

Determinação de coeficiente de transferência de calor de ácido adípico

Ulyana Horbatyuk

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Carlos Manuel Coutinho Tavares de Pinho

Orientador no INEGI: Ana Gomes Magalhães



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Setembro 2019

Resumo

A presente dissertação foi elaborada no âmbito da especialização Energia Térmica do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

O principal objetivo deste trabalho foi a medição de taxas de transferência de calor de um termofluido, *Therminol 66*, para o material de mudança de fase ácido adípico. O ácido adípico apresenta uma temperatura de mudança de fase de 151-152 °C. Recorreu-se a uma instalação experimental presente no laboratório de Combustão do INEGI, que inclui um permutador de ensaios com uma camada de três tubos com uma inclinação de 5° com a horizontal, em torno dos quais escoa o termofluido de forma quase perpendicular aos tubos. A instalação experimental permite recriar ciclos de carga e descarga (aquecimento e arrefecimento).

De modo a avaliar a influência do caudal na taxa a que se dão os processos de carga e descarga, efetuaram-se ensaios a diferentes caudais, concluindo-se que não existe grande influência, pois a resistência térmica no interior dos tubos é muito superior fora destes.

Os ensaios experimentais realizados incluíram ainda os testes ao d-manitol, material estudado anteriormente, para validar as conclusões obtidas.

Para o material em estudo, ácido adípico, o valor médio de transferência de calor global obtido foi 1.008 W/(m²K), do coeficiente de transferência de calor no material de mudança de fase foi 1.320 W/(m²K) e do coeficiente de transferência de calor do lado do termofluido foi 38.720 W/(m²K). Estes valores de coeficientes de transferência de calor são muito superiores aos apresentados por d-manitol.

Determination of the heat transfer coefficient of adipic acid

Abstract

This dissertation was elaborated in the scope of the Thermal Energy specialization of the Integrated Master in Mechanical Engineering at the Faculty of Engineering of the University of Porto.

The main goal of this work was to measure the heat transfer rates of a thermofluid, Therminol 66, to a phase change material called adipic acid. The adipic acid has a phase change temperature of 151-152 ° C. An experimental installation in the INEGI Combustion laboratory was used, which includes a cylindrical capsule with three tubes disposed almost horizontally (5° inclination) that contains phase change material, around which the thermal fluid flows almost perpendicular to the tubes. The experimental installation allows to recreate loading and unloading cycles (heating and cooling).

In order to evaluate the influence of the flow on the rate at which the loading and unloading processes take place, tests were performed at different flow rates, concluding that there is no great influence, since the thermal resistance inside the tubes is much higher than on the outside.

Experimental tests also included tests on d-mannitol, previously studied material, to validate the conclusions obtained.

For the studied material, adipic acid, the average global heat transfer value obtained was 1,008 W / (m²K), the heat transfer coefficient in the phase change material was 1,320 W / (m²K) and the heat transfer coefficient on the thermofluid side was 38,720 W / (m²K). These values of heat transfer coefficients are much higher than those presented by d-mannitol.

Agradecimentos

Aos meu Orientador, Professor Carlos Manuel Coutinho Tavares de Pinho pela partilha do seu conhecimento, constante motivação e disponibilidade.

À minha orientadora no INEGI, Ana Gomes Magalhães, pelos conselhos e recomendações.

Ao Vítor Ferreira, por toda a ajuda ao longo do trabalho.

Aos meus pais por nunca me deixarem desistir.

À minha irmã, que acredita sempre em mim e me apoia incondicionalmente.

Ao Pedro.

Aos meus amigos.

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento do projeto e motivação.....	1
1.2	INEGI.....	1
1.3	Objetivos do projeto.....	2
1.4	Estrutura da dissertação.....	2
2	Estado da arte.....	3
2.1	Introdução aos materiais de mudança de fase.....	3
2.1.1	Armazenamento de energia.....	3
2.1.2	Materiais de mudança de fase e a sua classificação.....	5
2.2	Limitações dos materiais de mudança de fase e métodos de melhoria.....	8
2.2.1	Condutibilidade térmica.....	8
2.2.2	Sobreaquecimento e fusão incongruente.....	10
2.2.2	Degradação.....	10
2.3	Aplicações dos materiais de mudança de fase.....	10
2.3.1	Eletrónica.....	10
2.3.2	Materiais de construção.....	11
2.3.3	Solar.....	11
2.3.4	Textil.....	11
3	Instalação e procedimento experimental.....	13
3.1	Componentes da instalação experimental.....	13
3.1.1	Sistema de aquecimento.....	14
3.1.2	Sistema de arrefecimento.....	14
3.1.3	Sistema de bombagem do fluido de transferência de calor.....	15
3.1.4	Tubagem e válvulas.....	16
3.1.5	Sistema de aquisição de dados.....	16
3.1.6	Vaso de expansão.....	16
3.1.7	Sistema de medição de caudal.....	17
3.1.8	Permutador de testes.....	17
3.2	Funcionamento.....	18
3.2.1	Aquecimento.....	19
3.2.2	Arrefecimento.....	19
4	Material de mudança de fase em estudo: ácido adípico.....	21
5	Permutador de testes.....	23
5.1	Características do permutador de testes.....	23
5.2	Instrumentação de medição.....	24

6	Validação dos resultados do d-manitol.....	25
6.1	Massa d-manitol introduzida nos tubos.....	25
6.2	Caracterização do caudal mássico e escoamento.....	25
6.3	Evolução de temperatura do material de mudança de fase no interior dos tubos.....	26
6.4	Coeficientes de transferência de calor.....	31
6.4.1	Coeficiente global de transferência de calor.....	31
6.4.2	Coeficiente de transferência de calor do lado do termofluido.....	34
6.4.3	Coeficiente de transferência de calor no material de mudança de fase....	37
6.4.4	Resumo.....	39
7	Resultados ácido adípico.....	41
7.1	Massa de ácido adípico introduzida nos tubos.....	41
7.2	Caracterização do caudal mássico e escoamento.....	41
7.3	Evolução da temperatura do material de mudança de fase.....	42
7.4	Coeficientes de transferência de calor.....	44
7.4.1	Coeficiente global de transferência de calor.....	44
7.4.2	Coeficiente de transferência de calor do lado do termofluido.....	47
7.4.3	Coeficiente de transferência de calor no material de mudança de fase.....	49
7.4.4	Resumo.....	51
8	Conclusão.....	53
9	Trabalhos futuros.....	55
	Referências.....	57
	ANEXO A: Características da bomba centrífuga.....	59
	ANEXO B: Propriedades do fluido de transferência de calor.....	61
	ANEXO C: Programa de aquisição de dados.....	63
	ANEXO D: Características e calibração da placa orifício.....	65
	ANEXO E: Verificação dos pontos de funcionamento da placa orifício.....	71
	ANEXO F: Ficha técnica do ácido adípico.....	73

Nomenclatura

A_{ext}	Área exterior	[m ²]
c	Calor específico	[J/ (kg K); kJ/ (kg K)]
D	Diâmetro	[m]
h_{ext}	Coeficiente de transferência de calor do lado do termofluido	[W/ (m ² K)]
h_{int}	Coeficiente de transferência de calor no material de mudança de fase	[W/ (m ² K)]
h_{mf}	Entalpia de mudança de fase	[J/ kg; kJ/ kg]
k	Condutibilidade térmica	[W/ (mK)]
m	Massa	[kg]
$\dot{m}$	Caudal mássico	[kg/ s]
Q	Energia térmica	[J]
$\dot{Q}$	Potência calorífica	[W]
Re	Número de Reynolds	-
T_{ent}	Temperatura à entrada do permutador	[°C]
T_{par}	Temperatura na parede dos tubos	[°C]
T_{PCM}	Temperatura do material de mudança de fase	[°C]
T_{sai}	Temperatura à saída do permutador	[°C]
U	Coeficiente global de transferência de calor	[W/ (m ² K)]
v	Velocidade do escoamento	[m/ s]
V	Tensão	[V]
μ	Viscosidade dinâmica	[Pa s]
ρ	Massa volúmica	[kg/ m ³]
ΔT_{ml}	Diferença da temperatura média logarítmica	[°C]
ΔV	Diferencial de tensão	[V]

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Processo de aquecimento e arrefecimento de um material, englobando a temperatura de mudança de temperatura (Trindade, 2018).....	4
Figura 2.2 – Classificação de diferentes tipos de materiais de mudança de fase (Trindade, 2018).....	5
Figura 3.1 – Instalação experimental (Rocha, 2018).....	13
Figura 3.2 – Aquecedor (direita) e controlador de temperatura do tipo liga/desliga (Trindade, 2018).....	14
Figura 3.3 -Permutador de calor (Rocha, 2018).....	14
Figura 3.4 – Caudalímetro (Esteves, 2016).....	15
Figura 3.5 – Grupo de bombagem (Trindade, 2018).....	15
Figura 3.6 – Variador de frequência (Trindade, 2018).....	15
Figura 3.7 – Placas de aquisição de dados (Rocha, 2018).....	16
Figura 3.8 – Vaso de expansão (Trindade, 2018).....	17
Figura 3.9 – Transdutor de pressão (Trindade, 2018).....	17
Figura 3.10 – Fonte de alimentação (Trindade, 2018).....	17
Figura 3.11 – Permutador de testes (Rocha, 2018).....	18
Figura 3.12 – Desenho esquemático da instalação. A-Aquecedor; B- Permutador de calor; C- Bomba centrífuga; D- Permutador de testes; E- Purga de ar; P- Placa orifício; V- Vaso de expansão (Trindade, 2018).....	19
Figura 3.13 – Desenho esquemático do circuito de aquecimento. A- Aquecedor; B- Bomba Centrífuga; C- Permutador de testes (Rocha, 2018).....	19
Figura 3.14- Desenho esquemático do circuito de aquecimento. A- Permutador de calor; B- Bomba Centrífuga; C- Permutador de testes (Rocha, 2018).....	20
Figura 4.1- Estrutura molecular do ácido adípico.....	21
Figura 5.1- Desenho esquemático do permutador de testes (Rocha, 2018).....	23
Figura 5.2- Desenho 2D do permutador de testes (Rocha, 2018).....	23
Figura 5.3- Esquema da colocação de termopares no permutador de testes (Rocha, 2018)....	24
Figura 6.1- Aquecimento d-manitol - 50 Hz. Evolução da temperatura ao longo do ciclo de aquecimento (Rocha, 2018).....	27
Figura 6.2 - Aquecimento d-manitol - 50 Hz. Evolução da temperatura ao longo do ciclo de aquecimento, dados obtidos por experimentação.....	28
Figura 6.3– Arrefecimento d-manitol - 50 Hz. Evolução da temperatura ao longo do ciclo de arrefecimento (Rocha, 2018).....	29
Figura 6.4- Arrefecimento d-manitol - 50 Hz. Evolução da temperatura ao longo do ciclo de arrefecimento à taxa de 5 l/min, dados obtidos por experimentação.....	30
Figura 6.5- Arrefecimento d-manitol - 50 Hz. Evolução da temperatura ao longo do ciclo de arrefecimento à taxa de 5 l/min, e posteriormente 3 l/min, dados obtidos por experimentação.....	30
Figura 6.6 - Aquecimento d-manitol - 50 Hz. Evolução do coeficiente de transferência de calor global ao longo do ciclo de aquecimento, dados obtidos por experimentação.....	32

Figura 6.7- Arrefecimento d-manitol - 50 Hz. Evolução do coeficiente de transferência de calor global ao longo do ciclo de arrefecimento à taxa de 5 l/min, dados obtidos por experimentação.....	33
Figura 6.8- Arrefecimento d-manitol - 50 Hz. Evolução do coeficiente de transferência de calor global ao longo do ciclo de arrefecimento à taxa de 5 l/min à taxa de 5 l/min, e posteriormente 3 l/min, dados obtidos por experimentação.....	33
Figura 6.9- Aquecimento d-manitol - 50 Hz. Evolução do coeficiente de transferência de calor do lado do termofluido ao longo do ciclo de aquecimento, dados obtidos por experimentação.....	35
Figura 6.10- Arrefecimento d-manitol - 50 Hz. Evolução do coeficiente de transferência de calor do lado do termofluido ao longo do ciclo de arrefecimento à taxa de 5 l/min, dados obtidos por experimentação.....	36
Figura 6.11- Arrefecimento d-manitol - 50 Hz. Evolução do coeficiente de transferência de calor do lado do termofluido ao longo do ciclo de arrefecimento à taxa de 5 l/min e posteriormente à 3 l/min, dados obtidos por experimentação.....	36
Figura 6.12 - Aquecimento d-manitol - 50 Hz. Evolução do coeficiente de transferência de calor no material de mudança de fase ao longo do ciclo de aquecimento, dados obtidos por experimentação.....	37
Figura 6.13 Arrefecimento d-manitol - 50 Hz. Evolução do coeficiente de transferência de calor no material de mudança de fase ao longo do ciclo de arrefecimento à taxa de 5 l/min, dados obtidos por experimentação.....	38
Figura 6.14- Arrefecimento d-manitol - 50 Hz. Evolução do coeficiente de transferência de calor do lado do termofluido ao longo do ciclo de arrefecimento à taxa de 5 l/min e posteriormente à 3 l/min, dados obtidos por experimentação.....	38
Figura 7.1- Aquecimento ácido adípico- 50 Hz. Evolução da temperatura ao longo do ciclo de aquecimento, dados obtidos por experimentação.....	42
Figura 7.2- Arrefecimento d-manitol - 50 Hz. Evolução da temperatura ao longo do ciclo de arrefecimento à taxa de 5 l/min, dados obtidos por experimentação.....	43
Figura 7.3- Arrefecimento ácido adípico - 50 Hz. Evolução da temperatura ao longo do ciclo de arrefecimento à taxa de 3 l/min, dados obtidos por experimentação.....	44
Figura 7.4- Aquecimento ácido adípico - 50 Hz. Evolução do coeficiente de transferência de calor global ao longo do ciclo de aquecimento, dados obtidos por experimentação.....	45
Figura 7.5- Arrefecimento ácido adípico - 50 Hz. Evolução do coeficiente de transferência de calor global ao longo do ciclo de arrefecimento à taxa de 5 l/min, dados obtidos por experimentação.....	46
Figura 7.6- Arrefecimento ácido adípico - 50 Hz. Evolução do coeficiente de transferência de calor global ao longo do ciclo de arrefecimento à taxa de 3 l/min, dados obtidos por experimentação.....	46
Figura 7.7 - Aquecimento ácido adípico - 50 Hz. Evolução do coeficiente de transferência de calor do lado do termofluido ao longo do ciclo de aquecimento, dados obtidos por experimentação.....	47
Figura 7.8- Arrefecimento ácido adípico - 50 Hz. Evolução do coeficiente de transferência de calor do lado do termofluido ao longo do ciclo de arrefecimento à taxa de 5 l/min, dados obtidos por experimentação.....	48

Figura 7.9- Arrefecimento ácido adípico - 50 Hz. Evolução do coeficiente de transferência de calor do lado do termofluido ao longo do ciclo de arrefecimento à taxa de 3 l/min, dados obtidos por experimentação.....	48
Figura 7.10- Aquecimento ácido adípico - 50 Hz. Evolução do coeficiente de transferência de calor no material de mudança de fase ao longo do ciclo de aquecimento, dados obtidos por experimentação.....	49
Figura 7.11- Arrefecimento ácido adípico - 50 Hz. Evolução do coeficiente de transferência de calor no material de mudança de fase ao longo do ciclo de arrefecimento à taxa de 5 l/min, dados obtidos por experimentação.....	50
Figura 7.12- Arrefecimento ácido adípico - 50 Hz. Evolução do coeficiente de transferência de calor do lado do termofluido ao longo do ciclo de arrefecimento à taxa de 3 l/min, dados obtidos por experimentação.....	50
Figura A.1 - Características da bomba centrífuga.....	59
Figura C.1 – Programa desenvolvido para o registo e processamento dos dados – aquecimento (Rocha, 2018).....	63
Figura C.2 - Programa desenvolvido para o registo e processamento dos dados – acompanhamento do aquecimento (Rocha, 2018).....	63
Figura D.1 - Desenho da placa orifício (Esteves, 2016).....	65
Figura D.2 - Curva de calibração da placa orifício para o permutador de testes com cápsula disposta na vertical.....	67
Figura D.3 - Curva de calibração da placa orifício para o permutador de testes com camada única de três tubos.....	68

Índice de Tabelas

Tabela 2.1– As principais vantagens e desvantagens de diferentes tipos de materiais de mudança de fase (Pinho, 2017).....	7
Tabela 6.1- Caudal mássico médio para diferentes ensaios do d-manitol.....	25
Tabela 6.2- Número de Reynolds médio para diferentes ensaios do d-manitol.....	26
Tabela 6.3 – Os coeficientes de transferência de calor globais médios obtidos durante a realização deste trabalho (2019), e por Rocha (2018).....	34
Tabela 6.4 – Valores médios de diferentes coeficientes de transferência de calor estudados do d-manitol.....	39
Tabela 7.1- Caudal mássico médio para diferentes ensaios do ácido adípico.....	41
Tabela 7.2- Número de Reynolds médio para diferentes ensaios do ácido adípico.....	41
Tabela 7.3- Valores médios de diferentes coeficientes de transferência de calor estudados do ácido adípico.....	51
Tabela B.1- Variação das propriedades do Therminol 66 com a temperatura.....	62
Tabela D.1- Caudais mássicos obtidos durante o controlo da calibração.....	66

1 Introdução

A energia representa, hoje-em-dia, uma necessidade quase primária. Esta encontra-se em quase todas as atividades desenvolvidas pelas pessoas, e como tal, a sua procura é cada vez maior. É sabido que, devido a esta procura, os recursos fósseis a preços acessíveis são cada vez menos, é necessário satisfazer essa procura através de fontes alternativas, e através de um uso mais racional da energia. Mais importante que isso é o grande impacto ambiental que apresentam.

Os fatores como o crescimento económico global, a população numerosa e uma procura constante da melhoria do conforto e estilo de vida contribuem para um aumento do consumo energético. A indústria, por sua vez, é um dos grandes setores que mais contribuem para tal. Por isso, a implementação das boas práticas neste setor, não só aumentará a produtividade e diminuirá os custos, como também vai permitir minimizar os seus impactos ao nível da emissão dos gases poluentes.

As energias renováveis têm vindo a mostrar-se como uma alternativa viável para muitas das utilizações dos combustíveis fósseis, no entanto estas apresentam algumas limitações, como por exemplo o seu desfasamento entre a procura e a oferta. A solução para este tipo de problemas passa por estudar modos de colmatar essas falhas, e é neste sentido que surge o armazenamento de energia térmica (Pinho, 2017).

1.1 Enquadramento do projeto e motivação

O presente trabalho enquadra-se no projeto de conclusão de grau de mestre na área de Energia Térmica, e surge como continuação de trabalhos desenvolvidos pela unidade de Energia do INEGI, relativamente aos sistemas de armazenamento de energia térmica com recurso a materiais de mudança de fase.

1.2 INEGI

INEGI – Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial nasceu em 1986 da parceria dos departamentos de Engenharia Mecânica e Engenharia e Gestão Industrial da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e é um instituto de novas tecnologias que tem por objetivo a atividade de investigação, inovação de base tecnológica e transferência de tecnologia. É uma associação privada sem fins lucrativos, que detém o estatuto de Utilidade Pública (INEGI, 2011).

Este trabalho foi desenvolvido na unidade de Energia cujos objetivos são a promoção de sustentabilidade e ecoeficiência nos setores industrial e de serviços. Tal é atingido através da implementação de conceitos de economia circular, racionalização de consumos energéticos,

integração direta de fontes de energia renovável, diminuição de desperdícios, valorização energética e recuperação de resíduos (Trindade, 2018).

1.3 Objetivos do projeto

O presente trabalho pretende medir as taxas de transferência de calor de um termofluido para um material de mudança de fase – ácido adípico, numa instalação laboratorial existente no INEGI.

1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em nove capítulos, sendo que o primeiro faz uma breve introdução ao interesse do estudo dos materiais de mudança de fase, contextualiza o projeto desenvolvido no laboratório do INEGI, tratando dos objetivos do trabalho efetuado.

O capítulo 2 apresenta o estado da arte, abordando o armazenamento de energia e classificando os materiais de mudança de fase. Neste capítulo também são abordadas as limitações deste tipo de materiais, bem como algumas das suas limitações.

O capítulo 3 descreve a instalação laboratorial utilizada para a realização do trabalho experimental, descrevendo os seus constituintes e o seu funcionamento.

O capítulo 4 apresenta o material em estudo, ácido adípico e contextualiza a necessidade do seu estudo.

No capítulo 5 é descrito em pormenor o permutador de testes utilizado, detalhando as suas dimensões e a sua constituição. Neste capítulo também se apresenta a instrumentação utilizada no trabalho experimental.

Os capítulos 6 e 7 apresentam a validação dos resultados dos testes anteriores ao d-manitol e os resultados obtidos para o ácido adípico. Nestes capítulos são descritos as massas de cada material usado, os regimes em que se processam os escoamentos. Por fim, apresentam-se os diferentes coeficientes de transferência de calor: global, do lado do termofluido e no material de mudança de fase.

Finalmente, o capítulo 8 apresenta as conclusões obtidas e no capítulo 9 sugerem-se trabalhos futuros.

2 Estado da arte

2.1 Introdução aos materiais de mudança de fase

A utilização dos materiais de mudança de fase como forma de armazenamento de energia remonta aos anos 1970, onde estes foram usados como condensadores térmicos em veículos lunares (Fleischer, 2015).

Os materiais de mudança de fase têm vindo a ganhar uma importância significativa no mundo da tecnologia, e no mundo da energia térmica. A tal importância é devida às várias razões: o crescente interesse na área de energia renovável, a evolução tecnológica e a procura de cada vez maior conforto, entre outras. Neste capítulo será explicitado o que são estes materiais, como se classificam e as suas aplicações.

2.1.1 Armazenamento de energia

Antes de introduzir o conceito do material de mudança de fase, é fundamental explicitar o armazenamento de energia térmica. O armazenamento de energia térmica pode ser feito com recurso ao calor sensível, calor latente e termoquímico.

No caso do armazenamento de calor termoquímico, tal é conseguido através de reações químicas reversíveis, ou então, através de processos de absorção e adsorção. Assim, o armazenamento do calor ocorre na fase endotérmica da reação e quando ocorre o processo inverso, uma reação exotérmica, este é libertado. Apesar de ainda se encontrar em desenvolvimento, este processo é bastante promissor, uma vez que os equipamentos que o utilizem possuem alta energia específica volumétrica e as perdas de calor decorrentes do processo são muito reduzidas (Nazir *et al.*, 2019).

Quando se trata de armazenamento de calor sensível, este processo deve-se à aplicação de energia a um material de modo a provocar um aumento ou uma diminuição da sua temperatura. A energia resultante de armazenamento por calor sensível é dada pela Equação 2.1:

$$Q = \rho V c \Delta T \quad (2.1)$$

Nesta equação c é o calor específico do material, ρ é a massa volumétrica do material, V é o volume de armazenamento e ΔT é a diferença entre as temperaturas final e inicial do armazenamento. É importante referir que o armazenamento térmico através do calor sensível depende em grande medida da componente calor específico volumétrico - ρc . Esta representa a aptidão de armazenar energia por um volume de uma substância que se encontra sujeita a uma diferença de temperatura, sem mudar o seu estado. Os materiais usados neste tipo de armazenamento têm de ser baratos, apresentar um calor específico elevado e ter uma boa capacidade calorífica, bem como uma alta condutibilidade térmica (Pinho, 2017). É possível utilizar um grande número de materiais e substâncias dependendo da situação em que este armazenamento é aplicado. Exemplos disso são a água e leito de rochas, utilizados em sistemas líquidos e sistemas a ar, respetivamente (Esteves, 2016).

Já o armazenamento através de calor latente compreende uma mudança física do material, durante a qual o material absorve e liberta energia, sem que haja alteração da sua temperatura. O calor que se liberta ou absorve num processo de mudança de fase é representado pela Equação 2.2:

$$Q = m h_{mf} \quad (2.2)$$

Nesta equação m é a massa do material e h_{mf} é o calor latente de mudança de fase. O calor latente de um material permite compreender qual é a quantidade de calor a fornecer para que

um quilograma desse material altere o seu estado físico. Este calor latente varia de substância para substância, e também de estado físico para estado físico.

Tomando como exemplo um sólido, este ao ser aquecido, irá absorver energia. Ao absorver esta energia, a substância irá aumentar de temperatura, até chegar ao ponto em que ocorre a transformação do seu estado físico, a fusão. Após a fusão, se se continuar a aplicar o calor, esta irá continuar a absorver energia até atingir o seu ponto de evaporação, mudando novamente o seu estado físico. Portanto, durante esta sequência de acontecimentos, acontecem dois tipos de armazenamento, sensível quando a temperatura do sólido ou líquido aumenta, e latente, durante as fases de transformação para líquido e vapor. O mesmo acontece no processo de arrefecimento. Este processo encontra-se ilustrado na Figura 2.1.

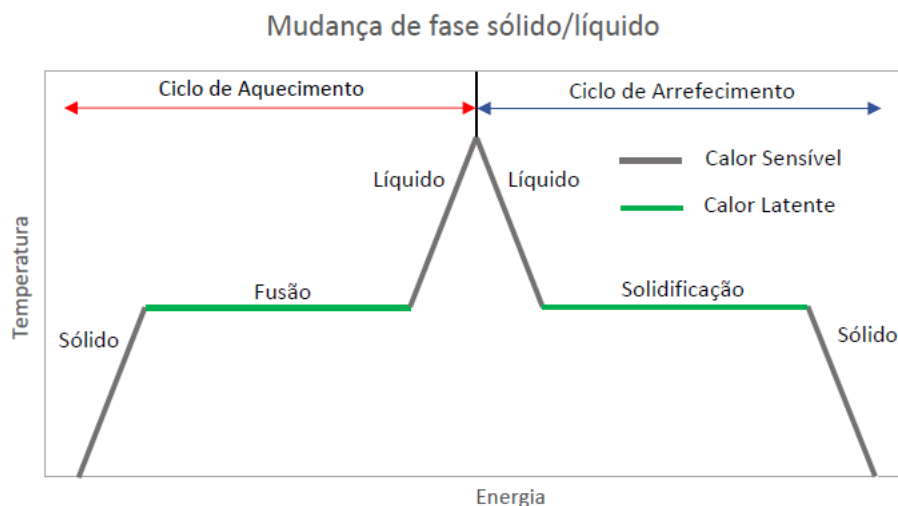


Figura 2.1 – Processo de aquecimento e arrefecimento de um material, englobando a temperatura de mudança de temperatura (Trindade, 2018).

