



Ricardo da Cunha Norte Mendes **Materiais de mudança de fase para aquecimento em escoamentos laminares**

Phase change materials on heating of laminar flows



Ricardo da Cunha Norte Mendes **Materiais de mudança de fase para aquecimento em escoamentos laminares**

Phase change materials on heating of laminar flows

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Fernando José Neto da Silva, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Dedico este trabalho a todos os que poderão vir a beneficiar da sua aplicação.

O júri

Presidente

Professora Doutora Margarida Isabel Cabrita Marques Coelho
Professora Auxiliar da Universidade de Aveiro

Professor Doutor António José Barbosa Samagaio
Professor Associado da Universidade de Aveiro

Professor Doutor Fernando Neto da Silva
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

À minha Mãe e Pai como forma de agradecimento inquantificável por, desde o primeiro dia me proporcionarem um futuro risonho.

Ao Professor Orientador, Fernando Neto, por tornar possível a minha inclusão no projeto.

A toda a equipa que me apoiou quando necessário, em especial ao Engenheiro João Teles, laboratório de Termo fluídos, Departamento Mecânica, Universidade de Aveiro.

À Catarina de Lemos Grilo Ferreira Barbosa.

Palavras-chave

Material mudança de fase, PCM, escoamento laminar

Resumo

O presente trabalho de dissertação tem como objetivo a caracterização de um sistema de armazenamento de energia térmica latente por meio de um PCM e para aquecimento de fluídos em escoamentos de baixo número de Reynolds usando a metodologia de Taguchi aplicada à otimização do ciclo de ensaios. Foi possível através da realização de um número mínimo de ensaios a otimização das condições de saída. Para tal, criou-se um protótipo de sistema de aquecimento de energia latente e comprovou-se através de testes experimentais a possibilidade de aquecimentos de fluídos.

De facto, foi usada uma bancada experimental propositadamente construída para o efeito. Este conjunto de equipamentos proporcionou registar os parâmetros relevantes nomeadamente a temperatura do fluído à passagem pelo sistema e a temperatura do PCM durante o teste. A otimização determinada. Assim como outros autores já o comprovaram, os resultados obtidos demonstram que o aquecimento de fluídos de baixo número de Reynolds é possível em sistemas de aquecimento por energia latente com recurso a PCM. Finalmente concluiu-se que a configuração física deste sistema terá que ser posta a prova com outras configurações e com sistemas dotados de maior capacidade de armazenamento contribuindo para um aumento do aproveitamento do calor fornecido e obtenção de temperaturas de saída desejadas.

Keywords

Phase change material, PCM, laminar flow.

Abstract

This dissertation is intended to characterize a latent heat thermal energy storage system by use of a PCM for heating fluids of low Reynolds number applying the Taguchi methods for test cycle optimization. Thus, it was possible, with a minimum of experiments, to obtain the optimal procession conditions. To this end, we intended to create a prototype system for heating and latent energy storage and through experimental tests demonstrate the possibility of heating of fluids.

In fact, the experimental setup used a purposely built apparatus. This set of equipment provided to register the relevant parameters including the temperature of the fluid passing through the system and the temperature of the PCM trough the test. The laboratory procedure was optimized by tests proving several solutions with the equipment available. The optimization was possible. As others have already shown with not specified flows, the results showed that the heating of fluids with low Reynolds number is possible with the use of energy storage systems using PCM. Finally it was concluded that the physical configuration of the system will have to be put to the test with other settings and systems endowed with greater storage capacity contributing to an increased use of heat supplied and desired output temperatures.

ÍNDICE

Índice

Índice	I
Lista de Tabelas.....	IV
Lista de Figuras.....	V
Abreviaturas.....	VII
Nomenclatura e símbolos.....	VII
- 1 - INTRODUÇÃO	- 1 -
1.1 MOTIVAÇÃO	- 2 -
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	- 2 -
1.3 ENQUADRAMENTO	- 3 -
- 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	- 9 -
2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	- 10 -
2.2 ÁREAS DE APLICAÇÃO DE MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE	- 10 -
2.2.1 PRODUTOS ALIMENTARES.....	- 10 -
2.2.2 TÉCNOLOGIA AUTOMÓVEL	- 11 -
2.2.3 ELETRODOMÉSTICOS	- 11 -
2.2.4 APLICAÇÕES EM SISTEMAS SOLARES DE AQUECIMENTO	- 12 -
2.2.5 TECNOLOGIA TÊXTIL	- 14 -
2.2.6 APLICAÇÕES MÉDICAS	- 15 -
2.2.7 TECNOLOGIA AVAC	- 17 -
2.2.8 CONSTRUÇÃO CIVIL	- 18 -
2.2.9 ELETRÓNICA.....	- 19 -
2.2.10 FÍSICA APLICADA: ÓTICA.....	- 20 -
2.2.11 OPTIMIZAÇÃO DE SAET LATENTES E PCM	- 20 -
- 3 - MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS.....	- 23 -
3.1 INTRODUÇÃO.....	- 24 -
3.2 DESENVOLVIMENTO DO PLANO EXPERIMENTAL	- 25 -
3.2.1 MÉTODO DE TAGUCHI, DOE	- 25 -
3.2.2 FATORES DE CONTROLO	- 26 -
3.2.3 FATORES DE RUÍDO.....	- 27 -
3.3 DESENVOLVIMENTO DA INSTALAÇÃO LABORATORIAL	- 27 -
3.3.1 DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO DA INSTALAÇÃO	- 28 -
3.3.2 DESCRIÇÃO DAS PLATAFORMAS DE CONTROLO E MONITORIZAÇÃO	- 29 -
3.4 DESENVOLVIMENTO DO TUBO PCM.....	- 31 -
3.4.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE	- 31 -
3.4.2 CARACTERIZAÇÃO DO TUBO PARA PCM	- 32 -
3.5 DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO EXPERIMENTAL	- 34 -
3.5.1 DESCRIÇÃO DA PREPARAÇÃO DOS TUBOS	- 34 -

