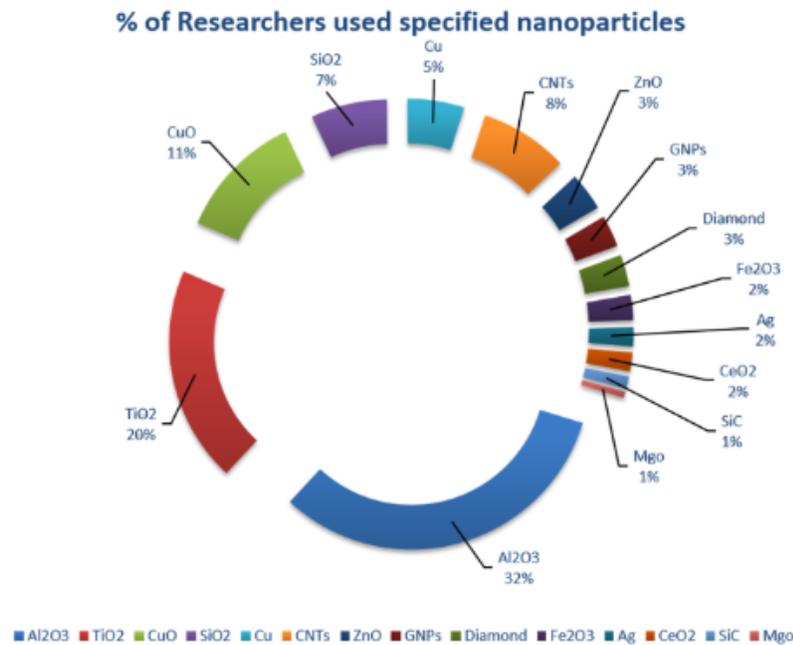


Figura 3.2 - Tipo de nanopartículas e percentagem de utilização em trabalhos de investigação [18]

Quanto ao fluido base, figura 3.3, existe alguma variedade, sendo mais utilizada em trabalhos de investigação a água. Este fluido é de fácil acesso, baixo custo, pode ser aplicado com uma grande gama de nanopartículas possui maior condutividade térmica que outros fluidos como etileno glicol e óleo. Pode observar-se que 76% dos estudos usa água, 17.6% usa uma mistura de água com etileno glicol, 4% usa etileno glicol e outros apresentam como fluido base óleo ou azoto líquido.

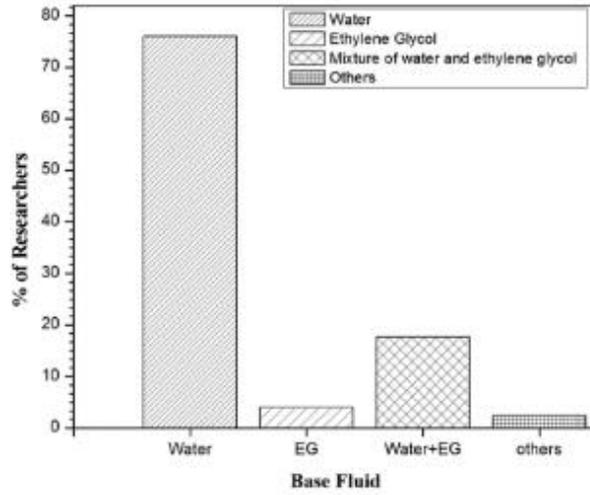


Figura 3.3 - Percentagem de utilização de diferentes fluidos bases em trabalhos de investigação [18]

### 3.1 VANTAGENS

Nas últimas décadas, os rápidos avanços na nanotecnologia levaram ao surgimento de nova geração de refrigerantes chamados nanofluidos. Contudo, nem sempre esta tecnologia apresenta viabilidade imediata, existindo muitos incentivos e vantagens da mesma, promovendo a investigação neste campo com o intuito de melhorar esta técnica e proporcionar uma melhor compreensão na utilização dos nanofluidos.

Apresentam-se assim algumas das vantagens desta técnica no processo de transferência de calor [19]:

- Aumento da condutividade térmica, por consequência maior eficiência no processo de transferência de calor;
- Propriedades ajustáveis, através da variação de concentração de nanopartículas e das suas características e pela variação do fluido base;
- Redução do tamanho das partículas diminuindo o risco de entupimento e a erosão provocada pelas partículas;
- Quando utilizadas partículas magnéticas, as mesmas podem ser localizadas por campo magnético aumentando a condutividade térmica do fluido de forma local;
- Redução da quantidade de fluido térmico utilizado, bem como o tamanho dos equipamentos de transferência de calor.

## 3.2 APLICAÇÕES

Os nanofluidos são vistos com grande potencial em aplicações em que o processo de transferência de calor seja preponderante. Por esse motivo apresentam uma vasta área de aplicação, sendo apresentado de seguida algumas das aplicações dos mesmos:

### **Eletrónica**

Os dispositivos eletrónicos têm cada vez menores dimensões, sendo mais compactos e mais leves, não comprometendo o funcionamento dos mesmos. Desta forma, é evidente que a quantidade de calor por unidade de área seja cada vez maior tornando-se necessário que o processo de dissipação de calor seja capaz de manter o funcionamento do dispositivo nas melhores condições. Posto isto, em certos casos o arrefecimento tradicional realizado com ar já não é suficiente, utilizando-se líquidos refrigerantes. Uma vez que as propriedades termofísicas dos nanofluidos são superiores a líquidos refrigerantes convencionais, os nanofluidos começam a ser uma aposta cada vez mais seria no processo de dissipação de calor [20].

### **Maquinagem**

No processo de maquinagem é recorrente a utilização de fluidos de corte de modo a extrair o calor produzido no momento do corte da peça, impedindo o sobreaquecimento da pastilha de corte e evitando problemas no processo de remoção da aparas. Assim, através da adição de nanopartículas, os lubrificantes apresentam melhores propriedades na dissipação do calor e coeficientes de fricção mais reduzidos acabando por se formar até menos calor durante o processo.

## **Ar-condicionado**

Nos sistemas de ar-condicionado é imprescindível a utilização de líquidos refrigerantes, assim os nanorefrigerantes podem ser uma solução bastante viável pelo que alguns estudos apresentam já performances melhores no desempenho global do processo de transferência de calor. Na figura 6 pode-se observar avaliar o ganho de condutividade térmica em função da temperatura e da fração volumétrica de nanopartículas [21].

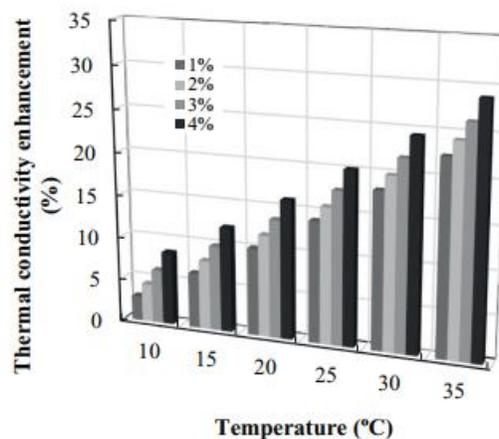


Figura 3.4 - Variação da condutividade térmica em função da temperatura e fração volumétrica utilizando um nanorefrigerante ( $Al_2O_3/R-141b$ ) [21]

## **Arrefecimento de motores**

Diversos processos industriais utilizam motores de combustão ou mesmo na refrigeração de veículos onde estão presentes radiadores, responsáveis pela remoção do excesso de calor gerado. Neste campo já se apresentaram vários estudos de modo a avaliar não só o desempenho térmico do nanofluido, mas também de modo a validar a queda de pressão e o risco de entupimento deste processo. Na figura 7 pode-se observar a variação da condutividade térmica em função da fração volumétrica de nanopartículas [22].

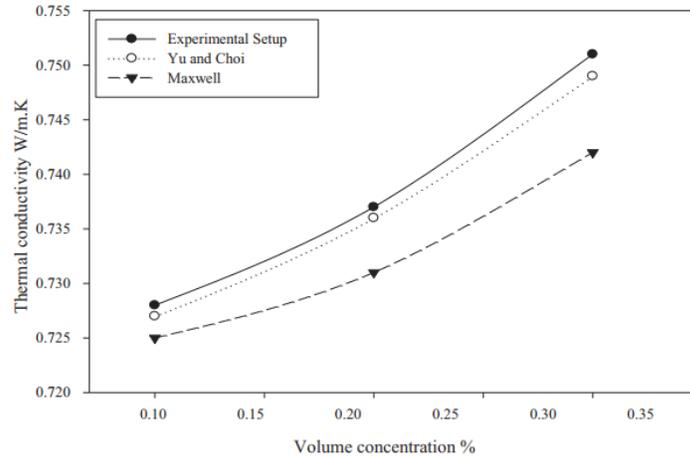


Figura 3.5 - Variação da condutividade térmica do nanofluido água-TiO<sub>2</sub> em função da fração volumétrica de nanopartículas [22]

## Medicina/Biomédica

Um dos aspetos de grande valor de alguns dos materiais utilizados para as nanopartículas é a magnetização, que permite localizar as nanopartículas e, desta forma, permitir a distribuição de tratamentos locais específicos como é exemplo os tratamentos por hipertermia, que implica o aumento da temperatura e destruição de células cancerígenas. Outro exemplo é também o método *drug-delivery* que permite a libertação de drogas num ponto específico de atuação, aumentando a probabilidade de sucesso no tratamento [68].

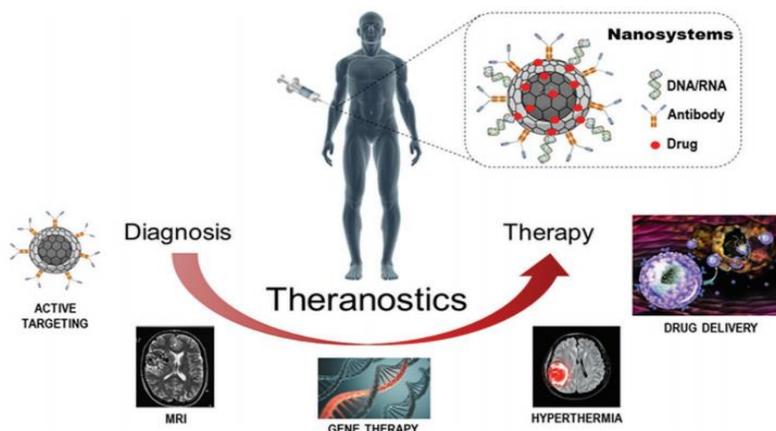


Figura 3.6 - Esquema do valor multifuncional das nanopartículas combinando no mesmo nanosistema diagnóstico e terapia [68]

### 3.2.1 APLICAÇÕES EM PAINÉIS SOLARES TÉRMICOS

São cada vez mais os estudos realizados em painéis solares térmicos com a utilização de nanofluidos, sendo que esta tecnologia permite uma melhor eficiência energética dos coletores solares através da melhoria nas propriedades termofísicas. Desta forma, apresenta-se de seguida um levantamento bibliográfico de alguns estudos realizados.

*Tabela 3.1 - Levantamento bibliográfico de aplicações de nanofluidos em painéis solares térmicos*

<b>Investigador</b>	<b>Nanofluido (Partículas – Fluido base)</b>	<b>Tamanho das partículas (nm)</b>	<b>Fração volumétrica (%)</b>	<b>Melhoria na eficiência (%)</b>
[23] Masuda et al.	TiO <sub>2</sub> – H <sub>2</sub> O	27	1 – 4,3	11 – 60
[24] Wang et al.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – EG	28	1,2 – 3,5	7 – 39
[25] Prasher et al.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – PPG	50	0,5 – 3	5,5 – 24
[26] Nguyen et al.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – H <sub>2</sub> O	47	1 – 13	10 – 210
[27] Chen et al.	TiO <sub>2</sub> – EG	25	0,1 – 1,86	0,5 – 23
[28] Garg et al.	Cu – EG	200	0,4 – 2	5 – 24
[29] Anoop et al.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – H <sub>2</sub> O	45	2 – 8	1 – 6
[29] Anoop et al.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – EG	100	0,5 – 6	8 – 32
[30] Kole & Dey	CaCO <sub>3</sub> – DIW	50	0,12 – 4,11	1 – 69
[31] Lee et al.	SiC – DIW	<100	0,001 – 3	1 – 102

Como se pode observar pelo levantamento bibliográfico realizado são bastantes variados os materiais de nanopartículas em que se realizam os estudos, bem como os fluidos utilizados. Adicionalmente, pode-se constatar que todos os estudos apresentam uma melhoria na eficiência energética do painel solar térmico.

### **3.3 MECANISMOS DE GANHO TÉRMICO**

De acordo com diversos estudos realizados são quatro os principais mecanismos de ganho térmico na condutividade dos nanofluidos, sendo estes: o movimento Browniano; a aglomeração das nanopartículas; a natureza de transporte das nanopartículas; e a presença de uma interface líquido/sólido.

#### **3.3.1 MOVIMENTO BROWNIANO**

O movimento Browniano caracteriza-se pela ocorrência de transporte direto de energia das partículas envolvidas através de colisões entre as mesmas, derivado do movimento aleatório que uma partícula dispersa apresenta num fluido.

Como o aumento da concentração de partículas implica um aumento no número de colisões e um, conseqüente, maior transporte de energia parecia evidente que o movimento Browniano era o principal responsável pelo aumento da condutividade térmica nos nanofluidos. Contudo, provou-se o contrário, sendo que este mecanismo pode até ser negligenciado, tal justificou-se através da observação de amostras de fluidos de maior viscosidade que atingiram maior valores de condutividade [32].

Para a verificação da teoria, utilizaram dois fluidos base com propriedades termofísicas semelhantes, excetuando na viscosidade, e misturaram-se em ambos a mesma quantidade de nanopartículas. Concordante com o movimento Browniano, existirá um movimento maior das partículas no fluido menos viscoso, derivado do menor atrito criado pelo fluido, resultando numa condutividade térmica maior quando comparado com o fluido mais viscoso. No entanto, verificou-se o contrário, discordando com a teoria do movimento Browniano, porque o fluido mais viscoso criou clusters de maiores dimensões, apresentando um grau de

aglomeração de nanopartículas maior e por consequência zonas de menor resistência térmica [33]. No presente, acredita-se que o movimento browniano tem um papel reduzido no aumento da condutividade térmica dos nanofluidos.

### 3.3.2 AGLOMERAÇÃO DAS PARTÍCULAS

A aglomeração das nanopartículas pode permitir o transporte mais rápido de calor devido a criação de zonas de menor resistência térmica ao longo do fluido, aumentando assim a capacidade em transportar calor, contudo não existe proporcionalidade entre a aglomeração de nanopartículas e a condutividade térmica, dado que a partir de um certo grau de aglomeração a condutividade começa a decrescer uma vez que impede o correto escoamento do fluido.

Neste campo, é de referenciar a investigação de [33], no qual se verificou o efeito da temperatura na variação da morfologia de aglomeração das partículas dispersas no fluido. Como é observável na figura 3.7, verifica-se que quanto maior a temperatura, maior a homogeneização da dispersão das nanopartículas no fluido base, sendo que para baixas temperaturas se verifica zonas inexistentes em relação a presença de nanopartículas. Assim, pode-se evidenciar que quanto maior a temperatura, maior a dispersividade das nanopartículas e por consequência maior o valor da condutividade efetiva do nanofluido. Em contraste, aglomerados isolados a baixas temperaturas, atuariam de forma inversa, o que levaria a condutividades mais baixas.

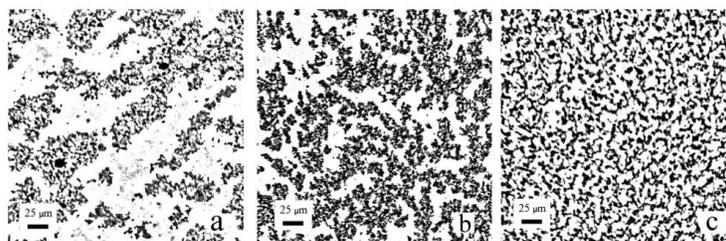


Figura 3.7 - Imagens microscópicas de um nanofluido contendo nanotubos de carbono (CNT): (a) amostra congelada  $-70^{\circ}\text{C}$ ; (b) amostra a temperatura ambiente; (c) amostra a  $100^{\circ}\text{C}$  [33]

### 3.3.3 NATUREZA DE TRANSPORTE DAS NANOPARTÍCULAS

As nanopartículas, normalmente sólidos cristalinos, transportam o calor sob a forma *phonons*, ou seja, através da propagação de vibrações. Estas vibrações são criadas e propagadas de forma aleatória dispersando-se em diversas direções, a elevada velocidade [32].

A propagação destas vibrações a partículas vizinhas cria pontes pelo fluido que conectam as partículas e permitem a vibração continua levando assim a um aumento da condutividade térmica. Previsivelmente, o efeito será tanto maior quanto menor a distância entre nanopartículas, predominando em zonas de elevada concentração de partículas e em partículas de menor diâmetro. Novamente, o movimento Browniano será importante pois o movimento constante de aproximação de partículas facilitará a propagação entre partículas.

### 3.3.4 ESTRATIFICAÇÃO DA INTERFACE LÍQUIDO-SÓLIDO

Seria expectável que na zona de interface líquido-sólido se desenvolvesse uma resistência térmica de contato, prejudicial para a condutividade. No entanto o que se verifica é exatamente o oposto.

Nesta interface verifica-se um ordenamento das partículas de fluido base provocado pela presença da nanopartícula que melhora a condutividade efetiva no local, como se evidencia na figura 3.8, criando-se uma pequena camada, com espessura inferior a 1 nm.

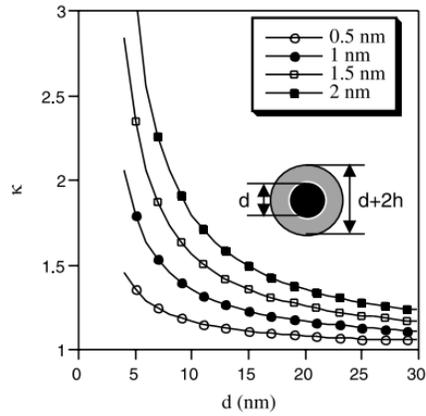


Figura 3.8 - Aumento da condutividade térmica efetiva de acordo com a interface líquido/sólido gerada pela presença de uma nanopartícula [34]

É também possível afirmar que quanto menor for o diâmetro da partícula maior será também o ganho provocado por este efeito, uma vez que com partículas maiores esta interface torna-se irrelevante [34].

### 3.4 PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM OS MECANISMOS

#### Tamanho das partículas

O tamanho das partículas desempenha um papel de extrema importância no aumento da condutividade térmica dos nanofluidos, não se limitando apenas à estabilidade da suspensão, mas também às propriedades térmicas, sendo de concluir que este fator influencia a mobilidade das partículas do fluido (movimento browniano), a distância intermolecular (natureza de transferência de calor e agregação das partículas) e definição da interface líquido-sólido.

A maioria dos estudos realizados conclui que a condutividade térmica aumenta com a diminuição do tamanho das nanopartículas, o que é concordante com os mecanismos apresentados previamente. Este efeito pode-se observar na figura 3.9.

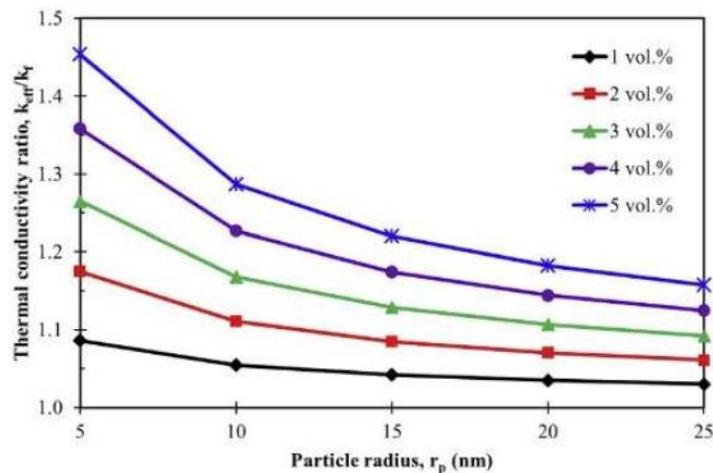


Figura 3.9 - Variação da condutividade térmica em função do tamanho das nanopartículas para diferentes valores de concentração [35]

#### Concentração

O aumento da concentração de nanopartículas no fluido base provoca, como é expectável, um aumento na condutividade efetiva da solução. Contudo, também

facilmente se conclui que existe uma concentração ótima, que varia de acordo com o fluido base e com as nanopartículas utilizadas [37]. Ultrapassando esse valor, a criação de aglomerados intensifica-se, ocorre uma maior deposição, o escoamento do fluido vê-se dificultado e conseqüentemente uma perda na condutividade térmica.

### Temperatura

A condutividade térmica aumenta de acordo com o aumento da temperatura, figura 3.10, justificando-se pelo facto de aumentar o número de colisões entre as partículas que por sua vez induz um aumento da condutividade térmica. De forma mais técnica pode se dizer que uma temperatura do nanofluido elevada intensifica o movimento Browniano das nanopartículas e por conseqüência esta que promove um aumento da microconvecção no transporte de calor [36].

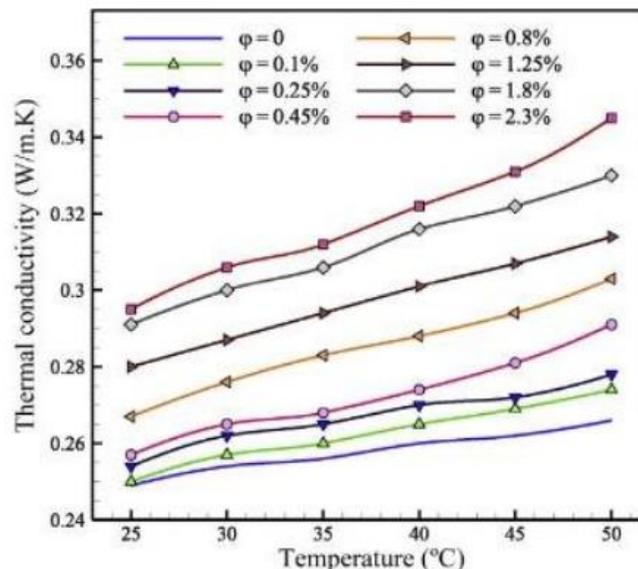


Figura 3.10 - Variação da condutividade térmica em função da temperatura do nanofluido para diferentes valores de concentração [35]

## Dispersão das nanopartículas

Estudos recentes, [37] e [38], demonstram que existe um efeito derivado da aglomeração das partículas na condutividade térmica, evidenciando que o incremento da mesma é função da agregação das nanopartículas. De acordo com alguns estudos, existe um determinado grau de agregação que permite alcançar a condutividade térmica mais alta, assim ao contrário do que se possa pensar a adição e agregação de nanopartículas não é proporcionalmente direta ao aumento da condutividade térmica. De notar, que o grau de agregação associado ao ponto máximo se encontra distante do previsto para misturas homogêneas, tal pode ser observado na figura 3.11.

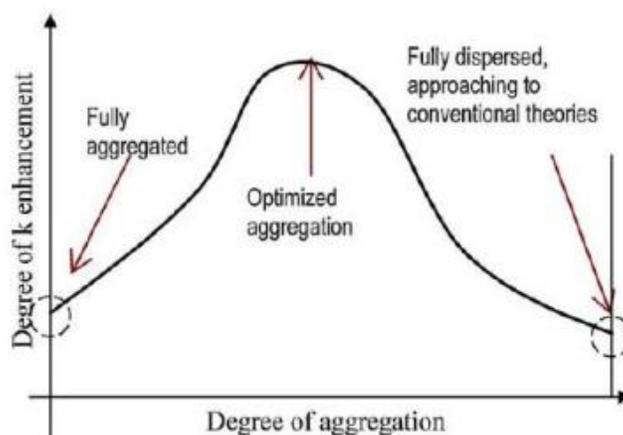


Figura 3.11 - Efeito da agregação de nanopartículas na condutividade térmica [39]

## Fluido base

Como é expectável, e tal como o nome indica, a base da solução e as suas propriedades intrínsecas são deveras importante na transferência de calor. De evidenciar, a condutividade térmica e a viscosidade como as propriedades mais preponderantes.

### Material das nanopartículas

A adição de nanopartículas tem um efeito direto nas propriedades do nanofluido. Podendo-se afirmar, de forma simples, que quanto maior a condutividade térmica do material das nanopartículas maior o incremento na condutividade térmica do nanofluido.