Armazenamento de calor latente apresenta algumas vantagens em relação ao armazenamento de calor sensível. O calor latente de mudança de fase é em grande medida superior ao calor específico do material, o que faz com que as trocas de calor latente sejam muito superiores às trocas de calor sensível. Outra vantagem importante é que o processo de mudança de fase é um processo isotérmico, permitindo que as temperaturas de funcionamento de armazenamento latente sejam mais baixas (Pinho, 2017).

Apesar disso, este tipo de armazenamento apresenta algumas desvantagens, como a baixa condutibilidade dos materiais de mudança de fase, o sobrearrefecimento, a segregação de fases e também a instabilidade dos materiais após vários ciclos de funcionamento.

O armazenamento de energia térmica compreende três fases distintas, a carga, o armazenamento e a descarga. Durante o período da carga, o meio de armazenamento acumula energia do meio ou do fluido de transferência de calor, durante o armazenamento propriamente dito, a energia acumulada é retida no seio do material, e por fim, na fase da descarga, essa energia é libertada para o meio ou para o fluido de transferência de calor.

É importante recorrer ao estudo de armazenamento de energia, uma vez que tal permitirá melhorar os processos tecnológicos e aumentar a sua eficiência. A implementação de sistemas de armazenamento resulta numa série de vantagens. Os custos da energia serão reduzidos, pois é possível guardar o excesso produzido em alturas de pico de produção e utilizá-la posteriormente, segundo a necessidade. Por fim, reduz-se a utilização de combustíveis fósseis, o que tem um significativo impacto ambiental (Pinho, 2017).

2.1.2 Materiais de mudança de fase e a sua classificação

Os materiais quando sujeitos a certas condições com o objetivo de mudar o seu estado físico, absorvem ou libertam energia durante esse processo. Estes materiais, utilizados em armazenamento de calor latente, são denominados de Materiais de Mudança de Fase (*PCM – Phase Change Materials*). Os materiais de mudança de fase são materiais com grande calor de fusão, que absorvem e rejeitam energia durante a sua mudança de fase. Estes materiais enquadram-se no armazenamento de energia latente, porque durante a transformação de fase, estes materiais absorvem/libertam energia, não aumentando de temperatura.

De modo a compreender os materiais de mudança de fase, pode-se recorrer a sua classificação segundo a transformação a que estão sujeitos: sólido-líquido, líquido-vapor, sólido-vapor ou sólido-sólido. Esta classificação encontra-se resumida, junto com os tipos de materiais que englobam na Figura 2.1. As menos recomendadas são as transformações líquido-vapor e sólido-vapor devido à grande expansão volumétrica inerente e pressões elevadas, apesar de apresentarem um calor latente mais elevado do que em qualquer outra transformação (Bruno *et al.*, 2015).

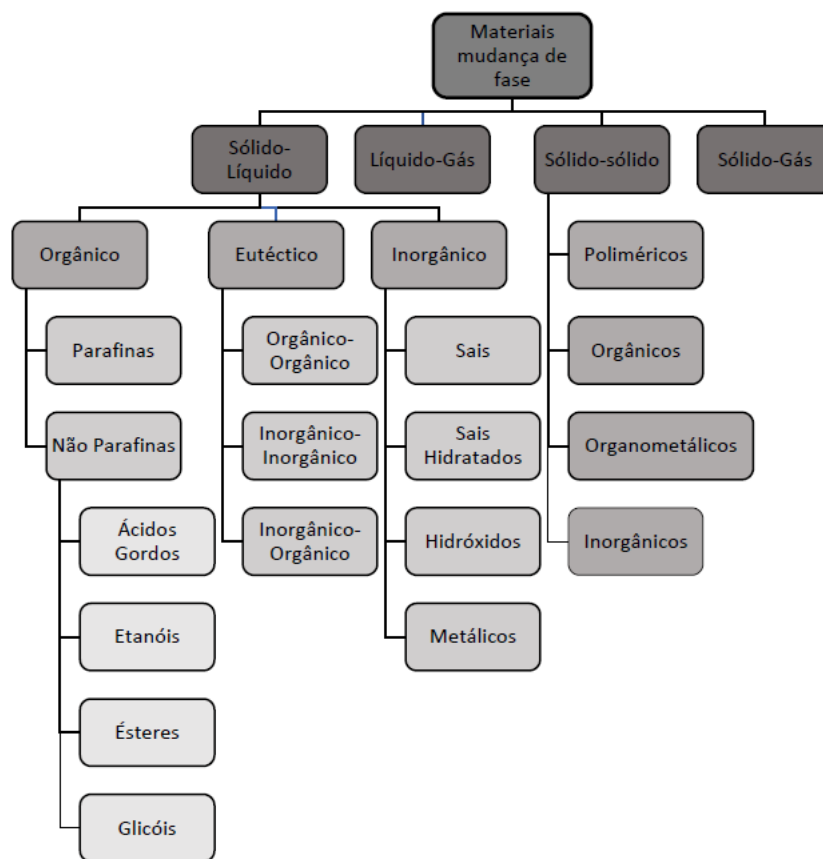


Figura 2.2 – Classificação de diferentes tipos de materiais de mudança de fase (Trindade, 2018).

Para integrar os materiais de mudança de fase em sistemas de armazenamento térmico, é necessário que cumpram uma série de requisitos. As propriedades térmicas mais relevantes são as temperaturas de mudança de fase adequadas à aplicação e condições de trabalho, grande capacidade de armazenamento de calor latente, de modo a permitir uso de menor quantidade de material e uma elevada condutibilidade térmica, que permitirá uma rápida transferência de calor, tornando os processos de carga e descarga mais céleres. Para além das enumeradas acima, é importante do ponto de vista de construção do sistema que os materiais apresentem uma baixa

variação de volume durante a transformação de fase, uma baixa pressão de vapor à temperatura de operação e compatibilidade com o meio. A estabilidade química permitirá uma maior durabilidade. Os fatores económicos têm que ser considerados, uma vez que grande abundância, disponibilidade e custo reduzido é fulcral para tornar um material atrativo. Para além destas, o impacto ambiental e a sua reciclabilidade são fatores cada vez mais importantes a considerar. Por fim, a segurança no manuseamento é igualmente importante, e assim o facto de serem não inflamáveis e não tóxicos é de extrema importância (Dinçer e Rosen, 2002). A grande desvantagem destes materiais é a baixa condutibilidade térmica, na gama dos 0,2 a 0,8 W/(m K), que afeta a eficiência do sistema (Cunha e Eames, 2016).

Um dos critérios mais importantes na seleção de um material de mudança de fase para a sua aplicação, é a temperatura de fusão, já que esta define a gama de temperaturas em que se fará o armazenamento térmico. Convém ainda salientar que as temperaturas de mudança de fase, e consequentemente de armazenamento latente, são constantes caso os materiais sejam puros, mas que no caso dos produtos comercialmente disponíveis, como o seu grau de pureza é mais baixo, verifica-se que a mudança de fase e logicamente o armazenamento de calor latente, ocorre numa maior ou menor gama de temperaturas. A largura desta banda de temperaturas é inversamente proporcional ao grau de pureza do material de mudança de fase em consideração (Pinho, 2017).

Os materiais orgânicos são os materiais de mudança de fase mais populares, e incluem as parafinas e ácidos gordos. São materiais que existem em abundância, baratos, são fáceis de manusear e não são corrosivos. Estas substâncias possuem elevado calor latente de fusão, no entanto são bastante instáveis a altas temperaturas, por isso o seu uso restringe-se a baixas e médias temperaturas (Bruno *et al*, 2015).

Já os materiais inorgânicos englobam sais hidratados e ligas metálicas. Estes apresentam propriedades como elevado calor latente de fusão, uma elevada condutibilidade térmica. No entanto são substâncias corrosivas e como consequência, são incompatíveis com um grande número de metais (Bruno *et al*, 2015).

A Tabela 2.1 apresenta as principais vantagens e desvantagens de diferentes tipos de materiais de mudança de fase (Pinho, 2017).

Tabela 2.1 – As principais vantagens e desvantagens de diferentes tipos de materiais de mudança de fase (Pinho, 2017).

	Orgânicos	Inorgânicos	Eutéticos
Vantagens	Não são corrosivos	Elevada entalpia de fusão	Temperatura de fusão precisa
	Não sofrem sobrearrefecimento	Alta condutibilidade térmica	Alta densidade de armazenamento de energia
	Estabilidade química e térmica	Custo moderado	
	Recicláveis	Pequena variação de volume	
	Disponíveis numa ampla gama de temperaturas	Não inflamáveis	
Desvantagens	Baixa condutibilidade térmica	Sofrem sobrearrefecimento	Disponibilidade limitada
	Inflamáveis	São corrosivos	
	Baixa entalpia de fusão	Falta de estabilidade térmica	
	Elevada variação de volume	Separação de fases	

2.1.2.1 Mudança de fase sólido-sólido

Os materiais de mudança de fase sólido-sólido sofrem uma transformação entre as fases sólida cristalina/semi-cristalina e uma fase amorfa/semi-cristalina.

As principais vantagens de utilização deste tipo de materiais de mudança de fase resumem-se ao facto de que não existem fugas de material e consequentemente, não há risco de contaminação, ao contrário do que pode acontecer com os materiais sólido-líquido (Crespo *et al.*, 2018). Este tipo de materiais pode ser utilizado em materiais de construção, como por exemplo, betão. Estes materiais sofrem menos segregação de fase e também apresentam poucas variações de volume, que resulta na sua maior durabilidade (Gotoh *et al.*, 2018).

Estes materiais podem ser divididos em quatro grandes grupos, conforme a sua estrutura molecular:

- os poliméricos;
- os orgânicos;
- os organometálicos;
- os inorgânicos.

Os materiais de mudança de fase sólido-sólido possuem diferentes transições de fases, resultando numa gama de temperaturas de transição vasta, juntamente com diferentes valores de condutibilidade térmica (Fallahi *et al.*, 2017).

2.1.2.2 Mudança de fase sólido-líquido

Este tipo de transição implica um rearranjo molecular de uma estrutura cristalina ordenada para uma estrutura amorfa. O aumento de temperatura provoca uma maior vibração das moléculas, que por sua vez quebra as ligações entre elas, obtendo-se assim um líquido. Com a descida da temperatura, em que se atinge a temperatura de mudança de fase, ocorre a nucleação – transformação de líquido novamente para uma estrutura cristalina organizada. Neste contexto, a substância fica sujeita a expansão e contração volumétrica (Fallahi *et al.*, 2017).

Os materiais de mudança de fase sólido-líquido podem também dividir-se em materiais orgânicos, inorgânicos e eutéticos. Os orgânicos, geralmente derivados de hidrocarbonetos, são bastante atrativos devido à apresentarem uma temperatura de mudança de fase estável, não apresentam segregação de fase, não apresentam sobrearrefecimento e não são corrosivos. São adequados para as baixas e moderadas temperaturas. Entre os materiais orgânicos destacam-se as parafinas e as não parafinas. As parafinas são substâncias de baixo custo, e uma energia térmica específica de armazenamento aceitável, no entanto a sua condutibilidade térmica é baixa, e como tal, é, por vezes necessário recorrer à métodos de melhoria de transferência de calor. Outro problema são as grandes variações de volume aquando da mudança de fase. As não parafinas são os ácidos gordos, etanóis, glicóis e ésteres. As suas principais vantagens são a durabilidade química e um sobrearrefecimento quase inexistente. Em contrapartida, são altamente inflamáveis, tóxicos, têm um baixo calor de fusão e são altamente instáveis a altas temperaturas (Khan *et al.*, 2016). Estes materiais são interessantes para aplicação em sistemas de armazenamento de energia solar. Os materiais de mudança de fase orgânicos são utilizados para gamas de temperatura mais elevada.

Um exemplo de materiais inorgânicos são os sais e sais hidratados. Estes apresentam elevado calor latente de fusão, uma boa condutibilidade térmica e uma baixa variação de volume na transição de fase. Apesar das suas vantagens, estes tipos de substâncias congelam a baixas temperaturas e a altas temperaturas apresentam comportamento instável, tornando-os de difícil manuseio. Para além disso, são caros, corrosivos e é frequente sofrerem sobrearrefecimento e segregação de fase (Khan *et al.*, 2016). Finalmente, quando o material é composto por dois ou mais elementos que resultam numa mistura cristalina congruente, são denominados de materiais eutéticos. Visto que as proporções de composição dos elementos constituintes podem variar bastante, isto atribui uma versatilidade a estes materiais, por assim é possível obter diferentes temperaturas de fusão.

2.2 Limitações dos materiais de mudança de fase e métodos de melhoria

2.2.1 Condutibilidade térmica

Um dos maiores problemas apresentados por materiais de mudança de fase é a sua baixa condutibilidade térmica, que dificulta o processo de transferência de calor, tornando-o mais lento. As principais técnicas de melhoria são encapsulamento, alhetas e uso de partículas com elevada condutibilidade térmica (Lin *et al.*, 2018).

2.2.1.1 Encapsulamento

Quando se reveste o material, criando uma barreira entre este e o meio ou outros materiais, fala-se em encapsulamento. Se o tamanho da cápsula é inferior a 1000 nm, trata-se de nano encapsulamento, se for entre 1-1000 µm é micro encapsulamento e finalmente, as cápsulas com tamanho superior a 1 mm é considerado marco encapsulamento (Nazir *et al.*, 2019). Para além do tamanho da cápsula, também pode variar a sua geometria. As cápsulas podem ser esféricas, tubulares, cilíndricas ou retangulares (Trindade, 2018). As formas mais populares de

encapsulamento são micro e macro encapsulamento. A sua utilização não só permite uma melhor transferência de calor, como também o facto de o material não interagir diretamente com o meio, os problemas da compatibilidade com o meio são menores. Outra vantagem é um maior controlo de expansão durante a mudança de fase.

Existem vários aspetos a ter em conta quando se pretende encapsular um material de mudança de fase. Estes são:

- compatibilidade do material de mudança de fase com o material da cápsula;
- resistência à corrosão;
- resistência ao fenómeno de mudança de fase;
- área suficiente de transferência de calor;
- elevado coeficiente de transferência de calor;
- fácil manuseamento.

Os recipientes de aço inoxidável e de cobre são adequados para encapsulamento de materiais inorgânicos. Os materiais eutéticos são compatíveis com recipientes de aço inoxidável, alumínio e aço ao carbono. Os materiais orgânicos não apresentam grandes problemas de incompatibilidade (Ferrer *et al.*, 2015).

O micro encapsulamento corresponde a quantidades muito pequenas de material de mudança de fase revestidas. O seu tamanho facilita a inserção destes tanto nos líquidos como nos sólidos. A vantagem mais relevante do uso de microcápsulas resume-se à uma elevada área de transferência de calor. As microcápsulas podem ser criadas através de reações químicas de polimerização (Fleischer, 2015).

2.2.1.2 Alhetas

Aumentando a área, é possível obter maiores taxas de transferência de calor. Tal é possível com recurso a alhetas. As alhetas podem ser axiais ou radiais (Zhang *et al.*, 2016).

Alguns estudos sugerem que as introduções das alhetas longitudinalmente em sistemas de armazenamento térmico não só aumentam a área de transferência, como também introduzem turbulência no escoamento, que auxilia a transferência de calor (Rocha, 2018). Apesar de apresentarem claras vantagens na sua utilização, estas também trazem algumas desvantagens, como por exemplo o aumento do peso do sistema onde são implementados e a necessidade de se introduzir menor volume do material de mudança de fase (Trindade, 2018)

2.2.1.3 Adição de nanopartículas

Outra solução para a melhoria da condutibilidade térmica é a adição de partículas, geralmente metálicas ou à base de carbono. Estes permitem, como no caso do micro encapsulamento, elevadas razões área de superfície por volume, e assim melhorar a condutibilidade térmica. Para evitar a segregação dessas partículas, é necessário ter em conta a sua densidade. Alguns estudos também demonstram que a adição das nanopartículas pode provocar alterações no material de mudança de fase, alterando a sua viscosidade e tornando-o imprevisível em termos de calor latente de fusão e a sua condutibilidade térmica. Surge também a questão de compatibilidade com o material (Nazir *et al.*, 2019).

2.2.2 Sobrearrefecimento e fusão incongruente

O fenómeno de sobrearrefecimento encontra-se, geralmente, em materiais inorgânicos. Este fenómeno consiste na cristalização tardia durante o processo de arrefecimento, provocando uma mudança de fase a uma temperatura inferior à temperatura a que se deu a fusão. Este fenómeno é prejudicial, pois é necessário reduzir a temperatura para que se dê a libertação do calor latente armazenado. Se não se der a mudança de fase, o material irá apenas armazenar calor sensível. Para evitar o sobrearrefecimento é possível adicionar partículas que auxiliem a nucleação.

Outro problema é a fusão incongruente. Este fenómeno ocorre especialmente em sais hidratados, onde o sal não é totalmente dissolvido na água. Este sal possui uma maior densidade e como tal, deposita-se no fundo do recipiente. Encontrando-se depositado, não participa no arrefecimento, perdendo-se assim a reversibilidade do processo. A solução para este problema passa por métodos químicos, para que se aumente a solubilidade, agitação mecânica ou então adição de excesso de água.

2.2.3 Degradação

Outra qualidade importante de um material de mudança de fase é o seu tempo de vida. Para que esse material seja utilizável durante um longo período de tempo, é necessário que mantenha as suas propriedades. Contudo, alguns desses materiais sofrem alterações químicas e físicas ao fim de vários ciclos de mudança de fase a que estão sujeitos.

2.3 Aplicações dos materiais de mudança de fase

Os materiais de mudança de fase são utilizados numa vasta gama de aplicações, desde pequenos componentes elétricos, até grandes estações de concertação solares. Quando a energia é considerada como produto final do processo, trata-se de armazenamento de energia térmica. Quando o armazenamento corresponde a uma fase intermédia do processo, ou seja, quando o seu armazenamento é necessário apenas para simplificar/ajudar durante o processo, trata-se de gestão térmica (Fleischer, 2015).

2.3.1 Eletrónica

Os equipamentos eletrónicos encontram-se em estudo permanente, aumentando-se a sua eficiência, potência, funcionalidade e diminuindo cada vez mais o tamanho. A necessidade do uso de baterias para estes equipamentos eletrónicos reside na procura de aparelhos que sejam portáteis, sejam eles telemóveis, ferramentas ou carros elétricos. Existem reservas acerca da sua utilização, uma vez que necessitam de ser seguros para a utilização, apresentarem um custo atrativo e terem um bom desempenho. No entanto, grandes exigências ao nível do desempenho, como o aumento das potências e maior densidade de energia, implicam um aumento significativo de temperaturas de funcionamento (Nazir *et al.*, 2019).

Os maiores problemas responsáveis por aproximadamente metade de falhas de equipamentos eletrónicos são associados à energia térmica (Ganatra *et al.*, 2018). Nessa sequência é possível implementar materiais de mudança de fase que acumulem a energia térmica proveniente do funcionamento do aparelho, de modo libertá-la para o ambiente posteriormente, garantindo a operação a uma temperatura constante (Fleischer, 2015).

Por exemplo, as baterias de lítio, que sofrem degradação a partir dos 60 °C, perdendo a sua capacidade e potência. Implementando materiais de mudança de fase neste tipo de baterias faz com que estas baterias sejam mais seguras e também mantenham o seu desempenho (Nazir *et*

al., 2019). Os materiais de mudança de fase também podem ser aplicados em microeletrônica, em pequenos circuitos ou dispositivos de memória, com a função de arrefecimento.

2.3.2 Materiais de construção

O recurso aos materiais de mudança de fase pode melhorar significativamente a eficiência de edifícios (Bruno *et al.*, 2015). Este tipo de aplicação tem um grande interesse no sentido de climatização de edifícios, reduzindo a necessidade energética e diminuindo os custos, o que consequentemente diminui impacto ambiental e aumenta a eficiência. No entanto, existe a necessidade de precauções especiais aquando da utilização destes materiais. Por exemplo, ácidos gordos apresentam um mau odor ao fim de alguns ciclos de funcionamento. Não é de esquecer também que certos matérias orgânicos são inflamáveis (Nazir *et al.*, 2019).

2.3.3 Solar

Todos os sistemas que funcionam com recurso a energia renovável sofrem de uma grande desvantagem que é a intermitência no fornecimento de energia. Os sistemas solares não são exceção, pois geralmente a maior quantidade de energia é gerada em alturas de menor necessidade do seu consumo. Como tal, a implementação de sistemas de armazenamento de energia é fulcral neste tipo de aplicações, pois permite uma melhoria de eficiência, e diminui a necessidade do recurso aos combustíveis fósseis (Fleischer, 2015).

2.3.4 Textil

As fibras de regulação térmica absorvem energia quando o corpo aumenta de temperatura, libertando essa energia quando o corpo arrefece. Essas fibras geralmente incorporam materiais de mudança de fase na gama de temperaturas de 28 a 35 °C.

Este tipo de aplicação pode ser encontrada em vestuário específico (para grandes altitudes – montanhismo), interiores de automóveis, cortinas e interiores de automóveis (Nazir *et al.*, 2019).

3 Instalação e procedimento experimental

O presente trabalho, cujo objetivo é testar um material de mudança de fase, o ácido adípico, necessita de uma instalação de modo a que se possa recriar todos os passos do armazenamento térmico, carga, armazenamento e descarga. Como tal, recorreu-se à instalação presente no laboratório de combustão no INEGI, que tem sido desenvolvida e melhorada por Esteves (2016), Trindade (2018) e Rocha (2018). Esta instalação tem vindo a evoluir, e a versão utilizada é a versão de Rocha (2018), apresentada Figura 3.1.



Figura 3.1 – Instalação experimental (Rocha, 2018).

Neste capítulo apresentam-se todos os componentes constituintes, juntamente com a explicitação dos circuitos integrantes.

3.1 Componentes da instalação experimental

O procedimento experimental compreende um aquecimento e um arrefecimento, portanto a instalação inclui:

- Sistema de aquecimento;
- Sistema de arrefecimento;
- Sistema de bombagem;
- Fluido de transferência de calor;
- Tubagem;

- Válvulas;
- Sistema de aquisição de dados;
- Vaso de expansão;
- Sistema de medição de caudal;
- Permutador de testes ou unidade de armazenamento de calor latente.

3.1.1 Sistema de aquecimento

O aquecimento do fluido de transferência de calor foi feito com recurso a um aquecedor elétrico, com uma capacidade de 9 l e 2 kW de potência de aquecimento. Juntamente com o aquecedor, existe um controlador de temperatura PID, através do qual se ajusta a temperatura pretendida do fluido de calor à saída do aquecedor. Estes aparelhos podem ser observados na Figura 3.2.

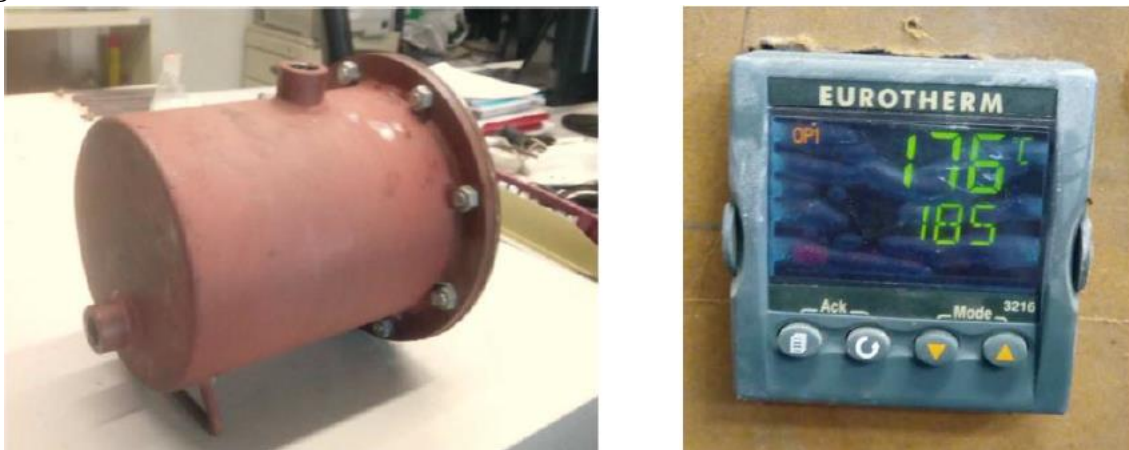


Figura 3.2 – Aquecedor (direita) e controlador de temperatura do tipo liga/desliga (Trindade, 2018).

3.1.2 Sistema de arrefecimento

O arrefecimento do fluido de transferência de calor foi conseguido pelo permutador de calor de carcaça e tubos (Figura 3.3). A potência máxima de dissipação de calor e a área de transferência de calor são respetivamente 29 kW e 1,16 m².



Figura 3.3 -Permutador de calor (Rocha, 2018).

O fluido de arrefecimento é a água da rede. De modo a regular o caudal e controlar a rapidez do arrefecimento, existe um caudalímetro de secção variável com retorno por mola, Figura 3.4.

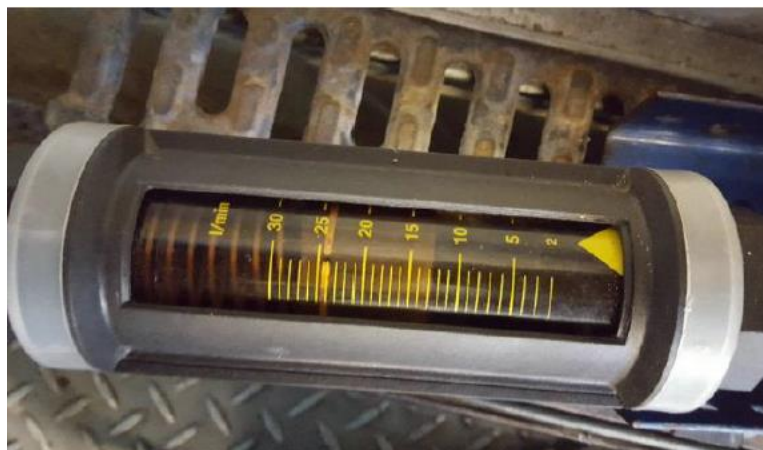


Figura 3.4 – Caudalímetro (Esteves, 2016).

3.1.3 Sistema de bombagem do fluido de transferência de calor

O sistema de bombagem é constituído por uma bomba centrífuga, *Kirloskar Brothers*, um motor elétrico *WEG*, Figura 3.5, e também um variador de frequência *ABB*, Figura 3.6. A bomba promove a circulação do fluido no interior da instalação, enquanto que o motor aciona a bomba. O variador de frequência é usado para controlar a frequência de alimentação do motor e consequentemente, o caudal do fluido de transferência de calor. O fluido de transferência de calor usado foi o *Therminol 66*, estando algumas características deste fluido indicadas no Anexo A.



Figura 3.5 – Grupo de bombagem (Trindade, 2018).