3.5.2	DESCRIÇÃO DE PREPARAÇÃO DA AMOSTRA	- 36 -
3.5.3	DESCRIÇÃO DE PREPARAÇÃO DA ESTAÇÃO	- 37 -
3.5.4	DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE CONEXÃO À ESTAÇÃO, INÍCIO E PARAGEM DE TESTE.	- 37 -
3.5.5	DESCRIÇÃO DO ÍNICO, FINAL E DE TESTE E PARÂMETROS ACOMPANHADOS	- 38 -
- 4 -	RESULTADOS	- 41 -
4.1	RESULTADOS EXPERIMENTAIS E VALORES CALCULADOS.....	- 42 -
4.1.1	TESTE 1.....	- 42 -
4.1.2	TESTE 2.....	- 44 -
4.1.3	TESTE 3.....	- 46 -
4.1.4	TESTE 4.....	- 48 -
4.1.5	TESTE 5.....	- 50 -
4.1.6	TESTE 6.....	- 52 -
4.1.7	TESTE 7.....	- 54 -
4.1.8	TESTE 8.....	- 56 -
4.1.9	TESTE 9.....	- 58 -
4.2	RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS TESTES 1 A 9	- 60 -
4.2.1	DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA	- 60 -
4.2.2	DETERMINAÇÃO DA ENERGIA	- 60 -
4.2.3	DETERMINAÇÃO DO CAUDAL.....	- 60 -
4.2.4	DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE REYNOLDS	- 61 -
4.3	DESVIOS ENTRE VALORES ALVO E OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE.....	- 61 -
4.4	APLICAÇÃO E RESULTADOS DA ANÁLISE DE TAGUCHI	- 62 -
4.4.1	ENERGIA TRANSMITIDA AO FLUÍDO.....	- 62 -
4.4.2	MAXIMIZAÇÃO DE FATORES PARA ENTREGA DE ENERGIA	- 64 -
4.4.3	INFLUÊNCIA DOS FATORES CONTROLÁVEIS NA ENTREGA DE ENERGIA	- 65 -
4.4.4	TEMPO DE DECAIMENTO DE TEMPERATURA A 20°C.....	- 65 -
4.4.5	MAXIMIZAÇÃO DE FATORES PARA PROLONGAMENTO DE TEMPO DE TESTE.....	- 67 -
4.4.6	INFLUÊNCIA DOS FATORES CONTROLÁVEIS NO TEMPO DE DECAIMENTO DE TEMPERATURA A 20°C	- 67 -
- 5 -	CONCLUSÕES FINAIS E SUGESTÕES	- 69 -
5.1	CONCLUSÕES.....	- 70 -
5.2	SUGESTÃO PARA OTIMIZAÇÕES FUTURAS.....	- 71 -
- 6 -	REFERÊNCIAS.....	- 73 -
- 7 -	ANEXOS	- 79 -

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Características desejáveis de um PCM. Adaptado de [5].	4
Tabela 2 – Transições de fase devido aos efeitos conjugados de pressão e ou temperatura.	5
Tabela 3 -Taxas de fusão médias para o sistema de controlo, tubos de calor e alhetas para as temperaturas de fluido de 45oC e 55oC e um caudal de 0.0026 kg/s.	12
Tabela 4 - Comparação entre simulações e modelo analítico para uma potência a dissipar de 20 W.	19
Tabela 5- para cada nível e parâmetro controlável a seleção de testes não se repete ao mesmo nível.	26
Tabela 6 – A aplicação da redução da tabela 5 às condições de teste.	26
Tabela 7 - Lista de equipamentos distribuídos na estação laboratorial.	29
Tabela 8 - Descrição dos sinais DA IO manipulados referentes à figura 28.	30
Tabela 9 – Características físicas do material de mudança de fase utilizado nos testes, adaptado de anexo 7.2.	32
Tabela 10 – Valores de volume obtidos para os lóbulos de três tubos distintos, os erros são de $\pm 0,02$ g.	33
Tabela 11 - Ajustes de temperatura ao chiller para estabilização de temperatura de entrada do fluido.	37
Tabela 12 - Passos de execução do inicio dos testes experimentais.	37
Tabela 13 - Parâmetros registados durante os testes, unidades e erros das sondas.	38
Tabela 14 – Resultados registados no teste 1.	42
Tabela 15 – Resultados registados no teste 2.	44
Tabela 16 – Resultados registados no teste 3.	46
Tabela 17 – Resultados registados no teste 4.	48
Tabela 18 – Resultados registados no teste 5.	50
Tabela 19 – Resultados registados no teste 6.	52
Tabela 20 – Resultados registados no teste 7.	54
Tabela 21 – Resultados registados no teste 8.	56
Tabela 22 – Resultados registados no teste 9.	58
Tabela 23 – Resultados registados nos testes.	60
Tabela 24 - Parâmetros determinados para obtenção do número de Reynolds.	61
Tabela 25 - Desvios entre valores alvo e obtidos experimentalmente.	62
Tabela 26 - fatores de controlo e níveis de controlo de fator.	62
Tabela 27 – Distribuição dos resultados de energia disponibilizada ao fluido.	62
Tabela 28 – Somas parciais por nível de atuação.	63
Tabela 29 - Tabela de resposta de fatores onde se representam igualmente as diferenças entre níveis.	63
Tabela 30 – Influência entre fatores controláveis e para cada nível na energia disponibilizada.	65
Tabela 31 - Influência entre níveis de controlo e para cada fator na energia disponibilizada.	65
Tabela 32 - Distribuição dos resultados de energia disponibilizada ao fluido.	65
Tabela 33 - Somas parciais por nível de atuação.	66
Tabela 34 - Tabela de resposta de fatores onde se representam igualmente as diferenças entre níveis.	66
Tabela 35 – Influência entre fatores controláveis e para cada nível no tempo de decaimento de temperatura a 20°C.	67
Tabela 36 - Influência entre níveis de controlo e para cada fator no tempo de decaimento de temperatura a 20°C.	67