### Preparação do nanofluido

A preparação do nanofluido é de extrema importância dada a morfologia da aglomeração e qualidade da dispersão, sendo comum possuir as nanopartículas isoladas no estado sólido sendo depois dispersas no fluido base, formando assim o nanofluido. Apresentam-se de seguida alguns fatores que influenciam o processo de preparação do nanofluido:

#### **Técnica de produção**

O processo produtivo de nanopartículas distingue-se no processo de uma ou duas etapas. No primeiro caso, a produção de nanopartículas e a sua dispersão no fluido base ocorre simultaneamente, sendo que no final do processo a concentração finalizada e pretendida é obtida por diluição. Enquanto no processo de duas etapas, o nanofluido obtém-se por dispersão de uma determinada quantidade de nanopartículas no fluido base.

No processo de uma etapa obtém-se nanofluidos de maior estabilidade porque é excluído o processo de secagem, armazenamento e diluição, assim as partículas não estarão, possivelmente, tão expostas a fatores ambientais como humidade ou variações térmicas, evitando a sua deterioração e aglomeração, comparativamente ao processo de duas etapas.

No processo de duas etapas, o custo é mais reduzido e utilizam-se normalmente dispersantes durante o fabrico e/ou dispersão ultrassónica no momento de diluição de forma a combater os efeitos negativos do processo.

Apesar das vantagens do processo de uma etapa, segundo uma revisão bibliográfica observa-se que os investigadores preferem o processo de duas etapas dado a sua facilidade e simplicidade. A tabela 3.2 sintetiza alguns trabalhos realizados com alumina ( $Al_2O_3$ ), em que para diferentes percentagens todos eles utilizaram o método de duas etapas.

*Tabela 3.2 - Levantamento bibliográfico de investigações realizadas com nanofluidos de alumina*

<b>Autores</b>	<b>Fluido base</b>	<b>Percentagem volumétrica (%)</b>	<b>Método de preparação</b>
[40] Wang et al. 1999	Água e Etilenoglicol	3 – 8	Duas etapas
[41] Xie et al. 2002	Água	1,8 – 5	Duas etapas
[42] Das et al. 2003	Água	1 – 4	Duas etapas
[43] Wen & Ding 2004	Água	0,19 – 1,59	Duas etapas
[44] Chon et al. 2005	Água	4	Duas etapas
[45] Li & Peterson 2006	Água	2 – 10	Duas etapas
[46] Beck, Sun, Teja 2007	Etilenoglicol	1 – 4	Duas etapas
[47] J. H. Lee et al. 2008	Água	0,01 – 0,3	Duas etapas
[48] Choi, Yoo, Oh 2008	Óleo isolante	0,5 – 4	Duas etapas

### **Acidez**

Vários estudos apontam que o valor do pH da mistura influencia a agregação das nanopartículas. A variação do pH em relação ao ponto isoelétrico (valor em

que as partículas não possuem carga elétrica) provoca a criação de forças repulsivas entre as mesmas, dificultando a agregação e contrariando as forças atrativas de Van der Waals.

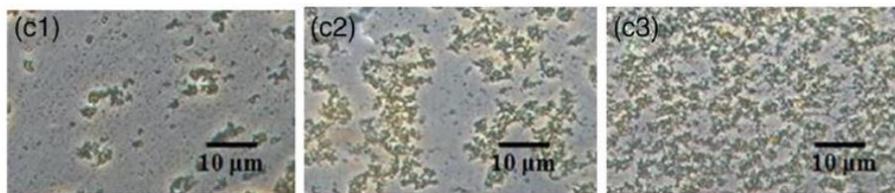
### **Dispersantes**

A adição de dispersantes aos nanofluidos permite controlar a tensão superficial das nanopartículas no fluido base, tornando a dispersão mais eficiente entre as mesmas. Foi comprovado que a adição de pequenas quantidades permite uma maior estabilidade do nanofluido, retardando a separação de fase por várias horas. Os dispersantes mais comuns são o ácido tioglicólico, CTAB ou SDS [70].

### **Agitação acústica**

Este processo é obtido através da colocação do nanofluido num banho de ultrassons, permitindo assim uma mais eficiente dispersão das partículas no fluido, homogeneizando e quebrando os agregados previamente formados.

Dado o elevado contributo desta técnica até para pequenos intervalos de agitação acústica, tornou-se praticamente protocolar a utilização desta técnica [49]. Pode-se observar na figura 3.12 o efeito da agitação acústica na morfologia da estrutura formada pelas nanopartículas realizado no estudo de Philip e Shima em 2012 [35].



*Figura 3.12 - Efeito do tempo de agitação acústica num nanofluido de EG e nanopartículas de CuO em que: a) Sem agitação; b) 30min; c)60min [35]*

## 3.5 DESAFIOS DOS NANOFLUIDOS

Os nanofluidos apresentam inúmeros desafios que resultam na falta de comercialização desta tecnologia. Apresentam-se então de seguida os vários desafios de forma a melhor enquadrar alguns dos capítulos deste trabalho:

### Baixo calor específico

É correntemente utilizado como fluido circulante, a água, dado o seu elevado calor específico comparativamente a outros fluidos. Dada esta característica, torna-se possível fornecer uma grande quantidade de energia, sem que isto provoque um grande aumento de temperatura, mantendo assim as suas características.

Contudo, como as nanopartículas, em geral, têm calores específicos baixos, quando são dispersas num fluido base (ainda que com elevado calor específico), criam um nanofluido de menor calor específico que o fluido base dada a natureza da mistura. Como uma das principais aplicações dos nanofluidos é a remoção de calor, o interesse é criar um nanofluido com elevado calor específico e principalmente uma condutividade térmica elevada [19].

### Queda de pressão e potência de bombeamento

A queda de pressão e a potência de bombeamento estão internamente ligadas, sendo que uma queda de pressão elevada resulta numa potência de bombeamento elevada.

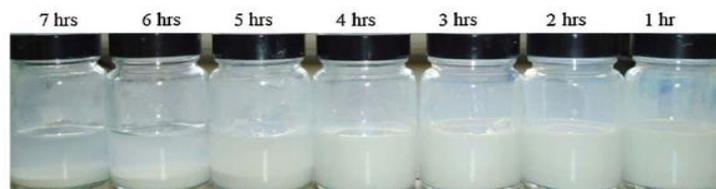
Existem dois fatores preponderantes no escoamento do nanofluido, e por consequência na queda de pressão, sendo estes a viscosidade e a densidade. Como a concentração de nanopartículas no fluido base aumenta proporcionalmente a densidade e a viscosidade, apresenta-se um grande desafio em manter o equilíbrio

entre a concentração de nanopartículas e não aumentar exageradamente o consumo energético, necessário para bombear o nanofluido.

#### Estabilidade das nanopartículas a longo prazo

Uma das principais dificuldades na utilização dos nanofluidos é a estabilidade do nanofluido, sendo que as suspensões estão na ordem das horas, como se pode verificar na figura 3.13, dependendo o tipo de fluido base e nanopartículas, o que torna inconcebível a utilização de nanofluidos em sistemas comercializados como os de refrigeração. Desta forma, a adição de surfactantes, a modificação superficial das partículas suspensas e a aplicação de forças sobre os aglomerados de partículas presentes na suspensão são algumas das formas de combater este problema.

Contudo, o uso de surfactantes é prejudicial na viscosidade, nas propriedades térmicas e na estabilidade química dos nanofluidos, pelo que o seu uso deve ser controlado.



*Figura 3.13 - Amostras de nanofluidos de  $Al_2O_3$ , sem qualquer tipo de estabilizador [39]*

#### Custo de produção

A adição de nanopartículas implica um incremento no custo de produção do fluido circulante, sendo a produção de nanopartículas que obriga ao maior dispêndio. Este processo, dependendo do material das nanopartículas, pode envolver processos físicos ou químicos que necessitam de equipamentos sofisticados, elevando bastante o custo de produção dos nanofluidos.

## 3.6 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DOS NANOFLUIDOS

As propriedades termofísicas alteram diretamente o processo de transferência de calor, de forma a avaliar a performance dos nanofluidos será realizada uma avaliação de cada uma das propriedades termofísicas mais importantes dos nanofluidos, evidenciado a sua determinação teórica.

### 3.6.1 CONDUTIVIDADE TÉRMICA

A adição de nanopartículas tem como principal intuito o aumento da condutividade térmica do fluido circulante. No que concerne à determinação deste valor de forma teórica pode-se dividir os modelos existentes em dois grupos: os modelos estáticos e os modelos dinâmicos.

#### Modelos estáticos

Nos modelos estáticos assume-se que a posição da nanopartícula é estática, calculando-se a condutividade térmica em semelhança a de uma mistura, ou seja, a partir da condutividade térmica do fluido, da condutividade térmica das nanopartículas e da sua concentração.

Alguns dos modelos explicativos exemplificam o comportamento do nanofluido assumindo que as nanopartículas são esféricas, como o modelo de Maxwell, Equação 4, aplicado para pequenas concentrações, é um modelo empírico de boa aproximação e simples, sendo um dos primeiros modelos criados e usado como base para outros que sofreram algumas correções [34].

$$K_{nf_{Maxwell}} = K_{fb} \left( \frac{K_p + 2K_{fb} + 2\varphi(K_p - K_{fb})}{K_p + 2K_{fb} - 2\varphi(K_p - K_{fb})} \right) \quad (4)$$

Tal como nas seguintes equações,  $K_p$  representa a condutividade térmica das partículas,  $K_{fb}$  representa a condutividade térmica do fluido base,  $\varphi$  a concentração de nanopartículas e  $K_{nf}$  a condutividade calculada para o nanofluido.

O primeiro modelo capaz de prever a condutividade térmica para sistemas de nanofluidos de partículas não esféricas foi apresentado por Hamilton e Crosser em 1962 [34]. Baseado na equação de Laplace, de forma a incluir o modelo de Maxwell e um fator empírico  $n$ , variável conforme a geometria da partícula suspensa, Equação 5.

$$K_{nf_{H\&C}} = K_{fb} \left( \frac{K_p + (n-1)K_{fb} - \varphi(n-1)(K_{fb} - K_p)}{K_p + (n-1)K_{fb} + \varphi(K_{fb} - K_p)} \right) \quad (5)$$

$$n = \frac{3}{w} \quad (6)$$

Como se pode observar na Equação 5, o modelo de Hamilton e Crosser é dependente da variável  $n$  que é determinado tendo em conta a esfericidade da partícula,  $w$ , como é possível verificar na Equação 6. A esfericidade de uma partícula varia, portanto, com a sua forma, sendo por exemplo, para uma esfera,  $w=3$ , ou para um cilindro,  $w=0.5$ . Contudo, uma vez que é baseado no modelo de Maxwell, este é projetado para sistemas heterogéneos nos quais a interação entre as partículas pode ser negligenciada.

Mais tarde, Xue apresentou um modelo baseado numa relação entre progressões logarítmicas que já considerava a distribuição espacial estocástica das partículas, Equação 7 [34].

$$K_{nf_{Xue}} = \left( \frac{1 - \varphi + 2\varphi \frac{K_p}{K_p - K_{fb}} \ln\left(\frac{K_p + K_{fb}}{2K_f}\right)}{1 - \varphi + 2\varphi \frac{K_{fb}}{K_p - K_{fb}} \ln\left(\frac{K_p + K_{fb}}{2K_f}\right)} \right) \quad (7)$$

## Modelos dinâmicos

Os modelos estáticos ignoravam o efeito do movimento Browniano, o movimento aleatório das partículas no fluido, e apresentavam pouca especificidade na influência que o formato dos clusters têm na variação da condutividade térmica dos nanofluidos, que como visto é significativa. Por esses dois motivos, surgiram os modelos dinâmicos que tal como o nome indica já incluem a influência do movimento das partículas no fluido e, assim, descrevem de forma mais aproximada, e também mais complexa, a condutividade térmica do nanofluido.

O modelo dinâmico de Xuan utiliza como base o modelo estático de Maxwell [34], Equação 4, somando o efeito dinâmico do movimento aleatório das partículas no nanofluido, que é traduzido pela difusão Browniana e da formação de clusters, Equação 8.

$$K_{nf_{Xuan}} = K_{nf_{Maxwell}} + \frac{1}{2K_{fb}} \rho_p c_p \varphi D_B \quad (8)$$

Nesta equação,  $\rho_p$  representa a densidade do material das nanopartículas,  $c_p$  o calor específico do material das nanopartículas,  $\varphi$  a concentração de nanopartículas e  $D_B$  representa a difusão Browniana que é obtida através da Equação 9.

$$D_B = \sqrt{\frac{k_B T}{3\pi\mu_{fb}r_c}} \quad (9)$$

Na Equação 9, pode-se observar as variáveis que influenciam a difusão Browniana e por consequência o efeito dinâmico das partículas no fluido base, para o caso  $k_B$  corresponde à constante de Boltzmann,  $T$  à temperatura do fluido,  $\mu_{fb}$  à viscosidade do fluido base e  $r_c$  ao raio médio dos clusters de nanopartículas

formados. Como se pode constatar, o raio médio dos cluster das nanopartículas é inversamente proporcional à difusão Browniana, Xuan justifica este facto derivado de clusters de menores dimensões se moverem de forma mais rápida e para pontos mais longínquos por unidade de tempo, o que proporciona um transporte de energia mais forte dentro do nanofluido.

Mais tarde, no ano de 2004, Koo e Kleinstreuer [50] desenvolveram um modelo, Equação 10, que considerava a energia cinética das nanopartículas devido ao movimento Browniano, juntamente com os efeitos do tamanho das partículas, fração de volume e dependência da temperatura, bem como das propriedades do fluido base. Este modelo também se baseava no modelo estático de Maxwell em conjunto com a adição da parcela do ganho térmico dinâmico.

$$K_{nf_{K\&K}} = K_{nf_{Maxwell}} + \frac{5 \times 10^4}{K_{fb}} \beta(\varphi) \rho_{fb} c p_{fb} f(T, \varphi) \sqrt{\frac{k_B T}{\rho_p d_p}} \quad (10)$$

Na Equação 10 é possível observar a presença de duas funções,  $f$  e  $\beta$ , as quais são obtidas através de resultados experimentais que refletem a influencia dos parâmetros referidos no parágrafo anterior.

A função  $f$ , Equação 11, função fatorial, descreve o efeito da condutividade térmica das partículas tendo em conta o tipo de partículas, a concentração, a temperatura e as propriedades do fluido base. No entanto, uma vez que várias constantes da equação são obtidas por calculo experimental, a equação pode ser simplificada. Deste modo, a função fatorial tem simplesmente em conta o efeito da temperatura e da concentração pois estes dois parâmetros são os de maior relevo.

$$f(T, \varphi) = (-6.04\varphi + 0.4705)T + (1722.3\varphi - 134.63) \quad (11)$$

A função  $\beta$  representada pela Equação 12, refere-se apenas o efeito da fração volúmica, assumindo que as restantes dependências dos parâmetros estão cobertas pela função  $f$ .

$$\beta(\varphi) = 0.0017(100\varphi)^{-0.084} \quad (12)$$

De forma simplificada, o comportamento dos diferentes modelos encontra-se esquematizada graficamente na Figura 3.14, associando algum erro devido a simplificações de cálculo, como o tipo de partículas, temperatura, existência de clusters e a sua dimensão procurando-se ajustar estes valores com algum senso.

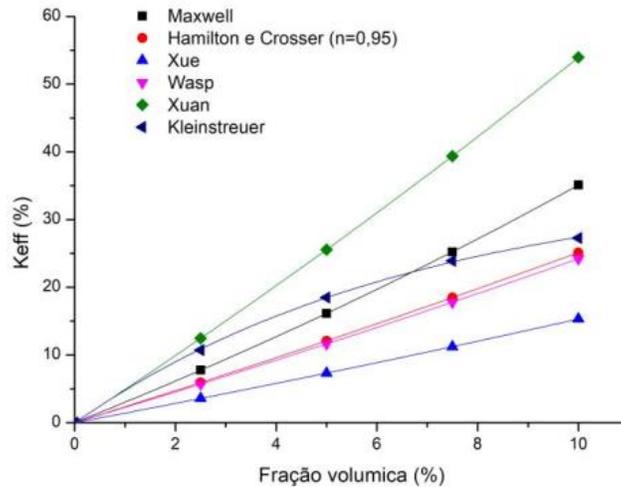


Figura 3.14 - Comportamento dos diferentes modelos de previsão da condutividade de um nanofluido em função da fração volúmica [50]

### 3.6.2 MASSA VOLÚMICA

A massa volúmica pode ser calculada por meio de uma média ponderada de propriedades do fluido base e das nanopartículas, Equação 13 [47].

$$\rho_{nf} = \rho_p\varphi + \rho_{fb}(1 - \varphi) \quad (13)$$

### 3.6.3 CALOR ESPECÍFICO

O calor específico de um nanofluido pode variar tendo em conta vários fatores, como é exemplo o fluido base, concentração das nanopartículas e seu diâmetro e utilização de dispersantes. Contudo, muitos dos estudos realizados têm revelado várias contradições [51], por esse motivo o modelo apresentado, através da Equação 14, é apenas uma média ponderada das propriedades do fluido base e das nanopartículas [47]:

$$cp_{nf} = \frac{cp_p \rho_p \varphi + cp_{fb} \rho_{fb} (1 - \varphi)}{\rho_{nf}} \quad (14)$$

### 3.6.4 VISCOSIDADE

O cálculo da viscosidade de um nanofluido pode-se equiparar-se ao efeito na viscosidade de um solvente por adição de partículas de soluto. O modelo base, que foi sofrendo alterações ao longo do tempo, é denominado de modelo de Einstein [52], que em 1906, estudou precisamente o fenómeno de difusão de partículas de um soluto numa solução diluída, apresentado na Equação 15.

$$\mu_{nf} = (1 + \varepsilon\varphi)\mu_{fb} \quad (15)$$

Na Equação 15,  $\mu_{nf}$  e  $\mu_{fb}$  correspondem às viscosidades do nanofluido e do fluido base respetivamente,  $\varphi$  corresponde à concentração de nanopartículas utilizadas e  $\varepsilon$  a um fator associado ao tipo de partículos do soluto. Quando consideradas esferas rígidas, desprezando as interações entre si e com dimensões muito maiores que as partículas do solvente, utiliza-se o fator de 2.5, tornando a Equação válida para um determinado intervalo de concentrações, apresentado na Equação 16.

$$\mu_{nf} = (1 + 2.5\varphi)\mu_{fb}, \quad 0 < \varphi < 10 \% \quad (16)$$

Contudo, a Equação 16 desprezava a interação entre partículas, o que já foi visto que têm um papel preponderante, por esse motivo Batchelor [53] propôs uma nova equação que já introduzia as interações entre partículas representando este efeito através de uma dependência quadrática variável de acordo com a fração volúmica, Equação 17.

$$\mu_{nf} = (1 + 2.5\varphi + 6.2\varphi^2)\mu_{fb}, \quad 0 < \varphi < 10 \% \quad (17)$$

Outro modelo foi apresentado por Mooney [54] apresentando o aumento da viscosidade em função de uma progressão exponencial, reportado na Equação 18:

$$\mu_{nf} = \mu_{fb} e^{\frac{2.5\varphi}{1-k\varphi}}, \quad 0 < \varphi < 10 \% \quad (18)$$

O fator  $k$  introduzido na Equação 18 é denominado por *self-crowding effect*, este valor será tanto maior quanto maior for a concentração de nanopartículas, visto que se encontra na equação de forma a representar a interação entre partículas, tendo sido estimado que pertenceria à gama  $1.35 < k < 1.9$ . Como o movimento das partículas é dificultado pela existência de um maior número de partículas vizinhas, para valores mais elevados o seu comportamento aproxima-se a um sólido.

### 3.7 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DE UMA MISTURA

Uma vez que o estudo também recairá sobre vários fluidos circulantes com diferente percentagem de propileno glicol com água, torna-se imprescindível a

demonstração teórica das propriedades termofísicas de uma mistura para que posteriormente possam ser calculadas.

### 3.7.1 CONDUTIVIDADE TÉRMICA

A condutividade térmica de maior parte das misturas de líquidos é normalmente menor que aquela prevista segundo modelos que têm por base tanto a fração mássica como a fração molar de cada líquido [55].

Ao longo do tempo, várias correlações foram propostas para o cálculo desta propriedade termofísica, contudo apresenta-se apenas a equação utilizada posteriormente. A equação de Fillippov [56] encontra-se representada na equação 19.

$$k_m = w_1 k_1 + w_2 k_2 - 0,72 w_1 w_2 (k_2 - k_1) \quad (19)$$

Na equação 19,  $w_1$  e  $w_2$  representam a fração mássica de cada líquido,  $k_1$  e  $k_2$  são as condutividades térmicas de cada líquido no estado puro sendo que  $k_2 > k_1$ .

### 3.7.2 CALOR ESPECÍFICO

Para o cálculo do calor específico de uma mistura realiza-se a media ponderada do calor específico de cada um dos líquidos, apresentado na equação 20.

$$Cp_m = w_1 Cp_1 + w_2 Cp_2 \quad (20)$$

Para o caso,  $Cp_m$  representa o calor específico da mistura, assim como  $Cp_1$  e  $Cp_2$  representam o calor específico de cada um dos líquidos,  $w_1$  e  $w_2$  representam a fração mássica de cada líquido.

### 3.7.3 VISCOSIDADE

O cálculo da viscosidade advém da equação clássica de Grunberg-Nissan (1949) [57], equação 21.

$$\ln \mu_m = \sum_{i=1}^N x_i \ln \mu_i \quad (21)$$

Nesta equação,  $\mu_m$  representa a viscosidade da mistura,  $x_i$  a fração molar do líquido  $i$  na mistura e  $\mu_i$  a viscosidade do líquido  $i$  num escoamento como líquido puro.

## 4. ESTUDO DO AQUECIMENTO DO FLUIDO CIRCULANTE NO SISTEMA SOLAR DESENVOLVIDO

De modo a estudar o sistema solar desenvolvido e vários tipos de fluidos circulantes diferentes, realizaram-se várias experiências com o intuito de testar o aquecimento do fluido em função do caudal, e assim avaliar o melhor caudal a utilizar para o sistema em questão e a percentagem de mistura de propileno glicol com água mais eficiente.

### 4.1 MATERIAIS E MÉTODOS

O sistema solar térmico, apresentado na figura 4.1, utilizado nos ensaios experimentais, é constituído essencialmente por três componentes: o coletor solar; a bomba de água e o holofote.



Figura 4.1 - Sistema solar térmico utilizado (1 - Painel solar térmico; 2 - Holofote; 3 – Bomba de água)

### 4.1.1 CONSTRUÇÃO DO COLETOR SOLAR

O coletor solar adquirido era um modelo representativo, pelo que lhe faltavam alguns componentes essenciais para o funcionamento correto e habitual de um coletor solar. O coletor da marca *Schuco* apresentava as seguintes dimensões máximas: 600x470x85 mm (LxHxW), como apresentado na figura 4.2.



*Figura 4.2 - Coletor solar Schuco utilizado no projeto*

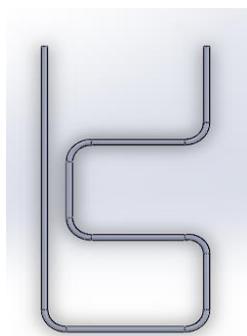
Começou-se por abrir o mesmo de forma a poder ser manuseado livremente, serrando-se os esquadros incorporados nos cantos da caixilharia e abrindo-se um dos lados. Como é visível na figura 4.3, o coletor possuía dois paralelepípedos colados que faziam o distanciamento entre as duas chapas, a chapa absorvedora e a chapa traseira, que sela o coletor. Uma vez que se verificou que o coletor carecia da serpentina, concluiu-se que seria necessário abri-lo por completo.



*Figura 4.3 - Coletor solar Schuco com o topo superior aberto*

Após desmontado o coletor procedeu-se a construção da serpentina, na qual se utilizou tubo de cobre recozido com um diâmetro externo de 10mm e 1mm de espessura. Para o sucedido existiam duas ferramentas diferentes: *Rothenberger Tube Bender Maxi* e *Virax 250L*, que possuíam o mesmo raio de curvatura máximo (35 mm), mas ângulos de dobragem diferentes (90° e 180° respectivamente).

Sabendo que a distância entre furos, que servem de entrada e saída à serpentina, era de 260 mm e tendo em conta as limitações das ferramenta de dobragem realizaram-se os esboços da serpentina através do programa de desenho e modelação assistida *SolidWorks 2017*, tendo sempre em vista a maximização da área de transferência de calor, a área externa do tubo. Nas figuras 4.4 e 4.5 apresentam-se as respectivas serpentinas.