Figura 3.6 – Variador de frequência (Trindade, 2018).

3.1.4 Tubagem e válvulas

Os tubos da instalação são em aço ao carbono, sem costura, com diâmetro externo de 28 mm e diâmetro interno de 24 mm. A instalação possui 7 válvulas de macho esférico. Estas válvulas têm duas funções: a purga de ar e a seleção de circuito, aquecimento ou arrefecimento.

3.1.5 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados é composto por duas placas de aquisição, ambas da *Measurement Computing*, Figura 3.7. Estas placas registam temperaturas e pressões, durante todo o ensaio. Para além das placas de aquisição, é utilizado o programa *DASYLab*. Este programa permite a visualização em tempo real da evolução das variáveis em estudo, como também armazena e pré-trata alguns dos dados. Durante este trabalho, foi utilizada a folha desenvolvida por Rocha (2018), presente no Anexo C.



Figura 3.7 – Placas de aquisição de dados (Rocha, 2018).

3.1.6 Vaso de expansão

Uma vez que durante o aquecimento o fluido sofre uma expansão, é necessária a existência de um vaso de expansão, Figura 3.8. Para um bom funcionamento da instalação, este tem de ser colocado no ponto mais alto da instalação, de modo a garantir a elevada pressão na tubagem, e também à entrada da bomba, de modo a evitar problemas de cavitação. Visto que a linha de expansão está ligada à instalação na admissão da bomba, que é o ponto de menor pressão da instalação, que é o mais favorável à libertação de voláteis.



Figura 3.8 – Vaso de expansão (Trindade, 2018)

3.1.7 Sistema de medição de caudal

O sistema de medição de caudal, do fluido de transferência de calor, é composto por um transdutor de pressão (Figura 3.9), uma fonte de alimentação (Figura 3.10), e uma placa orifício. A fonte de alimentação fornece uma corrente contínua de 24 V. A gama de saída do transdutor é de 1,872 V a 9,36 V. No trabalho anterior procedeu-se a calibração da placa orifício, e através das equações de calibração obtidas, foi possível obter o caudal do óleo em circulação. Durante a realização do presente trabalho, também se procedeu à verificação da calibração, e os resultados foram confirmados, como se mostra no Anexo D.



Figura 3.9 – Transdutor de pressão (Trindade, 2018).



Figura 3.10 – Fonte de alimentação (Trindade, 2018).

3.1.8 Permutador de testes

O permutador de testes utilizado neste trabalho, foi um permutador com camada única de três tubos, onde é encapsulado o material de mudança de fase, Figura 3.11. Todos os detalhes serão descritos no Capítulo 5.



Figura 3.11 – Permutador de testes (Rocha, 2018).

3.2 Funcionamento

Antes de se proceder aos ensaios, procedeu-se ao controlo de alguns pontos de funcionamento de modo a verificar se a placa orifício se encontrava calibrada. Depois de obtida a confirmação, a instalação foi isolada com lã de rocha, de modo a diminuir as perdas para o ambiente dos equipamentos presentes na instalação. Um ensaio experimental compreende o aquecimento, durante o qual ocorre a fusão do material em estudo, e o arrefecimento, durante o qual ocorre a solidificação. Na Figura 3.12 é possível observar um desenho esquemático da instalação.

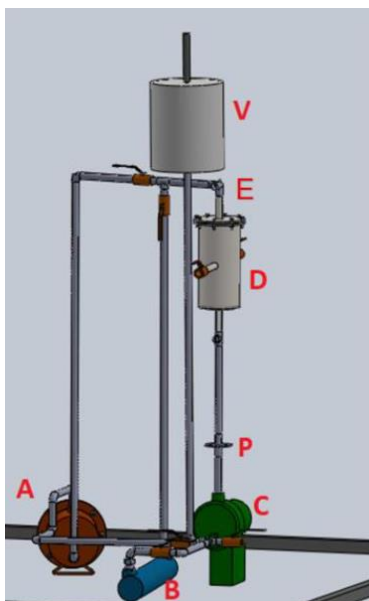


Figura 3.12 – Desenho esquemático da instalação. A-Aquecedor; B- Permutador de calor; C- Bomba centrífuga; D- Permutador de testes; E- Purga de ar; P- Placa orifício; V- Vaso de expansão (Trindade, 2018)

3.2.1 Aquecimento

O circuito de aquecimento é composto, essencialmente por três equipamentos: a bomba centrífuga, o permutador de testes e o aquecedor, Figura 3.13. As resistências elétricas dentro de aquecedor fornecem energia ao fluido de transferência de calor, o que faz com que a sua temperatura aumente. O fluido de transferência de calor é posto em circulação pela bomba centrífuga. Este, ao passar no permutador, cede energia ao material de mudança de fase.

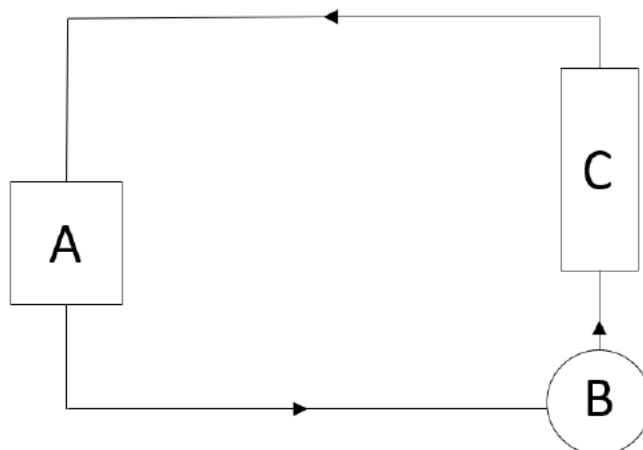


Figura 3.13 – Desenho esquemático do circuito de aquecimento. A- Aquecedor; B- Bomba Centrífuga; C- Permutador de testes (Rocha, 2018).

3.2.2 Arrefecimento

O circuito de arrefecimento é composto, essencialmente por três equipamentos: a bomba centrífuga, o permutador de testes e o permutador de calor. O fluido de transferência de calor, ao passar no permutador de calor, cede energia à água de arrefecimento, e diminui a sua temperatura, Figura 3.14. Assim, este ao passar no permutador de testes, recebe energia do material de mudança de fase, diminuindo também a sua temperatura. O fluido é posto em circulação pela bomba centrífuga.

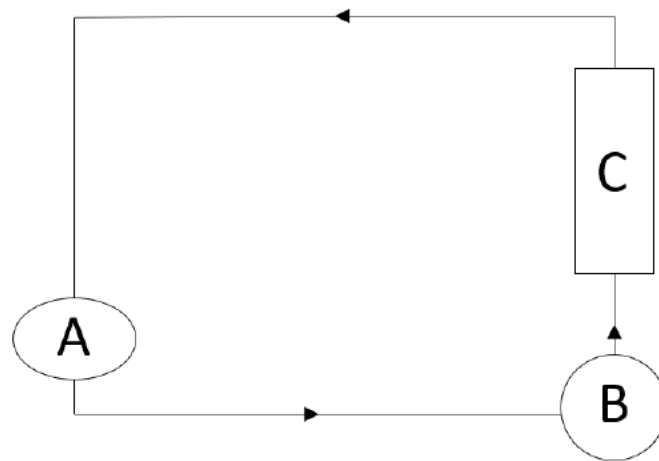


Figura 3.14- Desenho esquemático do circuito de aquecimento. A- Permutador de calor; B- Bomba Centrífuga; C- Permutador de testes (Rocha, 2018).

4 Material de mudança de fase em estudo: ácido adípico

O material de mudança de fase utilizado nos procedimentos experimentais associados à elaboração desta dissertação é o ácido adípico.

Este foi selecionado na sequência da realização de pesquisas anteriores, nomeadamente no projeto SHIP – Solar Heat For Industrial Processes, que teve por objetivo conceber um sistema holístico de integração direta de tecnologias inseridas em processos industriais de média temperatura, por exemplo tecnologia solar. Este projeto tem como principal objetivo demonstrar as vantagens térmicas e económicas importantes para tornar a sua implementação atrativa. Esta instalação protótipo encontra-se em Évora, na *Kemet Eletronics Portugal, S.A.*, e inclui um sistema de armazenamento com recurso a materiais de mudança de fase (SHIP, 2019). O ácido adípico foi utilizado nessa instalação protótipo.

Ácido adípico, também conhecido como ácido hexanodioico ou ácido 1,4-butanodicarboxílico é um ácido dicarboxílico. Apresenta um ponto de fusão entre 151-152 °C e o seu calor latente de fusão é entre 213 e 275 kJ/kg (Cunha e Eames, 2016). É um pó branco, cristalino, solúvel em água e solventes orgânicos e é inodoro. É utilizado numa vasta gama de aplicações, no entanto quase 80 % da sua produção serve para a produção da poliamida. Outras aplicações passam pela indústria de plastificantes e lubrificantes, revestimentos, colas, peles e couros sintéticos, entre outros. Foi escolhido, para a aplicação num protótipo instalado numa fábrica na região de Évora e consequentemente para o presente estudo, pois é o material que apresenta as melhores qualidades a seguir ao d-manitol previamente testado, na gama média das temperaturas de fusão, e apresenta a vantagem de não ser tão sensível ao processo de envelhecimento térmico, ao contrário do manitol.

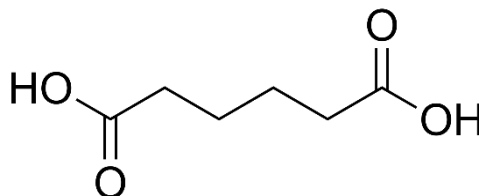


Figura 4.1- Estrutura molecular do ácido adípico.

Foram efetuados alguns estudos para se determinar os problemas que surgem devido à utilização deste material. As conclusões obtidas depois de submeter o ácido adípico a cinco ciclos de aquecimento e arrefecimento (entre 40 °C – 200 °C), num recipiente hermético, as suas propriedades como a temperatura de fusão e a entalpia de fusão não se alteraram, tendo-se verificado apenas um sobrearrefecimento de aproximadamente 5 °C (Haillot *et al.*, 2011). Outro estudo determinou experimentalmente não ocorre nenhuma degradação no material quando exposto ao ar corrente, até uma temperatura de 207 °C. O mesmo estudo demonstra através da análise espectrométrica que não existe nenhuma alteração morfológica no ácido adípico mesmo após 100 ciclos de aquecimento e arrefecimento entre 150 °C -200 °C. No entanto ocorre uma redução da entalpia de fusão de cerca de 7 %, e também uma diminuição ligeira da temperatura de solidificação, sendo que o resto das propriedades se mantêm inalteradas (Gasia *et al.*, 2017).

Este material é considerado adequado para a utilização em sistemas de calor latente, no entanto pode apresentar alguns problemas de corrosão quando sujeito a recipientes não compatíveis. Segundo os fabricantes de aços, este material é compatível com uma gama extensa de aços inoxidáveis. Alguns fabricantes admitem uma boa compatibilidade com o aço ao carbono, outros assumem que existe corrosão.

A ficha técnica encontra-se no Anexo E.

5 Permutador de testes

5.1 Características do permutador de testes

O permutador de testes utilizado neste trabalho experimental é um permutador com uma camada única de três tubos, no interior dos quais encontra-se o material de mudança de fase, Figura 5.1. Está-se perante um escoamento cruzado no interior do permutador de testes, pois o termofluido escoa em torno dos tubos. Contém seis tomadas de temperatura para registar as temperaturas nas paredes exteriores de tubos.

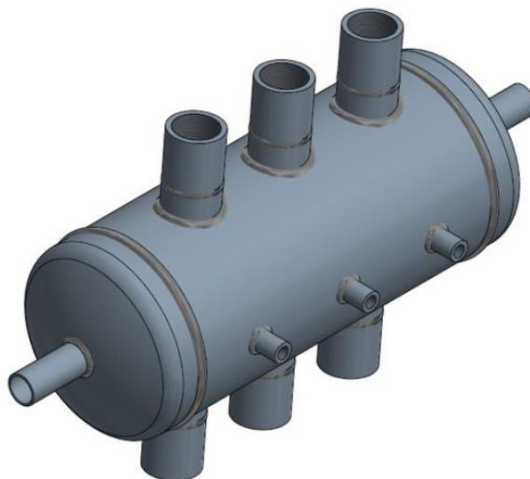


Figura 5.1- Desenho esquemático do permutador de testes (Rocha, 2018).

Este permutador foi concebido em aço ao carbono, e possui um diâmetro interno de 159,3 mm e um diâmetro externo de 168,3 mm. Os tubos que fazem parte do permutador têm um comprimento de 210 mm, um diâmetro externo de 48,3 mm e um diâmetro interno de 43,1 mm. A área de contacto do tubo com o termofluido é, aproximadamente $0,0241 \text{ m}^2$. Estes tubos, dispostos em série, estão quase perpendiculares ao escoamento, apresentando uma inclinação de 5° para uma remoção ou substituição do material mais fácil. O volume total disponível para inserir o material de mudança de fase é $1,348 \text{ dm}^3$, Figura 5.2. O termofluido escoa de baixo para cima, conforme se mostra na Figura 5.3 onde o permutador está devidamente apresentado na sua posição de funcionamento.

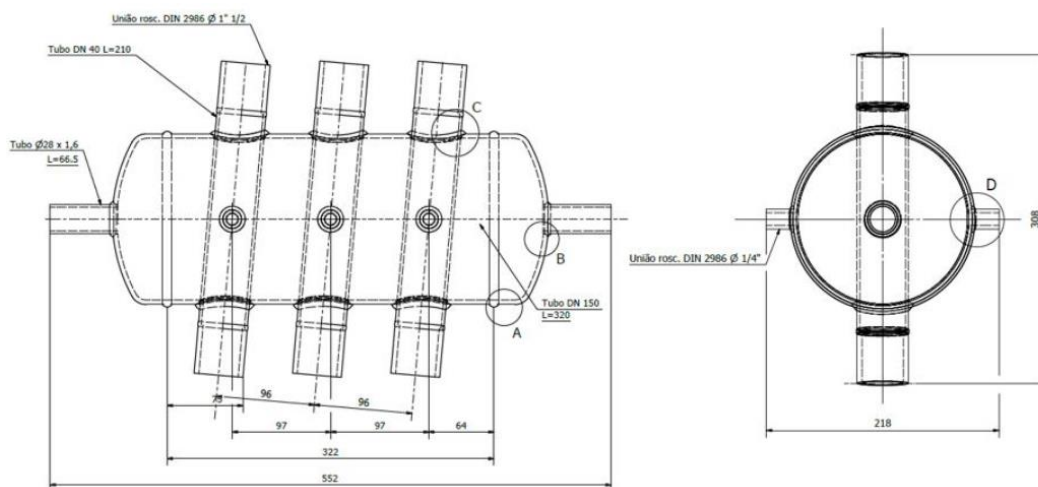


Figura 5.2- Desenho 2D do permutador de testes (Rocha, 2018).

5.2 Instrumentação de medição

Neste trabalho experimental é extremamente importante o registo de temperaturas, de modo a avaliar a evolução destas quando o sistema se encontra em aquecimento ou arrefecimento. Assim, foram colocados três termopares tipo T no interior de cada tubo, e também um termopar foi fixado na parede de cada tubo, com o propósito da determinação do coeficiente de transferência de calor do lado do termofluido, Figura 5.3. Também foram colocados termopares do tipo T à entrada e à saída do permutador, de modo a monitorizar as temperaturas do termofluido.

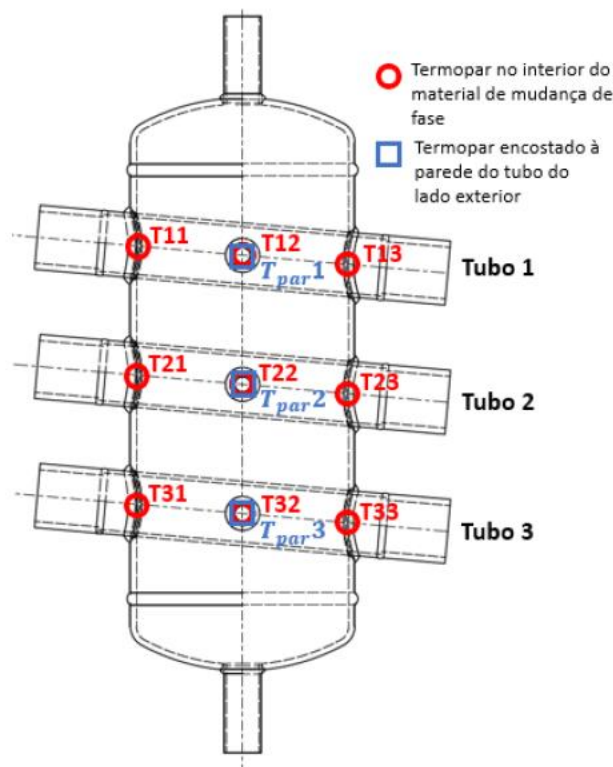


Figura 5.3- Esquema da colocação de termopares no permutador de testes (Rocha, 2018).

6 Validação dos resultados do d-manitol

De modo a verificar se a instalação se encontra em boas condições de funcionamento, e também confirmar os resultados obtidos anteriormente pelo Rocha (2018), optou-se inicial por replicar os ensaios utilizando d-manitol. Foram efetuados ensaios utilizando frequências de bombagem de 35 Hz e 50 Hz. Cada ensaio compreende um aquecimento e um arrefecimento. As condições de aquecimento mantiveram-se iguais, já o arrefecimento foi feito inicialmente com um caudal de água de 5 l/min, e ao fim de 15 minutos, um caudal de 3 l/min.

6.1 Massa d-manitol introduzida nos tubos

A massa total encapsulada em três tubos do permutador é de 1,8 kg. Esta massa encontra-se igualmente distribuída pelos três tubos. Para esta massa, a energia térmica absorvida e libertada no processo de mudança de fase pelo d-manitol ($h_{mf}=290$ kJ/kg) é de 522 kJ.

6.2 Caracterização do caudal mássico e escoamento

Como já se referiu, os ensaios experimentais decorreram a duas frequências de alimentação do motor diferentes, 35 Hz e 50 Hz. Para ser possível comparar estes, bem como as duas fases que o ensaio engloba, aquecimento e arrefecimento, explicitam-se os valores médios de caudal mássico de termofluido, na Tabela 6.1. Note-se que quando a frequência de alimentação é maior, maior é o caudal do termofluido em circulação. O caudal também varia conforme a fase do ensaio, sendo inferior durante o arrefecimento. A perda de carga durante o processo de arrefecimento é superior, devido à passagem do termofluido pelo permutador de carcaça e tubo onde se faz o seu arrefecimento, levando em consequência a uma diminuição do respetivo caudal.

Tabela 6.1- Caudal mássico médio para diferentes ensaios do d-manitol.

Frequência [Hz]	Processo	$\dot{m}$ [kg/s]
35	Aquecimento	0,364
	Arrefecimento	0,239
	Arrefecimento lento	0,228
50	Aquecimento	0,349
	Arrefecimento	0,351
	Arrefecimento lento	0,347

O regime de escoamento pode ser caracterizado utilizando o número de Reynolds, calculado através da Equação 6.1.

$$Re_D = \frac{\rho V D}{\mu} \quad 6.1$$

Visto que existem possibilidades diferentes para o cálculo do número de Reynolds, optou-se pela Equação 6.1, em que D representa o diâmetro externo dos tubos. Como os tubos encontram-se enclausurados no permutador, esta equação é usada como uma simplificação, pois num escoamento exterior não existem superfícies a confinar o escoamento. Os valores médios de número de Reynolds encontram-se na Tabela 6.2.

Tabela 6.2- Número de Reynolds médio para diferentes ensaios do d-manitol.

Frequência [Hz]	Processo	Re_D
35	Aquecimento	621
	Arrefecimento	89
50	Arrefecimento lento	49
	Aquecimento	960
	Arrefecimento	123
	Arrefecimento lento	70

Para um valor de número de Reynolds inferior a 2×10^5 o escoamento considera-se laminar (Incropera Frank 2013). Em todos os casos apresentados este número é muito inferior, e como tal, considera-se o escoamento laminar.

6.3 Evolução de temperatura do material de mudança de fase no interior dos tubos

Esta secção tem por objetivo apresentar as curvas de aquecimento e arrefecimento obtidas durante os ensaios ao d-manitol. Como explicitado nos capítulos anteriores, apresentam-se as medições dos termopares presentes dentro do material, bem como a temperatura do fluido de transferência de calor à entrada do permutador de calor.

As Figuras 6.1 e 6.2 apresentam a evolução das temperaturas durante o processo de aquecimento, para a frequência de 50 Hz. Nesses gráficos é possível observar as curvas obtidas pelos termopares que se encontram no material, bem como a temperatura do óleo medida à entrada do permutador.

Como verificado no trabalho desenvolvido por Rocha (2018), a mudança de fase dentro dos três tubos, e no seio de cada tubo, não se dá simultaneamente (Figura 6.1). Segundo os resultados obtidos, os primeiros pontos onde ocorre a mudança de fase encontram-se no tubo 2, mais precisamente, o primeiro termopar a detetar a mudança de fase é o T21. Tal pode ser justificado pelo facto de a transferência de calor sofrer um aumento devido à esteira provocada pelo tubo 3, onde o tubo se encontra. Uma vez que o termopar 21 encontra-se a uma cota mais alta dentro do tubo, pode ser resultado da convecção natural, visto que o material se funde junto às paredes do tubo, e consequentemente subir para o topo, provocando assim um aumento de temperatura. Segue-se a mudança em algumas partes do tubo 3, pois este é o tubo que recebe o primeiro contacto com o termofluido, e por fim, o tubo 1. No tubo 1, o primeiro local onde ocorre a mudança de fase é o T12. Como este se encontra no local central do tubo, uma possível justificação é que existe uma maior estabilidade de escoamento do termofluido, o que resulta numa distribuição equitativa de energia ao longo da área de transferência de calor disponível.

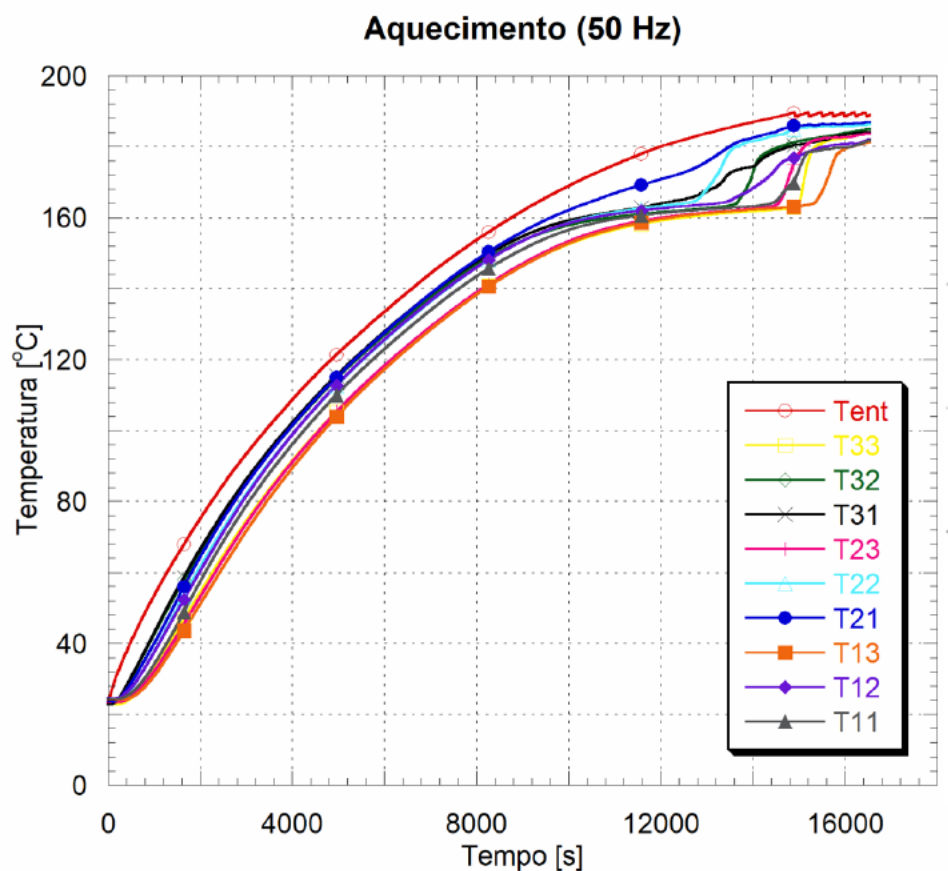


Figura 6.1- Aquecimento d-manitol - 50 Hz. Evolução da temperatura ao longo do ciclo de aquecimento (Rocha, 2018).

Comparando aos resultados obtidos (Figura 6.2), a situação é semelhante. O primeiro tubo onde ocorre a mudança de fase é o tubo 2, com a exceção de que é na região do termopar 23, e não na do 21 que se dá primeiro essa transformação. Ao analisar os gráficos obtidos em todos os ensaios, concluiu-se que, aquando da montagem dos termopares, foram trocados os termopares 23 e 21, visto que todas as outras curvas seguem aproximadamente a mesma ordem.

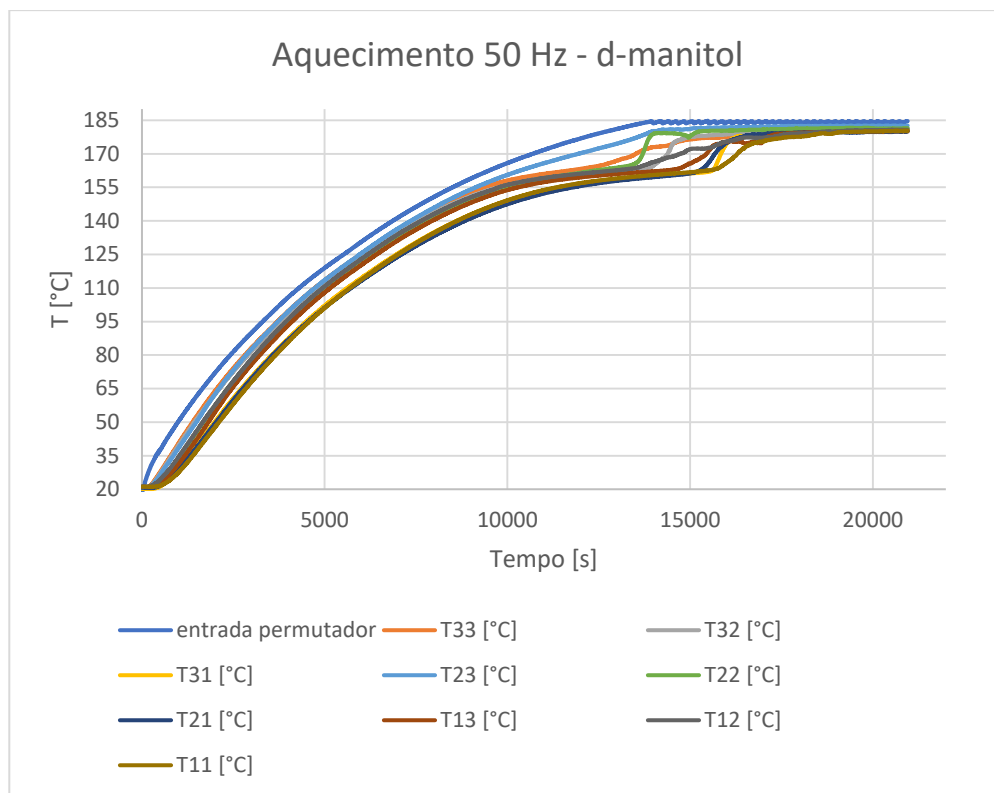


Figura 6.2 - Aquecimento d-manitol - 50 Hz. Evolução da temperatura ao longo do ciclo de aquecimento, dados obtidos por experimentação.