Lista de Figuras

Figura 1 - Ilustração do funcionamento que se espera obter com a realização dos ensaios.....	2 -
Figura 2 – Perspetiva da instalação laboratorial adaptada a execução dos ensaios desta tese.	3 -
Figura 3 - Perspetiva da residência da qual se refere o uso de materiais de mudança de fase para aplicações térmicas residenciais [66].	4 -
Figura 4 – Famílias de materiais de mudança de fase apresentados pelo cruzamento entre temperaturas de fusão e entalpias de fusão [25].	5 –
Figura 5 - Gráfico T-h de um material sensível e de um material de mudança de fase onde é visível o patamar de energia latente Δh_m . [16].....	6 –
Figura 6 - Ilustração do dispositivo usado nos testes de secagem de produtos alimentares.	10 -
Figura 7 - Gráfico representativo da eficiência energética calculada para uma máquina de lavar loiça e quatro PCM.	11 -
Figura 8 - Energia acumulada no PCM para o controlo, sistema de tubos de calor e sistema de alhetas, (a) Temperatura do fluido=45°C e caudal mássico=0.0026 kg/s, (b) Temperatura do fluido=55°C e para o mesmo caudal.	12 –
Figura 9 - Energia libertada pelo PCM à passagem do fluido para os três casos, controlo, tubos de calor, alhetas e para temperatura do fluido=10°C e caudal mássico=0.0022 kg/s,	13 -
Figura 10 - Representação da instalação experimental (a) e pormenor do SAET.	13 -
Figura 11 - Representação esquemática do banco de quatro tubos.	14 -
Figura 12 – Eficiência do PCM usado num SAET latente contra o caudal mássico de fluido no sistema de tubos quentes.	14 -
Figura 13 - Representação esquemática da montagem laboratorial.	15 -
Figura 14 - A ligadura térmica atua sobre o elemento corporal mantendo a temperatura no patamar desejado por um período de tempo mais extenso.	16 –
Figura 15 - A dispersão de pontos obtidos nos ensaios sobreposta às linhas de tendência simuladas corroboram a validade dos resultados obtidos.	16 –
Figura 16 - Comparação de carga de SAET latentes à base de PCM contra os sistemas convencionais de arrefecimento por água e glicol.	17 –
Figura 17 - Bancada de ensaio do SAET latente com recurso a PCM.	18 -
Figura 18 - Comparação da espessura necessária de uma parede contento PCM contra espessuras de materiais convencionais para a mesma carga térmica.	18 -
Figura 19 - Comparação do perfil de temperatura com e sem PCM numa parede de edifício e para o interior da divisão.	19 -
Figura 20 - Comparação do comportamento da evolução da temperatura da placa integrada do processador com e sem recurso a SAET latente por PCM.	20 -
Figura 21 - Para o trocador de calor apresentado, à direita, o coeficiente de armazenamento de calor para diferentes produtos tem a tendência decrescente apresentada.....	20 -
Figura 22 - Melhoria da densidade volumétrica de armazenamento comparado com a água e para três materiais PCM.	21 -
Figura 23 - trocas de calor convectivas e condutivas em regime transiente angulares q''_3 , radiais q''_1 e q''_2 e axiais para a troca de calor entre um caudal de fluido perfeitamente desenvolvido e de baixo número de Reynolds e um PCM em seu redor.	24 -
Figura 24 – Aspeto final da estação laboratorial aplicada ao estudo de PCM.	27 -
Figura 25 - Janela de controlo do <i>software</i> desenvolvido.	28 -
Figura 26 - Estação de preparação de fluido de teste.....	28 -
Figura 27 - Esquema da instalação laboratorial instalada.	29 -
Figura 28 - Esquema das plataformas de <i>hardware</i> conjugadas.	30 -
Figura 29 - Esquema das plataformas de <i>hardware</i> de registo onde as setas indicam o sentido da comunicação.	30 -
Figura 30 - Ilustração da tela secundária onde se registam temporariamente e de forma gráfica os valores obtidos.	31 -
Figura 31 - Calorimetria diferencial de varrimento obtida para o PCM Puretemp 35.....	32 -
Figura 32 – À direita, dimensões do tubo, à direita representação do tubo PCM após extrusão.	33 -
Figura 33 – Diagrama identificativo do posicionamento de termopares no tubo PCM, de forma radial à esquerda e ao longo do eixo de simetria.....	33 –
Figura 34 – O repouso das amostras antes de serem introduzidas na estação laboratorial oi feita com recurso a ma estufa.	36 -
Figura 35 - Ilustração do posicionamento do tubo na estação de testes.	39 -
Figura 36 – Potência disponibilizada ao fluido durante o ensaio.	42 -
Figura 37 – Temperatura de saída, de entrada do fluido e temperatura ambiente.	43 -

Figura 38 - Temperatura média do material de mudança de fase nas posições 0; 0,5 e 1 m.	- 43 -
Figura 39 - Potência disponibilizada do fluido durante o ensaio laboratorial.	- 44 -
Figura 40 - Temperatura de saída e entrada do fluido e temperatura do ambiente.	- 45 -
Figura 41 - Temperatura média do material de mudança de fase de fase nas posições 0; 0,5 e 1 m.	- 45 -
Figura 42 - Potência disponibilizada do fluido durante o ensaio laboratorial.	- 46 -
Figura 43 - Temperatura de saída e entrada do fluido e temperatura do ambiente.	- 47 -
Figura 44 - Temperatura média do material de mudança de fase de fase nas posições 0; 0,5 e 1 m.	- 47 -
Figura 45 - Energia disponibilizada do fluido durante o ensaio laboratorial.	- 48 -
Figura 46 - Temperatura de saída e entrada do fluido e temperatura do ambiente.	- 49 -
Figura 47- Temperatura média do material de mudança de fase nas posições 0; 0,5 e 1 m.	- 49 -
Figura 48 - Potência disponibilizada do fluido durante o ensaio laboratorial.	- 50 -
Figura 49 - Temperatura de saída e entrada do fluido e temperatura do ambiente.	- 51 -
Figura 50 - Temperatura média do material de mudança de fase nas posições 0; 0,5 e 1 m.	- 51 -
Figura 51 - Potência disponibilizada do fluido durante o ensaio laboratorial.	- 52 -
Figura 52 - Temperatura de saída e entrada do fluido e temperatura do ambiente.	- 53 -
Figura 53 - Temperatura média do material de mudança de fase nas posições 0; 0,5 e 1 m.	- 53 -
Figura 54 - Potência disponibilizada do fluido durante o ensaio laboratorial.	- 54 -
Figura 55 - Temperatura de saída e entrada do fluido e temperatura do ambiente.	- 55 -
Figura 56 - Temperatura média do material de mudança de fase nas posições 0; 0,5 e 1 m.	- 55 -
Figura 57 - Potência disponibilizada do fluido durante o ensaio laboratorial.	- 56 -
Figura 58 - Temperatura de saída e entrada do fluido e temperatura do ambiente.	- 57 -
Figura 59 - Temperatura média do material de mudança de fase nas posições 0; 0,5 e 1 m.	- 57 -
Figura 60 - Potência disponibilizada do fluido durante o ensaio laboratorial.	- 58 -
Figura 61 - Temperatura de saída e entrada do fluido e temperatura do ambiente.	- 59 -
Figura 62 - Temperatura do material de mudança de fase nas posições 0; 0,5 e 1 m.	- 59 -
Figura 64 - a) Resposta do parâmetro $V_{ambiente}$ b) $B T_{ambiente}$ c) $C m_{fluido}$ d) $D T_{fluido}$	- 64 -
Figura 65 - a) Resposta do parâmetro $V_{ambiente}$ b) $B T_{ambiente}$ c) $C m_{fluido}$ d) $D T_{fluido}$	- 66 -
Figura 66 - Termo higrômetro Vaisala HMT100.....	- 80 -
Figura 67 - Ilustração do equipamento Omega FMA1002R.	- 80 -
Figura 68 -Kern FCB 6K0.02B.....	- 80 -
Figura 69 - Digitron HLX65.....	- 81 -
Figura 70 - Ilustração do equipamento Moxa 5230.....	- 81 -
Figura 71 - Ilustração do equipamento Masterflex L/S.	- 81 -
Figura 72 - Ilustração do equipamento EGE SDN 503.	- 81 -
Figura 73 - Ilustração do equipamento Asco SCG202A051V.	- 81 -
Figura 74 - Ilustração do equipamento ADAM 4021	- 82 -
Figura 75 - Ilustração do equipamento ADAM 4018	- 82 -
Figura 76 - Ilustração do equipamento ADAM 4012	- 82 -
Figura 77 - Ilustração do termopar Gefran tipo J	- 82 -
Figura 78 - Equipamento termopar Tekon	- 82 -