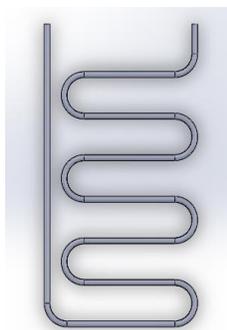


(a)



(b)

Figura 4.4 - Serpentina 1 (a) esboço (b) real



(a)



(b)

Figura 4.5 - Serpentina 2 (a) esboço (b) real

A serpentina 1 apresenta um comprimento total de 1635 mm e uma área externa de 51365,04 mm<sup>2</sup> e a serpentina 2 apresenta 2470 mm de comprimento e uma área externa de 77597,34 mm<sup>2</sup>, sendo que se optou por essa, dada a maior área externa do tubo.

Uma vez concebidas as serpentinas, procedeu-se à montagem do coletor. Voltaram-se a unir as duas chapas, a chapa absorvedora e a chapa traseira que sela o coletor por intermédio de quatro paralelepípedos aparafusados a chapa traseira e colados com a chapa absorvedora, como é exemplo a figura 4.6.



*Figura 4.6 - Ligação feita para unir a chapa absorvedora à chapa traseira*

Depois de unidas as duas chapas, procedeu-se a união das quatro laterais do coletor solar, já incluindo a serpentina como se apresenta na figura 4.7.



*Figura 4.7 - Montagem do coletor solar Schuco*

Na figura 4.8 podem-se ver as diferentes camadas do coletor solar, faltando ainda o isolamento térmico, que viria a ser colocado mais tarde, na parte traseira

do coletor. Como é visível na figura foi colocado uma placa de XPS que impede a serpentina de estar em contacto com a chapa traseira e, por consequência, de perder calor por condução para a mesma.

De notar que, a serpentina fica entre as duas chapas de alumínio, sendo que a luz incide diretamente na chapa absorvedora, que absorve calor por radiação e transmite esse mesmo calor para a serpentina por intermédio de convecção.

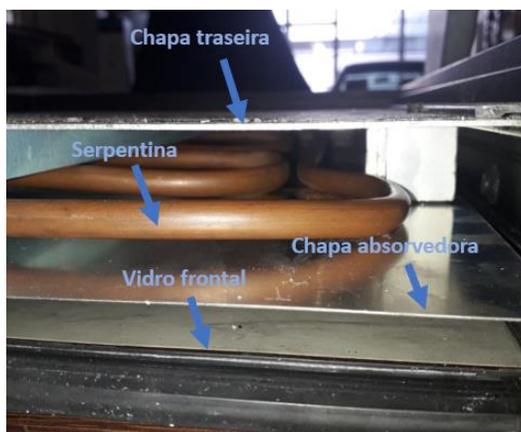


Figura 4.8 - Coletor solar por camadas

Por final colou-se a chapa traseira uma placa de lã de rocha de 530x410x30 mm (LxWxH).



Figura 4.9 - Placa de lã de rocha utilizada

#### 4.1.2 HOLOFOTE

O holofote utilizado para realizar o “papel do sol”, ou seja, ser a fonte de calor para o aquecimento do fluido através da sua radiação, é um holofote de 1000W. O mesmo foi colocado a uma distância de 1 metro do coletor solar e com um ângulo

de incidência perpendicular ao coletor, admitindo assim que para todos os testes realizados a fonte de calor tem a mesma radiação incidente.

### 4.1.3 BOMBA DE ÁGUA

Para realizar a circulação do fluido de aquecimento utilizou-se a bomba JECOD DCP 1200, apresentada na figura 4.10. Uma bomba de retorno de alto desempenho ultrassilenciosa, com controlador que opera de maneira confiável. O controle de velocidade é reforçado por sistemas elétricos inovadores que proporcionam cerca de 65% de economia de energia, permite dez níveis diferentes de caudal que foram previamente avaliados, sendo apresentados de seguida. De referenciar que as bombas Jecod DCP não contêm elementos de cobre e são reforçadas com um eixo de cerâmica resistente para proporcionar longa vida útil e resistência à corrosão.



*Figura 4.10 - Bomba JECOD DCP 1200*

De forma a avaliar os diferentes níveis de caudal da bomba encheu-se um recipiente com 1,75 litros de volume e cronometrou-se o tempo de enchimento cinco vezes para cada nível, realizando posteriormente a média dos caudais, obedecendo a equação 22 que permite o cálculo do caudal de enchimento  $Q_e$ , através da divisão entre o volume de enchimento  $V_e$  e o tempo de enchimento  $t_e$ .

$$Q_e = \frac{V_e}{t_e} \quad (22)$$

Após realizadas as medições tiraram-se os valores de caudal para os diferentes níveis, apresentando-se na Figura 4.11 as medições e o respetivo gráfico de calibração.

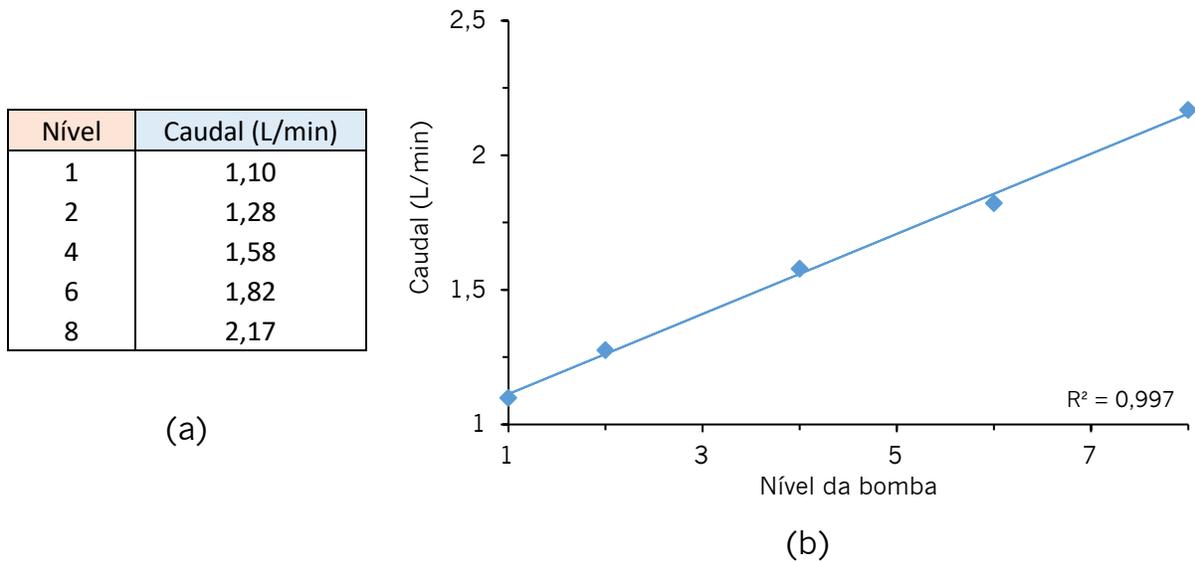


Figura 4.11 - Valores medidos para o caudal da bomba (a) e respetivo gráfico de calibração (b)

## 4.2 ESTUDO DO AQUECIMENTO DO FLUIDO CIRCULANTE ÁGUA SEM RESERVATÓRIO

Com o objetivo de estudar o aquecimento do fluido circulante água no sistema solar desenvolvido para os diferentes caudais da bomba começou-se por idealizar um sistema de água contínuo, ou seja, sem reservatório/acumulação de água, em que fosse possível analisar o aquecimento instantâneo do sistema solar, sendo que para medir as temperaturas utilizaram-se três termómetros, previamente calibrados.

O sistema solar contemplado, esquematizado na figura 4.12, apresenta uma entrada de água em que existe uma medição de temperatura, T1, de seguida essa água é bombeada por intermédio da bomba de água e introduzida no coletor. À

saída do coletor existe outra medição de temperatura, T3, antes da água ser despejada, de forma a calcular-se a diferença de temperatura entre T3 e T1, obtendo-se a taxa de aquecimento. O aquecimento é provocado apenas pelo holofote de 1000W e existe uma medição da temperatura interna do coletor solar na sua caixa de ar onde se encontra a serpentina, entre a placa absorvedora e a placa traseira.

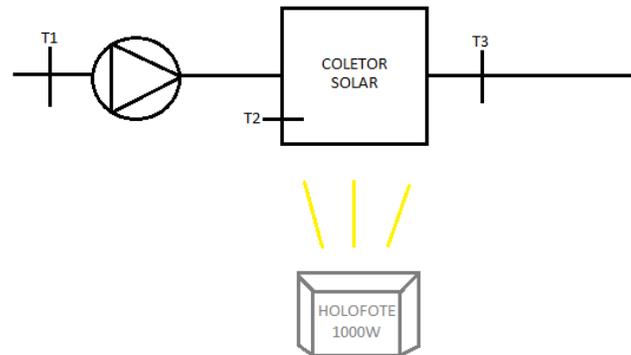


Figura 4.12 - Esquema do sistema solar 1

Através da medição da temperatura T2 e de modo a vencer-se a “inércia” do aquecimento do coletor solar, começou-se por aquecer o coletor até uma temperatura de 55°C antes de realizar qualquer circulação do fluido, avaliando-se assim a taxa de aquecimento do fluido circulante água em função do nível selecionado da bomba para um tempo de 60 minutos.

### 4.3 ESTUDO DO AQUECIMENTO DO FLUIDO CIRCULANTE ÁGUA COM RESERVATÓRIO

Outro estudo realizado com o fluido circulante água, de forma a avaliar o aquecimento para os diferentes caudais da bomba com o objetivo de entender qual seria o melhor a utilizar-se no sistema solar em questão, foi o estudo do

aquecimento de um volume de água de 3 litros em que é avaliado a aquecimento deste volume de água ao longo de 320 minutos aquecido através da radiação do holofote de 1000W, o sistema encontra-se esquematizado na figura 4.13.

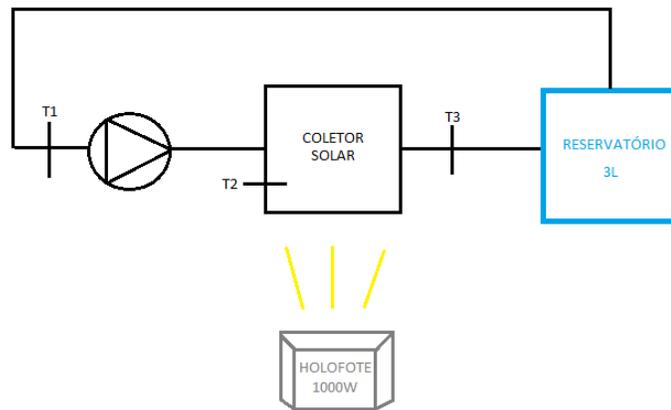


Figura 4.13 - Esquema do sistema solar 2

O sistema idealizado contém, tal como o sistema solar 1, três medições de temperatura: uma na entrada de água, T1; outro na saída, T2; e outro no interior do coletor, T3, na caixa de ar onde se encontra serpentina, entre a placa absorvedora e a placa traseira. A bomba de água utilizada é a mesma, JECOD 1200, contudo neste caso o sistema é fisicamente fechado, notando que a água em circulação é sempre a mesma e avalia-se o seu aquecimento ao longo do tempo para os diferentes caudais da bomba.

Além disso, é de referenciar que nas experiências realizadas posteriormente foi optado por se utilizar o menor nível da bomba, o nível 1 correspondente a um caudal volumétrico de 1,10 L/min, porque como não foi encontrada um caudal ideal para este sistema solar optou-se pelo caudal que tinha um dispêndio de energia menor.

## 4.4 ESTUDO DO AQUECIMENTO DO FLUIDO CIRCULANTE ÁGUA E PROPILENO GLICOL COM RESERVATÓRIO

Seguidamente, realizou-se um estudo de forma a avaliar a influência que teria a introdução de glicol no fluido circulante água para diferentes percentagens.

Adquiriu-se o fluido térmico através da empresa VIMASOL, denominado de Therfluid 100Y. É um fluido térmico anticongelante e anticorrosivo higroscópico praticamente inodoro à base de glicol de grau alimentar (não prejudicial à saúde), é um líquido límpido de aspeto amarelo fluorescente, é completamente solúvel em água, tem um pH entre 8 e 9, uma massa volúmica entre 1,020 e 1,030 kg/m<sup>3</sup> e é biodegradável. O Therfluid 100Y é utilizado em sistemas solares e bombas de calor ou em circuitos de refrigeração e de aquecimento na indústria alimentar.

Como já foi referido anteriormente, o principal motivo de adição de glicol para criar uma mistura com água é diminuir a temperatura de solidificação do fluido circulante nos coletores solares térmicos. Desta forma, torna-se imprescindível avaliar a influência que o fluido térmico Therfluid 100Y tem neste aspeto consoante a percentagem de glicol na mistura, como se verifica na tabela 4.1.

*Tabela 4.1 - Variação da temperatura de solidificação para diferentes concentrações de Therfluid 100Y*

<b>% Concentração de Therfluid 100 Y</b>	<b>Temperatura de solidificação (°C)</b>
<b>50%</b>	-32
<b>40%</b>	-21
<b>30%</b>	-14
<b>25%</b>	-10

Uma vez avaliada a influência das diferentes concentrações de glicol na temperatura de solidificação, decidiu-se avaliar a interferência que teria a introdução de glicol no aquecimento do fluido circulante ao longo do tempo.

Para tal, começou-se por estudar a variação criada no calor específico pelas diferentes concentrações, porque como esta grandeza física nos indica a relação entre a quantidade calor fornecida a um corpo e a variação de temperatura do mesmo, tornar-se-á possível ter uma percepção de qual percentagem terá o maior aumento de temperatura para um fornecimento de calor constante.

Uma vez que carecia de informação a ficha técnica do Therfluid 100Y para este estudo, através do comerciante identificou-se que o fluido térmico em questão será um produto que na sua composição tem monopropileno glicol de grau técnico ou alimentar e um outro produto que é um inibidor de corrosão de metais constituído por Benzoato de Sódio, TEA (Trietanolamina), Tolytriazole de sódio e Borax. Tornando-se impossível definir as propriedades térmicas deste fluido, admitiu-se para todo o projeto que seriam utilizadas as propriedades do Propileno glicol.

Assim, apresenta-se a tabela 4.2 que demonstram a variação do calor específico em função da concentração de Propileno glicol, realizada através da equação 23 [58].

$$Cp_m = \left(\frac{m_1}{m_T}\right) Cp_1 + \left(\frac{m_2}{m_T}\right) Cp_2 \quad (23)$$

Esta equação permite calcular o calor específico de uma mistura,  $Cp_m$ , tendo em conta o calor específico de cada componente, neste caso água e propileno glicol,  $Cp_1$  e  $Cp_2$  e a massa de cada componente,  $m_1$  e  $m_2$ , em função da massa total,  $m_T$ .

Tabela 4.2 - Variação do calor específico em função da concentração de propileno glicol na mistura

<b>% Concentração de Propileno glicol</b>	<b>Calor específico – C (J/kg.K)</b>
<b>50%</b>	3342
<b>40%</b>	3508
<b>30%</b>	3674
<b>25%</b>	3758
<b>0%</b>	4187

Como é evidenciado na tabela, o calor específico diminui com o aumento percentual de propileno glicol na mistura com água. Desta forma, será expectável que quanto maior a percentagem de glicol na mistura, maior será a temperatura atingida pelo fluido circulante para um fornecimento de calor constante.

Com o intuito de comprovar este estudo, realizaram-se algumas experiências seguindo o esquema do sistema solar 2, apresentado na figura 4.14.

Tal como no estudo do aquecimento com água e com um reservatório, este sistema solar é acionado por intermédio da bomba JECOD 1200, apresenta três medições de temperatura, T1 e T2 que medem a temperatura do fluido circulante, à entrada e à saída respetivamente e T3 que mede a temperatura da caixa de ar do coletor solar. A diferença desta experiência para a anterior é que desta vez o fluido circulante, com volume de 3L, é uma mistura de água com Therfluid 100Y para as percentagens de 50%, 40%, 30%, 25% e 0%.

Cada teste realizou-se para um período de 320 minutos, em que se registaram as medições das temperaturas de 20 em 20 minutos e todos os testes se realizaram no nível mínimo da bomba, ou seja, com um caudal volúmico de 1,10 L/min.

## **5. ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR DE NANOFLUIDOS**

### **5.1 ESTUDO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE NANOFLUIDOS**

Um dos grandes desafios dos nanofluidos é o incremento da condutividade térmica face ao fluido base, contudo a estimativa realizada de forma teórica, abordada no capítulo 3.5, assume apenas o valor da condutividade térmica do fluido base e do material das nanopartículas. Porém, existem outros parâmetros tais como a temperatura do fluido base, o movimento Browniano, o fator de forma, o tamanho de partículas, entre outros, que fazem variar de forma não linear e imprevisível a condutividade térmica, criando assim a necessidade de avaliar esta propriedade de forma experimental.

O estudo experimental da condutividade dos líquidos, em contraste com os sólidos, necessita de alguns parâmetros definidos para que a medição seja realizada de forma correta. A supressão de correntes de convecção e a homogeneidade são dois fatores importantíssimos, sendo que no caso do segundo os nanofluidos apresentam em particular alguma dificuldade dada a sedimentação ocorrente por natureza [34]. Todavia, estes fatores apresentados não são impeditivos de uma correta medição desde que se realize uma medição num intervalo de tempo curto, suficientemente rápido para evitar a formação de correntes convectivas, o que é também vantajoso para a homogeneidade sendo que ainda não ocorre sedimentação.

Considerando os pressupostos prévios, existem algumas técnicas capazes de levar a cabo a medição de fluidos de forma correta. Sendo que para o presente

estudo utilizou-se o método de Fonte Plana Transiente (FPT) (*Hot-Disk Transient Plane Source*) [69].

### 5.1.1 MÉTODO DE FONTE PLANA TRANSIENTE (FPT)

De forma a medir efetivamente a condutividade térmica através deste método, a FPT, constituída por um sensor de temperatura e uma fonte de calor, é imersa verticalmente num recipiente contendo o fluido em estudo, sendo que este recipiente está colocado num banho a temperatura constante. De seguida, fornece-se uma corrente elétrica à FPT, regista-se o aumento de temperatura causado pela mesma através do sensor de temperatura presente na FPT. Para terminar, é calculada através da corrente elétrica e da variação de temperatura, a condução de calor, por intermédio da Lei de Fourier.

De forma a suprimir a convecção natural, realiza-se o teste num tempo muito curto, na ordem dos segundos. Além disso, é de notar que o banho termostático é utilizado para que se garanta a uniformidade e estabilidade da temperatura [59].

Na figura 5.1 encontra-se esquematizada uma instalação referente à técnica da fonte plana transiente.

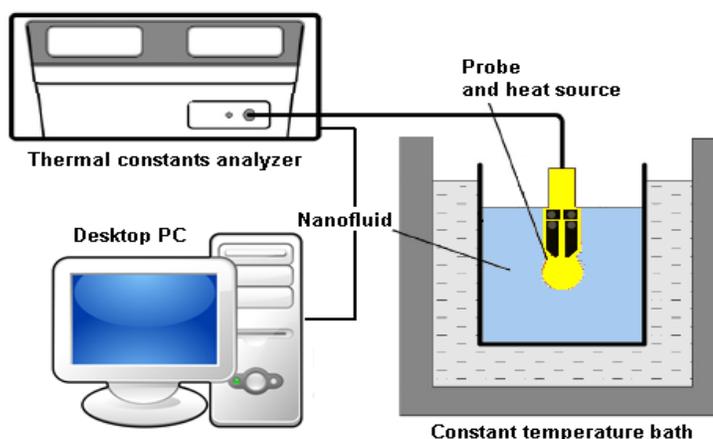


Figura 5.1 - Esquema da instalação para medição de condutividade térmica por método Fonte Plana Transiente [59]

Para o estudo realizou-se a medição da condutividade térmica da água destilada, para servir como ponto de referência, e dos nanofluidos de fração volumétrica de 0,01%, 0,05% e 0,1% de alumina e água destilada como fluido base [69].

## 5.2 ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR À MILIESCALA COM NANOFLUIDOS

De modo a estudar-se de forma mais aprofundada a transferência de calor com diferentes fluidos circulantes, elaborou-se um sistema de aquecimento para um escoamento.

### 5.2.1 MATERIAIS E MÉTODOS

O sistema, apresentado em esquema na figura 5.2 e na prática na figura 5.3, é constituído por um tubo de aço, de secção circular, que é aquecido na sua parte inferior por intermédio de uma resistência térmica controlada por uma fonte de aquecimento (Velleman LABPS6005SM) e uma bomba peristáltica (Gilson Miniplus 3) que permite o escoamento do fluido circulante.

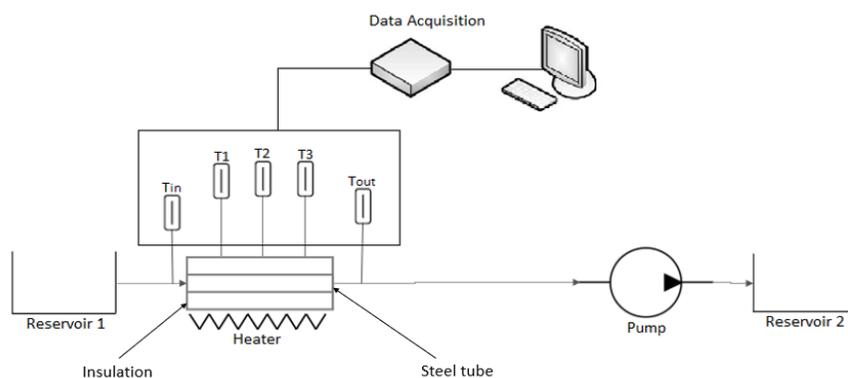


Figura 5.2 - Esquema da instalação utilizada para realizar os ensaios experimentais



Figura 5.3 - Instalação utilizada para realizar os ensaios experimentais

As dimensões do tubo no qual ocorre o estudo, e posteriores medições de temperatura, apresentam-se na seguinte tabela.

Tabela 5.1 - Dimensões do tubo utilizados nos ensaios experimentais

<b>DIMENSÕES DO TUBO</b>	
DIÂMETRO INTERNO	$5,40 \pm 0,05$ mm
DIÂMETRO EXTERNO	$6,00 \pm 0,05$ mm
COMPRIMENTO	$150,0 \pm 0,5$ mm

## **FLUIDOS UTILIZADOS**

Para o estudo realizado utilizaram-se diferentes fluidos de modo a avaliar a influência da introdução de glicol no fluido base água destilada e a incorporação de nanopartículas em diferentes fluidos circulantes com o intuito de analisar a melhoria no ganho do processo de convecção. Para tal, utilizaram-se os seguintes fluido circulantes (tabela 5.2) com as seguintes características a 20°C.

Tabela 5.2 - Fluidos utilizados e suas propriedades termofísicas

Nome	Condutividade térmica (W/m.K)	Calor específico (J/kg.K)	Viscosidade (Pa.s)	Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )
Água destilada	0,603	4182,5	0,00101	1001,6
PPG25W75	0,445	3753,7	0,00145	1010,2
PPGW50	0,326	3332,1	0,00234	1018,8
PPG75W25	0,246	2917,6	0,00571	1027,1
PPG	0,201	2510,0	0,0550	1036,0
Nanofluido água + 0,05% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,604	4176,4	0,00101	1002,9
Nanofluido água + 0,1% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,605	4170,3	0,00101	1004,2
Nanofluido água + 0,2% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,606	4158,2	0,00102	1006,8
Nanofluido PPGW50 + 0,05% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,327	3327,3	0,0023	1020,2
Nanofluido PPGW50 + 0,1% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,327	3322,4	0,0023	1021,7
Nanofluido PGW50 + 0,2% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,328	3312,7	0,0024	1024,6
Nanopartículas Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	36,0	779,0	.	3900,0

As propriedades da água foram retiradas das tabelas presentes em Bergman et al. 2007 [60] para a temperatura de 295 K. No caso do propileno glicol (PPG), as propriedades foram obtidas através do artigo de Suleiman Akilu et al. 2019 [58]. Para as misturas de água e propileno glicol utilizaram-se modelos teóricos, mais propriamente as equações 4, 13, 14 e 17.

É de referenciar que a percentagem de nanopartículas presentes no nanofluido se encontram sob a forma de fração volumétrica e não fração mássica.