Durante os ensaios experimentais optou-se por realizar um ensaio de aquecimento à mesma taxa de arrefecimento utilizada por Rocha (2018), 5 l/min, e também com uma taxa de arrefecimento mais baixa. Neste caso, para evitar a evaporação da água, que aconteceria se o caudal de água fosse excessivamente baixo, situação que poderia causar estragos na instalação, iniciou-se o arrefecimento com um caudal de água de 5 l/min, diminuindo este caudal posteriormente para 3 l/min ao fim de cerca de 20 minutos.

No que diz respeito ao arrefecimento, as mudanças de fase não seguem as mesmas sequências que no aquecimento, embora as diferenças sejam apenas na ordem de mudança em apenas alguns termopares. Tal pode ser causado pela redução do caudal mássico do termofluido em circulação. Assim na entrada do permutador de testes o efeito de jato é muito menor, afetando a troca de calor dentro do mesmo. É importante referir que durante o processo de montagem os termopares T11 e T13, T21 e T23, T31 e T33 foram montados ao contrário.

O primeiro termopar a detetar a mudança é o termopar T21, que se encontra no tubo central do permutador. Seguem-se-lhe os termopares dos tubos 3 e 1, sendo que o último termopar a registar a transformação é o termopar T13, que se encontra a uma cota mais baixa do tubo 1.

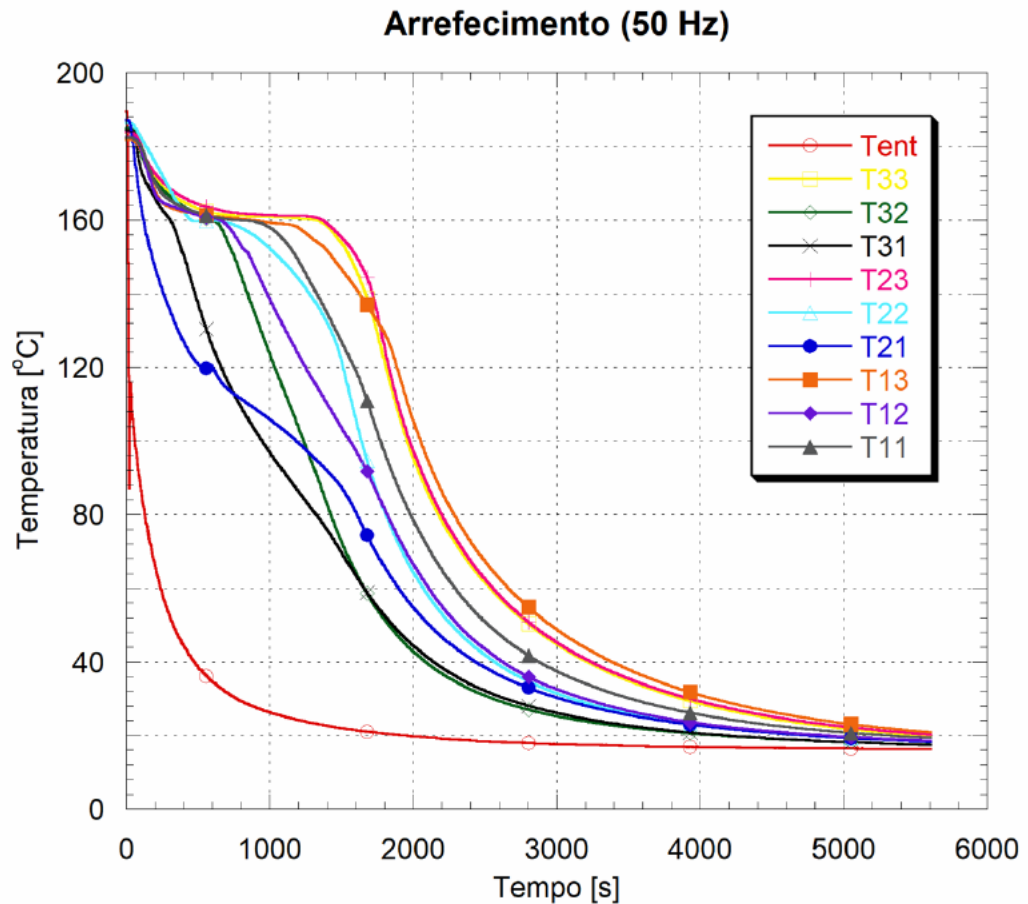


Figura 6.3– Arrefecimento d-manitol - 50 Hz. Evolução da temperatura ao longo do ciclo de arrefecimento (Rocha, 2018)

Comparando com os resultados obtidos durante a realização deste ensaio, o início de mudança de fase ocorreu no termopar T23, que é na realidade o termopar T21. Seguem-se as transformações sucessivas nos tubos 3 e 1, também igual ao que aconteceu nos ensaios de Rocha, terminando com o termopar T11 (T13), confirmando o que sucedeu anteriormente.

Quando analisadas as evoluções que sucederam em arrefecimento mais lento, as sequências de arrefecimento são as mesmas, alterando apenas a duração do ensaio. Isso pode ser justificado pelo facto de que o arrefecimento inicial é feito à mesma taxa, apanhando assim a zona de transição.

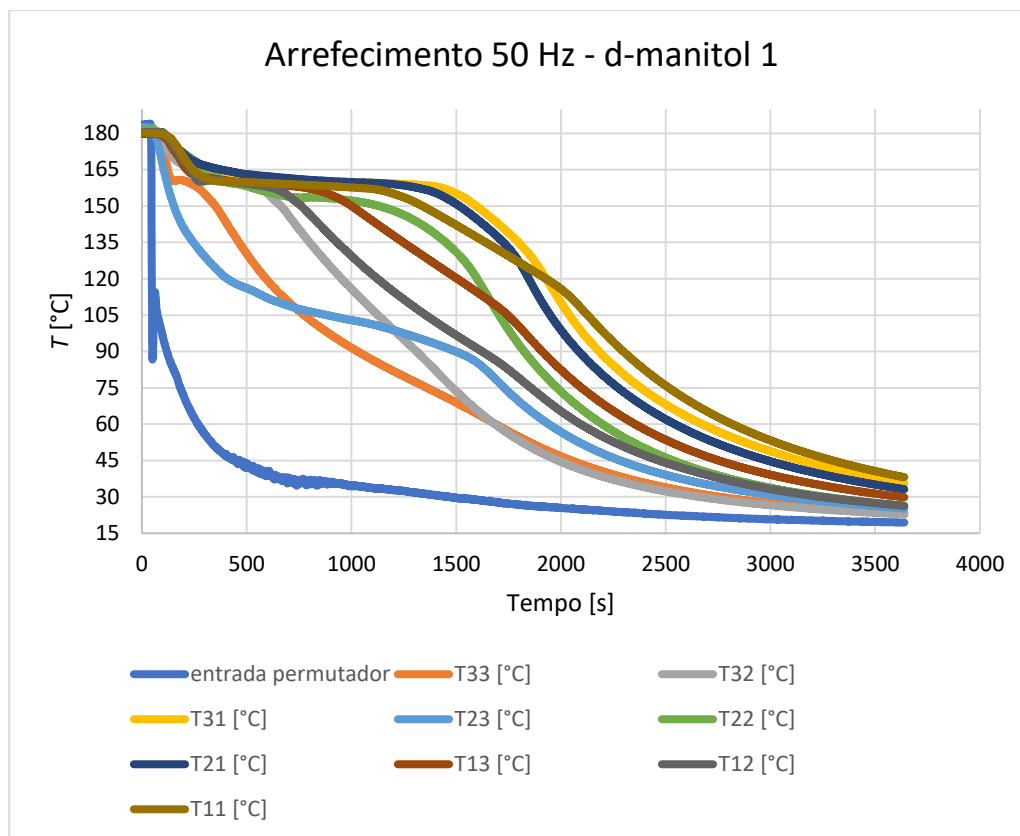


Figura 6.4- Arrefecimento d-manitol - 50 Hz. Evolução da temperatura ao longo do ciclo de arrefecimento à taxa de 5 l/min, dados obtidos por experimentação.

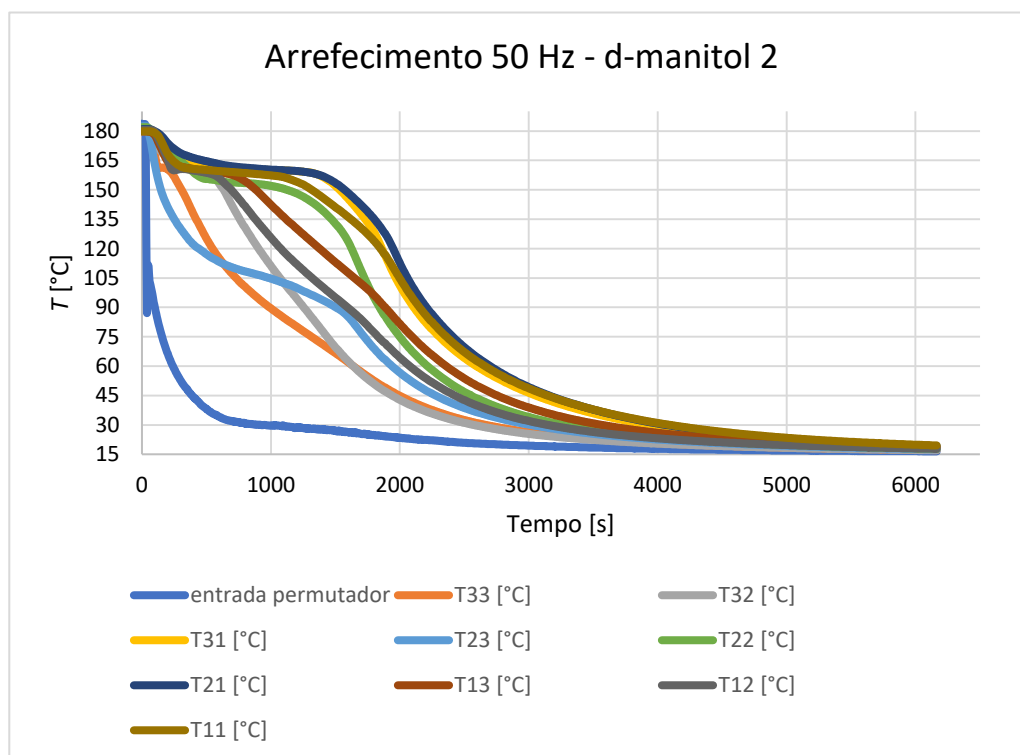


Figura 6.5- Arrefecimento d-manitol - 50 Hz. Evolução da temperatura ao longo do ciclo de arrefecimento à taxa de 5 l/min, e posteriormente 3 l/min, dados obtidos por experimentação.

O processo de arrefecimento é mais rápido, uma vez que a potência do permutador de arrefecimento (29 kW) utilizado na instalação é muito superior à potência do aquecedor (2 kW).

Por fim, a frequência da bomba não afeta significativamente as evoluções das temperaturas.

6.4 Coeficientes de transferência de calor

Com a realização deste trabalho, pretendeu-se determinar os coeficientes de transferência de calor. Assim, nesta secção apresenta-se as evoluções do coeficiente global de transferência de calor U , o coeficiente de transferência de calor no interior do material de mudança de fase h_{int} e também do coeficiente de transferência de calor do lado do termofluido, h_{ext} . De modo a calcular estes parâmetros, foi necessário recorrer às equações que o permitem, e que se apresentam abaixo.

6.4.1 Coeficiente global de transferência de calor

Aplicando a primeira lei de termodinâmica ao permutador em estudo resulta que,

$$\dot{Q} = \dot{m}c(T_{ent} - T_{sai}) \quad (6.2)$$

sendo que $\dot{Q}$, $\dot{m}$ e c são a potência cedida pelo termofluido no permutador de testes, o caudal mássico do termofluido em circulação e calor específico do termofluido, respetivamente. As temperaturas T_{ent} e T_{sai} representam as temperaturas do termofluido à entrada e à saída do permutador.

Assume-se um permutador adiabático, pois o permutador de testes encontra-se isolado. Assim, toda a potência que é cedida pelo termofluido é transferida ao material de mudança de fase,

$$\dot{Q} = UA\Delta T_{ml} \quad (6.3)$$

Nesta equação U é o coeficiente de transferência de calor global, A é a área de transferência de calor e ΔT_{ml} é a diferença de temperatura média logarítmica.

Ao combinar as Equações 6.2 e 6.3, obtém-se a equação 6.4, através da qual se calcula o coeficiente de transferência de calor global.

$$U = \frac{\dot{Q}}{A\Delta T_{ml}} = \frac{\dot{m}c(T_{ent} - T_{sai})}{A\Delta T_{ml}} \quad (6.4)$$

De modo a proceder ao cálculo, é necessário conhecer o valor da potência que o termofluido cede em cada instante, o que é possível de realizar visto que em todos os ensaios registou-se as temperaturas que correspondem às temperaturas do termofluido à entrada e à saída do permutador. A área de transferência de calor é a área de cada tubo, que é de 0,0241 m². Por fim, a diferença de temperatura média logarítmica é calculada segundo a Equação 6.4 deduzida por Esteves (2016). Esta equação tem esta configuração porque não existe escoamento dentro de cada tubo.

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{sai} - T_{PCM}^{final}) - (T_{ent} - T_{PCM}^{inicial})}{\ln\left(\frac{T_{sai} - T_{PCM}^{final}}{T_{ent} - T_{PCM}^{inicial}}\right)} \quad (6.5)$$

Para analisar todos os dados, recorreu-se aos intervalos de tempo sucessivos constantes e valores de temperatura médios para esses intervalos.

Na Figura 6.6 pode-se observar a evolução do coeficiente global de transferência de calor ao longo do ciclo de aquecimento.

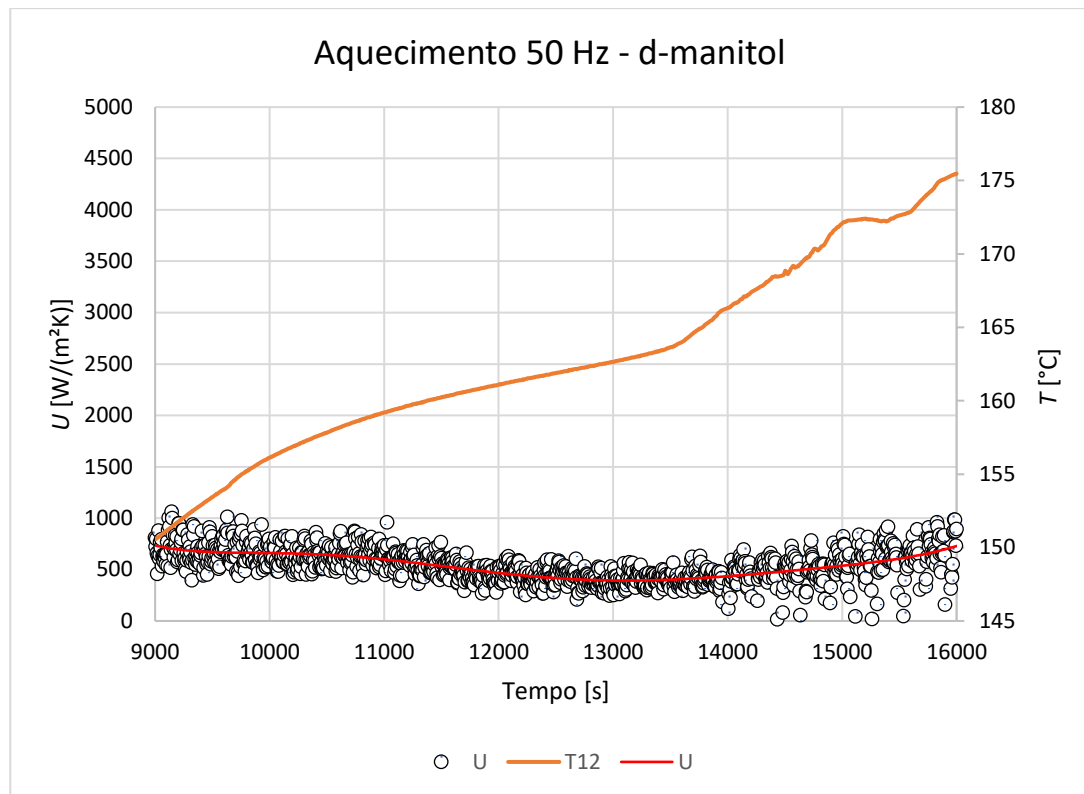


Figura 6.6 - Aquecimento d-manitol - 50 Hz. Evolução do coeficiente de transferência de calor global ao longo do ciclo de aquecimento, dados obtidos por experimentação.

O coeficiente de transferência de calor global mantém-se mais ou menos constante, no entanto existe uma variação durante a mudança de fase, voltando a aumentar a seguir. Visto que o coeficiente global depende da condutibilidade térmica do material de mudança de fase, e este diminui com o aumento de temperatura, esta pode ser umas das explicações do fenómeno observado.

No arrefecimento (Figuras 6.7 e 6.8), o coeficiente de transferência de calor global é maior no início do processo, uma vez que o material de mudança de fase encontra-se totalmente fundido e os efeitos de convecção predominam. Seguidamente este coeficiente diminui e torna-se quase constante. O arrefecimento mais lento (Figura 6.8) não apresenta muitas diferenças face ao arrefecimento à taxa de 5 l/min.

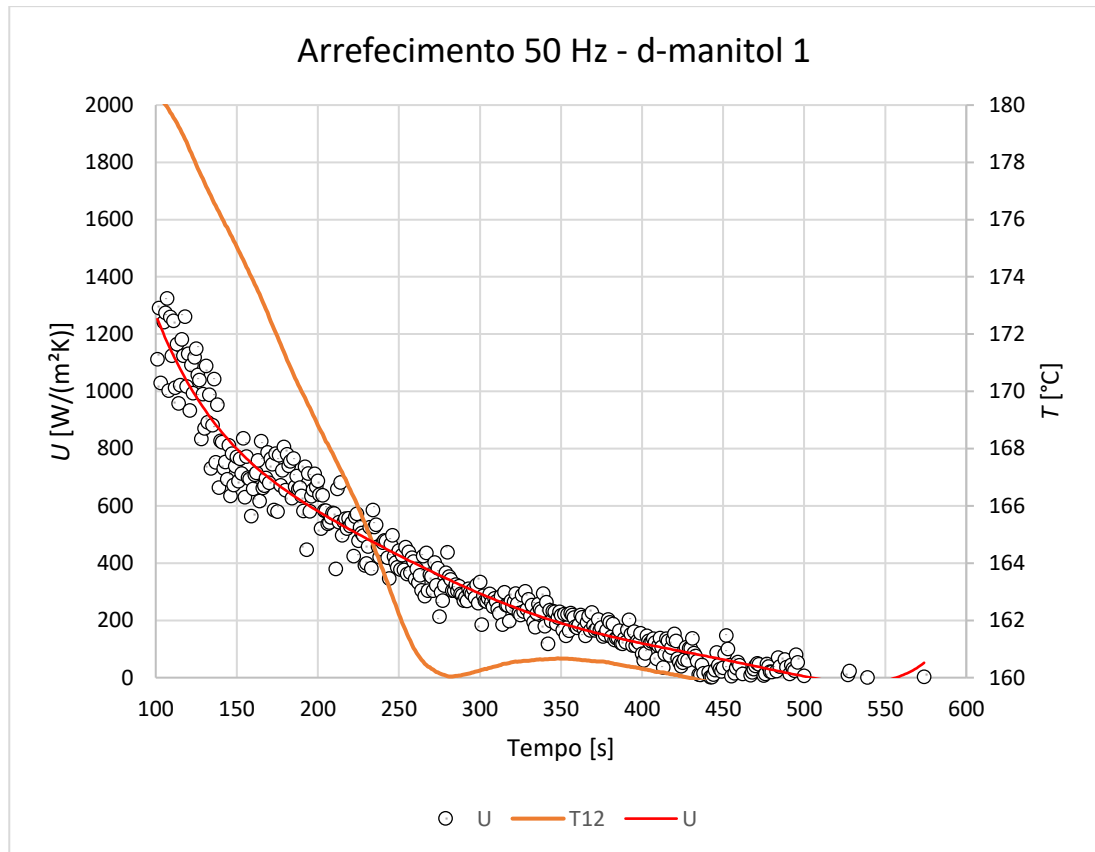


Figura 6.7- Arrefecimento d-manitol - 50 Hz. Evolução do coeficiente de transferência de calor global ao longo do ciclo de arrefecimento à taxa de 5 l/min, dados obtidos por experimentação

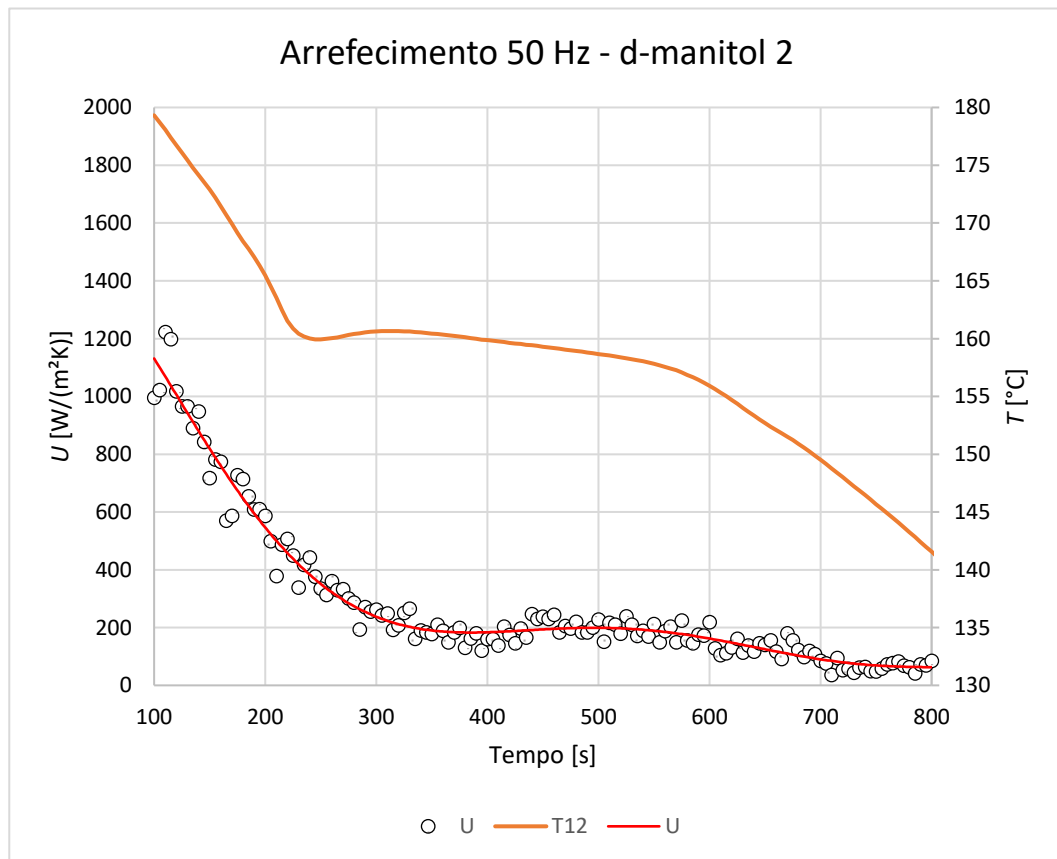


Figura 6.8- Arrefecimento d-manitol - 50 Hz. Evolução do coeficiente de transferência de calor global ao longo do ciclo de arrefecimento à taxa de 5 l/min à taxa de 5 l/min, e posteriormente 3 l/min, dados obtidos por experimentação.

Os valores médios obtidos durante este trabalho experimental e os obtidos por Rocha apresentam-se na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Os coeficientes de transferência de calor globais médios obtidos durante a realização deste trabalho (2019), e por Rocha (2018).

Frequência [Hz]	Processo	Tubo	$\bar{U}$ [W/(m ² K)]	
			2019	2018
35	Aquecimento	1	192	297
		2	331	466
		3	241	341
	Arrefecimento	1	239	357
		2	230	339
		3	239	361
	Arrefecimento lento	1	225	-
		2	212	-
		3	234	-
50	Aquecimento	1	540	354
		2	265	354
		3	204	398
	Arrefecimento	1	390	300
		2	383	289
		3	399	302
	Arrefecimento lento	1	271	-
		2	265	-
		3	274	-

Os coeficientes obtidos após a realização deste trabalho são mais baixos, o que se deve aos caudais de termofluido em circulação, que também são mais baixos, como discutido anteriormente.

6.4.2 Coeficiente de transferência de calor do lado do termofluido

Para determinar o coeficiente de transferência de calor do lado do termofluido utilizaram-se as temperaturas recolhidas pelos termopares que se encontram junto das paredes exteriores dos tubos. A equação 6.6 foi utilizada para o cálculo.

$$h_{ext} = \frac{\dot{Q}}{A_{ext}(T_{ent} - T_{par})} \quad (6.6)$$

Nesta equação $\dot{Q}$ representa a potência térmica, A_{ext} é a área exterior dos tubos, T_{ent} a temperatura de entrada do termofluido no permutador de testes e T_{par} é a temperatura de parede da cápsula.

Como verificado nos trabalhos anteriores (Trindade, 2018; Rocha, 2018), as correlações existentes na literatura não são as mais adequadas para o caso em estudo.

Comparando com os resultados obtidos por Rocha (2018), este obteve grandes oscilações o que se pode ser devido à grande instabilidade de escoamento.

Nas Figuras 6.9 e 6.10 apresentam-se as evoluções obtidas para o tubo 1 para o processo de aquecimento e arrefecimento obtidos nos ensaios realizados ao longo deste trabalho. Como se pode observar, este coeficiente apresenta também alguma variação, no entanto este segue uma clara tendência de aumentar ao longo do processo de aquecimento e diminuir ao longo do processo de arrefecimento.