Abreviaturas

AVAC	Aquecimento ventilação e ar condicionado
DSC	Calorimetria diferencial de varrimento PCM
PCM	Material de mudança de fase
SAET	Sistema de armazenamento de energia térmica
DOE	Design of experiments
CES	Sistemas energéticos solares

Nomenclatura e símbolos

Δ_{hm}	Calor Latente C_p	[J/kg]
	Calor específico	[J/ (kg · K)]
k_i	Número de fatores de controlo	
Q	Energia	[J]
h	Entalpia	[J/kg]
m	Massa	[kg]
n_i	Número de níveis de controlo	
N_{total}	Número total de experiências	
P	Potência	[W]
T	Temperatura	[°C]
T_f	Temperatura final T_i	[°C]
	Temperatura inicial	[°C]
T_m	Temperatura média	[°C]
T_{mf}	Temperatura de fusão	[°C]
v	Velocidade	[m/s]
v_m	Velocidade média	[m/s]

- 1 - INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

O mais importante desafio para o futuro da humanidade e mais diretamente relacionado com qualquer outro sector poderá vir a ser o da energia. Este desafio engloba todas as questões mais triviais do dia-a-dia porque consumimos energia até enquanto dormimos ou porque pode simplesmente estar contida em qualquer disciplina académica. Conflitos, saúde, emprego, ambiente, economia, religião, artes entre outros, cada um dos temas tem algo realmente importante relacionado com a energia.

A energia como recurso não está sempre disponível nem pronta a ser consumida pelo que irá sofrer transformações desde a sua extração ou captação até ser finalmente consumida. Poderá até ser armazenada e mantida em espera até posterior aplicação. A armazenagem pode ocorrer através de inúmeras estratégias: como energia potencial no lago de uma barragem, em energia cinética de corpos em movimento (volantes de inércia e motores automóveis), química em quebra e união de ligações, térmica sob a forma de calor sensível em materiais com grande quantidade de massa (betão ou metal), ou finalmente, sob a forma de calor latente como em materiais de mudança de fase que tendo maior densidade de armazenamento de energia com menor variação de temperatura do que os sistemas sensíveis, são à partida mais eficientes do que os dependentes do volume, Abhat [3]. A utilização de sistemas de armazenamento de energia térmica (SAET) latentes poderá melhorar o armazenamento temporário de energia térmica de tal forma a prolongar o período temporal em que a temperatura se encontra dentro de um patamar desejado.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Esta dissertação propõe o desenvolvimento e caracterização do funcionamento de um sistema de armazenamento de energia térmica latente usando PCM como armazenador de energia térmica. Pretende-se estabelecer a temperatura de entrada de um fluido num tubo PCM e registar a temperatura de saída sobre diversas condições ambientais, de caudal e temperatura, figura 1.

Testes à transmissão de calor a um fluido num escoamento de baixo número de Reynolds levando em conta o caudal e temperatura do escoamento, a temperatura e velocidade ambiente serão realizados. A caracterização de um método experimental para produção de tubos PCM, de preparação destes para testes e finalmente um método de registo de dados foram igualmente ser desenvolvidos.

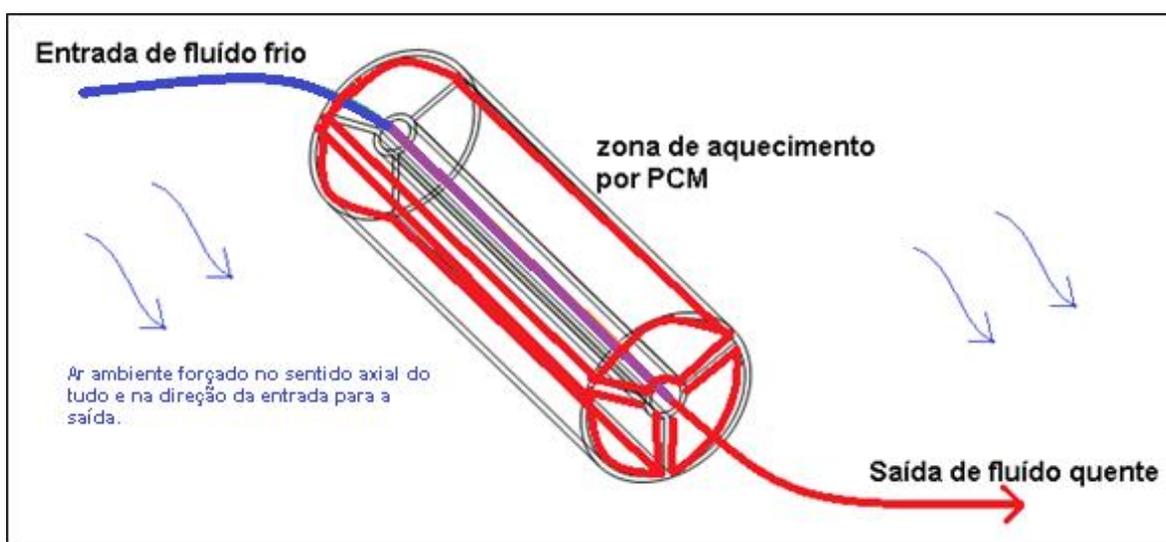


Figura 1 - Ilustração do funcionamento que se espera obter com a realização dos ensaios.

Para a realização dos testes laboratoriais adaptou-se a instalação apresentada na figura 2 adicionando as funcionalidades de preparação térmica e armazenamento de fluido, controlo de caudal de fluido, suporte ao tubo PCM, controlo e monitorização de velocidade, temperatura ambiente e registo de dados.



Figura 2 – Perspetiva da instalação laboratorial adaptada a execução dos ensaios desta tese.

1.3 ENQUADRAMENTO

Um material de mudança de fase é caracterizado pelo seu elevado calor latente e por possibilitar através de um sistema de armazenamento de energia térmica absorver e posteriormente libertar numa estreita faixa de temperatura uma dada quantidade de energia. Existem referências da década de 40 nos Estados Unidos da América de utilização de SAET em climatização residencial. Em 1948, a primeira casa experimental utilizando um SAET foi construída sob supervisão de Maria Telkes em Dover, Massachusetts [2] no entanto os materiais de mudança de fase foram utilizados pela primeira vez anteriormente no aquecimento de comboios britânicos durante a expansão industrial. [3] Em ambos os casos a inclusão de materiais de mudança de fase como parcela da fachada ou carenagem potenciava a manutenção térmica interior dos espaços.