### **CALIBRAÇÃO DA BOMBA PERISTÁLTICA**

O primeiro procedimento consistiu na calibração da bomba peristáltica (Gilson Miniplus 3). Em primeiro lugar, avaliou-se a temperatura a que o processo ocorre através de um termómetro. De seguida, colocou-se a água num reservatório e ligou-se a bomba para que todas as bolhas de ar fossem expelidas pela mesma. Uma vez que a água completava todo o circuito, desde o reservatório de entrada até ao reservatório de saída, tarou-se o recipiente que seria mais tarde cheio de água, durante um intervalo de um minuto, para que se pudesse medir com precisão a massa de água enchida no decorrer de cada medição. Posteriormente, definiu-se um valor na escala da bomba, e procurou-se iniciar a bomba ao mesmo tempo que o cronómetro. No final de um minuto de funcionamento da bomba retirou-se a mangueira de enchimento do reservatório e pesou-se a massa de água. Por fim, retirou-se o conteúdo do reservatório, e repetiu-se o processo três vezes para cada caudal.

Uma vez concluído o processo, realizou-se uma média das três medições e calculou-se o volume de enchimento de cada nível da bomba, através da equação 24.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (=) \quad v = \frac{m}{\rho} \quad (24)$$

Através da equação anterior calculou-se o volume,  $v$ , visto que a massa,  $m$ , foi registada pela balança para cada medição e a massa volúmica,  $\rho$ , é tabelada em função da temperatura registada a que água se encontrava durante o processo.

Finalmente, realizou-se o gráfico do caudal da bomba versus o nível da bomba apresentado na figura 5.4. De notar que, de forma a obter um gráfico plausível registaram-se seis níveis da bomba diferentes.

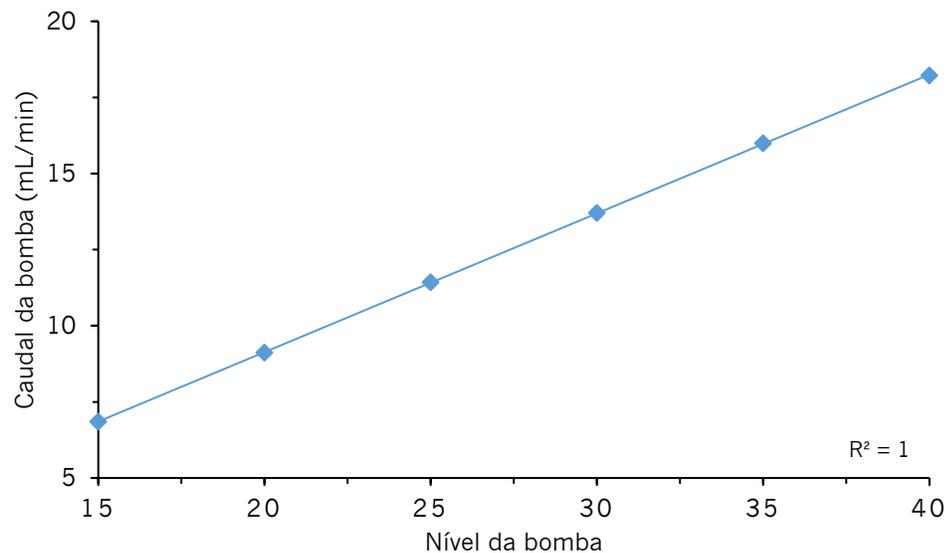


Figura 5.4 - Gráfico de calibração da bomba peristáltica

Uma vez obtida a equação da reta do caudal da bomba correspondente a cada nível tornou-se possível definir caudais exatos para o processo.

### 5.2.2 ANÁLISE TEÓRICA AO COEFICIENTE DE CALOR POR CONVECÇÃO

Com o intuito de se obter uma referência para o estudo experimental, começou-se por realizar uma abordagem teórica, visto ser apenas necessário ter conhecimento das propriedades do fluido em questão, das dimensões do tubo de escoamento, do regime de escoamento e do caudal utilizado.

Em primeira instância, avaliou-se o tipo de escoamento em questão, para que as equações posteriores fossem coerentes, através do número de Reynolds determinado pela equação 25.

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} \quad (25)$$

Na equação anterior,  $\rho$  representa a massa específica,  $U$  a velocidade do escoamento no tubo,  $D$  o diâmetro interno do tubo e  $\mu$  a viscosidade dinâmica do fluido. Este valor foi estimado para todos os ensaios realizados sendo que o mais elevado obtido foi de 64,42. Conclui-se que todos os escoamentos são em regime laminar (tabela 5.3).

Tabela 5.3 - Tipo de regime de escoamento em função do número de Reynolds [60]

Número de Reynolds	Regime de escoamento
Re < 2300	Laminar
2300 < Re < 4000	Misto
Re > 4000	Turbulento

Uma vez concluído que todos os ensaios se realizaram sob o escoamento laminar, calculou-se o número de Prandtl através da equação 26, valor adimensional que ajuda a descrever o escoamento, expressando a relação entre a difusão de quantidade de movimento e a difusão de quantidade de calor dentro do próprio fluido durante o escoamento.

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (26)$$

Nesta equação, em conformidade com as anteriores,  $\mu$  simboliza a viscosidade dinâmica do fluido,  $C_p$  o calor específico e  $k$  a condutividade térmica.

De referir, que todos os valores das equações 25 e 26 são relativos ao fluido e não ao tubo, uma vez que retratam o escoamento.

Após determinados os dois valores adimensionais que descrevem o escoamento torna-se possível determinar o número de Nusselt. De modo a determinar-se este valor pode recorrer-se a correlações obtidas experimentalmente como é o caso da equação 27, definida por Shah and London em 1978 [61], utilizada para escoamento hidrodinamicamente desenvolvidos e com fluxo de calor de parede constante.

$$Nu = \begin{cases} 1,953(Re Pr \frac{D}{L})^{1/3} & ; (Re Pr \frac{D}{L}) \geq 33,3 \\ 4,364 + 0,0722 (Re Pr \frac{D}{L}) & ; (Re Pr \frac{D}{L}) < 33,3 \end{cases} \quad (27)$$

Para os ensaios em questão é sempre utilizada a parcela inferior, visto que o valor mais elevado de  $(Re Pr \frac{D}{L})$  é de 27,87.

Outra hipótese muito recorrente para estimar o número de Nusselt é através de valores tabelados, como demonstra a figura 5.5, Kays e Crawford 1993 [60]. Para o caso, a secção transversal do tubo é circular e a fonte de aquecimento permite a regulação do fluxo de calor entre a resistência térmica e o tubo e não a regulação da temperatura. Seleciona-se, então, pela opção de fluxo de calor constante pois durante cada teste não houve alteração da tensão ou intensidade da corrente na fonte de aquecimento.

Cross Section	$\frac{b}{a}$	$Nu_D \equiv \frac{hD_h}{k}$		$fRe_{D_h}$
		(Uniform $q_w''$ )	(Uniform $T_w$ )	
	—	4.36	3.66	64
	1.0	3.61	2.98	57
	1.43	3.73	3.08	59
	2.0	4.12	3.39	62

Figura 5.5 - Número de Nusselt para escoamentos laminares desenvolvidos [60]

Como se pode observar na figura 5.6, o número de Nusselt difere bastante para os dois critérios, verificando-se que à medida que o caudal aumenta o número de Nusselt aumenta, seguindo o critério de Shah and London. Além disso, verifica-se que a introdução de propileno glicol na mistura implica um aumento do número de Nusselt, segundo o mesmo critério.

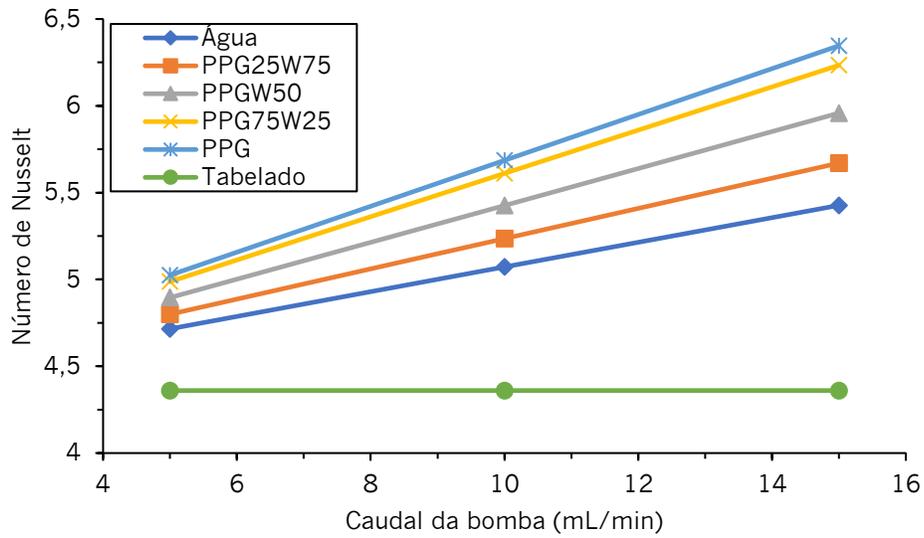


Figura 5.6 - Comparação do número de Nusselt em função do caudal para dois métodos diferentes

Para os ensaios realizados foram tidos em conta ambos os métodos, sendo que neste último método os valores tabelados apenas dependem da geometria, enquanto que os valores calculados segundo a equação 27 dependem diretamente do tipo de escoamento [61].

De acordo com a análise feita para escoamentos laminares em tubos circulares [62], o número de Nusselt pode ser relacionado, seguindo a equação 28, com o coeficiente de convecção,  $h$ , com a condutividade térmica,  $k$ , e com o diâmetro interno do tubo,  $D$ .

$$Nu = \frac{hD}{k} (=) h = \frac{Nu k}{D} \quad (28)$$

Deste modo é possível determinar o coeficiente de transferência de calor por convecção teórico para qualquer dos ensaios realizados. Contudo, as propriedades termofísicas dos nanofluidos têm de ser determinadas anteriormente, de acordo com as respetivas formulações.

Uma vez estimado o número de Nusselt, neste caso utilizado o valor tabelado constante para todos os ensaios, e utilizando um diâmetro de tubo constante para o escoamento, o valor teórico do coeficiente de convecção varia apenas com o valor da condutividade térmica de cada fluido. Desta forma, apresenta-se a tabela 5.4 com os resultados teóricos estimados.

Tabela 5.4 - Coeficiente de convecção teórico para os diferentes fluidos circulantes

Fluido circulante	Coeficiente de convecção teórico – h (W/m <sup>2</sup> .K)
Água	525,82
PPG25W75	387,34
PPGW50	283,93
PPG75W25	213,72
PPG	174,92
Nanofluido água + 0,05% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	526,57
Nanofluido água + 0,1% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	527,32
Nanofluido água + 0,2% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	528,82
Nanofluido PPGW50 + 0,05% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	284,92
Nanofluido PPGW50 + 0,1% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	285,34
Nanofluido PPGW50 + 0,2% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	286,17

### 5.2.3 ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COEFICIENTE DE CALOR POR CONVECÇÃO

De forma a avaliar a transferência de calor do fluido circulante, foram colocados dois termopares, um a entrada do tubo e outro a saída do mesmo, com o intuito de se avaliar a energia térmica transferida da resistência térmica para o fluido (calor útil) de cada ensaio segundo a equação 29.

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p \Delta T \quad (29)$$

Para o caso,  $\dot{Q}$  representa o calor útil por unidade de tempo (W),  $\dot{m}$  representa o caudal em kg/s,  $C_p$  simboliza o calor específico em J/kg.K e  $\Delta T$  traduz a diferença de temperatura em K, calculada através das temperaturas medidas, ou seja, temperatura de saída a subtrair pela temperatura de entrada.

Uma vez calculada a energia transferida para o fluido circulante, é necessário calcular a temperatura interna da parede do tubo. Para esse efeito, e devido à impossibilidade de colocar diretamente na parte interna do tubo os termopares, foram colocados três termopares na parte externa do tubo, na posição 1 mm, 5 mm e 9,5 mm medindo a partir do início da parte aquecida do tubo, como é visível na figura 5.7.



*Figura 5.7 - Posicionamento dos termopares no tubo*

Porém, como necessitamos da temperatura interna do tubo, utilizamos uma derivação da equação de Fourier para tubos cilíndricos, que permite estimar o calor transferido por condução unidirecional em regime permanente, equação 30.

$$\dot{Q} = \frac{2\pi Lk(T_e - T_i)}{\ln\left(\frac{r_i}{r_e}\right)} \quad (=) \quad T_i = T_e - \frac{\dot{Q} \times \ln\left(\frac{r_i}{r_e}\right)}{2\pi Lk} \quad (30)$$

Para a equação em questão,  $T_e$  representa a temperatura externa medida pelos termopares,  $r_i$  e  $r_e$  correspondem ao raio interno e externo do tubo respetivamente,  $L$  traduz o comprimento,  $k$  simboliza o coeficiente de condução térmica do material do tubo e  $\dot{Q}$  representa a energia transferida para o fluido, calculada previamente.

De seguida, torna-se necessário estimar a temperatura média do fluido circulante na posição em que o termopar é colocado. Para tal, utiliza-se a equação 31 [60].

$$T_m(x) = T_{m,i} + \frac{q''P}{\dot{m} C_p} x \quad (31)$$

Neste caso, a temperatura média do fluido em cada posição longitudinal é expressa por  $T_m(x)$ ,  $T_{m,i}$  representa a temperatura média do fluido à entrada,  $q''$  expressa a energia transferida para o fluido por unidade de área (interna),  $P$  representa o perímetro da secção transversal ao escoamento,  $\dot{m}$  o caudal em kg/s,  $C_p$  o calor específico mássica em J/kg.K e  $x$  a posição longitudinal a que o termopar foi colocado.

Uma vez obtida tanto a temperatura de superfície interna do tubo e a temperatura média do fluido circulante para cada posição longitudinal, pode-se

por final estimar o coeficiente de convecção térmica para cada ponto através da Lei do arrefecimento de Newton, equação 32 [60].

$$q'' = h(T_s - T_m) \quad (=) \quad h = q''(T_s - T_m) \quad (32)$$

Como descrito anteriormente,  $q''$  representa a energia transferida para o fluido por unidade de área (interna),  $T_s$  a temperatura de superfície interna do tubo e  $T_m$  a temperatura média do fluido circulante no ponto em questão calculado anteriormente pela equação 29.

#### 5.2.4 ANÁLISE TEÓRICA DA QUEDA DE PRESSÃO

Com o intuito de avaliar a influência da introdução de PPG na mistura, realizou-se uma análise teórica da queda de pressão dos diferentes fluidos circulantes utilizados, sendo que para tal, valeu-se a equação 33 [60].

$$\Delta P = \frac{f\rho U^2 L}{2D_i} \quad (33)$$

Para a equação em questão, a queda de pressão,  $\Delta P$ , é calculada através do coeficiente de atrito,  $f$ , da massa volúmica,  $\rho$ , da velocidade de escoamento no milicanal,  $U$ , do comprimento e diâmetro interno do milicanal,  $L$  e  $D$  respetivamente. Contudo, para que a queda de pressão possa ser calculada é necessário calcular previamente o valor do coeficiente de atrito (equação 34), visto que todas as outras variáveis são conhecidas à partida pelas dimensões do milicanal e pelo escoamento e propriedades do fluido.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (34)$$

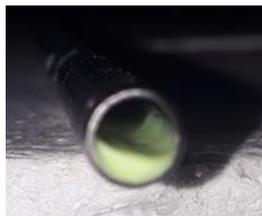
Como se pode verificar, o coeficiente de atrito é apenas dependente, de forma inversamente proporcional, do número de Reynolds. Apesar disso, segundo a equação 25, constata-se que o coeficiente de atrito é indiretamente dependente das propriedades termofísicas do fluido, o que leva a um estudo de relevância dada a grande diferença das propriedades termofísicas entre o propileno glicol e a água.

### 5.3 SEDIMENTAÇÃO DOS NANOFLUIDOS

Tal como referido previamente, uma das principais dificuldades inerentes aos trabalhos experimentais com nanofluidos é a sedimentação das nanopartículas, resultante da separação de fase do nanofluido. Após a preparação do nanofluido, as nanopartículas encontram-se em suspensão no fluido base, contudo devido à diferença da massa volúmica entre o material das nanopartículas e o fluido base, a ação gravítica provoca a deposição das nanopartículas no fundo do recipiente.

A estabilidade da solução tem uma preponderância enorme no escoamento do fluido, sendo que muitos parâmetros consequentes deste fator alteram a transferência de calor, tais como a existência de turbulências, rugosidade, acidentes geométricos ou até a criação de barreiras devido à deposição dos nanofluidos.

Esta sedimentação que ocorre nos nanofluidos, além da alteração da transferência de calor, promove o deterioramento dos dispositivos, aumento da potência de bombeamento (maior queda de pressão gerada) e possíveis entupimentos do sistema (figura 5.8).



*Figura 5.8 - Aspeto do tubo de escoamento do sistema micro após vários ensaios com nanofluidos*

### 5.3.1 CARACTERIZAÇÃO E PREPARAÇÃO DOS NANOFLUIDOS

As nanopartículas utilizadas consistem em óxido de alumínio, também conhecido como alumina, em estado sólido tendo-se obtido o nanofluido por diluição de uma massa de nanopartículas num volume de fluido base.

No capítulo 3.6 foram mencionadas diversas propriedades das nanopartículas que podem ser potencialmente relevantes para o estudo da transferência de calor. Assim, é de extrema relevância efetuar um levantamento bibliográfico das mesmas. Na tabela 5.5 são apresentados os valores utilizados neste estudo, salvaguardando que, como já foi referido, estes valores podem oscilar para nanofluidos obtidos mesmo a partir da mesma amostra de nanopartículas, devido a vários parâmetros (temperatura, forma das nanopartículas, entre outros).

Tabela 5.5 - Propriedades das nanopartículas de óxido de alumínio [58]

Nome	Composição química	Condutividade térmica K (W/mK)	Calor específico Cp (J/kgK)	Massa volúmica $\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Diâmetro médio das nanopartículas (nm)
Alumina	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	36	779	3900	50

Como referido, os nanofluidos são obtidos por diluição das nanopartículas no fluido base. Com intuito de melhorar esta diluição, aumentando a dispersão das nanopartículas e evitando a formação de aglomerados, foi realizado sempre um banho de ultrassons durante 1h e 30 minutos sempre que se utilizava um dos nanofluidos, figura 5.9.



*Figura 5.9 - Banho de ultrassons utilizado na preparação dos nanofluidos*

Inicialmente, começou-se por estudar os seis diferentes nanofluidos utilizados nos ensaios experimentais: água + 0,05%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; água + 0,1%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; água + 0,2%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; água + 0,1%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; PPGW50 + 0,05%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; PPGW50 + 0,1%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; PPGW50 + 0,2%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Como se verificou, uma deposição mais acentuada nos nanofluidos que tinham como fluido base o fluido PPGW50, realizou-se posteriormente outro estudo, de forma a avaliar a influencia da introdução de propileno glicol na sedimentação dos nanofluidos, para tal estudaram-se os seguintes nanofluidos: água + 0,05%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; PPG25W75 + 0,05%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; PPGW50 + 0,05%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; PPG75W25 + 0,05%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

## **6. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

Este capítulo destina-se a análise e discussão de resultados obtidos tanto para o sistema macro realizado com o sistema solar térmico, bem como para os ensaios relativos à transferência de calor com nanofluidos.

### **6.1 ESTUDO DO AQUECIMENTO DO FLUIDO CIRCULANTE NO SISTEMA SOLAR DESENVOLVIDO**

Quanto aos ensaios realizados no sistema solar desenvolvido, utilizaram-se duas metodologias diferentes: uma, na qual se utilizou água corredia a entrar no sistema com caudal variável, não havendo reservatório de água, avaliando-se assim qual a potência de aquecimento do sistema em função do caudal da bomba; e outra, onde se estudou o aquecimento de diferentes fluidos circulantes para um reservatório de três litros, de forma a analisar-se a energia acumulada ao longo do tempo, simulando-se o circuito primário de um sistema solar comercializado correntemente.

#### **6.1.1 ESTUDO DO AQUECIMENTO DO FLUIDO CIRCULANTE ÁGUA SEM RESERVATÓRIO**

Como é conclusivo através da observação da figura 6.1, nos primeiros 20 minutos existe alguma irregularidade na medição da diferença de temperatura entre a entrada e a saída do fluido circulante água. Contudo, avaliando-se a partir dos 20 minutos até ao final, a diferença de temperatura é maior para níveis de caudal mais baixos, como seria expectável, visto que quanto menor o caudal, menor a velocidade de circulação do fluido e portanto maior o tempo que o fluido

circula no coletor, por outras palavras, a mesma quantidade de água está mais tempo na serpentina e portanto o processo de transferência de calor do coletor para a água é realizado durante mais tempo, o que proporciona diferenças de temperatura mais elevadas.

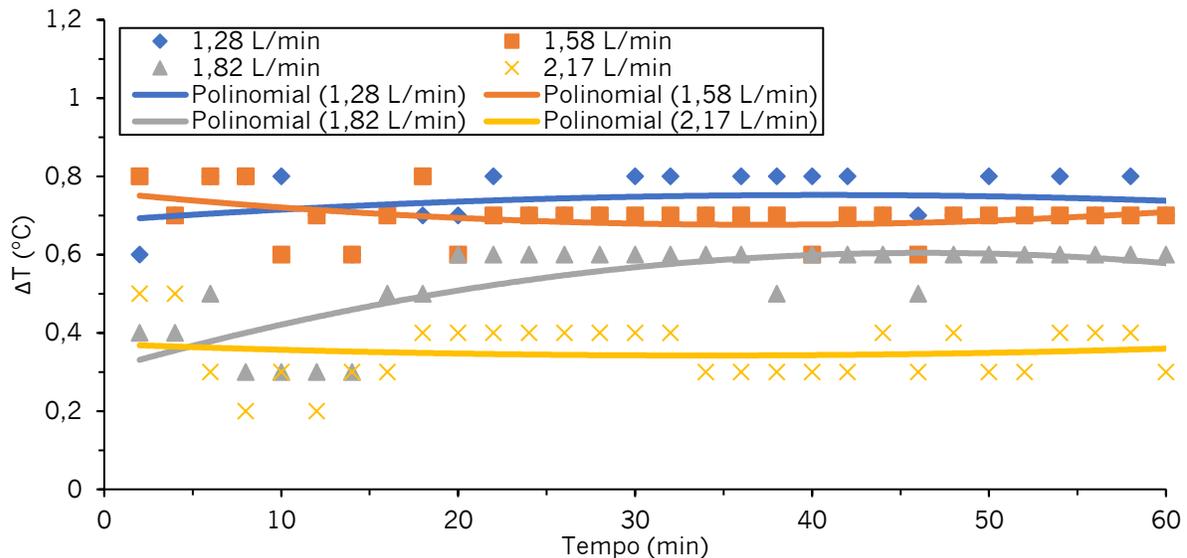


Figura 6.1 - Diferença de temperatura entre a entrada e saída do sistema solar ao longo do tempo para diferentes caudais

Apesar da diferença de temperatura ser maior à medida que o caudal diminui, isto não significa que a energia transferida para o fluido siga o mesmo crescimento, uma vez que a energia transferida é dependente também do caudal mássico e do calor específico (equação 1). Posto isto, apresenta-se na figura 6.2 a variação da energia transferida para o fluido circulante ao longo do tempo de acordo com os diferentes níveis da bomba, sendo que a análise é realizada após o minuto vinte. Como se pode observar não existe nenhuma linearidade entre a diminuição do caudal e o aumento da energia transferida, verificando-se até que para o maior caudal (2,17mL/min) a energia transferida é a menor. Normalmente, verifica-se um incremento da energia transferida em função do aumento de caudal, contudo para o caso a variação do caudal é baixa demais para se verificar esse incremento.