Como para além do arrefecimento efetuado à uma taxa de 5 l/s foi efetuado o arrefecimento mais lento, iniciando-se em 5 l/s e ao fim de cerca de 20 min, mudado para 3 l/s. Na Figura 6.11 pode se observar esse arrefecimento. Este apresenta-se um pouco mais instável do que o arrefecimento à taxa de 5 l/s, o que pode ser justificado por essa alteração do caudal de arrefecimento.

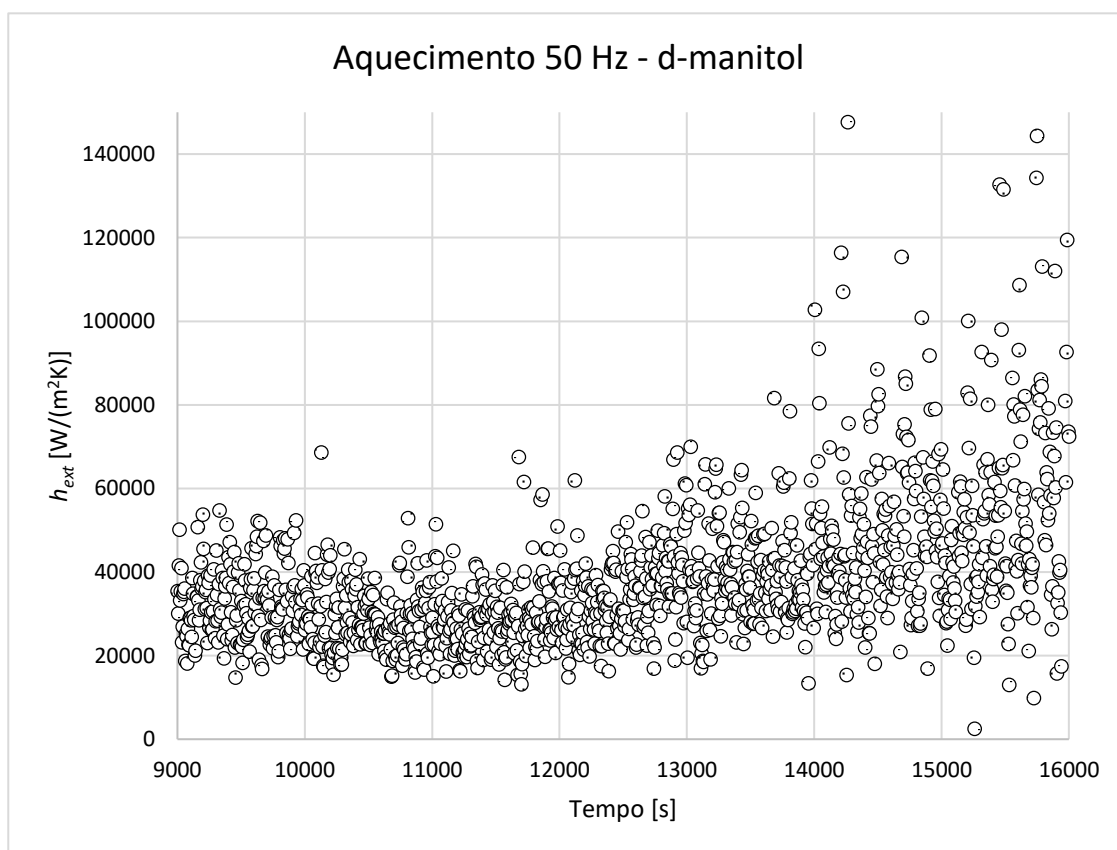


Figura 6.9- Aquecimento d-manitol - 50 Hz. Evolução do coeficiente de transferência de calor do lado do termofluido ao longo do ciclo de aquecimento, dados obtidos por experimentação.

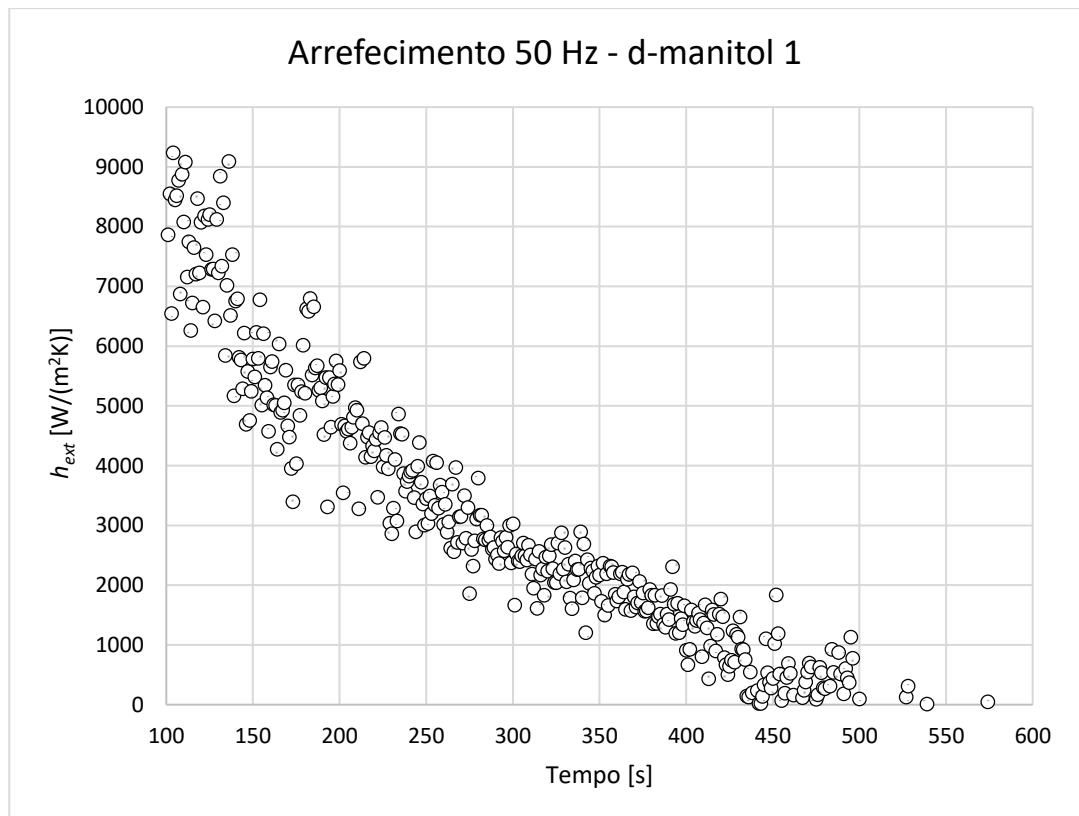


Figura 6.10- Arrefecimento d-manitol - 50 Hz. Evolução do coeficiente de transferência de calor do lado do termofluido ao longo do ciclo de arrefecimento à taxa de 5 l/min, dados obtidos por experimentação.

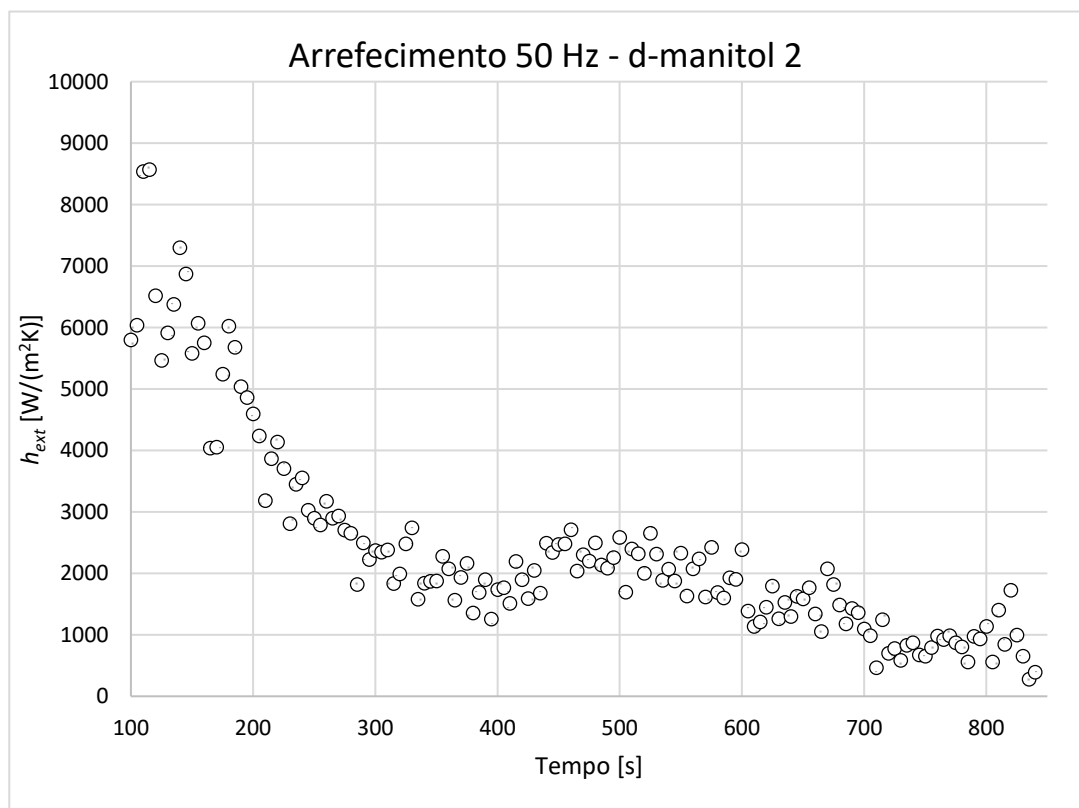


Figura 6.11- Arrefecimento d-manitol - 50 Hz. Evolução do coeficiente de transferência de calor do lado do termofluido ao longo do ciclo de arrefecimento à taxa de 5 l/min e posteriormente à 3 l/min, dados obtidos por experimentação.

6.4.3 Coeficiente de transferência de calor no material de mudança de fase

O coeficiente de transferência de calor é determinado recorrendo à Equação 6.7.

$$U = \left[\frac{r_{ext}}{r_{int} h_{int}} + \frac{r_{ext} \ln \left(\frac{r_{ext}}{r_{int}} \right)}{k} + \frac{1}{h_{ext}} \right]^{-1} \quad (6.7)$$

Recorre-se à esta equação uma vez que os coeficientes de transferência global e do lado do termofluido já foram determinados.

As Figuras 6.12, 6.13 e 6.14 apresentam a evolução do coeficiente de transferência de calor no material de mudança de fase, aquecimento, arrefecimento e arrefecimento mais lento, respetivamente.

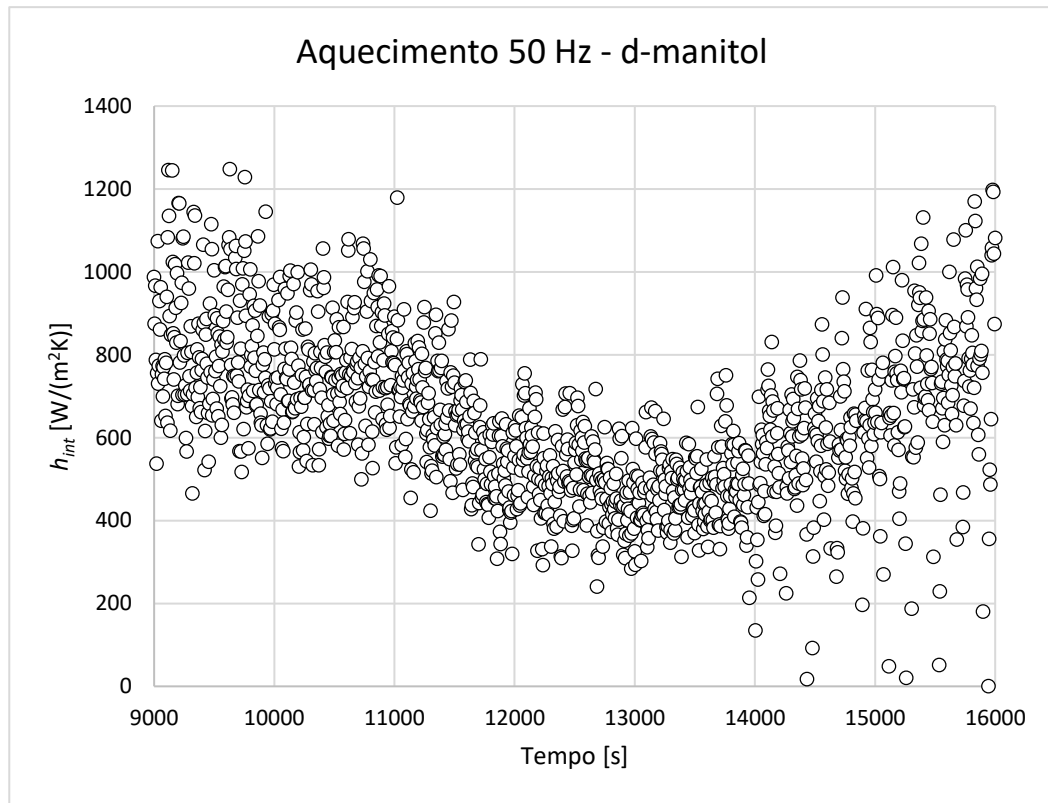


Figura 6.12 - Aquecimento d-manitol - 50 Hz. Evolução do coeficiente de transferência de calor no material de mudança de fase ao longo do ciclo de aquecimento, dados obtidos por experimentação.

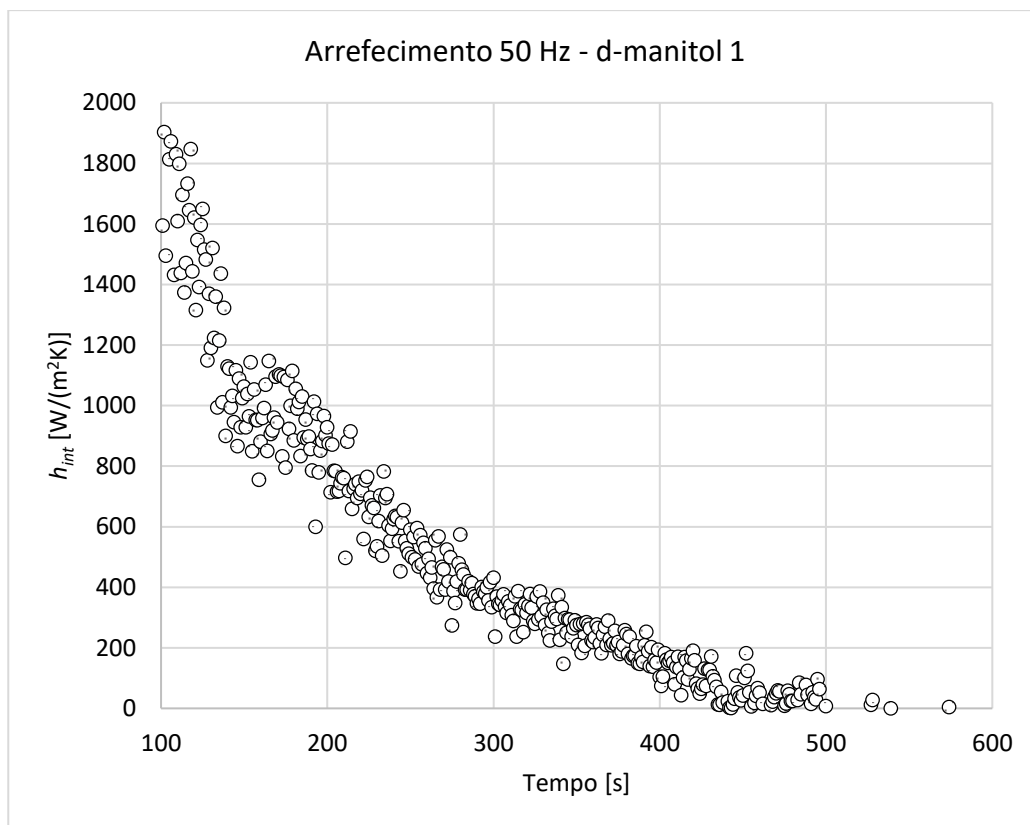


Figura 6.13 Arrefecimento d-manitol - 50 Hz. Evolução do coeficiente de transferência de calor no material de mudança de fase ao longo do ciclo de arrefecimento à taxa de 5 l/min, dados obtidos por experimentação.

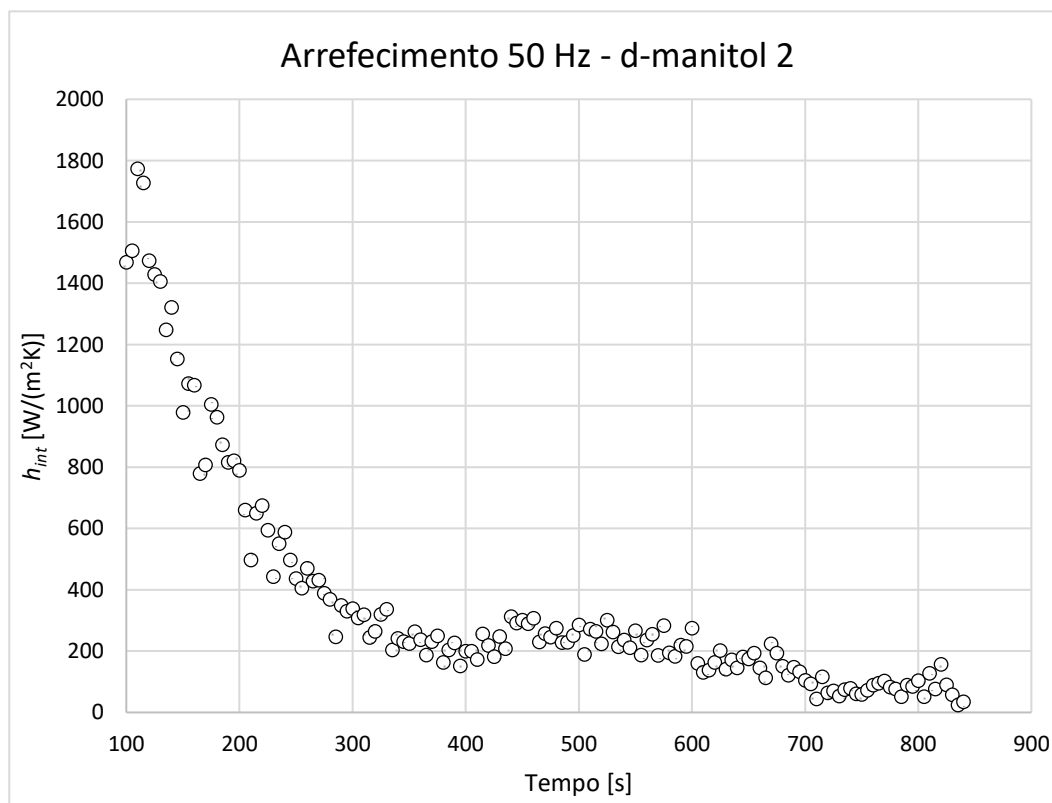


Figura 6.14- Arrefecimento d-manitol - 50 Hz. Evolução do coeficiente de transferência de calor do lado do termofluido ao longo do ciclo de arrefecimento à taxa de 5 l/min e posteriormente à 3 l/min, dados obtidos por experimentação.

6.4.4 Resumo

Na Tabela 6.4 apresentam-se os valores médios dos coeficientes de transferência discutidos anteriormente. Estes valores compreendem o intervalo de mudança de fase.

Tabela 6.4 – Valores médios de diferentes coeficientes de transferência de calor estudados do d-manitol.

Frequência [Hz]	Processo	Tubo	$\bar{U}$ [W/(m ² K)]	$\overline{h_{ext}}$ [W/(m ² K)]	$\overline{h_{int}}$ [W/(m ² K)]
35	Aquecimento	1	192	6.324	228
		2	331	49.741	385
		3	241	49.567	277
	Arrefecimento	1	239	2.117	314
		2	230	11.717	271
		3	239	13.281	252
	Arrefecimento lento	1	225	1.888	300
		2	212	7.375	254
		3	234	7.374	289
50	Aquecimento	1	540	37.900	641
		2	265	175.799	306
		3	204	12.992	231
	Arrefecimento	1	390	3.219	451
		2	383	12.885	463
		3	399	12.885	484
	Arrefecimento lento	1	271	2.420	360
		2	265	16.828	317
		3	274	16.827	329

7 Resultados ácido adípico

7.1 Massa de ácido adípico introduzida nos tubos

A massa total encapsulada em três tubos do permutador é de 1,36 kg. Esta massa encontra-se igualmente distribuída pelos três tubos. Para esta massa, a energia térmica absorvida e libertada no processo de mudança de fase pelo ácido adípico ($h_{mf} = 275 \text{ kJ/kg}$) é de 373 kJ.

7.2 Caracterização do caudal mássico e escoamento

À semelhança do manitol, os ensaios experimentais decorreram a duas frequências de alimentação do motor diferentes, 35 Hz e 50 Hz. Para ser possível comparar estes, bem como as duas fases que o ensaio engloba, aquecimento e arrefecimento, explicitam-se os valores médios de caudal mássico.

Da Tabela 7.1 conclui-se que para uma maior frequência de alimentação, o caudal em circulação é maior, como verificado no caso do d-manitol, sendo igualmente inferior durante o processo de arrefecimento.

Tabela 7.1- Caudal mássico médio para diferentes ensaios do ácido adípico.

Frequência [Hz]	Processo	$\dot{m}$ [kg/s]
35	Aquecimento	0,367
	Arrefecimento	0,226
	Arrefecimento lento	0,297
50	Aquecimento	0,472
	Arrefecimento	0,380
	Arrefecimento lento	0,365

Segundo a Equação 6.1, calculou-se o número de Reynolds de modo a classificar o tipo de escoamento nesta situação. Os resultados obtidos representados na Tabela 7.2 permitem concluir que estamos perante um escoamento laminar, pois em todas as etapas o número de Reynolds obtido é inferior à 2×10^5 (Incropera Frank 2013).

Tabela 7.2- Número de Reynolds médio para diferentes ensaios do ácido adípico.

Frequência [Hz]	Processo	Re_D
35	Aquecimento	643
	Arrefecimento	81
50	Arrefecimento lento	98
	Aquecimento	722
	Arrefecimento	112
	Arrefecimento lento	110

7.3 Evolução da temperatura do material de mudança de fase

Da mesma forma como se procedeu na repetição dos ensaios relativos ao manitol, foram efetuados ensaios que compreendiam aquecimento e arrefecimento do ácido adípico. Assim, o aquecimento foi feito sempre à mesma taxa, enquanto que o arrefecimento foi efetuado inicialmente a uma taxa de 5 l/min, e noutro ensaio este foi feito a 3 l/min.

Observando a Figura 7.1 que diz respeito ao aquecimento do ácido adípico a uma frequência de 50 Hz, vemos que a mudança de fase ocorre inicialmente no tubo 3, sendo que o termopar que deteta essa mudança é o T31, seguindo-se-lhe os tubos 2 e 1, nos termopares na mesma posição – T21 e T11. Depois a mudança de fase dá-se no centro do permutador de ensaios, nos termopares T32 e T22. O último termopar a detetar a mudança de fase é o T23. Nesta situação as mudanças de fase ocorrem primeiro na posição 1 de cada tubo, na cota mais elevada, seguindo-se a posição central, a posição 2 e por fim, na cota mais baixa, posição 3.

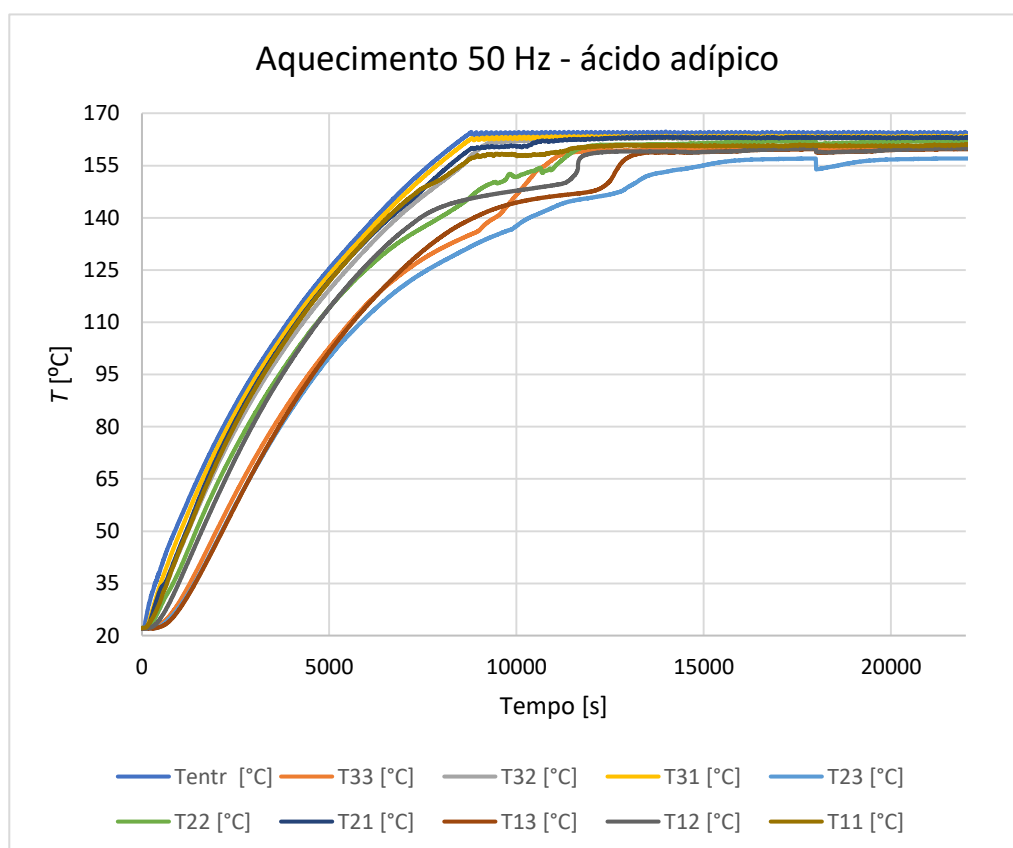


Figura 7.1- Aquecimento ácido adípico- 50 Hz. Evolução da temperatura ao longo do ciclo de aquecimento, dados obtidos por experimentação.