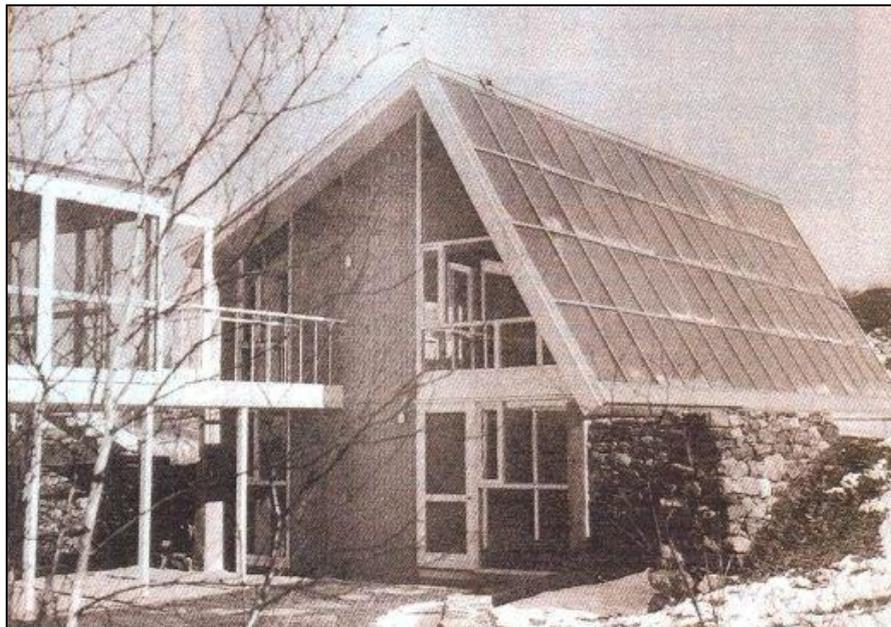


Figura 3 - Perspectiva da residência da qual se refere o uso de materiais de mudança de fase para aplicações térmicas residenciais pela primeira vez por Maria Telkes [66].

Os materiais de mudança de fase armazenam entre cinco a catorze vezes mais calor por unidade de volume do que materiais de armazenamento sensíveis tais como alvenaria, água (usada como SAET sensível), ou rocha. Um grande número de materiais de mudança de fase são conhecidos para fundir com o calor de fusão em qualquer intervalo desejado, no entanto para a sua validação como materiais de armazenamento de calor latente em SAET, estes materiais devem exibir comportamentos desejáveis para além de uma gama de temperatura de mudança de fase funcional. A escolha de técnicas adequadas para desenvolvimento de SAET latentes deve ter como base critérios físico-químicos e o equilíbrio apropriado entre fatores deve ser feito na sua seleção. [5] Assim enumeram-se características como elevado calor latente, boa transferência de calor, equilíbrio de fases favorável, elevada densidade, pequena variação de volume, baixa pressão de vapor, ausência de subarrefecimento, velocidade de cristalização suficiente, estabilidade química, compatibilidade com materiais de encapsulamento, não toxicidade, não ignifugidade, não inflamabilidade, abundância, disponibilidade e baixo custo. [4] Estes são alguns parâmetros possíveis, Meling [6] apresenta uma discussão detalhada acerca do processo e critérios de seleção destes materiais. Listas de materiais mais abrangentes estão presentes em publicações como Cabeza [14], Kenisarin e Mahkamov [64] ou Gomez [5].

Tabela 1 – Características desejáveis de um PCM. Adaptado de [5].

<ul style="list-style-type: none">• Compactação; Alta capacidade de armazenamento por unidade de massa e volume.
<ul style="list-style-type: none">• Alta eficiência de armazenamento;
<ul style="list-style-type: none">• Uniformidade de temperatura;
<ul style="list-style-type: none">• Capacidade cíclica de carga/descarga a taxas elevadas sem gradientes térmicos significativos e sem perda de capacidade de carga;

Contrariamente às transformações vapor-líquido, as mudanças sólido-líquido produzem largas variações entálpicas sem grandes variações de densidade e por isso os sais e ligas metálicas são bons candidatos a materiais de mudança de fase. Porque os materiais de mudança de fase com alto ponto de fusão têm alta

densidade energética, o seu uso pode reduzir o equipamento e os custos de encapsulação nos SAET pela redução significativa do tamanho destes sistemas.

Tabela 2 – Transições de fase devido aos efeitos conjugados de pressão e ou temperatura.

	Sólido	Líquido	Gás
Sólido	Transformação Sólido-Sólido	Fusão	Sublimação
Líquido	Solidificação	-	Vaporização
Gás	Sublimação	Condensação	-

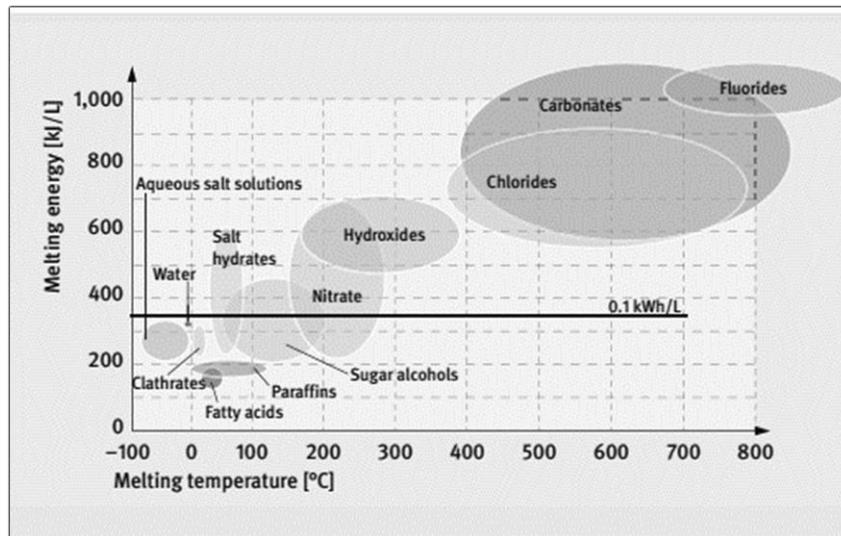


Figura 4 – Famílias de materiais de mudança de fase apresentados pelo cruzamento entre temperaturas de fusão e entalpias de fusão [25].