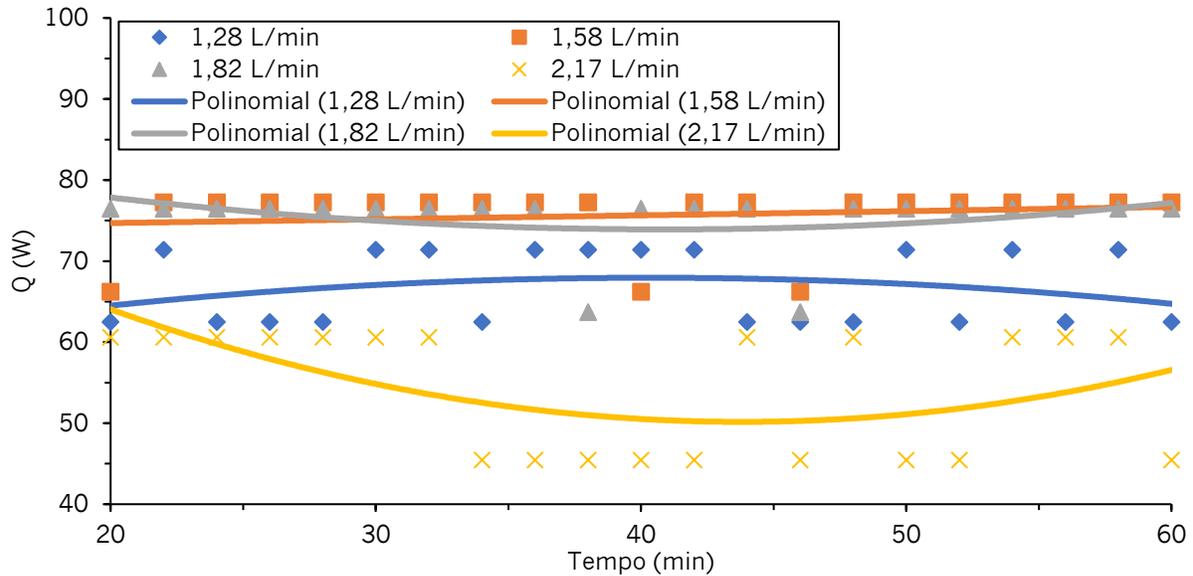


Figura 6.2 - Energia transferida para o fluido circulante ao longo do tempo para diferentes caudais

### 6.1.2 ESTUDO DO AQUECIMENTO DO FLUIDO CIRCULANTE ÁGUA COM RESERVATÓRIO

Como se avalia a partir da figura 6.3, as curvas de aquecimento são todas muito idênticas, apesar da curva que atinge maior temperatura ser a correspondente ao nível máximo de caudal acionado pela bomba e a curva de menor temperatura ser a de menor caudal, não existe uma concordância entre o aumento do caudal e o aumento da temperatura, visto que o nível 2 correspondente a um caudal volúmico de 1,28 L/min é o que atinge a segunda maior temperatura e o caudal 1,82 mL/min atinge temperaturas muito idênticas ao caudal 1,10 mL/min. Desta forma, torna-se inconclusivo uma dependência do aumento da temperatura ao longo do tempo com o caudal do fluido de aquecimento. Contudo, é notório que quando a temperatura inicial é mais elevada (caudais 2,17 mL/min e 1,28 mL/min) a temperatura máxima atingida por esses caudais é também superior a caudais em que a temperatura inicial é mais baixa (caudais 1,10 mL/min, 1,58 mL/min e 1,82 mL/min).

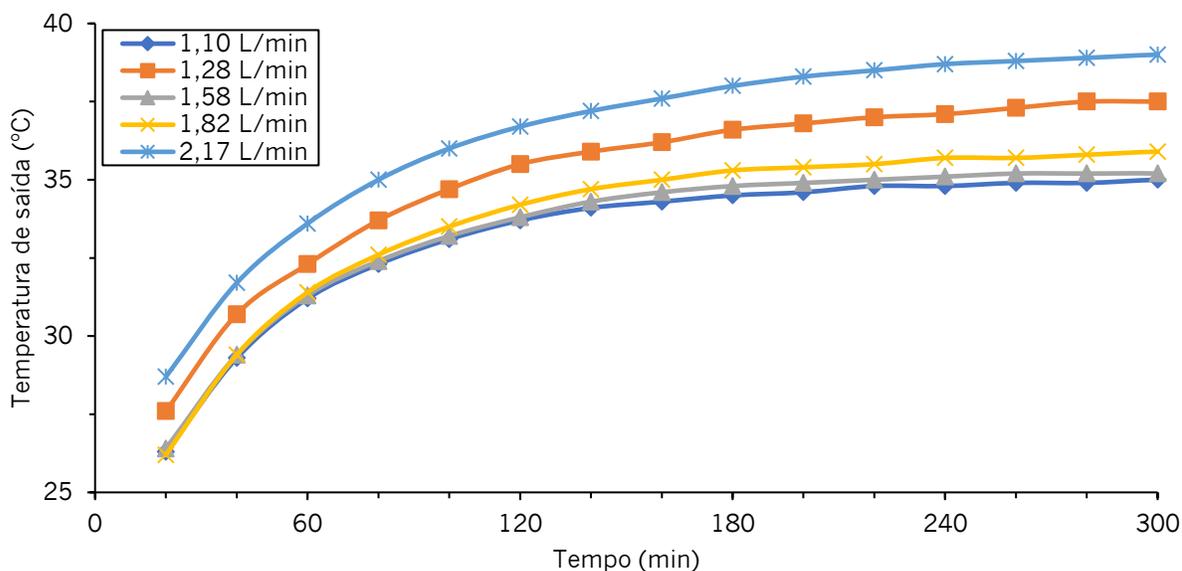


Figura 6.3 - Temperatura de saída da água do sistema solar ao longo do tempo para diferentes caudais

De referir, que as temperaturas foram registadas com um intervalo de 20 minutos visto que na experiência apresentada anteriormente, realizada segundo o sistema solar 1, existiam algumas irregularidades nos primeiros 20 minutos.

### 6.1.3 ESTUDO DO AQUECIMENTO DO FLUIDO CIRCULANTE ÁGUA E GLICOL COM RESERVATÓRIO

Através da observação da figura 6.4, notou-se uma grande discrepância dos resultados sendo que na percentagem de 40% de propileno glicol se notou uma grande diferença na temperatura inicial e na temperatura atingida, que esteve próxima dos 34°C. Demais, a temperatura máxima atingida não foi de acordo com o estudo realizado sobre o calor específico, visto que, por exemplo, a percentagem de 30% atinge temperaturas inferiores à percentagem de 0%. No entanto, após a realização de mais alguns testes e uma análise mais aprofundada dos mesmos, constatou-se que a temperatura máxima atingida pelo fluido circulante é extremamente dependente da temperatura ambiente (apresentada na tabela 6.1), sendo claramente plausível, uma vez que o isolamento do coletor solar construído

não é o ideal e o reservatório do fluido circulante é aberto no topo, aumentando drasticamente as perdas, estas que são sempre em relação à temperatura ambiente.

De evidenciar também o facto de existir um incremento significativo da temperatura nas duas primeiras horas, continuando a aumentar até à terceira hora e daí em diante existe um aumento muito ligeiro da temperatura de saída, podendo-se referir que existe praticamente uma igualdade entre o calor que entra no sistema solar térmico, gerado pela radiação do holofote, e o calor que sai, devido as perdas referidas anteriormente.

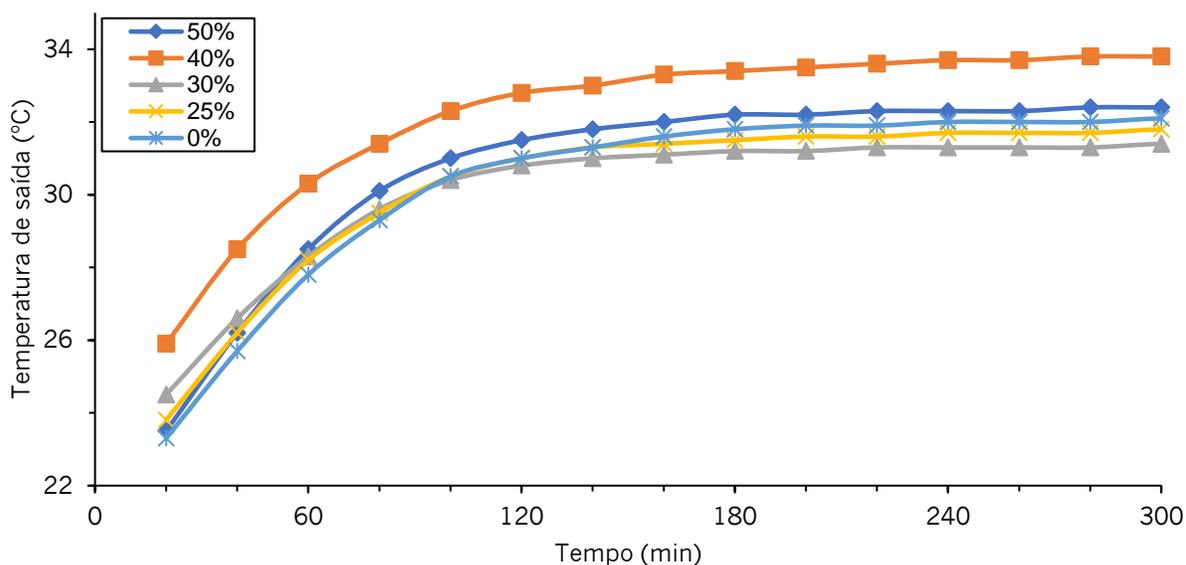


Figura 6.4 - Temperatura de saída do fluido circulante com diferentes percentagens de PPG ao longo do tempo (caudal de 1,10 L/min)

Tabela 6.1 - Temperatura ambiente de cada ensaio em função da percentagem de PPG

Tamb (°C)	% PPG
21,7	0
21,2	25
20,9	30
22,3	40
21,2	50

Pelas razões apresentadas previamente, optou-se por realizar um gráfico qualitativo, figura 6.5, em que a temperatura de saída registada é posteriormente dividida pela temperatura ambiente, com o intuito de criar uma razão de temperaturas que tem em conta, em cada teste, a temperatura ambiente a que foi realizado. Desta forma, cada curva do gráfico criado será sempre em função da temperatura ambiente a que o mesmo teste se realizou, não eliminando a grande influência que este parâmetro exerce, mas sim incluindo este parâmetro na própria análise. Posto isto, apresenta-se de seguida o gráfico para as diferentes percentagens de propileno glicol no fluido circulante.

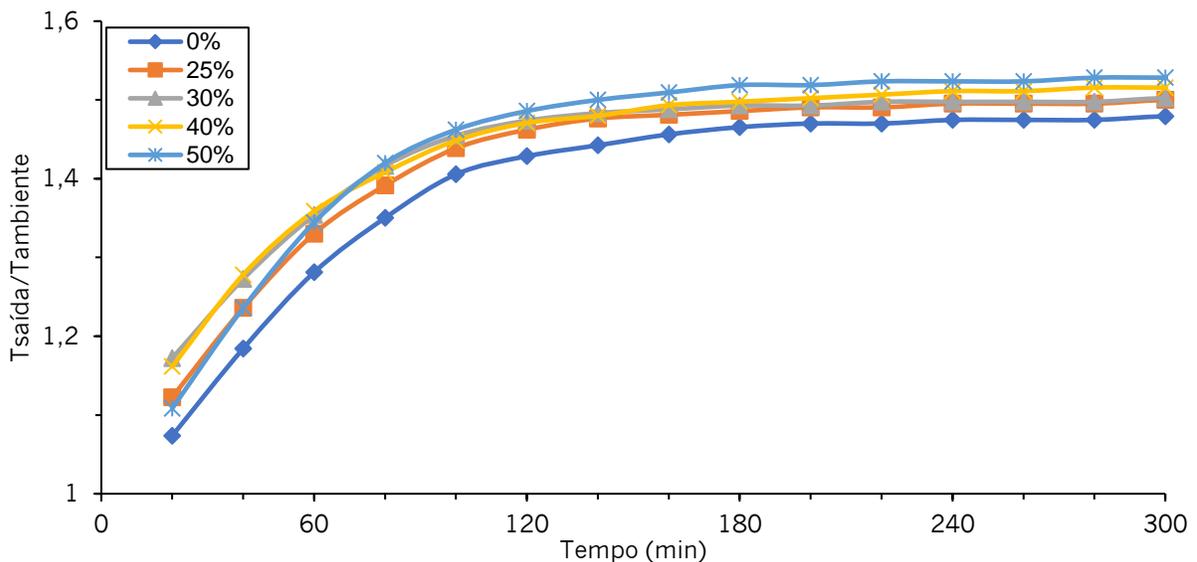


Figura 6.5 - Taxa de aquecimento do fluido circulante para diferentes percentagens de PPG ao longo do tempo (caudal de 1,10 L/min)

Tal como é perceptível pela figura 6.5, o fluido circulante que apresenta melhor rácio de temperatura de saída pela temperatura ambiente a que decorre o ensaio é o de 50% de propileno glicol e gradualmente esse rácio diminui à medida que a fração volumétrica de propileno glicol diminui, sendo que esta conclusão se retira a partir do momento em que existe alguma estabilidade na temperatura de saída (a partir do minuto 180).

Como se pode concluir, este sistema solar térmico é extremamente dependente da temperatura ambiente e uma vez que o estudo do aquecimento do sistema se torna-se qualitativo face a essa variável, torna-se evidente o que se pode concluir da análise teórica, ou seja, o aumento da fração volumétrica de propileno glicol na mistura leva a um aumento na temperatura de saída do fluido circulante, uma vez que o calor específico da mistura diminui com este incremento e o calor que entra no sistema se mantém constante.

## 6.2 ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR COM NANOFLUIDOS

No presente capítulo apresenta-se a análise e discussão de resultados segundo a metodologia descrita no capítulo 5.

### 6.2.1 ESTUDO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DOS NANOFLUIDOS

Os ensaios experimentais realizaram-se a 22°C, e apresenta-se os resultados obtidos na figura 6.6. Como se pode reparar, verifica-se um crescimento, praticamente, linear à medida que se introduz alumina, sendo que um incremento percentual é apresentado na tabela 6.2.

Verificaram-se também noutros estudos realizados, Nine et al. [63], que o incremento ocorre de forma praticamente linear para baixas frações volumétricas de nanopartículas e que o incremento obtido neste estudo está em concordância com os outros.

Tabela 6.2 - Aumento da condutividade térmica em função da fração volumétrica de  $Al_2O_3$

Fração volumétrica de $Al_2O_3$ (%)	Aumento da condutividade térmica (%)
0,01	0,42
0,05	2,07
0,1	3,49

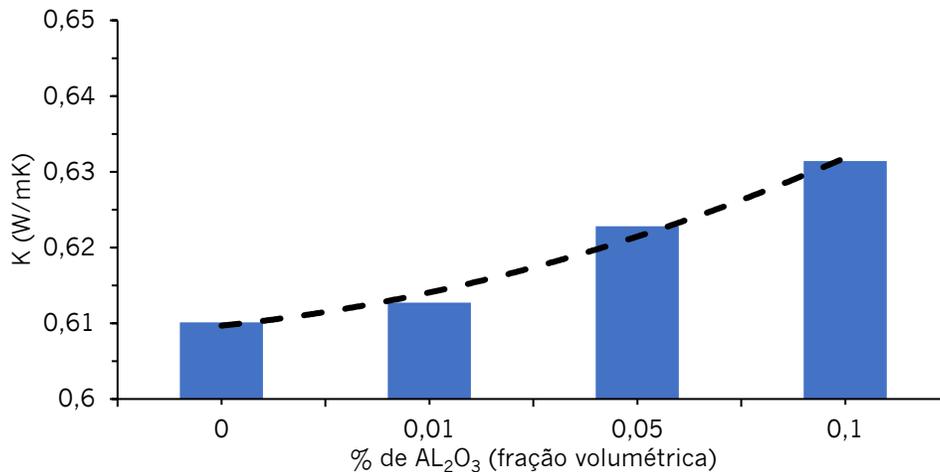


Figura 6.6 - Condutividade térmica em função da fração volumétrica de  $Al_2O_3$

## 6.2.2 ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR À MILIESCALA COM NANOFLUIDOS

Relativamente aos ensaios experimentais realizados sobre a transferência de calor numa tubagem com aquecimento de fluxo constante, a metodologia baseou-se em utilizar apenas uma geometria e manter constantes as propriedades físicas do sistema de forma a verificar a influência dos diferentes tipos de fluidos circulantes, seja através da introdução de propileno glicol na água ou com a utilização de nanofluidos.

### **INFLUÊNCIA DA INTRODUÇÃO DE PROPILENO GLICOL NA ÁGUA**

A introdução de propileno glicol na água formando um novo fluido circulante foi alvo de estudo, de forma a poder-se compreender se o aumento da temperatura de saída, verificado no estudo macro deste projeto, se traduziria numa transferência de calor mais eficiente.

Desta forma, nas condições descritas para o ensaio foram testados cinco fluidos circulantes diferentes: água, PPG25W75, PPGW50, PPG75W25 e PPG.

### **Coefficiente de transferência de calor por convecção**

Na figura 6.7 pode-se observar o coeficiente de transferência de calor por convecção em função do caudal para os diferentes tipos de fluido circulante. Como é perceptível na figura, quanto maior a percentagem de glicol introduzida na mistura menor é o valor do coeficiente de convecção, isto deve-se principalmente à baixa condutividade térmica do propileno glicol comparativamente à água.

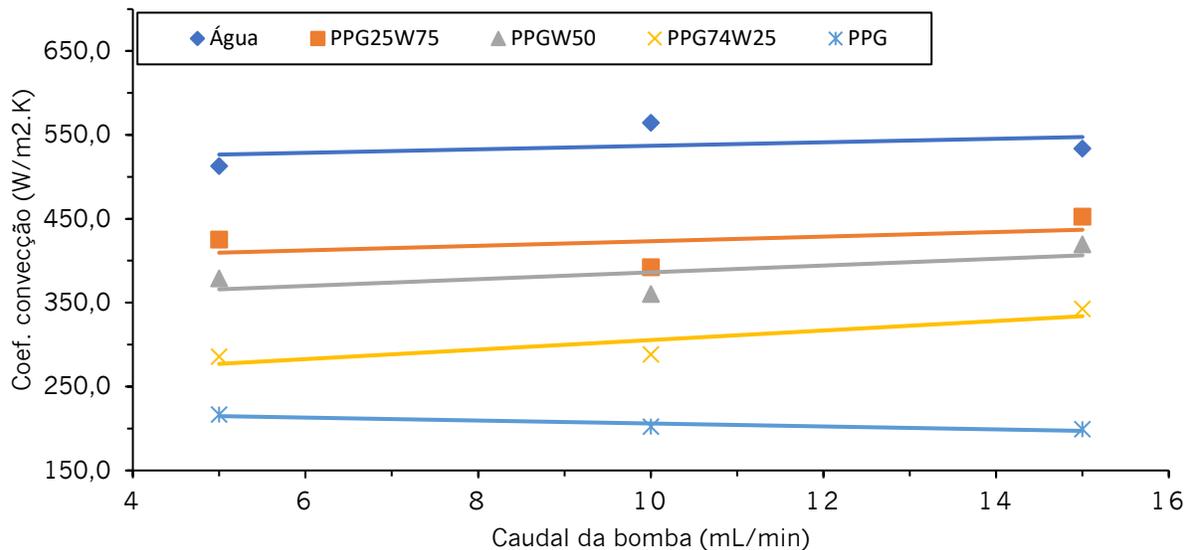
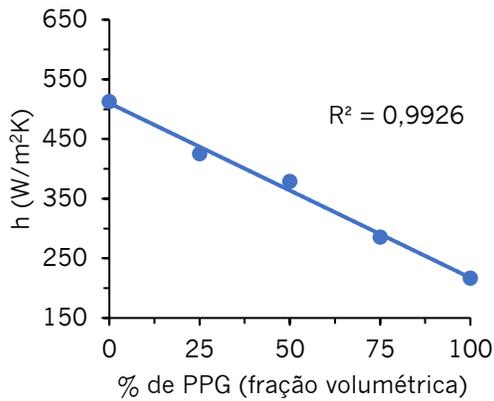


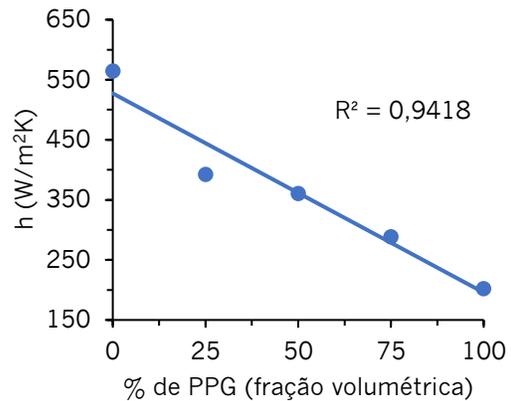
Figura 6.7 - Coeficiente de convecção em função do caudal da bomba

Como se pode constatar na figura anterior, não existe propriamente um aumento definido para o coeficiente de convecção de acordo com o aumento do caudal da bomba, sendo de notar que para o propileno glicol (PPG) existe até uma queda. Este facto, em contrariedade com alguns dos estudos realizados previamente deve-se, provavelmente, ao facto da variação do caudal realizada ser pequena.

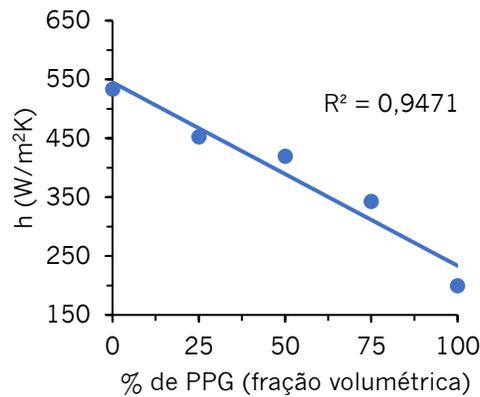
De forma a avaliar se existia alguma relação entre a introdução de propileno glicol e a queda do coeficiente de convecção, fixou-se o caudal e estudou-se a relação. Apresentando-se o resultado na figura 6.8, para os caudais 5 mL/min, 10 mL/min e 15 mL/min respetivamente.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.8 - Coeficiente de transferência de calor por convecção em função da fração volumétrica de PPG para diferentes caudais **a)** 5 mL/min, **b)** 10 mL/min e **c)** 15 mL/min

Como é perceptível na figura 6.8, existe uma queda notória de acordo com a introdução de propileno glicol, contudo não se observa uma linearidade exata nesta relação para todos os caudais, apenas para o caudal de 5 mL/min. Contudo, a utilização da reta de cada gráfico leva a uma aproximação aceitável para o cálculo

do coeficiente de convecção para uma determinada fração volumétrica de propileno glicol.

### **Energia transferida da resistência térmica para o fluido circulante**

Quanto à energia transferida pela resistência térmica para o fluido circulante, evidencia-se uma queda à medida que aumenta a fração volumétrica de propileno glicol, como se evidencia na figura 6.9, contudo verifica-se que a mesma não acontece de forma uniforme e linear, sendo até bastante aleatória. Além disso, é notório que o aumento do caudal implica um aumento na energia transferida para o fluido, o que é expectável pela equação 1.

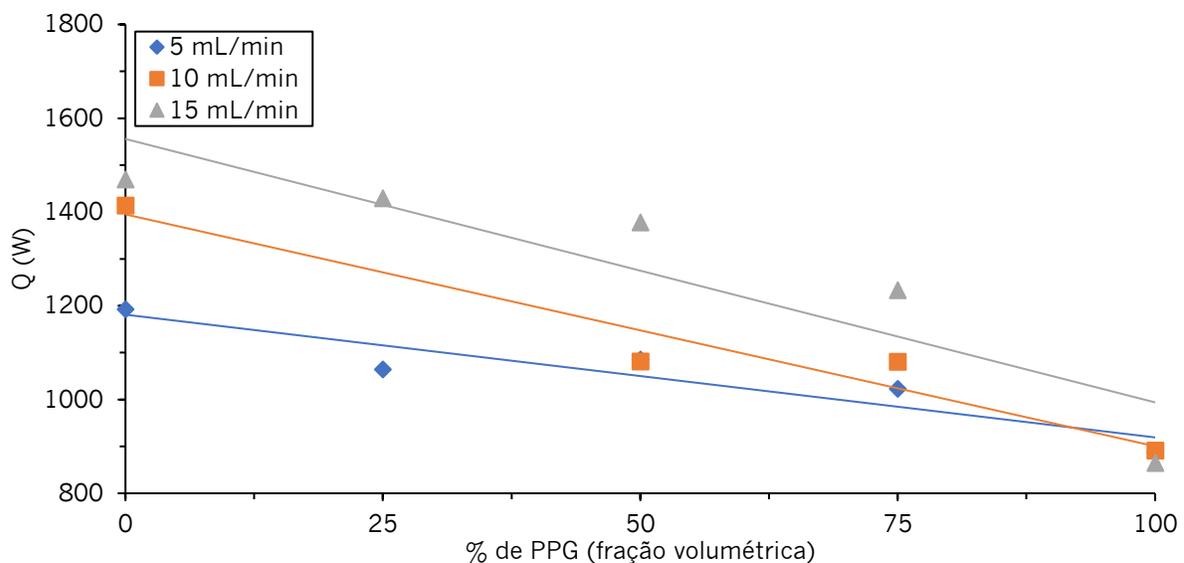


Figura 6.9 - Quantidade de energia transferida para o fluido em função da fração volumétrica de PPG para diferentes caudais

### **Queda de pressão (teórico)**

Na figura 6.10, é possível observar a queda de pressão em função do caudal da bomba para os diferentes fluidos circulantes utilizados. Para o caso, verifica-se um crescimento acentuado na queda de pressão com a introdução de propileno glicol, isto deve-se ao elevado aumento do coeficiente de atrito à medida que a

percentagem de propileno glicol aumenta, uma vez que o coeficiente de atrito é linearmente proporcional à queda de pressão (equação 33).