No arrefecimento (Figuras 7.2 e 7.3) a sequência com que se dá a mudança de fase nos diferentes termopares é sensivelmente a mesma. O primeiro e o último termopar a detetar a mudança são igualmente T31 e T23, respetivamente. Nesta situação, as mudanças de fase dão-se também inicialmente na posição 1 de cada tubo, que corresponde aos termopares na cota mais elevada no permutador de ensaios, iniciando-se sempre no tubo 3, depois no tubo 2 e por fim no tubo 1. A seguir ocorre o mesmo na posição dois, igualmente iniciando-se no tubo 3, depois o 2 e o 1. Finalmente dá-se a mudança de fase na posição 3, que corresponde à cota mais baixa no permutador. O primeiro tubo onde ocorre a mudança de fase é o 3, segue-se o tubo 1 e finalmente o 2.

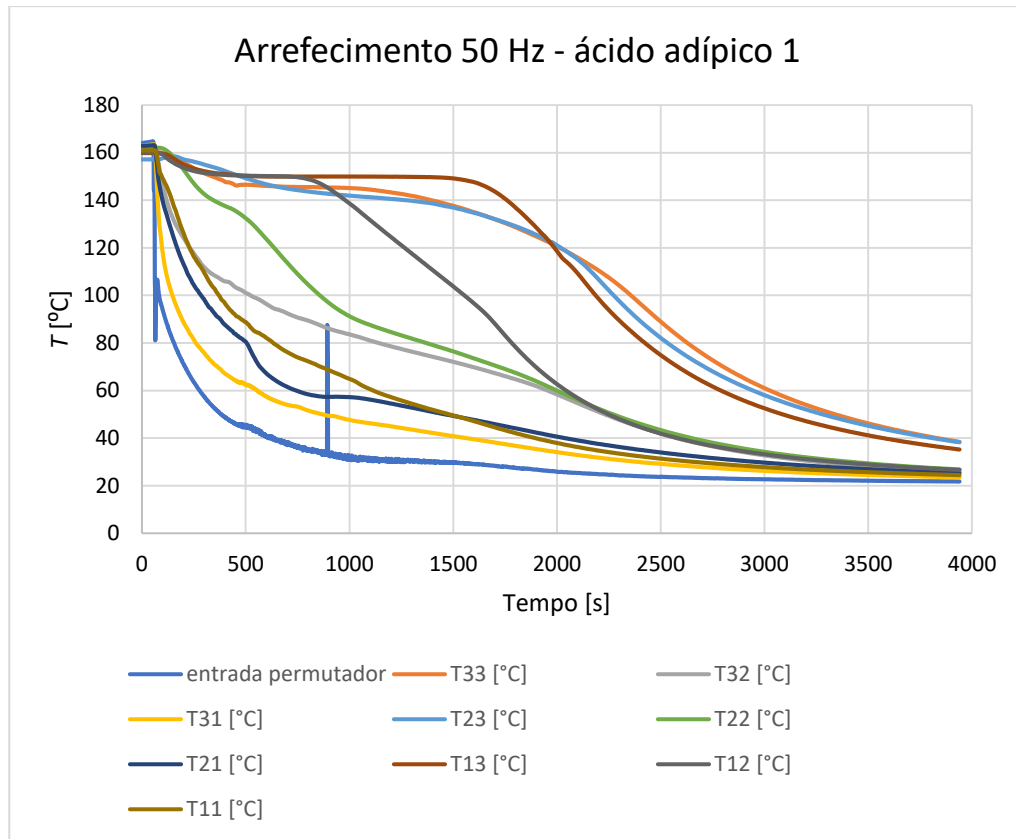


Figura 7.2- Arrefecimento d-manitol - 50 Hz. Evolução da temperatura ao longo do ciclo de arrefecimento à taxa de 5 l/min, dados obtidos por experimentação.

Quando foi efetuado um arrefecimento mais lento (Figura 7.2), as mudanças de fase não ocorrem da mesma forma. O primeiro termopar a detetar a mudança é o T31, seguindo-se-lhe o T21, tal como acontece nos casos analisados acima. A seguir vem o termopar T32 e só depois é que se dá a primeira mudança no tubo 1, no termopar T11. O último termopar a detetar a mudança de fase é o T13.

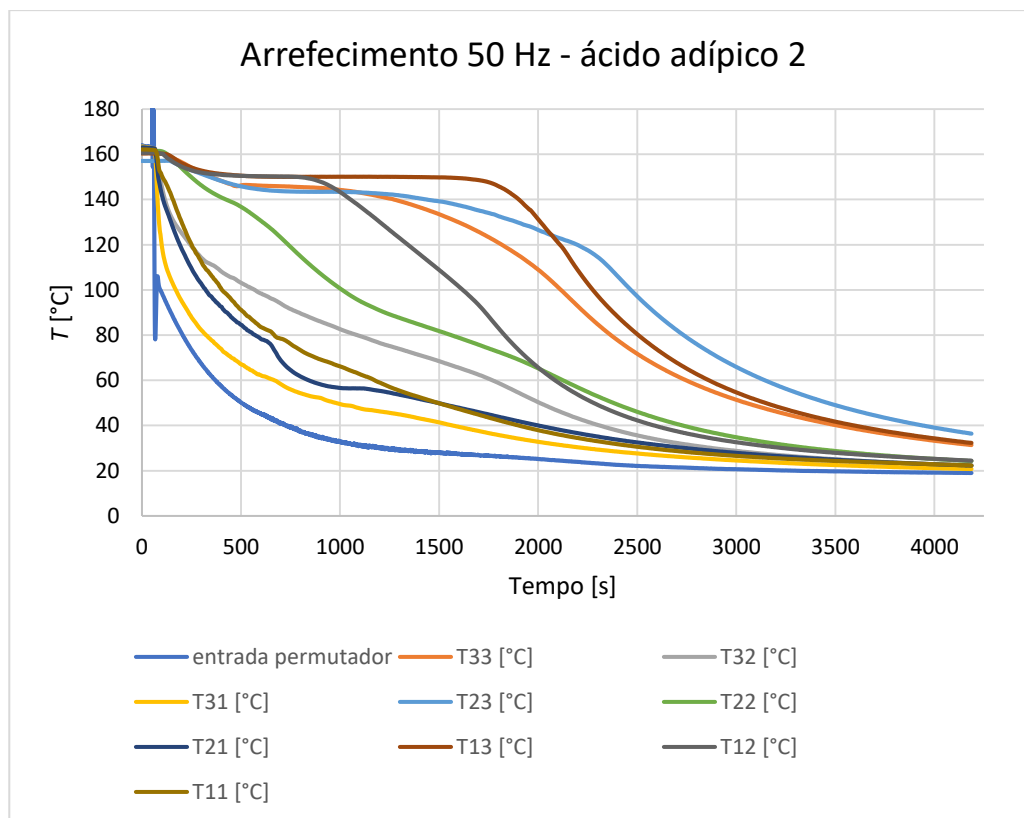


Figura 7.3- Arrefecimento ácido adípico - 50 Hz. Evolução da temperatura ao longo do ciclo de arrefecimento à taxa de 3 l/min, dados obtidos por experimentação.

7.4 Coeficientes de transferência de calor

Seguindo a mesma lógica da secção 6.4, apresentam-se de seguida os coeficientes de transferência de calor obtidos. Estes são o coeficiente de transferência de calor global U , o coeficiente de transferência de calor no interior do ácido adípico h_{int} e o coeficiente de transferência de calor do lado do termofluido h_{ext} .

7.4.1 Coeficiente global de transferência de calor

O coeficiente global de transferência de calor U foi obtido recorrendo à Equação 6.4 utilizada na secção 6.4. Recorrendo às mesmas considerações utilizadas no Capítulo 6, assume-se que a energia tem uma distribuição uniforme pelos três tubos do permutador de testes.

Os dados apresentados nesta secção são relativos ao termopar T12, por ser o termopar que se encontra no centro do tubo, e o tubo 1 ser considerado como o local onde o escoamento é o mais estável.

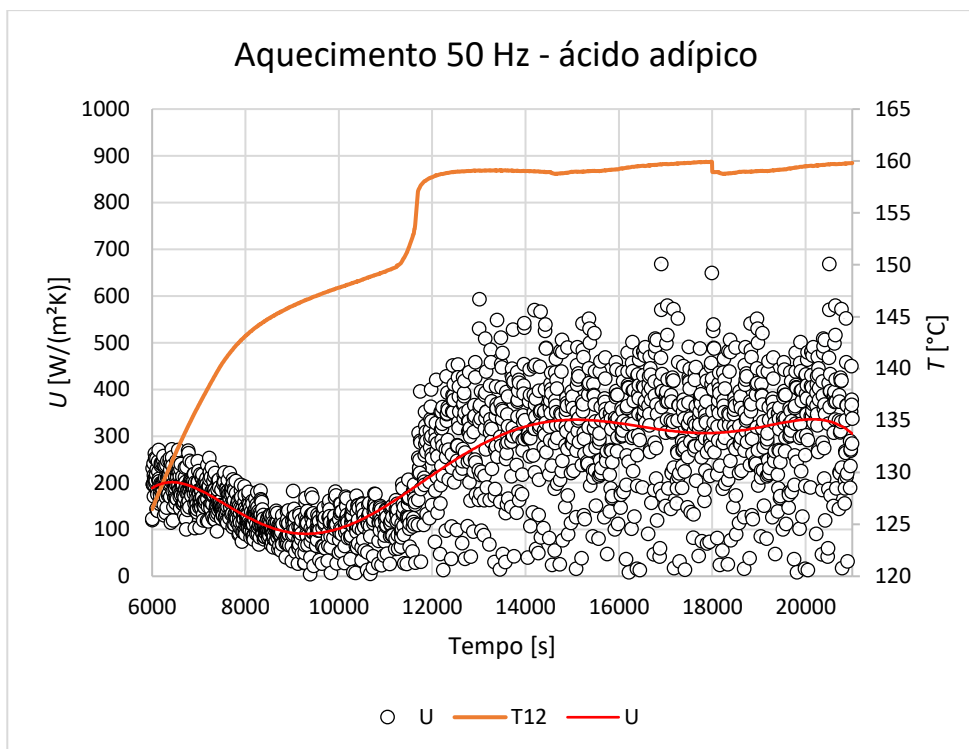


Figura 7.4- Aquecimento ácido adípico - 50 Hz. Evolução do coeficiente de transferência de calor global ao longo do ciclo de aquecimento, dados obtidos por experimentação.

Igualmente como se verificou para o caso do d-manitol, o coeficiente de transferência de calor global diminui no início do aquecimento (Figura 7.4). Apesar de não existir dados concretos na literatura acerca da variação do coeficiente de condutibilidade térmica do ácido adípico, pode-se admitir que se verifica um comportamento semelhante no d-manitol. Assim, conclui-se que existe um claro indício de que a condutibilidade térmica do ácido adípico, analogamente ao caso do d-manitol, também diminui com o aumento de temperatura. À medida que o ciclo de aquecimento prossegue, o coeficiente de transferência de calor global aumenta, uma vez que começam a predominar os efeitos das correntes de convecção.

Relativamente ao arrefecimento (Figuras 7.5 e 7.6), o coeficiente de transferência de calor global apresenta valores altos uma vez que o material se encontra na fase líquida, sendo notáveis os efeitos das correntes de convecção. Ultrapassando o ponto de mudança de fase, o coeficiente de transferência de calor global diminui e estabiliza. Isto verifica-se para os dois casos, de arrefecimento à taxa de 5 l/s e 3 l/s.

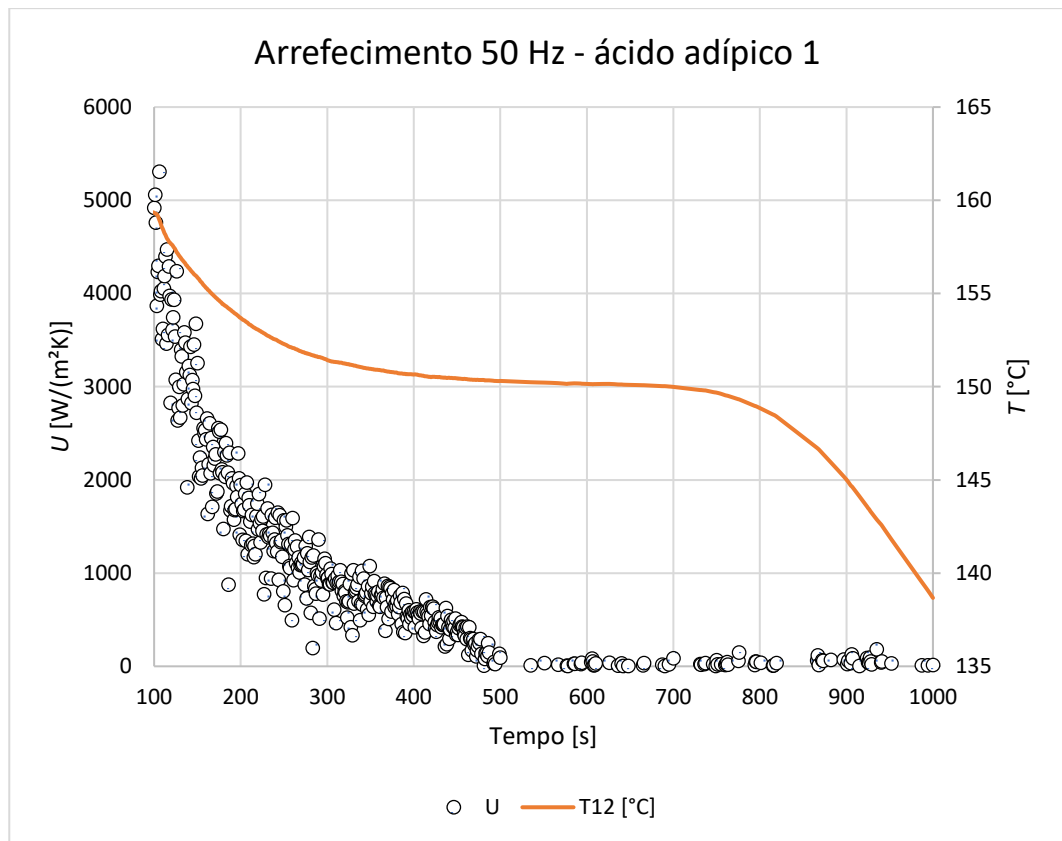


Figura 7.5- Arrefecimento ácido adípico - 50 Hz. Evolução do coeficiente de transferência de calor global ao longo do ciclo de arrefecimento à taxa de 5 l/min, dados obtidos por experimentação.

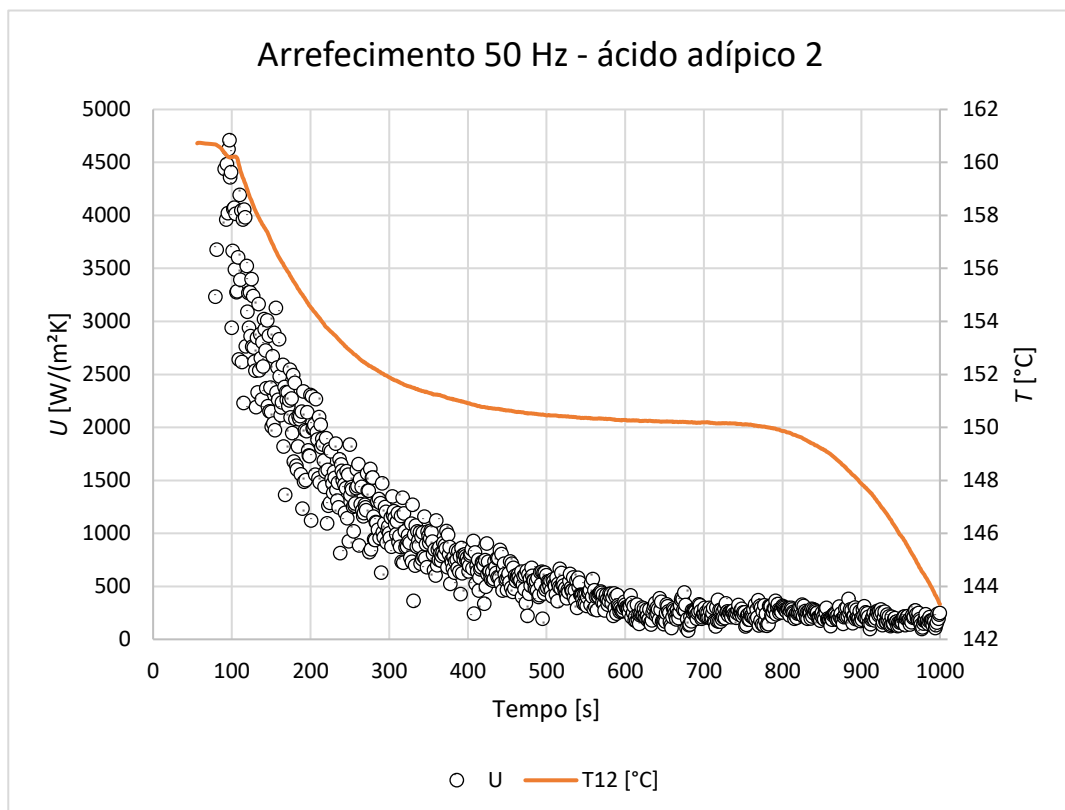


Figura 7.6- Arrefecimento ácido adípico - 50 Hz. Evolução do coeficiente de transferência de calor global ao longo do ciclo de arrefecimento à taxa de 3 l/min, dados obtidos por experimentação.

7.4.2 Coeficiente de transferência de calor do lado do termofluido

As Figuras 7.7, 7.8 e 7.9 apresentam as curvas experimentais relativas ao coeficiente de transferência de calor do lado do termofluido para uma frequência de alimentação de 50 Hz. Os dados obtidos tanto no aquecimento como no arrefecimento apresentam grandes variações, uma vez que o escoamento é irregular devido à impossibilidade de acrescentar um dispositivo estabilizador, ou aumentar o comprimento de entrada do permutador de testes.

Nesta secção apresentam-se os dados relativos ao tubo 1, utilizando como a temperatura na parede do tubo, as temperaturas registadas pelo termopar T1.

No entanto, observa-se, no caso do aquecimento, que a tendência do coeficiente de transferência de calor do lado do termofluido sofre poucas alterações, mantendo-se quase constante (Figura 7.7).

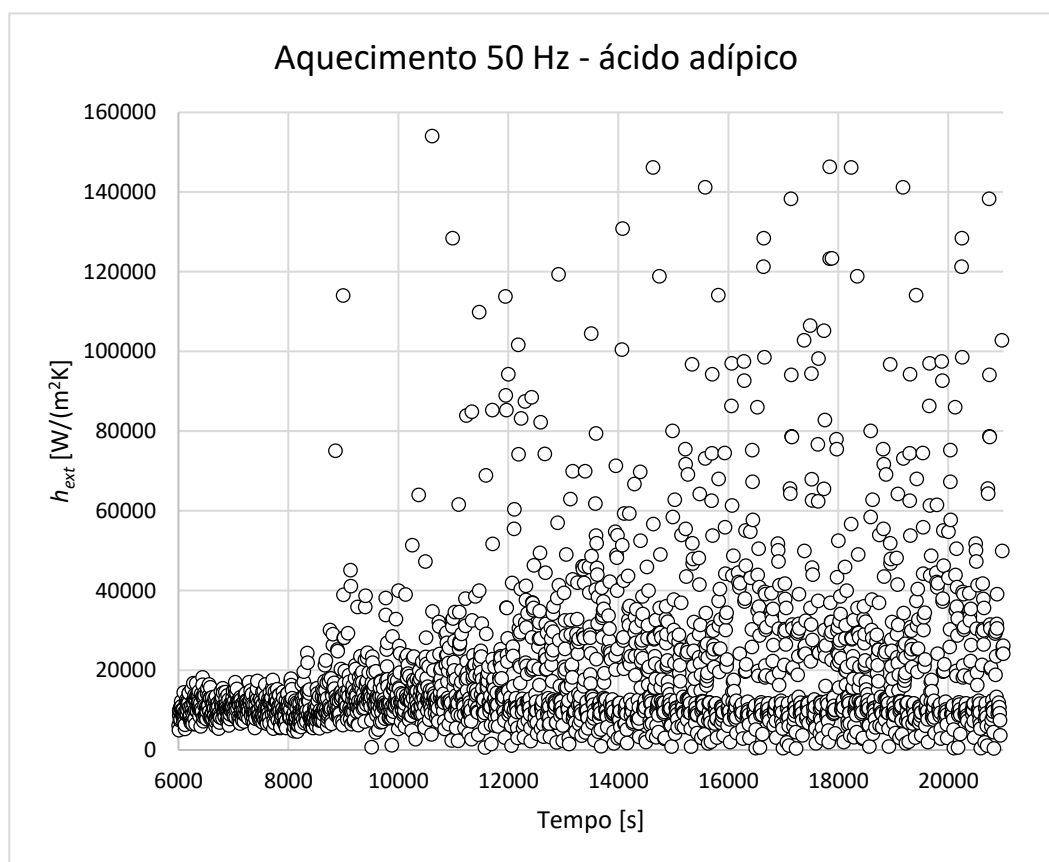


Figura 7.7- Aquecimento ácido adípico - 50 Hz. Evolução do coeficiente de transferência de calor do lado do termofluido ao longo do ciclo de aquecimento, dados obtidos por experimentação.

No início de arrefecimento, o coeficiente de transferência de calor do lado do termofluido é elevado. Nos dois casos o coeficiente oscila, acentuando-se mais no caso do arrefecimento mais rápido, no entanto nos dois casos este tende a ficar constante (Figuras 7.8 e 7.9).

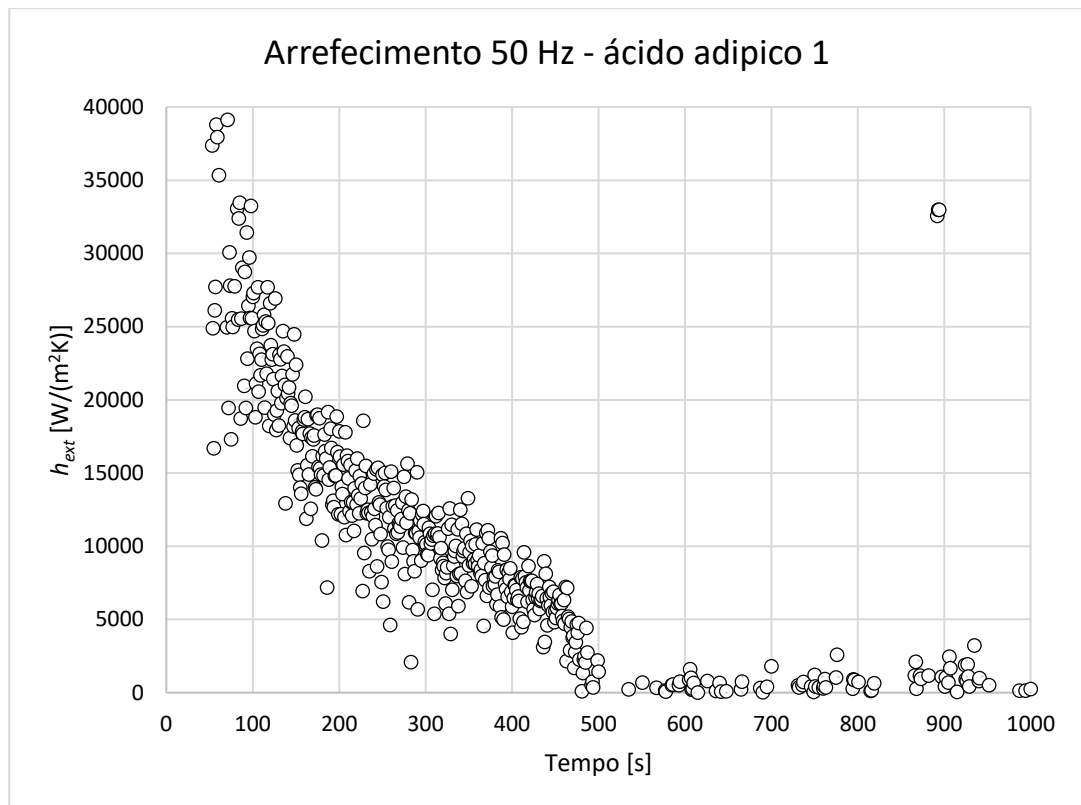


Figura 7.8- Arrefecimento ácido adípico - 50 Hz. Evolução do coeficiente de transferência de calor do lado do termofluido ao longo do ciclo de arrefecimento à taxa de 5 l/min, dados obtidos por experimentação.

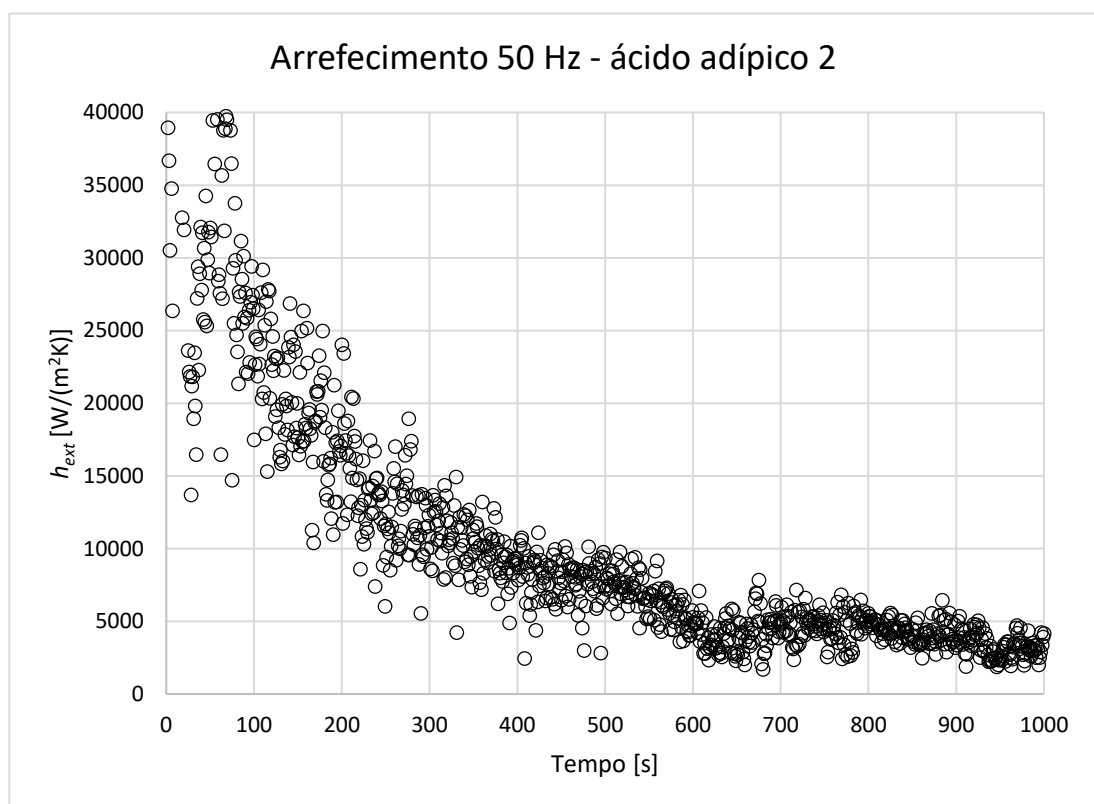


Figura 7.9- Arrefecimento ácido adípico - 50 Hz. Evolução do coeficiente de transferência de calor do lado do termofluido ao longo do ciclo de arrefecimento à taxa de 3 l/min, dados obtidos por experimentação.