Uma mudança de fase é a evolução de um estado físico de matéria para outro. Diferentes conjugações de pressão e temperatura proporcionam condições à movimentação das moléculas relativamente fixas no estado sólido a maneira aleatória na fase gasosa. Materiais que não acumulam energia por mudança de fase acumulam de maneira sensível e o calor retido num sistema sensível (sem mudança de fase) pode ser dado pela equação seguinte.

$$Q_{sensitive} = \int_{T_i}^{T_f} m C_p dT [J] \quad (1)$$

A capacidade de armazenar energia térmica de uma massa, m , de um material que sofre de mudança de fase aquecido de T_i até T_f através de uma mudança de fase a temperatura T_{mf} , pode ser dada como a soma do calor sensível armazenado na fase em que se encontra inicialmente com a soma do calor latente na transição de fase Δh somada finalmente ao calor sensível na fase final, C_p . [26]

$$Q = m [C_p (T_{mf} - T_i) + \Delta h_m + C_p (T_f - T_{mf})] [J] \quad (2)$$

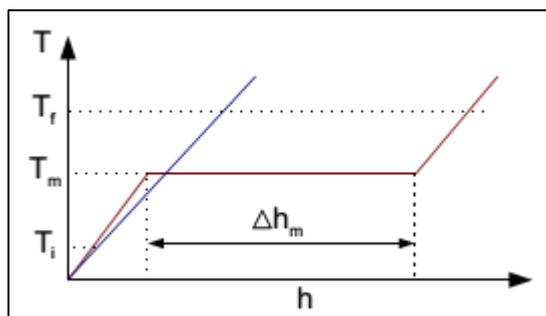


Figura 5 - Gráfico T-h de um material sensível e de um material de mudança de fase onde é visível o patamar de energia latente Δh_m . [16].

Em suma as temperaturas de mudança de fase dos SAET são determinadas pelo ponto de fusão do material de mudança de fase e a capacidade calorífica do sistema é determinada pelos calores latentes e sensíveis dos materiais de mudança de fase. [7]. De longe, o material de mudança de fase mais conhecido é a água. O seu uso como SAET latente para armazenamento de frio é feito há dois mil anos. Atualmente o armazenamento a frio com recurso a gelo é extensivamente utilizado e até mesmo o arrefecimento com gelo natural e neve é ainda usado. [8] Segundo Hauer A. [15], a densidade de energia de armazenamento de calor sensível é dada pela capacidade energética dos meios de armazenamento e do intervalo de temperatura. A gama de temperatura depende da aplicação e é limitada pela temperatura da fonte de calor e pelo fornecimento de calor. A densidade de energia pode ser aumentada através da introdução de uma substância mudança de fase na gama de temperaturas de armazenagem o que constitui a diferenciação de PCM em classes de misturas ou compostos:

Os PCM podem ser divididos em categorias:

- Orgânicos estão subdivididos em classes (parafínicos ou não parafínicos) caracterizados por uma fusão congruente e por não serem corrosivos.
- Os PCM inorgânicos são os compostos que englobam a classe dos sais hidratados e dos metais. Caracterizam-se por possuírem elevado calor latente por unidade de massa e volume, são económicos, não são inflamáveis, mas podem decompor-se ou sofrer subarrefecimento, fenómeno de ocorre quando, no processo de arrefecimento, uma temperatura mais baixa do que a temperatura de mudança de fase tem que ser atingida para que o material comece a solidificar e libertar calor. Se essa temperatura não for atingida, o PCM não muda de fase e apenas ocorre troca de calor sensível.
- Os PCM eutéticos que são misturas de dois ou mais componentes que fundem e cristalizam congruentemente. Podem ser misturas de compostos orgânico-orgânico, inorgânico-inorgânico ou orgânico-inorgânico [4]. Dentro desta classe as misturas de hidrocarbonetos alquílicos lineares possibilitam o ajuste das suas propriedades térmicas. Através da mistura controlada destes compostos, é possível obter o ponto de fusão desejado para uma determinada aplicação. Para além disso, têm um elevado calor latente por unidade de massa, possuem uma boa estabilidade química e uma baixa pressão de vapor à temperatura ambiente, não são corrosivos, não são tóxicos ou perigosos para a saúde, características essenciais para um composto de mudança de fase de utilização generalizada.

Os PCM podem ser encontrados em forma líquida, sólida sob a forma de diversas granulometrias, sólidos elásticos tipo borrachas ou microencapsulações nas mais diversas formas tipo bolsas maleáveis, painéis, esferas, cilindros, ou poderão estar dispersos na própria matéria de suporte.

A seleção de um SAET para uma determinada aplicação depende de fatores como o tempo de armazenamento, requisitos de temperatura de abastecimento e utilização, capacidade de armazenamento, perdas de calor, espaço disponível ou fatores económicos [3]. As unidades latentes são habitualmente menores em dimensão que as unidades sensíveis. O exemplo mais comum de um SAET de calor latente com recurso a materiais de mudança de fase é a conversão da água em gelo onde o SAET é o contentor físico que suporta o material antes, durante e posteriormente à mudança de fase. Tendo em conta a transição entre estado líquido/sólido/líquido da água como a fonte energética do SAET latente, na fase de arrefecimento, a solidificação, o calor deixa o sólido e energia é absorvida pelo sistema que se pretende alimentar; a mudança de sólido para líquido requer o fornecimento de energia.

Arkar [23] concluiu que o fator de forma tem uma maior influência sobre SAET. Outro parâmetro importante, que tem influência sobre a resposta térmica e sobre a eficiência do sistema de arrefecimento livre é a temperatura de fusão do material de mudança de fase.

Em suma este documento introduziu o tema dos materiais de mudança de fase fazendo uma descrição essencial às suas características básicas e à criação de sistemas de armazenamento de energia térmica latente. O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica, o capítulo 3 demonstra os materiais e os métodos seguidos para caracterização do perfil térmico de um SAET criado no laboratório de termo fluídos da Universidade de Aveiro assim como o desenvolvimento de um plano experimental tendo como base os métodos de otimização DOE de Taguchi. Resultados são posteriormente apresentados e comentados no capítulo 4. Finalmente são apresentadas conclusões e sugestões de melhorias futuras, capítulo 5, uma vasta bibliografia consultada no capítulo 6 e anexos pertinentes no capítulo 7.

- 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O potencial de utilização de materiais de mudança de fase em SAET pode ser corroborado pela extensa área de aplicação e investigação destes materiais até à data. De facto, a área é tão extensa que abrange desde vestuário de missões espaciais para controlo de temperatura corporal até ao útil bloco de gelo num copo de refrigerante. Sem ordem de importância, irão ser resumidos nos próximos parágrafos alguns exemplos de utilização de materiais de mudança de fase.

2.2 ÁREAS DE APLICAÇÃO DE MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE

2.2.1 PRODUTOS ALIMENTARES

Sakamon [9] com o objetivo investigar a viabilidade do uso de um SAET incluindo' cera de parafina como material de mudança de fase para armazenar energia térmica resultante do aproveitamento de energia solar em excesso e libertação desta quando a disponibilidade de energia é inadequada ou não disponível e o seu efeito na secagem de produtos alimentares, como auxiliar à secagem de produtos alimentares.