Por sua vez, como o coeficiente de atrito é inversamente proporcional ao número de Reynolds (equação 34) e este é inversamente proporcional à viscosidade dinâmica (equação 25), leva a que um aumento na viscosidade dinâmica do fluido implique uma queda de pressão elevada. Ora, como a viscosidade dinâmica da mistura é dependente da fração molar de cada constituinte da mistura (equação 23), e uma vez que a densidade molar do PPG (76,1 g/mol) é muito superior à da água (18,0 g/mol), isto faz com que a introdução gradual de glicol na água implique um aumento não linear na viscosidade dinâmica.

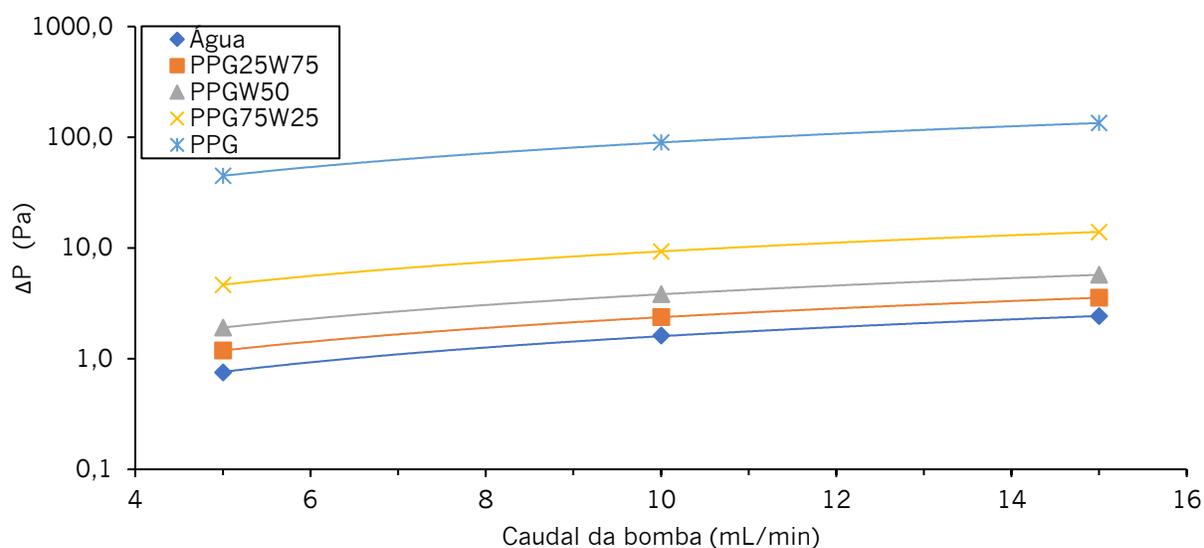


Figura 6.10 - Valor da queda de pressão em função do caudal da bomba para os diferentes fluidos circulantes

### Número de Reynolds

O número de Reynolds é um valor adimensional que descreve o regime de escoamento do fluido, representando o quociente entre as forças de inércia e as forças de viscosidade. Desta forma, apresenta-se na figura 6.11 a variação deste valor em função do caudal da bomba para as diferentes frações volumétricas de propileno glicol.

É notório a diminuição do número de Reynolds à medida que a percentagem de propileno glicol aumenta, isto deve-se ao aumento das forças de viscosidade uma vez que as forças de inércia se mantêm constantes para os diferentes ensaios devido à continuidade da velocidade de escoamento e diâmetro do tubo.

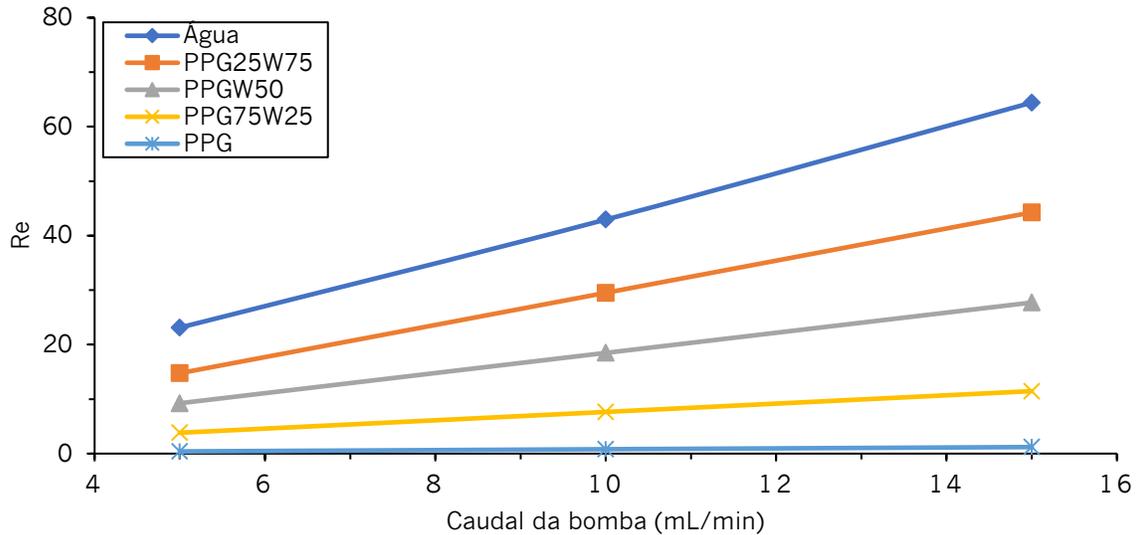


Figura 6.11 - Número de Reynolds em função do caudal da bomba para os diferentes fluidos circulantes

Na figura 6.12 apresenta-se a variação do número de Reynolds em função da fração volumétrica de propileno glicol para os diferentes caudais, como se pode constatar a variação deste valor não é linear devido ao facto de o número de Reynolds ser dependente da massa volúmica, que aumenta à medida que a fração volumétrica de propileno glicol aumenta, e porque a variação da viscosidade do fluido circulante não é linearmente variável com a introdução de propileno glicol.

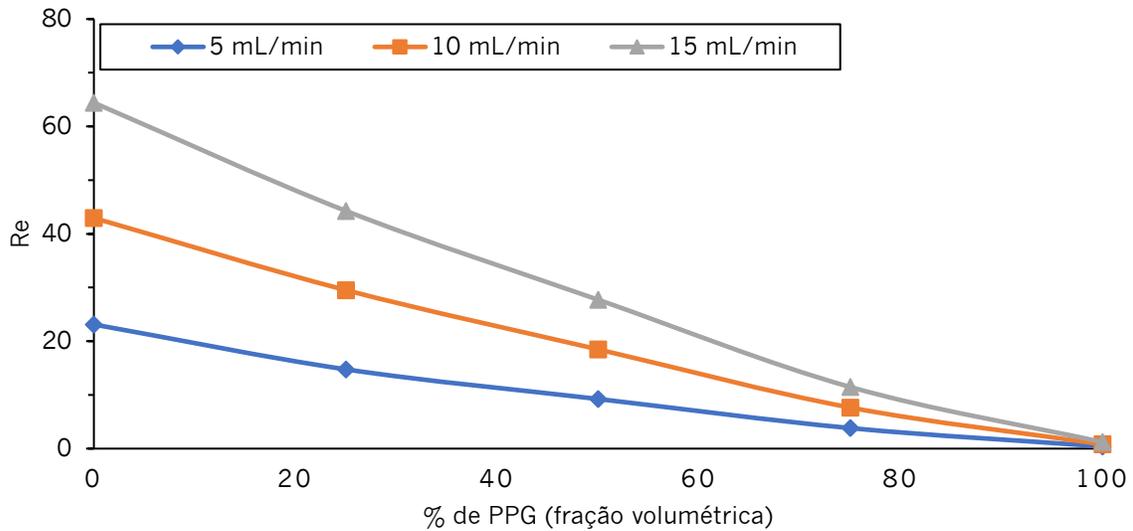


Figura 6.12 - Número de Reynolds em função da fração volumétrica de PPG para diferentes caudais

## **INFLUÊNCIA DA INTRODUÇÃO DE NANOPARTÍCULAS NOS FLUIDOS BASES ÁGUA E PPGW50**

Como descrito anteriormente, foram criados seis nanofluidos de diferentes frações volumétricas de alumina (0,05%, 0,1%, 0,2%) e para dois fluidos bases diferentes (água e PPGW50), com o propósito de se estudar a influência da introdução de nanopartículas no processo de transferência de calor.

### **Coeficiente de transferência de calor por convecção**

Como principal fator, avaliou-se o coeficiente de transferência de calor por convecção do processo descrito no capítulo 5.2.5, apresentando-se os resultados nas figuras 6.13 e 6.14. Como se pode observar, existe um aumento para a introdução de nanopartículas para a percentagem de 0,05% e 0,01% e uma queda para a percentagem de 0,2%, tanto para o fluido base água como para o PPGW50.

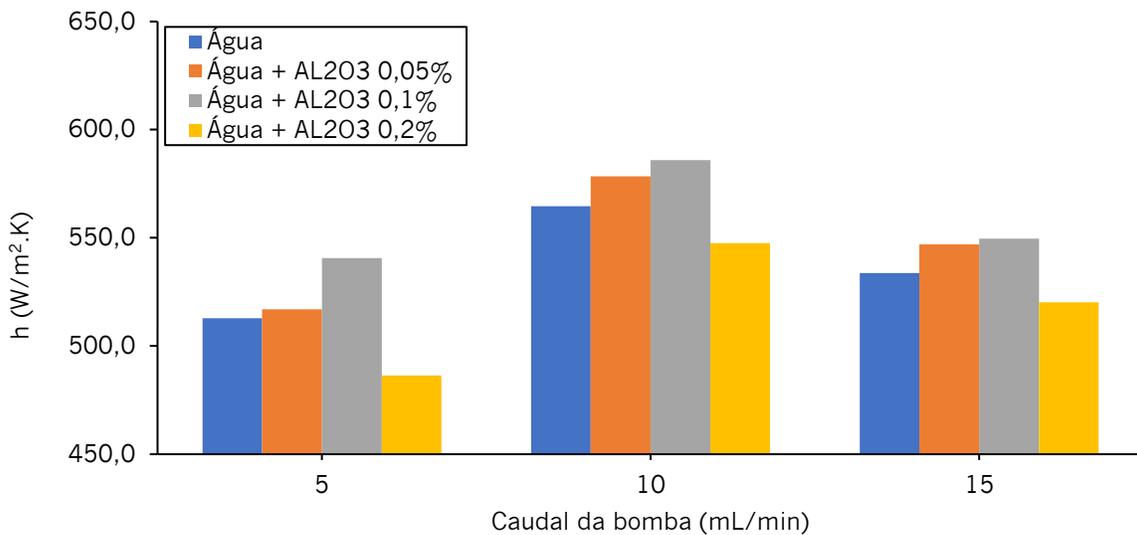


Figura 6.13 - Coeficiente de convecção em função do caudal da bomba

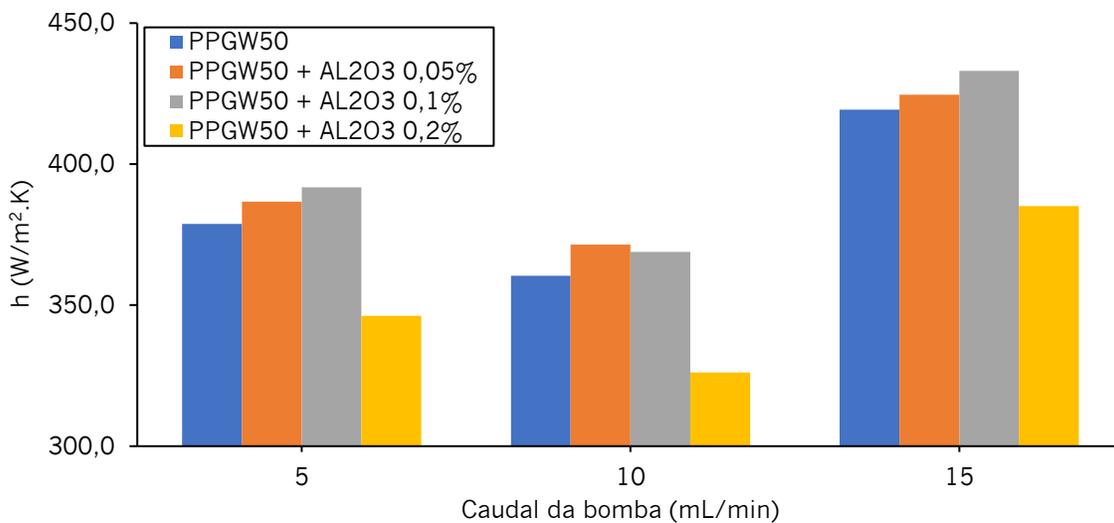


Figura 6.14 - Coeficiente de convecção em função do caudal da bomba

Em contrariedade com a literatura, Mohammad et al. [65], não se verifica um aumento com a introdução de nanopartículas, provavelmente devido ao facto de existir uma sedimentação de nanopartículas no interior do tubo que cria uma barreira que dificulta a transferência de calor, como se pode observar na figura 6.15. Demais, evidencia-se o facto de a queda existente para a percentagem de 0,02% ser maior para o fluido base PPGW50 em relação ao fluido base água, o

que é concordante com o estudo da sedimentação realizado, na qual se verifica uma deposição mais rápida para o PPGW50.

Reforça-se também a conclusão de que não existe um aumento do coeficiente de convecção para o aumento de caudal, devido aos baixos caudais utilizados.



Figura 6.15 - Sedimentação das partículas de alumina na ligação do tubo

### **Número de Nusselt**

Com o intuito de se comprovar o estudo realizado sobre o coeficiente de transferência de calor por convecção, apresenta-se na figura 6.16 a variação do número de Nusselt experimental em função do caudal da bomba. Existe uma dependência entre o coeficiente de convecção e o número de Nusselt (equação 29) pelo que seria expectável que a variação evidenciada anteriormente se repetisse.

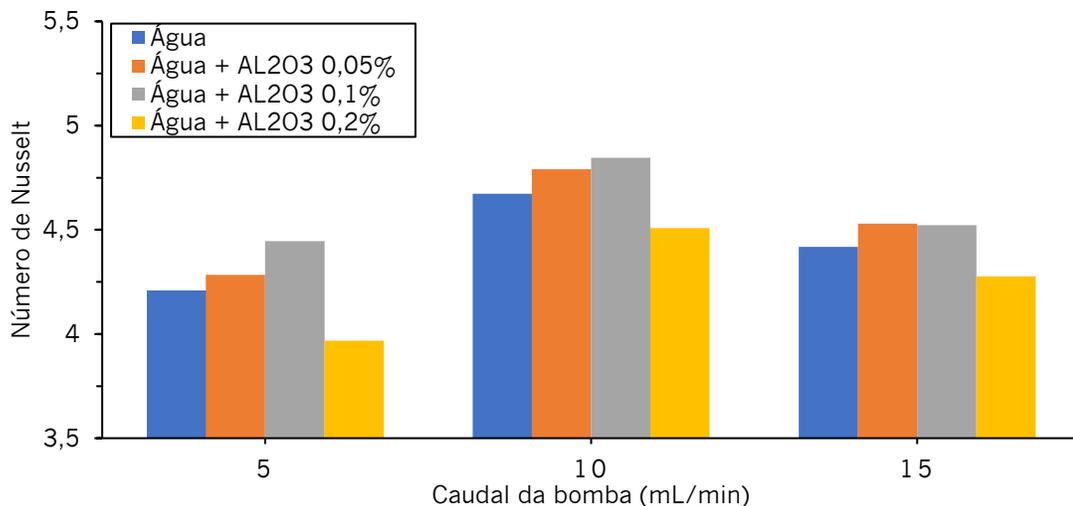


Figura 6.16 - Número de Nusselt em função do caudal da bomba

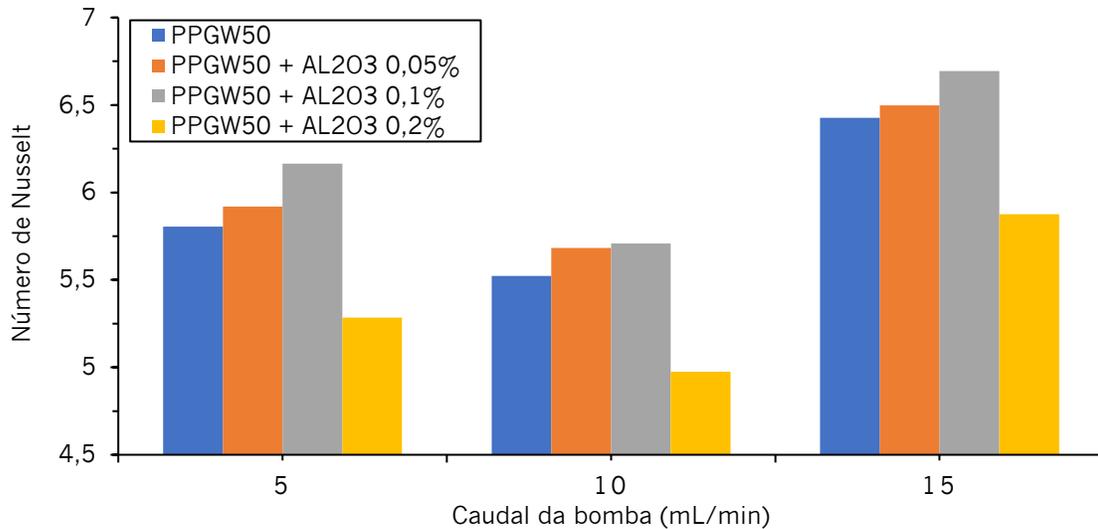


Figura 6.17 - Número de Nusselt em função do caudal da bomba

### 6.2.3 ESTUDO DA SEDIMENTAÇÃO DOS NANOFLUIDOS

Como referido no capítulo 5.3 realizou-se em primeira instância o estudo da sedimentação dos nanofluidos, com nanopartículas de alumina, procurando avaliar a influência do fluido base, a fração volumétrica de nanopartículas e a preparação do nanofluido.

Após a preparação dos diferentes nanofluidos, colocaram-se as amostras num suporte de imobilização, sendo as mesmas analisadas em intervalos de tempo regulares, como se pode observar na figura 6.18. De referir que todos os nanofluidos foram expostos a um banho ultrassónico (agitação acústica) de 1h e 30 minutos e que os provetes com fluido límpido amarelo fluorescente são os de fluido base PPGW50 (três provetes à esquerda) e os outros são com fluido base água (três provetes à direita).

Como se pode constatar os nanofluidos que têm como fluido base o fluido PPGW50 apresentam uma taxa de deposição mais acentuada que os nanofluidos que têm como fluido base a água, verificando-se até que ocorre a separação total

da fase líquida (fluido base) da fase sólida (nanopartículas). Ademais, não se verificou nenhuma razão ou influência da concentração de nanopartículas na taxa de sedimentação, ou seja, diferentes concentrações levam a fases de separação atingidas aproximadamente no mesmo intervalo de tempo.

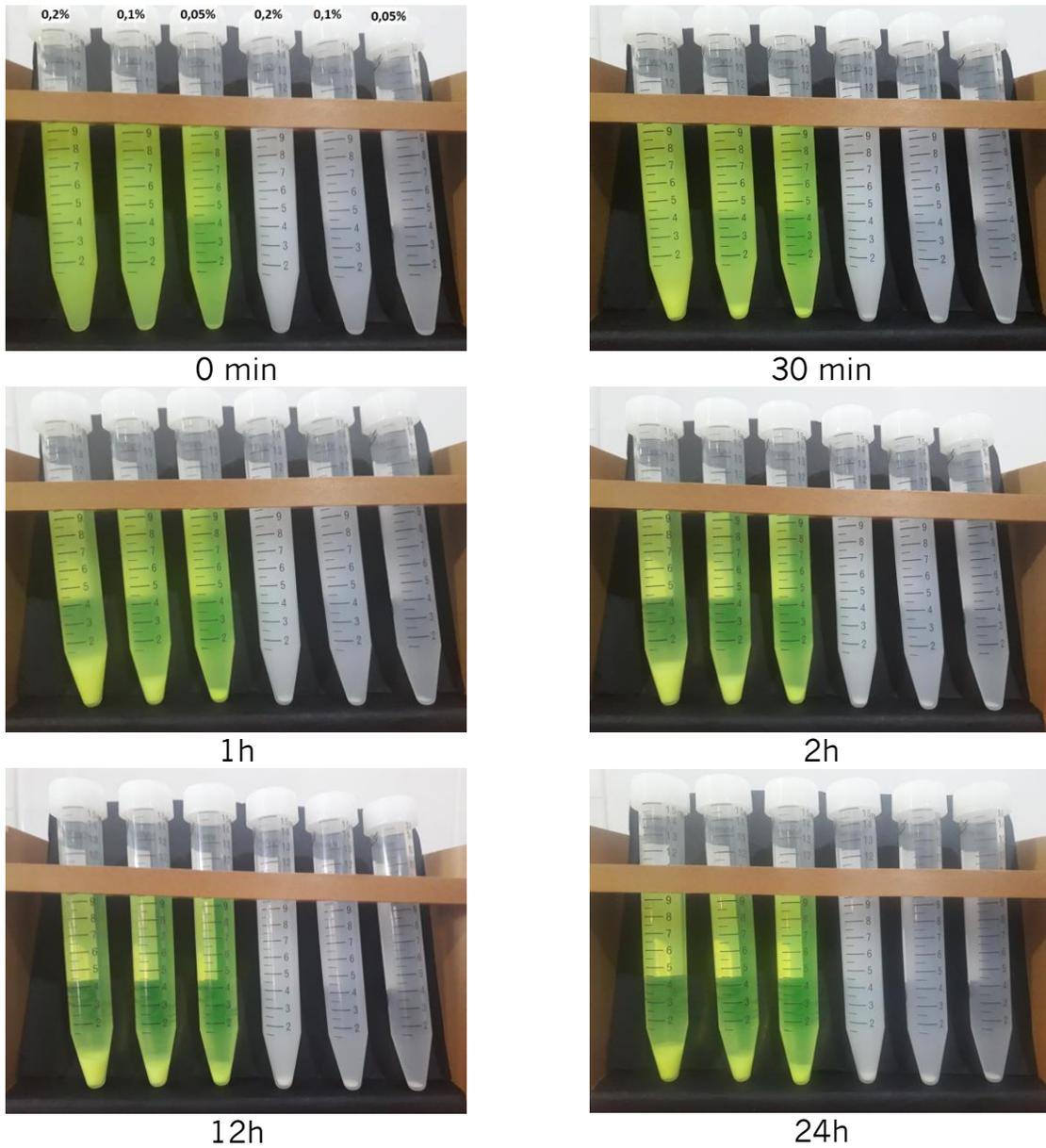


Figura 6.18 - Ensaio de sedimentação com os nanofluidos utilizados no escoamento com milicanal

Uma vez que a sedimentação se verificou muita mais acentuada para os nanofluidos que têm como fluido base o fluido PPGW50, decidiu-se realizar um estudo da sedimentação em função da introdução de propileno glicol na mistura. Desta forma, utilizaram-se os fluidos base: água; , PPG25W75 (25% propileno glicol e 75% água), PPGW50 (50% propileno glicol e 50% água), PPG75W25 (75% propileno glicol e 25% água), e PPG (100% propileno glicol).; todos com a mesma fração volumétrica de alumina (0,05%). Para o caso verificaram-se as seguintes deposições (figura 6.19).