7.4.3 Coeficiente de transferência de calor no material de mudança de fase

As Figuras 7.10, 7.11 e 7.12 apresentam as evoluções do coeficiente de transferência de calor no material de mudança de fase para uma frequência de alimentação de 50 Hz. Os dados que se apresentam foram obtidos recorrendo à Equação 6.7 .

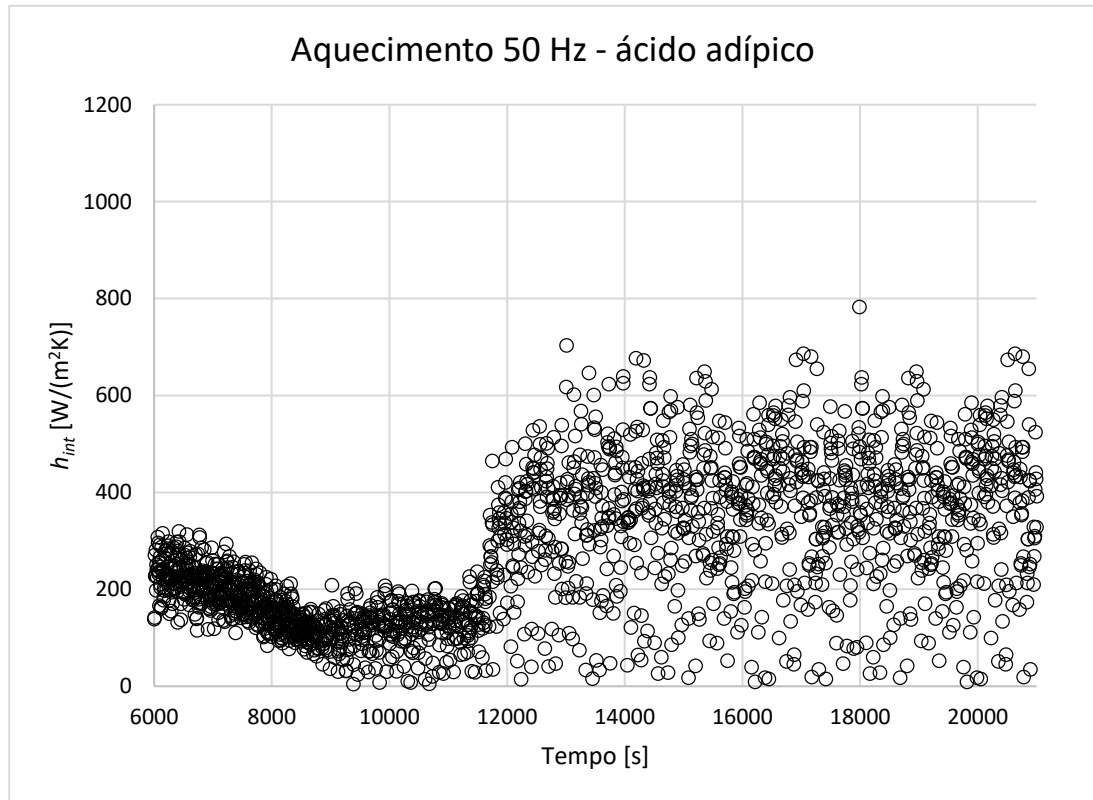


Figura 7.10- Aquecimento ácido adípico - 50 Hz. Evolução do coeficiente de transferência de calor no material de mudança de fase ao longo do ciclo de aquecimento, dados obtidos por experimentação.

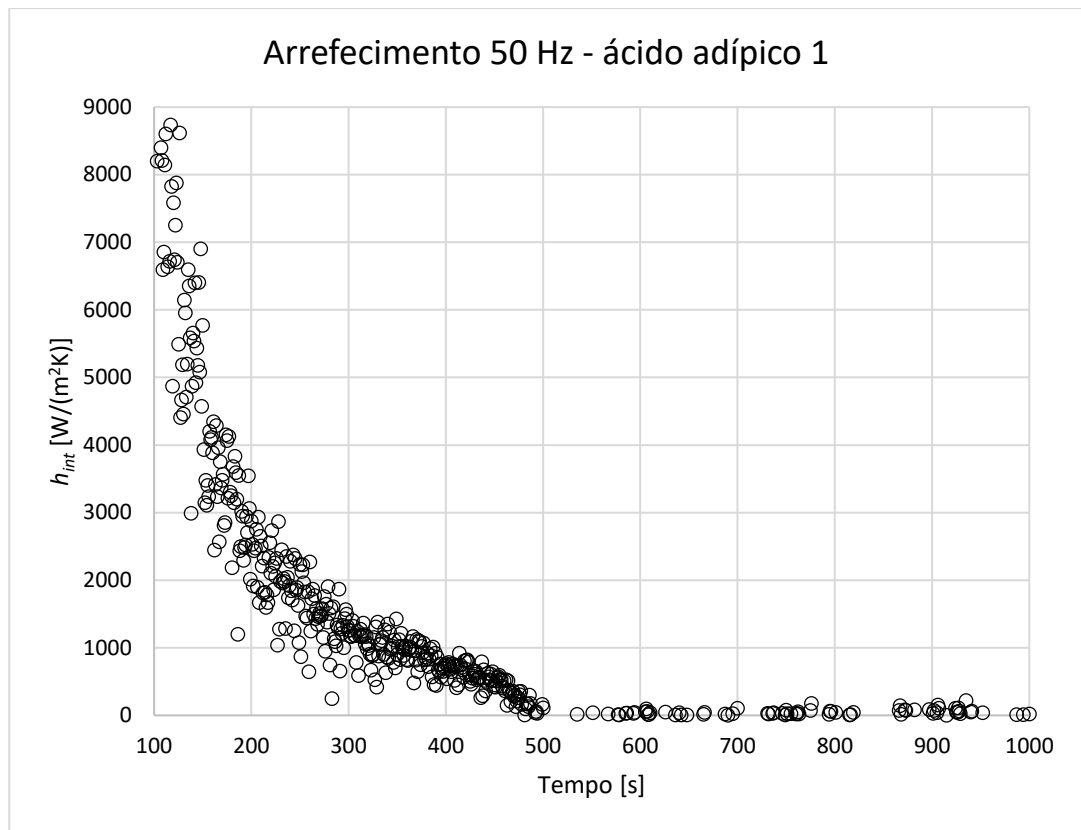


Figura 7.11- Arrefecimento ácido adípico - 50 Hz. Evolução do coeficiente de transferência de calor no material de mudança de fase ao longo do ciclo de arrefecimento à taxa de 5 l/min, dados obtidos por experimentação.

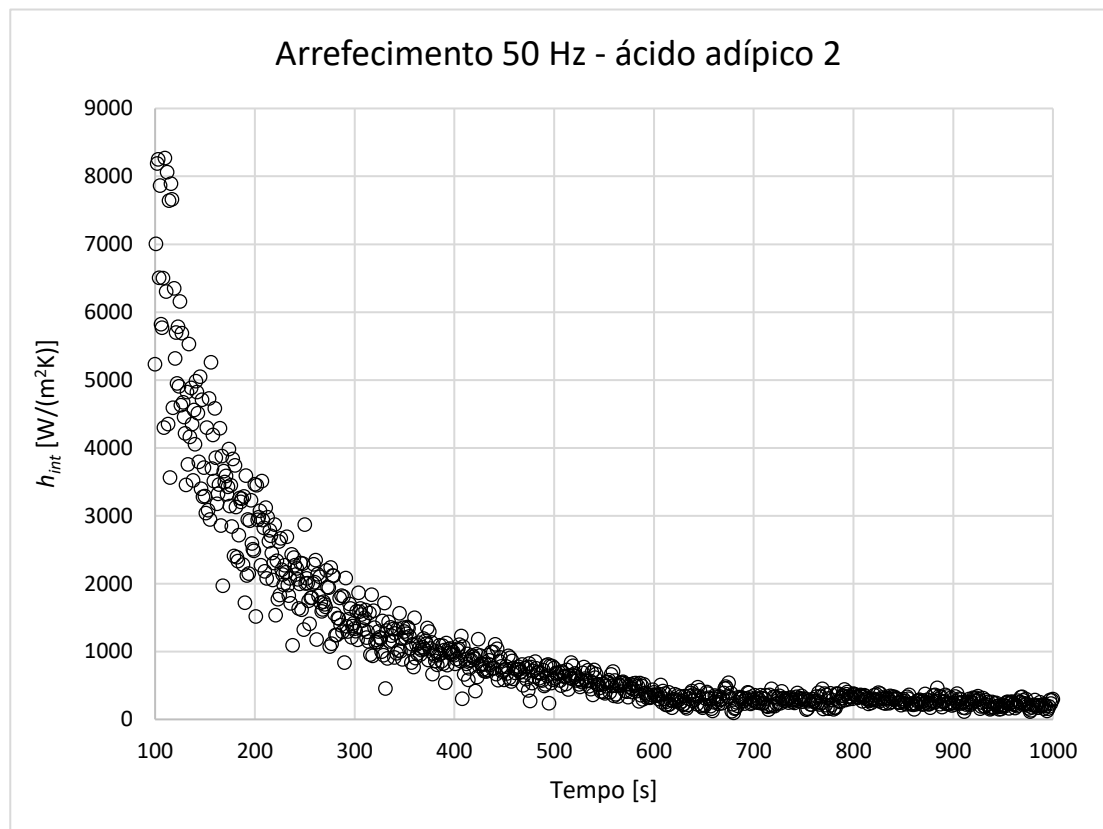


Figura 7.12- Arrefecimento ácido adípico - 50 Hz. Evolução do coeficiente de transferência de calor do lado do termofluido ao longo do ciclo de arrefecimento à taxa de 3 l/min, dados obtidos por experimentação.

O coeficiente de transferência de calor no material de mudança de fase, tal como o coeficiente de transferência de calor do lado do termofluido têm uma evolução mais clara durante o arrefecimento mais lento, a 3 l/min.

7.4.4 Resumo

Nesta secção apresentam-se na Tabela 7.3 todos os valores médios de coeficientes discutidos anteriormente, para o ácido adípico. Estes valores são relativos ao intervalo de mudança de fase.

Tabela 7.3- Valores médios de diferentes coeficientes de transferência de calor estudados do ácido adípico.

Frequência [Hz]	Processo	Tubo	$\bar{U}$ [W/(m ² K)]	$\overline{h_{ext}}$ [W/(m ² K)]	$\overline{h_{int}}$ [W/(m ² K)]
35	Aquecimento	1	1.114	32.814	1.075
		2	1.787	92.621	1.815
		3	2.699	92.621	3.989
	Arrefecimento	1	382	3.470	547
		2	406	15.562	476
		3	609	19.288	910
	Arrefecimento lento	1	337	3.542	458
		2	393	28.661	539
		3	581	28.661	734
50	Aquecimento	1	174	16.966	199
		2	271	33.867	312
		3	650	33.867	517
	Arrefecimento	1	1.446	16.259	2.336
		2	1.530	30.793	1.963
		3	2.234	44.549	3.222
	Arrefecimento lento	1	977	10.152	1.150
		2	1.028	71.063	1.293
		3	1.543	122.161	2.174

8 Conclusão

Os materiais estudados, d-manitol e ácido adípico apresentam diferentes temperaturas de mudança de fase, nomeadamente 164 °C para o d-manitol e 152 °C para o ácido adípico. Utilizou-se a instalação disponível no laboratório de combustão do INEGI, que inclui um permutador de testes composto por uma camada de três tubos, com uma inclinação de 5 ° com a horizontal, onde foram inseridos os materiais de mudança de fase.

Foram efetuados vários ciclos de aquecimento/arrefecimento de modo a obter coeficientes de transferência de calor: global, do lado do termofluido e finalmente no material de mudança de fase.

Os testes ao d-manitol foram efetuados com o objetivo de validar os resultados obtidos anteriormente, bem como avaliar o impacto de um arrefecimento mais lento. O valor médio de transferência de calor global obtido foi 285 W/(m²K), do coeficiente de transferência de calor no material de mudança de fase foi 340 W/(m²K) e do coeficiente de transferência de calor do lado do termofluido foi 24.507 W/(m²K). Estes valores são mais baixos do que os estudados por Rocha (2018), o que pode ser justificado pelos caudais mais baixos do termofluido em circulação, bem como pela degradação sofrida pelo material, que após vários ciclos sofre um processo de caramelização, perdendo as suas propriedades.

A partir dos testes ao ácido adípico obtiveram-se valores médios de transferência de calor global obtido foi 1.008 W/(m²K), do coeficiente de transferência de calor no material de mudança de fase foi 1.320 W/(m²K) e do coeficiente de transferência de calor do lado do termofluido foi 38.720 W/(m²K).

Comparando os valores obtidos, conclui-se que os coeficientes de transferência de calor do ácido adípico são muito superiores aos do d-manitol.

Conclui-se também que um arrefecimento mais lento permite obter resultados mais consistentes, com menos oscilações.

Tal como verificado por Rocha (2018) a resistência térmica dentro do material de mudança de fase é muito superior que do lado exterior dos tubos, por isso a taxa com que se efetuam a carga e descarga não são influenciados pelo caudal do óleo em circulação à volta dos tubos que encapsulam o material.

Confirma-se mais uma vez que os efeitos das correntes de convecção natural são importantes, pois predominam após a fusão do material e consequentemente, aumentam os coeficientes de transferência de calor no seio do material de mudança de fase.

É de referir que durante a pesquisa efetuada para a realização deste trabalho experimental, não se encontrou dados acerca dos coeficientes de transferência de calor, e portanto, este trabalho representa uma contribuição importante para o estudo do ácido adípico enquanto material de mudança de fase.

9 Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros sugere-se uma modificação da instalação de modo a diminuir os ruídos presentes no escoamento, introduzindo um elemento estabilizador ou aumentando o comprimento de entrada no permutador. Sugere-se também a alteração do circuito de aquecimento, para que o óleo possa aquecer até à temperatura desejada sem que passe pelo material de mudança de fase.

E finalmente, o teste de outros materiais de mudança de fase para alargar a base de informações relativa a este tipo de materiais que ainda está muito reduzida, tendo em atenção a enorme importância prática que se adivinha que estes materiais passarão a ter num futuro próximo.

Referências

- Bruno, F., M. Belusko, M. Liu and N. H. S. Tay (2015). 9 - Using solid-liquid phase change materials (PCMs) in thermal energy storage systems. Advances in Thermal Energy Storage Systems. L. F. Cabeza, Woodhead Publishing: 201-246.
- Crespo, A., C. Barreneche, M. Ibarra and W. Platzer (2018). "Latent thermal energy storage for solar process heat applications at medium-high temperatures – A review." Solar Energy.
- Dinçer, I. and A. Rosen Marc (2002). Thermal energy storage systems and applications. Chichester, John Wiley & Sons.
- Esteves L. P. F., (2016). Testes a dois materiais de mudança de fase para armazenamento de energia térmica. Porto, Dissertação do MIEM. FEUP, Porto, Portugal.
- Fallahi, A., G. Guldentops, M. Tao, S. Granados-Focil and S. Van Dessel (2017). "Review on solid-solid phase change materials for thermal energy storage: Molecular structure and thermal properties." Applied Thermal Engineering **127**: 1427-1441.
- Ferrer, G., A. Solé, C. Barreneche, I. Martorell and L. F. Cabeza (2015). "Corrosion of metal containers for use in PCM energy storage." Renewable Energy **76**: 465-469.
- Fleischer, A. S. (2015). "Thermal energy storage using phase change materials : fundamentals and applications."
- Ganatra, Y., J. Ruiz, J. A. Howarter and A. Marconnet (2018). "Experimental investigation of Phase Change Materials for thermal management of handheld devices." International Journal of Thermal Sciences **129**: 358-364.
- Gotoh, R., T. Totani, M. Wakita and H. Nagata (2019). "Controlling heat release of crystallization from supercooling state of a solid-solid PCM, 2-amino-2-methyl-1,3-propanediol." International Journal of Heat and Mass Transfer **137**: 1132-1140.
- Hailot, D., T. Bauer, U. Kröner and R. Tamme (2011). "Thermal analysis of phase change materials in the temperature range 120–150°C." Thermochimica Acta **513**(1): 49-59.
- Incropera Frank, P. (2013). Principles of heat and mass transfer. Hoboken, John Wiley & Sons.
- INEGI. (2011). "A Instituição." 2019, from <http://www.inegi.up.pt/instituicao.asp?idm=1&idsubm=5&LN=>. [Acedido em Junho de 2019].
- Khan, Z., Z. Khan and A. Ghafoor (2016). "A review of performance enhancement of PCM based latent heat storage system within the context of materials, thermal stability and compatibility." Energy Conversion and Management **115**: 132-158.
- Lin, Y., G. Alva and G. Fang (2018). "Review on thermal performances and applications of thermal energy storage systems with inorganic phase change materials." Energy **165**: 685-708.
- Nazir, H., M. Batool, F. J. Bolivar Osorio, M. Isaza-Ruiz, X. Xu, K. Vignarooban, P. Phelan, Inamuddin and A. M. Kannan (2019). "Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review." International Journal of Heat and Mass Transfer **129**: 491-523.
- Pereira da Cunha, J. and P. Eames (2016). "Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials – A review." Applied Energy **177**: 227-238.
- Pinho, C. (2017). Sebenta de Gestão de Energia Térmica. Porto, Portugal, FEUP.
- Rocha, T. D. d. C. (2018). Estudo do desempenho térmico de duas unidades de armazenamento de calor latente. Dissertação do MIEM. FEUP, Porto, Portugal.

SHIP. (2019). "Acerca." from <http://www.valter.pt/ship/>. [Acedido em Junho de 2019].

Trindade J. I. C. (2018). Projeto, construção e teste de um módulo de acumulação de energia térmica usando material de mudança de fase. Porto, Dissertação do MIEM. FEUP, Porto, Portugal.

Zhang, H., J. Baeyens, G. Cáceres, J. Degève and Y. Lv (2016). "Thermal energy storage: Recent developments and practical aspects." Progress in Energy and Combustion Science **53**: 1-40.

ANEXO A: Características da bomba centrífuga

As características da bomba centrífuga fornecidas pelo fabricante encontram-se representadas na Figura A.1.

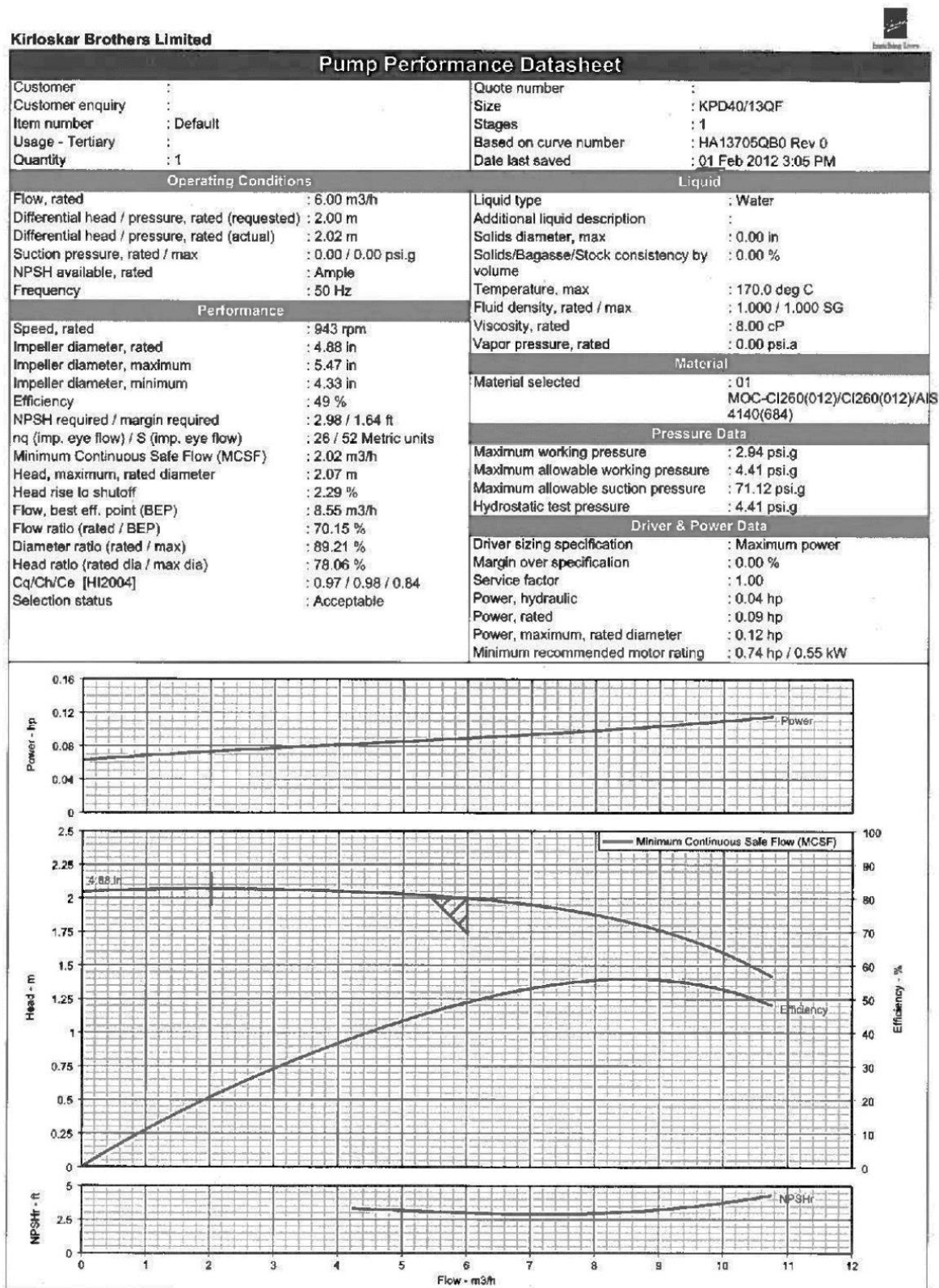


Figura A.1- Características da bomba centrífuga.

ANEXO B: Propriedades do fluido de transferência de calor

Para determinar as propriedades do fluido de transferência de calor, o fabricante fornece as seguintes equações:

Massa volúmica [kg/m³]:

$$\rho = -0,614254 \times T(^{\circ}\text{C}) - 0,000321 \times T^2(^{\circ}\text{C}) + 1020,62 \quad (\text{B.1})$$

Calor específico [kJ/(kg K)]:

$$c = 0,003313 \times T + 0,0000008970785 \times T^2(^{\circ}\text{C}) + 1,496005 \quad (\text{B.2})$$

Condutibilidade térmica [W/(m K)]:

$$k = -0,000033 \times T(^{\circ}\text{C}) - 0,00000015 \times T^2(^{\circ}\text{C}) + 0,118294 \quad (\text{B.3})$$

Viscosidade cinemática [mm²/s]:

$$\nu = e^{\left(\frac{586,375}{T(^{\circ}\text{C})+62,5} - 2,2809\right)} \quad (\text{B.4})$$

Pressão de vapor [kPa]:

$$P_v = e^{\left(\frac{-9094,51}{T(^{\circ}\text{C})+340} + 17,6371\right)} \quad (\text{B.5})$$

Trindade (2018) elaborou a Tabela B.1 contendo as propriedades do fluido:

Tabela B.1- Variação das propriedades do *Therminol 66* com a temperatura.

Temperatura [°C]	Massa volumica [kg/m³]	Condutibilidade Térmica [W/(mK)]	Calor Específico [kJ/(kgK)]	Viscosidade		Pressão de Vapor (abs.) [kPa]
				Dinâmica [mPa.s]	Cinemática [mm²/s]	
0	1021,5	0,118	1,495	1324,87	1297,01	-
10	1014,9	0,118	1,529	344,26	339,2	-
20	1008,4	0,118	1,562	123,47	122,45	-
30	1001,8	0,117	1,596	55,6	55,51	-
40	995,2	0,117	1,63	29,5	29,64	-
50	988,6	0,116	1,665	17,64	17,84	-
60	981,9	0,116	1,699	11,53	11,74	-
70	975,2	0,115	1,733	8,06	8,26	0,01
80	968,5	0,115	1,768	5,93	6,12	0,02
90	961,8	0,114	1,803	4,55	4,73	0,03
100	955	0,114	1,837	3,6	3,77	0,05
110	948,2	0,113	1,873	2,92	3,08	0,08
120	941,4	0,112	1,908	2,42	2,58	0,12
130	934,5	0,111	1,943	2,05	2,19	0,18
140	927,6	0,111	1,978	1,75	1,89	0,27
150	920,6	0,11	2,014	1,52	1,65	0,4
160	913,6	0,109	2,05	1,34	1,46	0,58
170	906,6	0,108	2,086	1,18	1,3	0,83
180	899,5	0,107	2,122	1,06	1,17	1,17
190	892,3	0,107	2,158	0,95	1,06	1,62
200	885,1	0,106	2,195	0,86	0,97	2,23
210	877,8	0,105	2,231	0,78	0,89	3,02
220	870,4	0,104	2,268	0,72	0,82	4,06
230	863	0,103	2,305	0,66	0,77	5,39
240	855,5	0,102	2,342	0,61	0,71	7,1
250	847,9	0,1	2,379	0,57	0,67	9,25
260	840,3	0,099	2,417	0,53	0,63	11,95
270	832,5	0,098	2,455	0,49	0,59	15,31
280	824,6	0,097	2,492	0,46	0,56	19,46
290	816,6	0,096	2,531	0,44	0,54	24,55
300	808,5	0,095	2,569	0,41	0,51	30,73
310	800,3	0,093	2,608	0,39	0,49	38,22
320	792	0,092	2,647	0,37	0,47	47,2
330	783,5	0,091	2,686	0,35	0,45	57,94
340	774,8	0,089	2,726	0,34	0,43	70,68
350	765,9	0,088	2,766	0,32	0,42	85,74
360	756,9	0,086	2,806	0,31	0,41	103,42
370	747,7	0,085	2,847	0,3	0,39	124,09
380	738,2	0,084	2,889	0,28	0,38	148,13

ANEXO C: Programa de aquisição de dados

O programa de aquisição de dados utilizado foi desenvolvido por Rocha (2018). Este programa permitiu, para além do registo de dados, observar os ciclos em tempo real, e também fazer um pré-tratamento dos dados (Figuras C.1 e C.2).