O sistema inclui um circuito de condicionamento e circulação de ar, ligado a um aquecedor de ar e a um trocador de calor onde é armazenado o PCM. Após, uma câmara de secagem a jusante onde é colocado o produto a secar recebe o ar aquecido previamente. Um caudalímetro regista o fluxo de ar à saída da câmara de secagem.

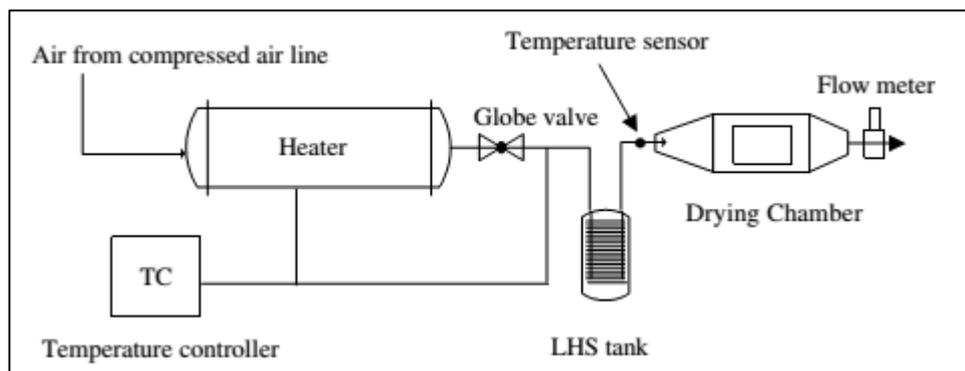


Figura 6 - Ilustração do dispositivo usado nos testes de secagem de produtos alimentares.

Durante a carga o bloco PCM foi monitorizado por 16 termopares com uma frequência de 15 minutos. Durante a descarga duas velocidades de ar, 1 m/s e 2 m/s foram testadas e a temperatura na câmara de secagem foi registada a cada 5 minutos, mantendo esta constante a 60°C. O efeito da utilização de SAET sobre a cinética de secagem da batata-doce é positivo no sentido em que proporciona poupança energética.

Verificou-se que a de secagem da batata é mais rápida com a diminuição da velocidade de entrada de ar ambiente para a mesma temperatura. A quantidade de energia extraível a partir do SAET foi de 1920 e 1386 kJ.kg./ s para velocidades de 1 e 2 m/s e as economias de energia foram calculadas em 40% e 34% para velocidade de ar de entrada de 1 e 2 m/s, respetivamente.

2.2.2 TÉCNOLOGIA AUTOMÓVEL

Kappels [10] investigador do Instituto Fraunhofer para o Meio Ambiente, Segurança e Tecnologia da Energia UMSICHT em Oberhausen, Alemanha, desenvolveu um novo materiais de mudança de fase refrigerante registado como CryoSolplus que conduz o calor de baterias de veículos elétricos, três vezes mais eficazmente do que a água, mantendo a temperatura da bateria dentro um intervalo aceitável, mesmo em situações de condução extremas.

A dispersão mistura a água e parafina, juntamente com tensioativos estabilizadores e glicol. A vantagem é de absorver três vezes mais calor do que a água e possuir funções de amortecimento para situações extremas tais como viagens em autoestrada, no auge do verão. Outras vantagens incluem a diminuição volumétrica dos sistemas de refrigeração líquida que se converte em poupança de peso e espaço sob o capô. O principal desafio superado durante o desenvolvimento de CryoSolplus foi a criação de uma dispersão estável.

2.2.3 ELETRODOMÉSTICOS

Paksoy [11] propõe que entre as aplicações que beneficiam do uso de materiais de mudança de fase estão os eletrodomésticos. Como objetivo propõe demonstrar o aumento da eficiência energética de máquinas de lavar louça e frigoríficos, através de armazenamento de calor latente em materiais de mudança de fase criados para o efeito.

Para a recuperação de calor residual nos aparelhos domésticos, uma máquina de lavar louça e um frigorífico, foram adaptados à inclusão de um SAET. Para o efeito, materiais de mudança de fase com intervalos de fusão de 12°C a 10°C e calores de fusão na gama de 94 J g⁻¹ a 220 J g⁻¹ foram considerados como adequados. Quatro materiais de mudança de fase diferentes foram testados para a recuperação de calor residual entre os 42°C a 52°C. As estabilidades térmicas dos materiais de mudança de fase utilizados nos SAET foram determinadas em 1000 ciclos térmicos. Análise de calorimetria exploratória diferencial feita para estes ciclos térmicos revelaram variação de ponto de fusão nulo e variações de calor latente foram inferiores a 10%.

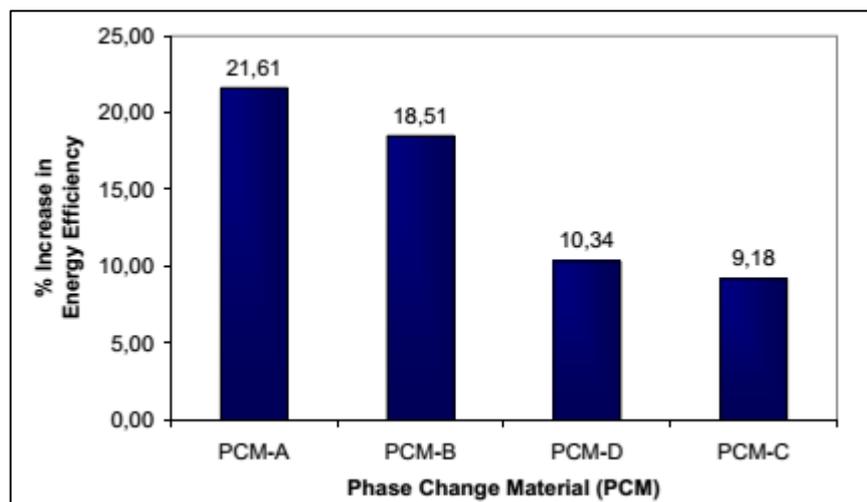


Figura 7 - Gráfico representativo da eficiência energética calculada para uma máquina de lavar louça e quatro PCM.

Resultados para um estudo de caso de recuperação de calor em máquinas de lavar louça mostraram que o aumento da temperatura máxima na temperatura de entrada do segundo ciclo de lavagem foi 13,4°C. A este aumento correspondente em eficiência energética da máquina de lavar louça um valor de 22%.

2.2.4 APLICAÇÕES EM SISTEMAS SOLARES DE AQUECIMENTO

Robak [12] propõe um conceito inovador, que combina tubos de calor com um SAET latente para aplicação em sistemas de energia solar concentrada. Dada a baixa condutividade térmica dos materiais de mudança de fase, tubos de calor atuam para diminuir a resistência térmica, aumentando a taxa global de transferência de calor.