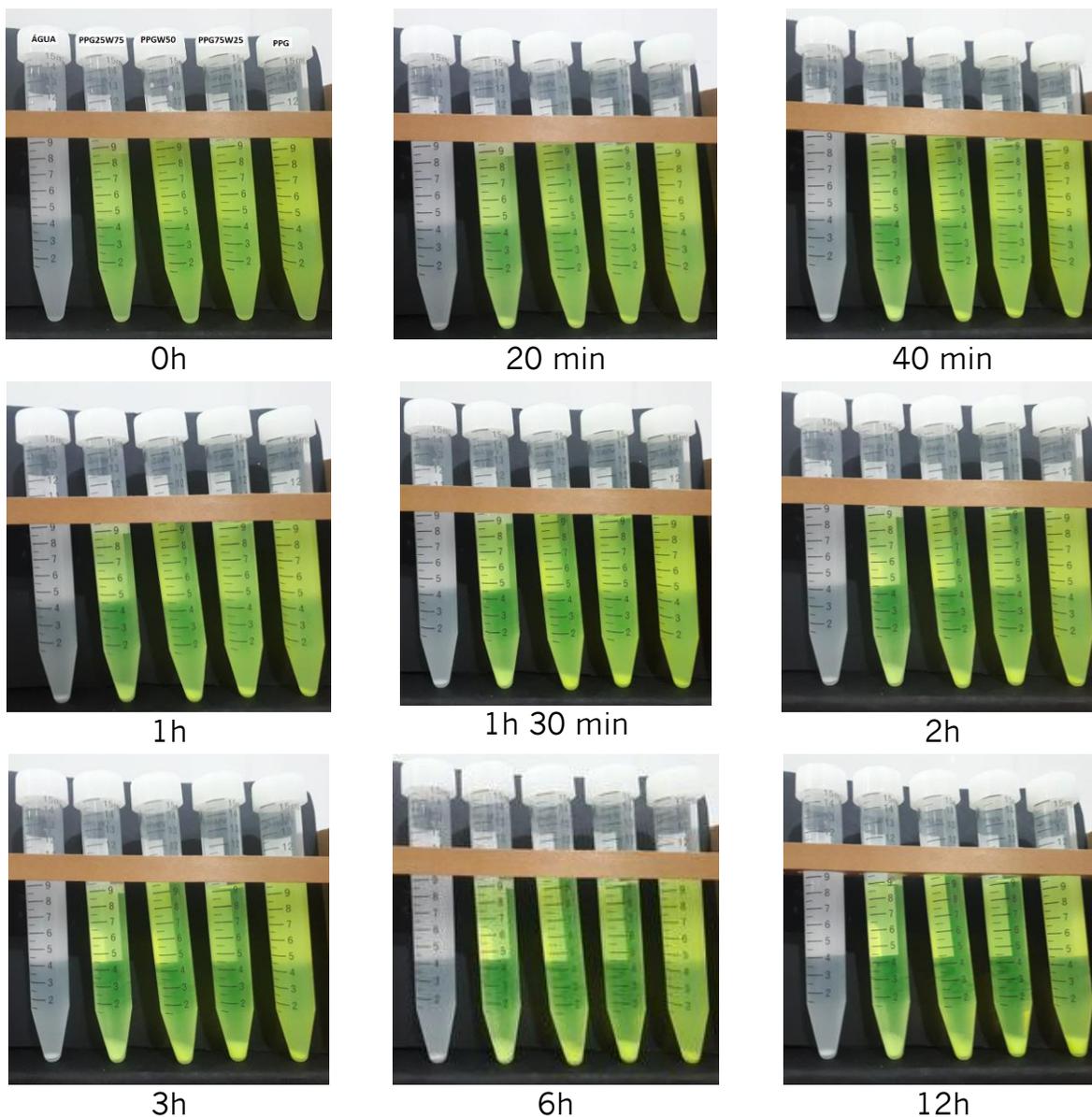


Figura 6.19 - Ensaio de sedimentação em função da introdução de propileno glicol na mistura

Como se pode observar pela figura 6.19, reforça-se a ideia de que os nanofluidos que têm propileno glicol na mistura de fluido base sofrem a sedimentação total das nanopartículas de alumina, ou seja, ocorre uma separação total da fase sólida (nanopartículas) da fase líquida (fluido base). Além disso, verifica-se que quanto menor a percentagem de propileno glicol na mistura do fluido base, mais rápido se dá a sedimentação, sendo bastante notório que para o nanofluido de fluido base PPG demora bem mais do que para os restantes.

## 7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 7.1 CONCLUSÕES

No presente relatório foi estudado, numa primeira fase, um sistema solar desenvolvido a partir de um modelo de exposição, de forma a avaliar a potência do sistema solar térmico em função do caudal volúmico e em função da introdução de propileno glicol na mistura do fluido circulante. Em relação à primeira avaliação do sistema, verificou-se que a diferença de temperatura entre a entrada e a saída do painel solar térmico se verifica maior à medida que o caudal diminui, o que era previsível visto que quanto menor o caudal maior o tempo que a água passa na serpentina. Contudo, o processo de transferência de calor não é apenas proporcional a essa diferença de temperatura, assim sendo, quando avaliada a energia transferida da fonte luminosa para o fluido circulante é inconclusivo uma proporcionalidade entre a potência de bombeamento e a energia transferida, admitindo-se, assim, que para os restantes testes se optaria pela potência de bombeamento menor porque é que tem menor gasto energético.

Quanto à avaliação realizada em função da introdução de propileno glicol na mistura, constatou-se que à medida que a percentagem de propileno glicol aumenta na mistura, a temperatura de saturação do sistema também aumenta, apesar disso a introdução de propileno glicol induz uma diminuição do calor específico da mistura o que nos leva a concluir que esse aumento da temperatura de saturação não implica um aumento na energia transferida para o sistema, necessitando de ser avaliado mais detalhadamente o peso que estas variações têm no processo de transferência de calor.

Posteriormente, e de forma a concluir mais sobre a introdução de propileno glicol na mistura que constitui o fluido circulante, estudou-se o escoamento num milicanal de aço aquecido por uma resistência térmica, no qual foi também

avaliado a utilização de nanofluidos no processo de transferência de calor. Inicialmente, avaliou-se que a introdução de propileno glicol na mistura leva a uma queda no coeficiente de transferência de calor por convecção, notando-se que a diminuição gerada neste coeficiente é praticamente proporcional em relação ao aumento da percentagem de propileno glicol na mistura. Adicionalmente, verificou-se que o aumento percentual de propileno glicol na mistura leva a um aumento elevado na queda de pressão (valor teórico) e um aumento no número de Reynolds, ambos derivados do aumento da viscosidade.

Desta forma, pode-se afirmar que no caso dos sistemas solares térmicos convencionais utilizados em habitações unifamiliares, a introdução de propileno glicol, necessário devido ao aumento da temperatura de congelamento que este fluido proporciona, deve ser feito na menor percentagem possível uma vez que induz uma perda no coeficiente de transferência de calor por convecção e implica uma potência de bombeamento maior proveniente de uma queda de pressão mais acentuada.

Em relação aos ensaios experimentais realizados através do escoamento no milicanal para nanofluidos, realizaram-se testes para dois fluidos base, água e PPGW50 (50% propileno glicol e 50% água), e para um material de nanopartículas, óxido de alumínio/alumina, com as percentagens volumétricas de 0,05%, 0,1% e 0,2%. Quanto a estes ensaios experimentais, verificou-se que, para ambos os fluidos bases, o coeficiente de transferência de calor por convecção aumenta para as percentagens de 0,05% e 0,1%. Estes aumentos justificam-se pelo facto de haver um aumento na condutividade térmica em relação ao fluido base, estudo esse que também foi avaliado e foi verificado que existe uma relação linear entre o aumento (em percentagem volumétrica) das nanopartículas e a condutividade térmica. Contudo, para a percentagem de 0,2% verificou-se uma descida do coeficiente de convecção, sendo mais notória no fluido base PPGW50, em que uma possível explicação pode ser devida à percentagem já ser elevada o suficiente para

que a sedimentação, existente durante o escoamento, crie uma barreira de nanopartículas que dificulta a transferência de calor.

Assim, pode-se afirmar que para os nanofluidos estudado, a melhor percentagem volumétrica de alumina seria de 0,05%, uma vez que a de 0,1% não induz um aumento muito maior em relação à anterior.

Inferido pelos ensaios realizados com a percentagem volumétrica de 0,2%, decidiu-se realizar um estudo da sedimentação dos nanofluidos, com o intuito de se avaliar este grande desafio. Assim verificou-se que os nanofluidos, utilizados previamente no estudo da transferência de calor no milicanal, apresentam maior taxa de deposição para o fluido base PPGW50 do que para a água, havendo até uma separação total da fase líquida da fase sólida ao final de duas horas. Além disso, não se notou nenhuma razão entre a percentagem de nanopartículas e a taxa de sedimentação, em relação ao mesmo fluido base.

Uma vez que a existência de propileno glicol na mistura levou a uma deposição bem mais acentuada, decidiu-se estudar a relação entre a percentagem de propileno glicol e a taxa de sedimentação, ou seja, manteve-se a percentagem volumétrica de 0,05% de alumina para todos os nanofluidos e variou-se a percentagem de propileno glicol e água da mistura, usando-se assim os diferentes fluidos base: água destilada, PPG25W75 (25% propileno glicol e 75% água), PPGW50 (50% propileno glicol e 50% água), PPG75W25 (75% propileno glicol e 25% água), e PPG (100% propileno glicol). Para estes novos nanofluidos, verificou-se que a sedimentação ocorre de forma total para os nanofluidos que tem propileno glicol na mistura do fluido base, ou seja, as nanopartículas de alumina depositam, aparentemente, na sua totalidade. Adicionalmente, concluiu-se que os nanofluidos que têm como fluido base uma mistura de água destilada e propileno glicol (para as diferentes percentagens) têm uma sedimentação mais acentuada que os nanofluidos que têm como fluido base apenas um elemento, água destilada ou propileno glicol.

## 7.2 TRABALHOS FUTUROS

Como referido, esta tecnologia apresenta-se ainda num estado embrionário, sendo-se que são vários os ramos em que o presente trabalho se pode ainda debruçar, seja para tornar o trabalho mais abrangente como para torná-lo mais conclusivo nos aspetos estudados. Assim sendo, apresentam-se de seguida algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Caracterizar de forma experimental todos os fluidos circulantes e nanofluidos utilizados em relação à sua condutividade térmica e viscosidade, de forma a comparar com modelos teóricos e avaliar a influência da viscosidade no processo de sedimentação;
- Utilizar fontes de aquecimento mais potentes e caudais de bombeamento maiores para estudar a influência da temperatura do nanofluido no processo de transferência de calor;
- Avaliar a criação de escoamentos turbulentos no processo de transferência de calor;
- Realizar um estudo aprofundado do custo de produção das nanopartículas, com o propósito de avaliar a percentagem ideal de nanopartículas para o sistema em estudo;
- Estudar a incorporação dos nanofluidos utilizados para um sistema solar térmico, de forma a avaliar a sedimentação com caudais de bombeamento mais próximos dos sistemas comercializados;
- Avaliar a otimização de um sistema solar térmico em relação ao seu posicionamento em função do Sol
- Realização de simulações numéricas de forma a entender mais detalhadamente os fenómenos de transferência de calor.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Gupta, Munish et al. - A comprehensive review of experimental investigations of forced convective heat transfer characteristics for various nanofluids. International Journal of Mechanical and Materials Engineering. 9:11 (2014) 1–21.
- [2] “Inquérito ao Consumo de energia no sector doméstico,” INE, DGEG, 2010
- [3] Cengel Yunus, A. 2003. “Heat transfer: a practical approach”. McGraw-Hill New York.
- [4] [http://recursosolar.geodesign.com.br/Pages/Sol\\_Rad\\_Basic\\_RS.html](http://recursosolar.geodesign.com.br/Pages/Sol_Rad_Basic_RS.html)
- [5] <http://www-geografia.blogspot.com/2017/12/Radiacao-Solar.html>
- [6] <https://sistemasolares.blogs.sapo.pt/7504.html>
- [7] <http://www.heliotek.com.br/para-casa/aquecedor-solar-para-piscina>
- [8] Colectores Solares para Aquecimento de Água - Pavilhões Desportivos e Piscinas. Lisboa, Abril de 2004. ISBN 972-8268-28-9. [www.aguaquentesolar.com](http://www.aguaquentesolar.com)
- [9] [www.viessmann.com](http://www.viessmann.com)
- [10] Silênia Priscila Lemes, Gabriela Sá Brito, Rogério Cattelan Antochaves de Lima, Almir Barros da S. Santos Neto, Gihad Mohamad, André Lübeck. “Integração de painéis solares térmicos” Setembro 2016 <https://ojs.sites.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/article/view/1518>
- [11] Ioan Sarbu, Calin Sebarchievici, in Solar Heating and Cooling Systems, (2017) <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/evacuated-tube-collector>
- [12] John A. Duffie, William A. Beckman – “Solar Engineering of Thermal Processes”, Fourth Edition (2013)
- [13] P. Rushi Prasad, H.V Byregowda, P.B Gangavati, (2010) Heat Transfer- Yunus and Cengel (2nd-edition)
- [14] John Canivan “How to Build a Solar Hot Water System”, Sunny Future Pr (January 30, 2004)
- [15] Mohamed Hamdy, Ahmed A. Askalany, K. Harby, Nader Kora – “An overview on adsorption cooling systems powered by waste heat from internal combustion engine” 2015 Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 51, Pages 1223-1234

[16] M. Kehrer, H. M. Kunzel, K Sedlbauer, (2003) Journal of Building Physics 26(3):207-212, "Ecological Insulation Materials - Does Sorption Moisture Affect their Insulation Performance?". <https://doi.org/10.1177/109719603027869>

[17] Mahbubul, I.M. 2019b. "Introduction to Nanofluid". Em "Preparation, Characterization, Properties and Application of Nanofluid", 1–13. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813245-6.00001-0>.

[18] Sajid, Muhammad Usman, e Hafiz Muhammad Ali. 2019. «Recent Advances in Application of Nanofluids in Heat Transfer Devices: A Critical Review». Renewable and Sustainable Energy Reviews 103 (Abril): 556–92. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.057>

[19] Saidur, R., K. Y. Leong, e H. A. Mohammad. (2011). "A review on applications and challenges of nanofluids". Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (3): 1646–68. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.035>

[20] Colangelo, G., E. Favale, M. Milanese, A. de Risi, e D. Laforgia. 2017. «Cooling of electronic devices: Nanofluids contribution». Applied Thermal Engineering 127 (Dezembro): 421–35. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.042>

[21] Alawi, Omer A., Jassim Mohammed Salih, e A. R. Mallah. 2019. «Thermo-physical properties effectiveness on the coefficient of performance of Al2O3/R141b nano-refrigerant». International Communications in Heat and Mass Transfer 103 (Abril): 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.02.011>

[22] Bigdeli, Masoud Bozorg, Matteo Fasano, Annalisa Cardellini, Eliodoro Chiavazzo, e Pietro Asinari. 2016. «A review on the heat and mass transfer phenomena in nanofluid coolants with special focus on automotive applications». Renewable and Sustainable Energy Reviews 60. 1615-33. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.027>.

[23] Masuda H, Ebata A, Teramae K, Hishinuma N. Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (dispersion of -Al2O3, SiO2 and TiO2 ultra-fine particles). Netsu Bussei (Japan).1993; 4(4): 227–233.

[24] Kasaeian, A., Eshghi, A. T., & Sameti, M. (2015). "A review on the applications of nanofluids in solar energy systems". Renewable and Sustainable Energy Reviews, 43, 584–598. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.020>

[25] Prasher R, Song D, Wang J, Phelan P. "Measurements of nanofluid viscosity and its implications for thermal applications". Applied Physics Letters.2006; 89(13): 133108

[26] Nguyen C, Desgranges F, Roy G, Galanis N, Mare T, Boucher S, Anguemintsa H. Temperature and particle-size dependent viscosity data for water-based nanofluids-hysteresis phenomenon. *International Journal of Heat Fluid Flow*.2007; 28(6): 1492–1506.

[27] Chen H, Ding Y, Lapkin A, Fan X. “Rheological behavior of ethylene glycol titanate nanotube nanofluids”. *Journal of Nanopart. Res.* 2009; 11(6): 1513–1520

[28] Garg J, Poudel B, Chiesa M, Gordon J, Ma J, Wang J, Ren Z, Kang Y, Ohtani H, Nanda J. Enhanced thermal conductivity and viscosity of copper nanoparticles in ethylene glycol nanofluid. *Journal of Applied Physics*.2008; 103: 074301.

[29] Anoop KB, Sundararajan T, Das SK. Effect of particle size on the convective heat transfer in nanofluid in the developing region. *International Journal of Heat Mass Transfer*.2009; 52(9-10): 2189–2195.

[30] Kole M, Dey TK. Viscosity of alumina nanoparticles dispersed in car engine coolant. *Exp. Therm. Fluid Sci.*2010; 34(6): 677–683.

[31] Lee SW, Park SD, Kang S, Bang IC, Kim JH. Investigation of viscosity and thermal conductivity of SiC nanofluids for heat transfer applications. *International Journal of Heat Mass Transfer*.2011; 54(1-3): 433–438.

[32] Keblinski, P, S. R Phillpot, S. U. S Choi, e J. A Eastman. 2002. «Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids)». *International Journal of Heat and Mass Transfer* 45(4): 855–63. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(01\)00175-2](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(01)00175-2)

[33] Daviran, Samaneh, Alibakhsh Kasaeian, Hamed Tahmooressi, Alimorad Rashidi, Dongsheng Wen, e Omid Mahian. 2017. «Evaluation of clustering role versus Brownian motion effect on the heat conduction in nanofluids: A novel approach». *International Journal of Heat and Mass Transfer* 108: 822–29. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.12.071>

[34] Paul, G., M. Chopkar, I. Manna, e P.K. Das. (2010). «Techniques for Measuring the Thermal Conductivity of Nanofluids: A Review». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (7): 1913–24. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.017>

[35] Philip, J., & Shima, P. D. (2012). “Thermal properties of nanofluids”. *Advances in Colloid and Interface Science*, 183–184, 30–45. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2012.08.001>

[36] Teng, Tun-Ping, Yi-Hsuan Hung, Tun-Chien Teng, Huai-En Mo, e How-Gao Hsu. 2010. «The Effect of alumina/water nanofluid particle size on thermal conductivity». *Applied Thermal Engineering* 30 (14): 2213–18. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.05.036>.

[37] Evans, William, Ravi Prasher, Jacob Fish, Paul Meakin, Patrick Phelan, e Pawel Keblinski. 2008. «Effect of Aggregation and Interfacial Thermal Resistance on Thermal Conductivity of Nanocomposites and Colloidal Nanofluids». *International Journal of Heat and Mass Transfer* 51 (5–6): 1431–38. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.10.017>

[38] Prasher, Ravi, Patrick E. Phelan, e Prajesh Bhattacharya. 2006. «Effect of Aggregation Kinetics on the Thermal Conductivity of Nanoscale Colloidal Solutions (Nanofluid)». *Nano Letters* 6 (7): 1529–34. <https://doi.org/10.1021/nl060992s>

[39] Wen, Dongsheng, Guiping Lin, Saeid Vafaei, e Kai Zhang. 2009. «Review of Nanofluids for Heat Transfer Applications». *Particuology* 7 (2): 141–50. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2009.01.007>.

[40] Wang X, Xu X, Choi SUS. “Thermal conductivity of nanoparticle–fluid mixture”. *Journal Thermophys, Heat Transfer*.1999; 13(4): 474–480.

[41] Xie H, Wang J, Xi T, Ali F. “Thermal conductivity of suspensions containing nanosized alumina particles”. *International Journal of Thermophysics*.2002b; 91: 4568-4572.

[42] Das SK, Putra N, Thiesen P, Roetzel W. Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids. *ASME Journal of Heat Transfer*.2003a; 125: 567-574

[43] Wen D, Ding Y. “Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions”. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.2004a; 47: 5181-5188

[44] Chon H, Kihm KD, Lee SP, Choi SUS. “Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) thermal conductivity enhancement”. *Applied Physics Letters*.2005; 87: 153107

[45] Li CH, Peterson GP. Experimental investigation of temperature and volume fraction variations on the effective thermal conductivity of nanoparticles suspensions (Nanofluids). *Journal of Applied Physics*.2006; 99: 084314.

[46] Beck, Michael P., Tongfan Sun, e Aryn S. Teja. 2007. «The Thermal Conductivity of Alumina nanoparticles Dispersed in Ethylene Glycol». *Fluid Phase Equilibria* 260 (2): 275–78. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2007.07.034>

[47] Pang, Changwei, Jae Won Lee, e Yong Tae Kang. 2015. «Review on combined heat and mass transfer characteristics in nanofluids». *International Journal of Thermal Sciences* 87: 49–67.

[48] Choi, C., H.S. Yoo, e J.M. Oh. 2008. «Preparation and Heat Transfer Properties of Nanoparticlein-Transformer Oil Dispersions as Advanced Energy-

Efficient Coolants». *Current Applied Physics* 8 (6): 710–12. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2007.04.060>.

[49] Choi, C., H.S. Yoo, e J.M. Oh. 2008. «Preparation and Heat Transfer Properties of Nanoparticlein-Transformer Oil Dispersions as Advanced Energy-Efficient Coolants». *Current Applied Physics* 8 (6): 710–12. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2007.04.060>.

[50] Koo, J., & Kleinstreuer, C. (2004). “A new thermal conductivity model for nanofluids”. *Journal of Nanoparticle Research*, 6(6), 577–588. <https://doi.org/10.1007/s11051-004-3170-5>

[51] Shahrul, I. M., I. M. Mahbubul, S. S. Khaleduzzaman, R. Saidur, e M. F. M. Sabri. 2014. «A comparative review on the specific heat of nanofluids for energy perspective». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 38: 88–98. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.081>

[52] Salinas, S. R. A. (2005). Einstein e a teoria do movimento browniano. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 27(2), 263–269. <https://doi.org/10.1590/S1806-11172005000200013>

[53] Pavlik, M. (2011). “The dependence of suspension viscosity on particle size, shear rate, and solvent viscosity”. *College of Liberal Arts & Social Sciences Theses and Dissertations*, 71.

[54] Mooney, M. (1951). “The viscosity of a concentrated suspension of spherical particles”. *Journal of Colloid Science*, 6(2), 162–170. [https://doi.org/10.1016/0095-8522\(51\)90036-0](https://doi.org/10.1016/0095-8522(51)90036-0)

[55] Bruce Poling, John Prausnitz, John O’Connell, “The Properties of Gases and Liquids”, Fifth Edition, McGraw-Hill 2001

[56] Yu. L. Rastorguev & Yu. A. Ganiev (1968). “Thermal conductivity of solutions” *Journal of engineering physics* volume 14, pages372–377 <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00828557>

[57] L. Grunberg & Alfred H. Nissan (1949). “Mixture law for viscosity” *Nature* volume 164, pages799–800. <https://www.nature.com/articles/164799b0>

[58] Suleiman Akilu, Aklilu Tesfamichael Baheta, Kumaran Kadirgama, Eswaran Padmanabhan, K.V. Sharma (2019) “Viscosity, electrical and thermal conductivities of ethylene and propyleneglycol-based  $\beta$ -SiC nanofluids” *Journal of Molecular Liquids* 284, 780-792. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.03.159>

[59] Sarviya, R.M., e Veeresh Fuskele. 2017. «Review on Thermal Conductivity of Nanofluids». *Materials Today: Proceedings* 4 (2): 4022–31. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.304>

[60] Theodore L. Bergman e Adrienne S. Lavigne “Fundamentals of heat and mass transfer” 8th Edition, Wiley

[61] Shah, R. K., and A. L. London, *Laminar Flow Forced Convection in Ducts*, Academic Press, New York, 1978

[62] Tuckerman, D.B., e R.F.W. Pease. 1981. «High-performance heat sinking for VLSI». *IEEE Electron Device Letters* 2 (5): 126–29. <https://doi.org/10.1109/EDL.1981.25367>

[63] M.J. Nine, H. Rehman, H.-S. Chung, K. Bae, H.-M. Jeong, “Effect of Ultrasonic Action on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Water Dispersion and Thermal Characterization with Convective Heat Transfer”, *Nanosci. Nanotechnol. Lett.* 4 (2012) 827–834. doi:10.1166/nnl.2012.1422

[64] P. K. Das (2017) “A review based on the effect and mechanism of thermal conductivity of normal nanofluids and hybrid nanofluids” *Journal of Molecular Liquids*, Volume 240, Pages 420-446 <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.07.017>.