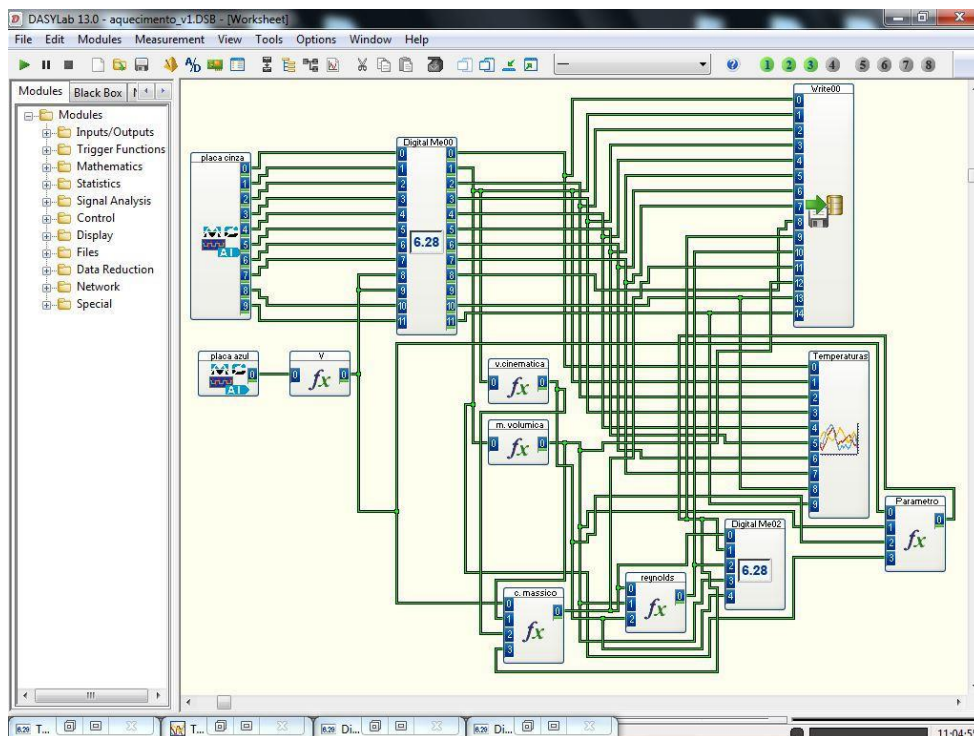


Figura C.1 – Programa desenvolvido para o registo e processamento dos dados – aquecimento (Rocha, 2018).

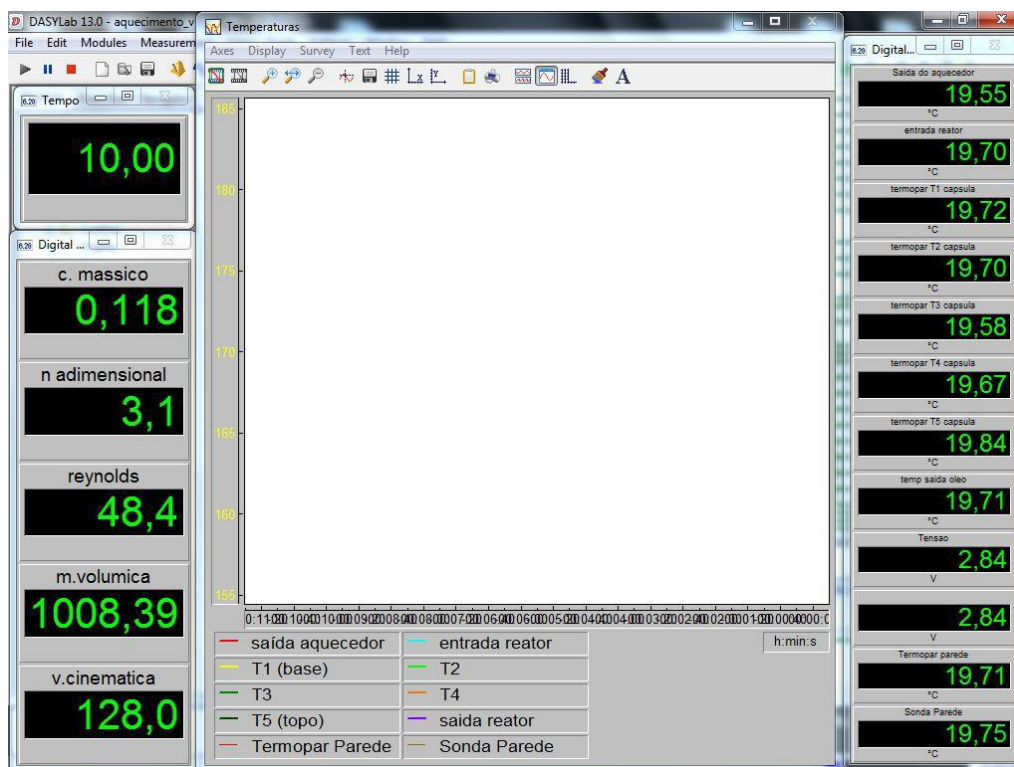


Figura C.2- Programa desenvolvido para o registo e processamento dos dados –acompanhamento do aquecimento (Rocha, 2018).

ANEXO D: Características e calibração da placa orifício (Rocha, 2018).

A Figura D.1 apresenta o desenho da placa orifício.

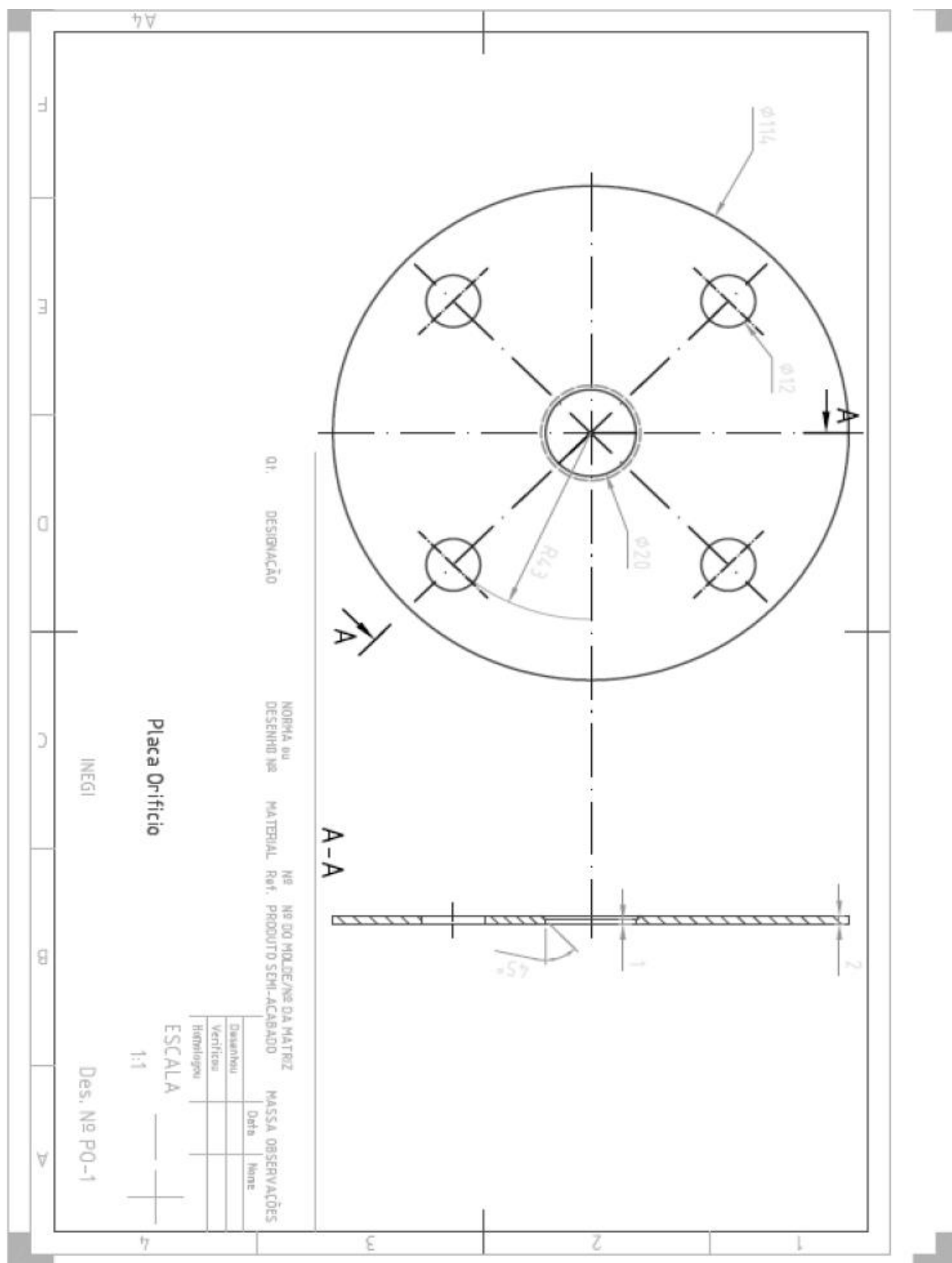


Figura D.1- Desenho da placa orifício (Esteves, 2016).

A equação (D.1) permite relacionar o caudal mássico de termofluido em circulação com a queda de pressão, a razão de diâmetros e o coeficiente de descarga da placa orifício. Nesta equação, F_{et} é o fator de expansão térmico e F_{eg} o fator de expansão do gás (Coelho, 2017).

$$\dot{m} = C_d F_{et} F_{eg} \frac{\sqrt{2}\pi D^2}{4} \frac{\beta^2}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{\Delta P \rho} \quad (D.1)$$

Para a placa orifício utilizada na instalação a razão entre o diâmetro do orifício e o diâmetro interno da tubagem é de 0,833 e o diâmetro interno da tubagem é de 0,024 m.

O processo de calibração da placa orifício passa por simular várias situações de utilização normal da instalação e, simultaneamente, observar a tensão obtida (proporcional à queda de pressão), correlacionando-a com a massa de termofluido escoada através da placa orifício, num determinado intervalo de tempo. Assim, a utilização de uma derivação em circuito aberto, paralela ao circuito principal, onde seja possível extrair para pesagem o fluido que atravessa a placa orifício durante um dado período de tempo apresenta-se como a melhor solução.

Durante a calibração da placa orifício deve ainda ser registada a temperatura do termofluido, visto que influencia tanto a sua massa volúmica como a sua viscosidade.

Desta forma, é necessário encontrar um parâmetro que, simultaneamente, contabilize o caudal em circulação e a influência da temperatura sobre a massa volúmica e a viscosidade do fluido. Este parâmetro será o número de Reynolds que é definido através da equação (D.2).

$$Re_D = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{4\dot{m}}{\mu \pi D} \quad (D.2)$$

Voltando à equação (D.1), o fator de expansão do gás assume o valor um, dado que o termofluido pode ser considerado incompressível. Além disso, como o material do elemento medidor é alumínio e o da tubagem é aço, o fator de expansão térmico apresenta sempre valores próximos da unidade, pelo que será considerado igual a um, nos cálculos que se seguem. Agregando as equações (D.1) e (D.2) obtém-se a equação (D.3).

$$Re_D = C_d \frac{\beta^2}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{\frac{2\Delta P \rho D^2}{\mu^2}} \quad (D.3)$$

Dado que existem dúvidas quanto à validade da equação do transdutor de pressão (devido a possíveis derivas eletrónicas), optou-se por relacionar diretamente o caudal em circulação com a tensão registada no sistema de aquisição de dados. Assim, a equação (D.4) relaciona o caudal mássico com a tensão medida na saída do transdutor de pressão. Nesta, C_1 é a constante que se pretende determinar durante o processo de calibração e ΔV a diferença entre a tensão lida (V) e a tensão que seria lida se não houvesse escoamento, para a mesma temperatura do termofluido (V_0).

$$Re_D = C_1 \sqrt{\frac{2\Delta V \rho D^2}{\mu^2}} \quad (D.4)$$

Processo de calibração

Tal como atrás referido, existe a necessidade de utilizar um ramal em derivação, paralelo ao circuito principal, para extrair o termofluido que atravessa a placa orifício durante um dado intervalo de tempo. As variáveis a registar são a tensão, a massa escoada, o tempo de escoamento e a temperatura do fluido. Além disso, regista-se a tensão lida pelo sistema de aquisição de dados no caso em que a bomba centrífuga não está em funcionamento. Importa

referir que o processo de calibração foi efetuado por duas vezes, devido ao facto de terem sido utilizados dois permutadores de testes. De seguida apresentam-se as etapas do processo de calibração:

- 1) Coloca-se a bomba centrífuga em funcionamento e estabelece-se a temperatura do termofluido que se pretende atingir no controlador de temperatura.
- 2) Quando a temperatura pretendida é atingida, define-se no variador de frequência a frequência de alimentação do motor elétrico à qual se pretende iniciar o processo de calibração. Optou-se por iniciar o processo com uma frequência de 50 Hz.
- 3) Através das válvulas existentes na instalação, desvia-se o fluido para o ramal em circuito aberto, armazenando-o num recipiente e inicia-se a contagem do tempo. Em simultâneo terá de ser reposto fluido na instalação de modo a evitar a entrada de ar. Esta reposição de fluido é efetuada pelo ponto mais alto da instalação, o vaso de expansão. De seguida, volta-se a colocar o fluido a circular em circuito fechado e termina-se a contagem do tempo. Durante o tempo em que o termofluido circula no ramal aberto, o sistema de aquisição de dados regista a tensão de saída do transdutor de pressão.
- 4) Realiza-se a medição da temperatura do termofluido armazenado no recipiente e a sua massa.
- 5) Desliga-se a bomba centrífuga e regista-se a tensão de saída do transdutor de pressão.
- 6) Repete-se os pontos 3 e 4 para as frequências de 35 e 40 Hz.
- 7) De seguida define-se uma nova temperatura no controlador e repete-se a sequência.

Este processo foi efetuado para cinco temperaturas representativas da gama de temperaturas de funcionamento da instalação, o que perfaz um total de 15 pontos de funcionamento (5 temperaturas $\times$ 3 frequências). Substituindo as grandezas medidas durante a calibração nos parâmetros da equação (D.4), obtêm-se os pontos que se apresentam nos gráficos das Figuras D.2 e D.3.

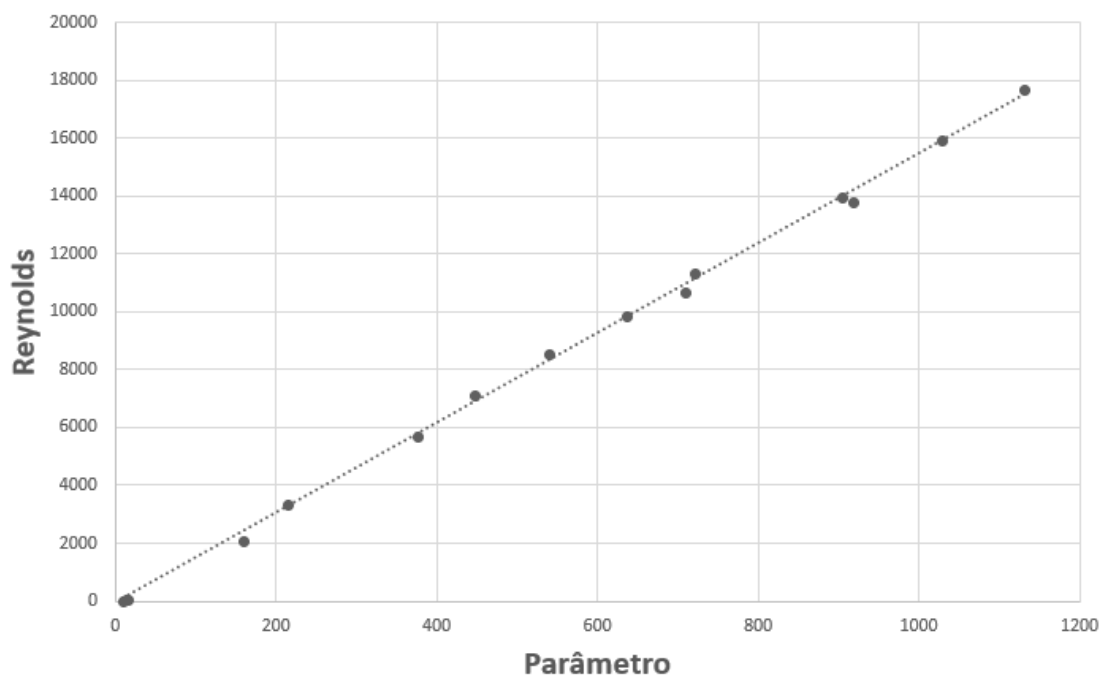


Figura D. 1: Curva de calibração da placa orifício para o permutador de testes com cápsula disposta na vertical.

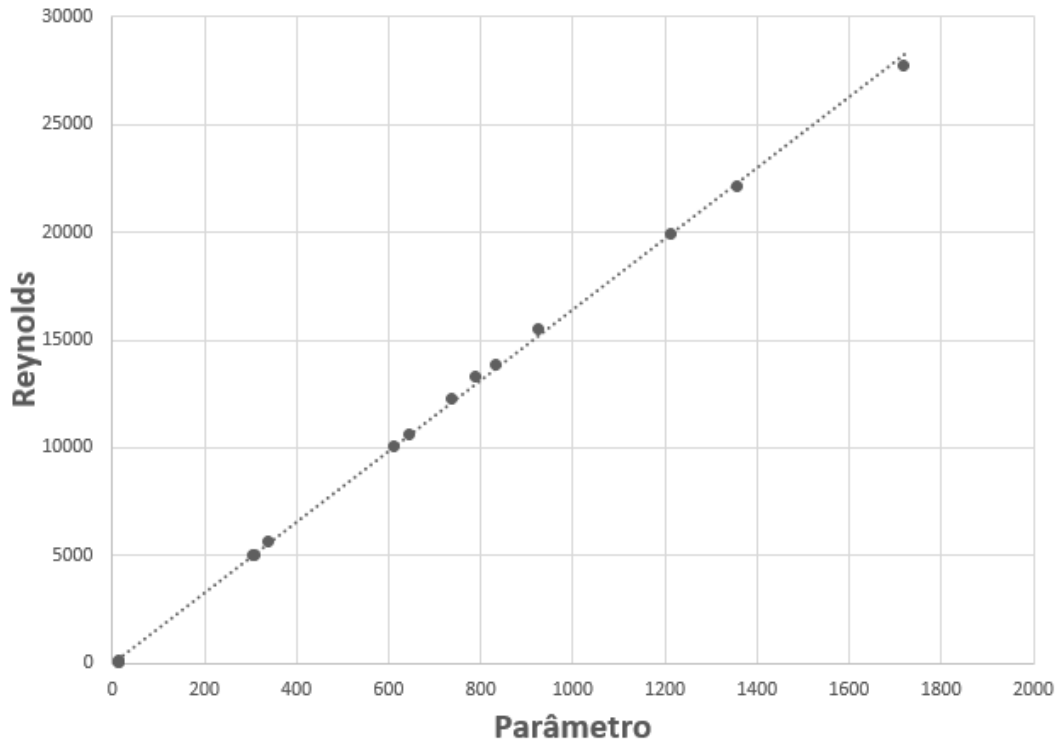


Figura D. 2: Curva de calibração da placa orifício para o permutador de testes com camada única de três tubos.

Assim, é possível ajustar uma reta aos pontos e obter a equação que relaciona ambos os parâmetros. Estas equações para os dois permutadores de testes são apresentadas de seguida. De salientar que estas aproximações lineares apresentam um coeficiente de determinação superior a 0,99, que se trata de um valor muito satisfatório tendo em conta as circunstâncias da calibração.

Permutador de testes com cápsula disposta na vertical:

$$Re_D = 15,499 \sqrt{\frac{2\Delta V \rho D^2}{\mu^2}} \quad (D.5)$$

Permutador de testes com camada única de três tubos:

$$Re_D = 16,426 \sqrt{\frac{2\Delta V \rho D^2}{\mu^2}} \quad (D.6)$$

Análise de incertezas da calibração

Apresenta-se agora uma análise de incertezas às equações obtidas na calibração.

Quando consultada bibliografia sobre análise de incertezas é recomendada a utilização de uma equação de aplicação complexa (Coleman e Steele, 2009). Contudo, é possível assumir as considerações apresentadas de seguida sem perder a credibilidade da análise e, simultaneamente, simplificar a análise.

- 1) Não são consideradas incertezas sistemáticas em ambas as variáveis.
- 2) Todas as incertezas aleatórias estão concentradas na variável Y.

Enquanto a primeira consideração é relativamente rebuscada, mas credível, a segunda consideração adequa-se ao procedimento experimental realizado, uma vez que a dispersão

segundo a variável $X = \sqrt{\frac{2\Delta V \rho D^2}{\mu^2}}$ se deve a variações na variável $Y = Re_D$ provenientes das oscilações no caudal, provocadas pela bomba centrífuga.

Desta forma, esta análise permitirá apenas contabilizar a incerteza no ajustamento, pelo que se tornam aceitáveis as considerações anteriormente expostas. A equação (D.7), em conjunto com as considerações apresentadas permite analisar o erro da correlação obtida para a calibração da placa orifício (Coleman e Steele, 2009).

$$s_{cal} = s_Y = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - mX_i - c)^2}{N - 2} \right]^{1/2} \quad (D.7)$$

Recorrendo à equação (D.7), é possível determinar o desvio padrão da variável Y , o que permite conhecer a incerteza aleatória da mesma $P_{95\%}$, para um intervalo de confiança de 95%, através da aplicação da equação (D.8), ou dito de outra forma, o erro para um valor genérico de X_i , obtido através de uma curva de calibração (Coleman e Steele, 2009).

$$P_{95\%} = t \cdot s_{cal} \quad (D.8)$$

Na equação (D.8) o parâmetro t representa o valor da distribuição t de *Student*, calculada para $N-2$ graus de liberdade. Este erro ficará fossilizado num erro sistemático.

Caso o valor da leitura seja conhecido, é possível determinar o intervalo no qual o valor médio da população μ_Y , em que se insere a variável Y , se encontra. Este intervalo apresenta-se na equação (D.9). Nesta equação, as variáveis s_Y , Y , $\bar{X}$ e s_{XX} são obtidas pelas equações (D.7), (D.10), (D.11) e (D.12), respetivamente e N representa o número de pontos avaliados. De salientar que a variável Y provém dos valores obtidos pela regressão para um determinado X_i , enquanto a variável Y_i , remete para o valor dos pontos referentes a um determinado X_i .

$$Y - 2 \left\{ s_Y^2 \left(\frac{1}{N} + \frac{(X - \bar{X})^2}{s_{XX}} \right) \right\}^{1/2} \leq \mu_Y \leq Y + 2 \left\{ s_Y^2 \left(\frac{1}{N} + \frac{(X - \bar{X})^2}{s_{XX}} \right) \right\}^{1/2} \quad (D.9)$$

$$Y = mX + c \quad (D.10)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (D.11)$$

$$s_{XX} = \sum_{i=1}^N X_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^N X_i)^2}{N} \quad (D.12)$$

Nas Tabelas D.1 e D.2 apresentam-se os resultados da resolução das equações apresentadas até este ponto, respetivamente, para o permutador de testes com cápsula disposta na vertical e para o permutador com camada única de três tubos.

Tabela D. 1: Valores para a determinação do erro do ajuste da correlação para um intervalo de confiança de 95%, para o caso do permutador de testes com cápsula disposta na vertical.

Parâmetro	Valor
N	15
$\bar{X}$	520,47
s_{XX}	2050190
s_{cal}	211,69
t	2,16
$P_{95\%}$	457,25

Tabela D. 2: Valores para a determinação do erro do ajuste da correlação para um intervalo de confiança de 95%, para o caso do permutador de testes com camada única de três tubos.

Parâmetro	Valor
N	15
$\bar{X}$	654,46
s_{XX}	3644724
s_{cal}	227,60
t	2,16
$P_{95\%}$	491,61

ANEXO E: Verificação dos pontos de funcionamento da placa orifício

De modo a verificar as condições de calibração da placa fez-se um controlo em alguns pontos de funcionamento, para uma frequência de 50 Hz, que se apresentam na Tabela D.1.

Tabela D.1- Caudais mássicos obtidos durante o controlo da calibração.

T [°C]	$\dot{m}$ [kg/s] - pesagem	$\dot{m}$ [kg/s] - calculado	Erro [%]
50	0,645	0,537	16,8 %
150	0,720	0,702	2,45 %
180	0,745	0,603	19,0 %

O erro relativamente ao caudal mássico pesado e calculado através da Equação D.1 foi considerado desprezável.

ANEXO F: Ficha técnica do ácido adípico



FICHA DE PRODUTO

Ácido Adípico

1. IDENTIFICAÇÃO

SINÓNIMOS: Ácido hexanodioico; Ácido 1,4-butanodicarboxílico.

FÓRMULA QUÍMICA: $C_6H_{10}O_4$

PESO MOLECULAR: 146.14

N.º CAS: 124-04-9

Nº EINECS: 204-673-3

2. CARACTERÍSTICAS

→ O produto é um pó branco cristalino, solúvel em água e solventes orgânicos, inodoro.

ESPECIFICAÇÕES	VALOR
Concentração (% $C_6H_{10}O_4$)	≥ 99,8
Água (%)	≤ 0,2
Nitratos (mg/kg)	≤ 4
Cinzas (mg/kg)	≤ 2
Ferro (mg/kg)	≤ 0,4
Cor (APHA)	≤ 5

PROPRIEDADE	VALOR
Ponto de fusão (°C)	151-152
Ponto de ebulição (°C)	337
Flash point (°C)	232
Densidade relativa	0,7
Solubilidade em água a 25°C (g/l)	24,9

3. APLICAÇÕES

- ◆ Produção de Nylon e Espuma de Poliuretano.
- ◆ Preparação de esteres monoméricos e poliméricos – indústria de plastificantes e lubrificantes.
- ◆ Revestimentos : Uretano, Poliéster, Alquídicos e gel coats.
- ◆ Resinas de Poliéster.
- ◆ Peles e couros sintéticos.
- ◆ Colas.

4. BENEFÍCIOS

- Elevada pureza;
- Proporciona flexibilidade e resistência na produção de poliésteres insaturados;
- Aumenta a flexibilidade das resinas alquídicas.

5. APRESENTAÇÃO

- O Produto pode ser comercializado sob a forma:
- Sacos 25kg, em paletes retratilizadas;
 - Bigbags de 500kg.

6. HIGIENE, SEGURANÇA E AMBIENTE

Informação sobre a sua utilização, forma de manipulação, bem como informações sobre segurança e ambiente pode ser encontrada na ficha de segurança elaborada por **QuimiTécnica.com, S.A.**