[65] Mohammad Salemi Mojarrad, Ali Keshavarz, Masoud Ziabasharhagh, Mohammad Mehdi Raznahan, “Experimental investigation on heat transfer enhancement of alumina/water and alumina/water–ethylene glycol nanofluids in thermally developing laminar flow”, *Faculty of Mechanical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, Experimental Thermal and Fluid Science* 53 (2014) 111–118 <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2013.11.015>

[66] Choi, S.U., Eastman, J.A., 1995. “Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles” (No. ANL/MSD/CP-84938; CONF-951135-29). Argonne National Lab., IL (United States).

[67] Mohamed Ghorab, Evgueniy Entchev, Libing Yang, *Alexandria Engineering Journal*, 2017. “Inclusive analysis and performance evaluation of solar domestic hot water system (a case study)”

[68] Raquel O. Rodrigues, Patrícia C. Sousa, João Gaspar, Manuel Bañobre-López, Rui Lima, and Graça Minas, *Nano-micro Small Journal*, 2020 “Organ-on-a-Chip: A Preclinical Microfluidic Platform for the Progress of Nanomedicine”

[69] R.R. Souza, Vera Faustino, J.D. Oliveira, Inês M. Gonçalves, Manuel Bañobre-López, Ana S. Moita, Rui Lima. 2021 “Experimental investigation on thermal and transport properties of a novel stable nanofluid based on iron oxide nanoparticles” *in press*

[70] Anderson Gallego, Karen Cacua, Bernardo Herrera, David Cabaleiro, Manuel M. Piñeiro and Luis Lugo. *Advanced Powder Technology*, 2020 “Experimental evaluation of the effect in the stability and thermophysical properties of water-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> based nanofluids using SDBS as dispersant agent”



# ANEXO I – TRANSFERÊNCIA DE CALOR À MILIESCALA COM NANOFUIDOS (EXPERIMENTAL)

Água

Q_fonte (W)	Caudal			Tin (°C)	Tout (°C)	ΔT (°C)	Tm(x1) (°C)	Tm(x2) (°C)	Tm(x3) (°C)	h (W/m <sup>2</sup> K)	Qútil (W)
	mL/min	m <sup>3</sup> /s	kg/s								
6,36	5	8,33E-08	8,35E-05	19,63	27,67	8,05	20,16	22,31	24,72	512,80	2,81
	10	1,67E-07	1,67E-04	18,96	23,73	4,77	19,28	20,55	21,98	564,57	3,33
	15	2,50E-07	2,50E-04	18,92	22,23	3,30	19,14	20,02	21,01	533,73	3,46

PPG25W75

Q_fonte (W)	Caudal			Tin (°C)	Tout (°C)	ΔT (°C)	Tm(x1) (°C)	Tm(x2) (°C)	Tm(x3) (°C)	h (W/m <sup>2</sup> K)	Qútil (W)
	mL/min	m <sup>3</sup> /s	kg/s								
6,36	5	8,33E-08	8,42E-05	22,39	30,33	7,94	22,92	25,04	27,42	425,12	2,51
	10	1,67E-07	1,68E-04	24,15	28,23	4,07	24,43	25,51	26,73	392,26	2,57
	15	2,50E-07	2,53E-04	17,18	20,73	3,55	17,41	18,36	19,43	452,44	3,37

PPG50W50

Q_fonte (W)	Caudal			Tin (°C)	Tout (°C)	ΔT (°C)	Tm(x1) (°C)	Tm(x2) (°C)	Tm(x3) (°C)	h (W/m <sup>2</sup> K)	Qútil (W)
	mL/min	m <sup>3</sup> /s	kg/s								
6,36	5	8,33E-08	8,49E-05	19,43	28,46	9,04	20,03	22,44	25,15	378,79	2,56
	10	1,67E-07	1,70E-04	21,15	25,65	4,50	21,45	22,65	24,00	360,39	2,55
	15	2,50E-07	2,55E-04	16,97	20,79	3,82	17,22	18,24	19,39	419,35	3,25

PPG75W25

Q_fonte (W)	Caudal			Tin (°C)	Tout (°C)	ΔT (°C)	Tm(x1) (°C)	Tm(x2) (°C)	Tm(x3) (°C)	h (W/m <sup>2</sup> K)	Qútil (W)
	mL/min	m <sup>3</sup> /s	kg/s								
6,36	5	8,33E-08	8,56E-05	21,87	31,51	9,64	22,51	25,08	27,98	285,58	2,41
	10	1,67E-07	1,71E-04	21,54	26,64	5,10	21,88	23,24	24,77	288,36	2,55
	15	2,50E-07	2,57E-04	19,07	22,94	3,88	19,33	20,36	21,52	342,42	2,91

PPG

Q_fonte (W)	Caudal			Tin (°C)	Tout (°C)	ΔT (°C)	Tm(x1) (°C)	Tm(x2) (°C)	Tm(x3) (°C)	h (W/m <sup>2</sup> K)	Qútil (W)
	mL/min	m <sup>3</sup> /s	kg/s								
6,36	5	8,33E-08	8,63E-05	21,39	31,03	9,63	22,04	24,60	27,50	216,76	2,09
	10	1,67E-07	1,73E-04	20,11	24,96	4,84	20,44	21,73	23,18	202,03	2,10
	15	2,50E-07	2,59E-04	19,97	23,10	3,13	20,18	21,01	21,95	199,17	2,04

Nanofluido água + 0,05% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Q_fonte (W)	Caudal			Tin (°C)	Tout (°C)	ΔT (°C)	Tm(x1) (°C)	Tm(x2) (°C)	Tm(x3) (°C)	h (W/m <sup>2</sup> K)	Qútil (W)
	mL/min	m <sup>3</sup> /s	kg/s								
6,36	5	8,33E-08	8,36E-05	20,50	26,08	5,58	20,87	22,36	24,04	517,0	1,95
	10	1,67E-07	1,67E-04	20,14	22,63	2,49	20,31	20,97	21,72	578,5	1,74
	15	2,50E-07	2,51E-04	19,56	21,19	1,64	19,67	20,10	20,59	547,0	1,71

Nanofluido água + 0,1% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Q_fonte (W)	Caudal			Tin (°C)	Tout (°C)	ΔT (°C)	Tm(x1) (°C)	Tm(x2) (°C)	Tm(x3) (°C)	h (W/m <sup>2</sup> K)	Qútil (W)
	mL/min	m <sup>3</sup> /s	kg/s								
6,36	5	8,33E-08	8,37E-05	18,42	26,49	8,07	18,96	21,11	23,53	540,6	2,82
	10	1,67E-07	1,67E-04	18,29	22,87	4,58	18,59	19,82	21,19	585,9	3,20
	15	2,50E-07	2,51E-04	18,83	22,21	3,37	19,06	19,96	20,97	549,6	3,53

Nanofluido água + 0,2% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Q_fonte (W)	Caudal			Tin (°C)	Tout (°C)	ΔT (°C)	Tm(x1) (°C)	Tm(x2) (°C)	Tm(x3) (°C)	h (W/m <sup>2</sup> K)	Qútil (W)
	mL/min	m <sup>3</sup> /s	kg/s								
6,36	5	8,33E-08	8,39E-05	18,67	26,04	7,37	19,16	21,13	23,34	486,3	2,57
	10	1,67E-07	1,68E-04	18,67	22,66	3,99	18,93	20,00	21,19	547,6	2,78
	15	2,50E-07	2,52E-04	17,52	20,42	2,90	17,71	18,48	19,35	520,3	3,04

Nanofluido PPGW50 + 0,05% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Q_fonte (W)	Caudal			Tin (°C)	Tout (°C)	ΔT (°C)	Tm(x1) (°C)	Tm(x2) (°C)	Tm(x3) (°C)	h (W/m <sup>2</sup> K)	Qútil (W)
	mL/min	m <sup>3</sup> /s	kg/s								
6,36	5	8,33E-08	8,50E-05	17,85	25,25	7,40	18,34	20,32	22,54	386,7	2,09
	10	1,67E-07	1,70E-04	17,61	21,96	4,35	17,90	19,06	20,37	371,5	2,46
	15	2,50E-07	2,55E-04	19,82	22,83	3,01	20,02	20,82	21,73	424,6	2,56

Nanofluido PPGW50 + 0,1% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Q_fonte (W)	Caudal			Tin (°C)	Tout (°C)	ΔT (°C)	Tm(x1) (°C)	Tm(x2) (°C)	Tm(x3) (°C)	h (W/m <sup>2</sup> K)	Qútil (W)
	mL/min	m <sup>3</sup> /s	kg/s								
6,36	5	8,33E-08	8,51E-05	17,79	26,51	8,72	18,37	20,70	23,32	391,8	2,47
	10	1,67E-07	1,70E-04	17,45	22,27	4,82	17,77	19,06	20,50	368,8	2,72
	15	2,50E-07	2,55E-04	19,26	22,76	3,50	19,49	20,43	21,48	433,0	2,97

Nanofluido PPGW50 + 0,2% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Q_fonte (W)	Caudal			Tin (°C)	Tout (°C)	ΔT (°C)	Tm(x1) (°C)	Tm(x2) (°C)	Tm(x3) (°C)	h (W/m <sup>2</sup> K)	Qútil (W)
	mL/min	m <sup>3</sup> /s	kg/s								
6,36	5	8,33E-08	8,54E-05	18,37	27,35	8,98	18,97	21,36	24,06	346,3	2,54
	10	1,67E-07	1,71E-04	18,23	23,14	4,91	18,56	19,87	21,34	326,1	2,78
	15	2,50E-07	2,56E-04	18,50	21,86	3,36	18,72	19,62	20,63	385,1	2,85

## ANEXO II – TRANSFERÊNCIA DE CALOR À MILIESCALA COM NANOFUIDOS (TEÓRICO)

Água

Di (m)	Caudal	U (m/s)	Re	Pr	$\Delta P$ (Pa)	f	h (W/m <sup>2</sup> K)
	mL/min						
0,005	5	4,24E-03	23,12	6,85	0,75	2,77	526,69
0,005	10	8,49E-03	42,95	6,85	1,61	1,49	526,69
0,005	15	1,27E-02	64,42	6,85	2,42	0,99	526,69

PPG25W75

Di (m)	Caudal	U (m/s)	Re	Pr	$\Delta P$ (Pa)	f	h (W/m <sup>2</sup> K)
	mL/min						
0,005	5	4,24E-03	14,75	12,26	1,18	4,34	387,82
0,005	10	8,49E-03	29,51	12,26	2,37	2,17	387,82
0,005	15	1,27E-02	44,26	12,26	3,55	1,45	387,82

PPG50W50

Di (m)	Caudal	U (m/s)	Re	Pr	$\Delta P$ (Pa)	f	h (W/m <sup>2</sup> K)
	mL/min						
0,005	5	4,24E-03	9,24	23,90	1,91	6,93	284,51
0,005	10	8,49E-03	18,48	23,90	3,81	3,46	284,51
0,005	15	1,27E-02	27,72	23,90	5,72	2,31	284,51

PPG75W25

Di (m)	Caudal	U (m/s)	Re	Pr	$\Delta P$ (Pa)	f	h (W/m <sup>2</sup> K)
	mL/min						
0,005	5	4,24E-03	3,82	67,77	4,65	16,75	214,19
0,005	10	8,49E-03	7,64	67,77	9,30	8,37	214,19
0,005	15	1,27E-02	11,46	67,77	13,95	5,58	214,19

PPG

Di (m)	Caudal	U (m/s)	Re	Pr	$\Delta P$ (Pa)	f	h (W/m <sup>2</sup> K)
	mL/min						
0,005	5	4,24E-03	0,40	686,82	44,82	160,11	175,27
0,005	10	8,49E-03	0,80	686,82	89,64	80,06	175,27
0,005	15	1,27E-02	1,20	686,82	134,45	53,37	175,27

Nanofluido água + 0,05% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Di (m)	Caudal	U (m/s)	Re	Pr	$\Delta P$ (Pa)	f	h (W/m <sup>2</sup> K)
	mL/min						
0,005	5	4,24E-03	21,05	6,99	0,82	3,04	526,57
0,005	10	8,49E-03	42,09	6,99	1,65	1,52	526,57
0,005	15	1,27E-02	63,14	6,99	2,47	1,01	526,57

Nanofluido água + 0,1% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Di (m)	Caudal	U (m/s)	Re	Pr	$\Delta P$ (Pa)	f	h (W/m <sup>2</sup> K)
	mL/min						
0,005	5	4,24E-03	21,92	6,98	0,79	2,92	527,32
0,005	10	8,49E-03	42,09	6,98	1,65	1,52	527,32
0,005	15	1,27E-02	65,77	6,98	2,38	0,97	527,32

Nanofluido água + 0,2% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Di (m)	Caudal	U (m/s)	Re	Pr	$\Delta P$ (Pa)	f	h (W/m <sup>2</sup> K)
	mL/min						
0,005	5	4,24E-03	21,05	6,96	0,83	3,04	528,82
0,005	10	8,49E-03	42,10	6,96	1,65	1,52	528,82
0,005	15	1,27E-02	63,14	6,96	2,48	1,01	528,82

Nanofluido PPGW50 + 0,05% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Di (m)	Caudal	U (m/s)	Re	Pr	$\Delta P$ (Pa)	f	h (W/m <sup>2</sup> K)
	mL/min						
0,005	5	4,24E-03	9,24	23,86	1,91	6,93	284,92
0,005	10	8,49E-03	18,48	23,86	3,82	3,46	284,92
0,005	15	1,27E-02	27,72	23,86	5,73	2,31	284,92

Nanofluido PPGW50 + 0,1% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

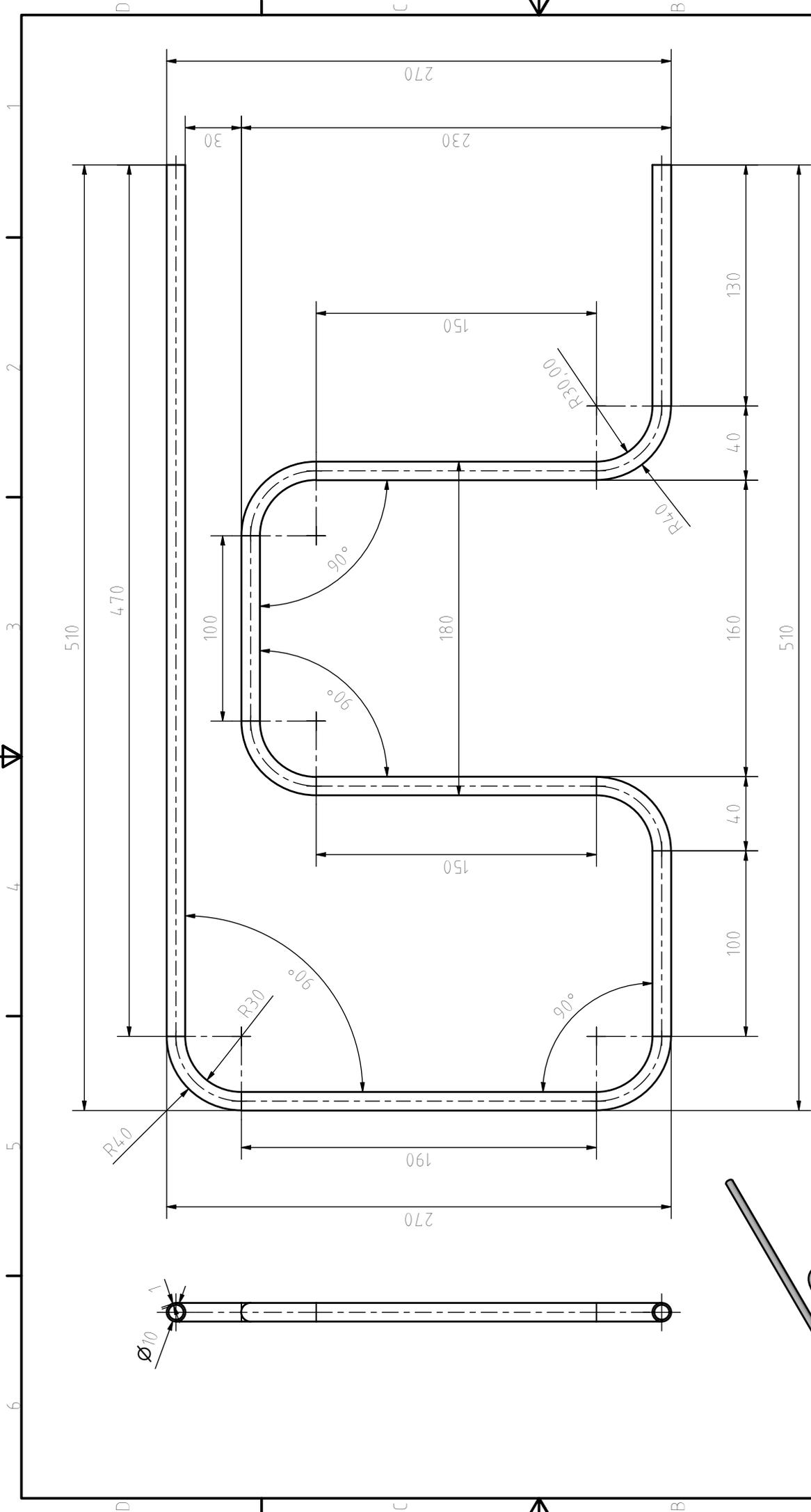
Di (m)	Caudal	U (m/s)	Re	Pr	ΔP (Pa)	f	h (W/m <sup>2</sup> K)
	mL/min						
0,005	5	4,24E-03	9,24	23,82	1,91	6,92	285,34
0,005	10	8,49E-03	18,49	23,82	3,82	3,46	285,34
0,005	15	1,27E-02	27,73	23,82	5,73	2,31	285,34

Nanofluido PPGW50 + 0,2% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

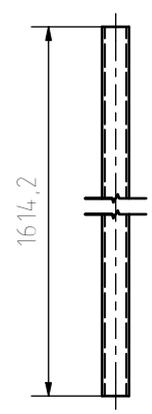
Di (m)	Caudal	U (m/s)	Re	Pr	ΔP (Pa)	f	h (W/m <sup>2</sup> K)
	mL/min						
0,005	5	4,24E-03	9,25	23,74	1,92	6,92	286,17
0,005	10	8,49E-03	18,49	23,74	3,83	3,46	286,17
0,005	15	1,27E-02	27,74	23,74	5,75	2,31	286,17

## ANEXO III – DESENHOS TÉCNICOS

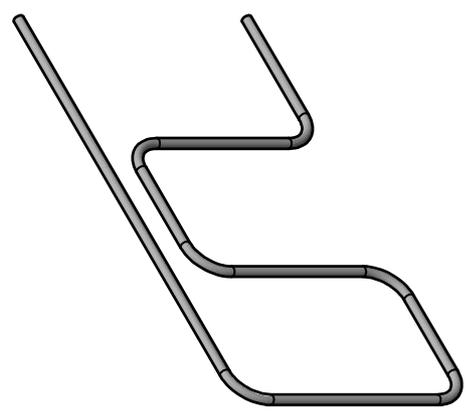
No presente capítulo serão apresentados os desenhos técnicos, bem como a planificação de corte do tubo, das duas serpentinas produzidas a partir de um tubo de cobre recozido com um diâmetro externo de 10mm e 1mm de espessura, realizado com as ferramentas *Rothenberger Tube Bender Maxi* e *Virax 250L*.

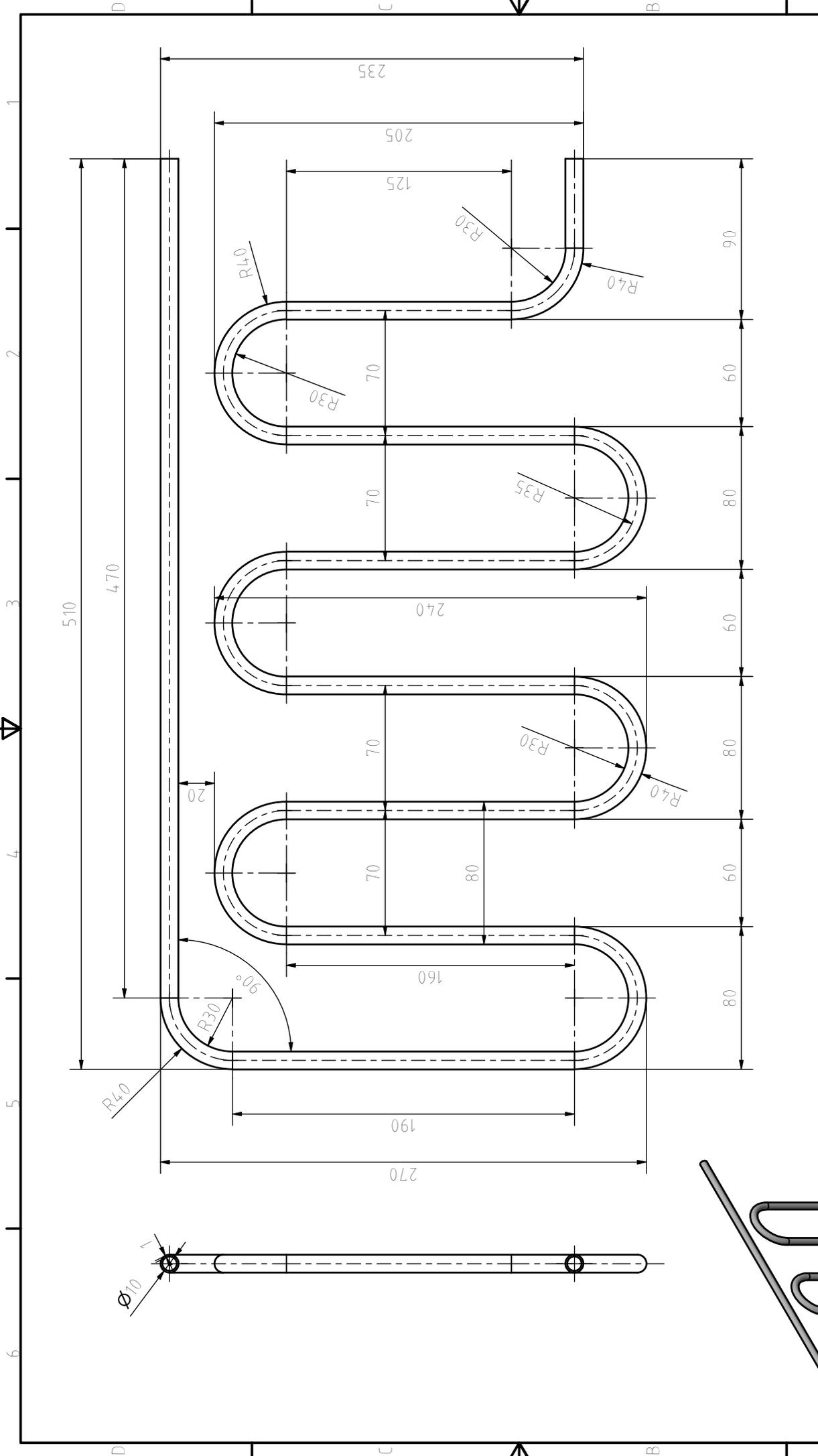


Planificação Corte Tubo



Desenh		Aprova		Projeto		Universidade do Minho		TESE	
Proj		Proj		Proj		Departamento de		20.SP.02	
Copi		Copi		Copi		Engenharia Mecânica			
Verif		Verif		Verif					
Escala		Escala		Escala		Sepertina - Modelo 2			
12		12		12		Tubo RD 10x1			
Tol		Tol		Tol					
ISO		ISO		ISO					
2768mk		2768mk		2768mk					
								Substituído por:	





Desenh. Aprovado:		Projeto: Igual		Criação:		Verif.:		Escala:		Universidade do Minho		TESE	
Projeto:		Projeto:		Projeto:		Projeto:		Projeto:		Departamento de Engenharia Mecânica		20.SP.01	
Copiou:		Copiou:		Copiou:		Copiou:		Copiou:		Sepertina - Modelo 1		Substituído por:	
Verif.:		Verif.:		Verif.:		Verif.:		Verif.:		Tubo RD 10x1		Substituído por:	
Escala:		Escala:		Escala:		Escala:		Escala:		Tol. ISO 2768mk		Substituído por:	
Escala:		Escala:		Escala:		Escala:		Escala:		Tol. ISO 2768mk		Substituído por:	

Planificação Corte Tubo