Foi executado uma simulação à escala laboratorial para validar o conceito de utilização de tubos de calor para redução de resistência térmica no material de mudança de fase, parafina, n-octadecano $C_{18}H_{38}$, temperatura de fusão= 27.5°C e 99% pureza. Foram observados três regimes de fusão: fusão dominada por condução, dominada por convecção natural, fusão de contacto nos três sistemas usados, fusão de controlo, fusão por tubos de calor e fusão por alhetas. Os resultados da taxa de fusão do PCM foram registados e comparados como se observa na tabela 3.

Tabela 3 -Taxas de fusão médias para o sistema de controlo, tubos de calor e alhetas para as temperaturas de fluido de 45oC e 55oC e um caudal de 0.0026 kg/s.

Experiment	Avg. Melting Rate
45°C Benchmark	3.8 ± 0.4 g/min
45°C Heat pipe	6.4 ± 0.3 g/min
45°C Fin	4.3 ± 0.1 g/min
55°C Benchmark	6.6 ± 1.1 g/min
55°C Heat pipe	11.5 ± 1.5 g/min

Os regimes de fusão observados nos três protótipos correspondem segundo o autor e para o regime de condução, à rápida acumulação de energia no PCM nos minutos iniciais quando existe a diferença máxima de temperatura entre o fluido e o PCM. O segundo regime está relacionado com a taxa de transferência de calor em regime, o terceiro e último corresponde a uma subida na taxa de transferência de calor devido à fusão por contacto.

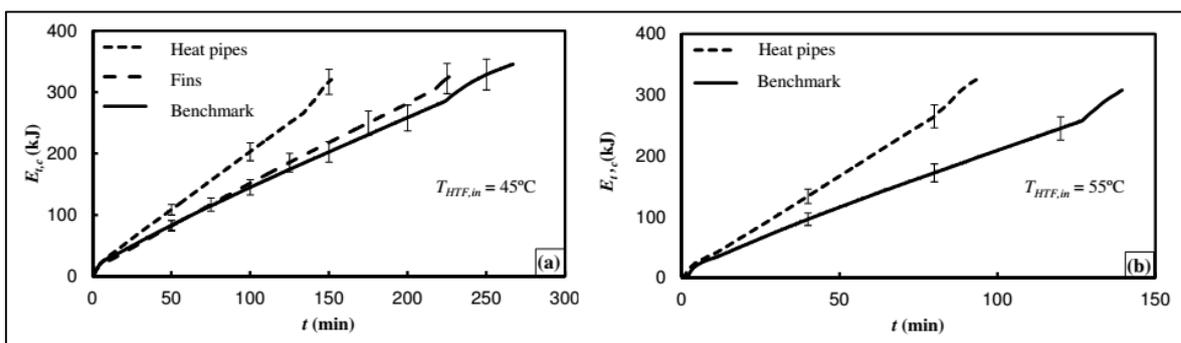


Figura 8 - Energia acumulada no PCM para o controlo, sistema de tubos de calor e sistema de alhetas, (a) Temperatura do fluido=45°C e caudal mássico=0.0026 kg/s, (b) Temperatura do fluido=55°C e para o mesmo caudal.

Para o caso da libertação de energia para o fluido, a evolução de transmissão de energia está representada para os três casos na figura 8. As taxas médias de transferência de calor para o sistema de tubos de calor foram em média 70% superiores ao controlo e 50% superiores ao sistema de alhetas. A eficiência do sistema de tubos de calor definido como o rácio entre a energia acumulada neste sistema relativamente ao rácio da

energia acumulada no controlo obteve um valor máximo de 1,6 vezes enquanto a máxima eficiência associada ao uso de alhetas foi aproximadamente de 1,1 vezes o controlo.

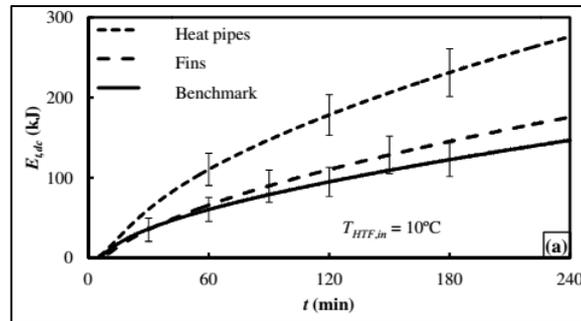


Figura 9 - Energia libertada pelo PCM à passagem do fluido para os três casos, controlo, tubos de calor, alhetas e para temperatura do fluido=10°C e caudal mássico=0.0022 kg/s.

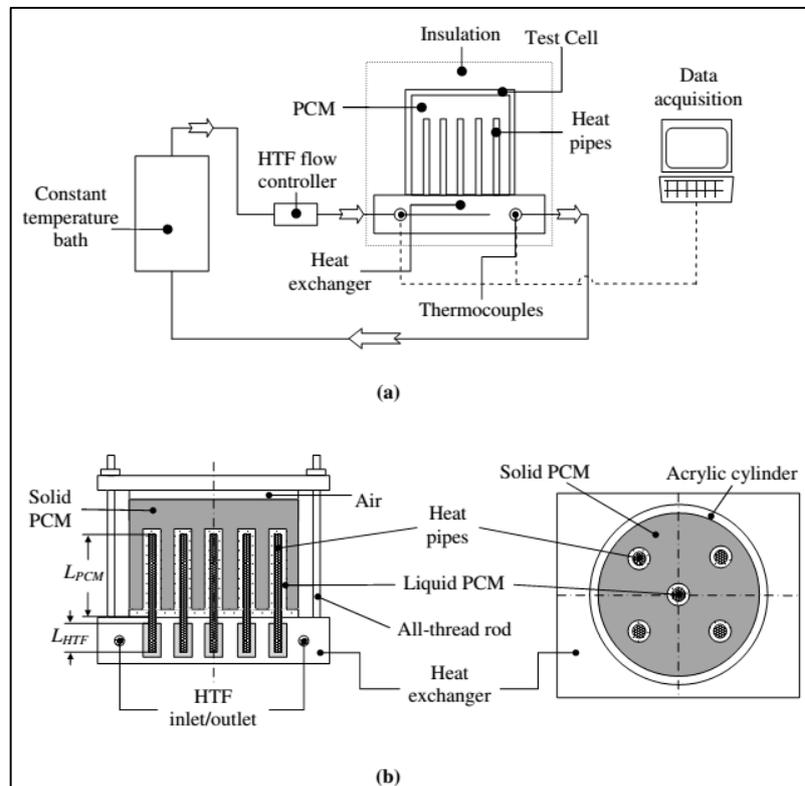


Figura 10 - Representação da instalação experimental (a) e pormenor do SAET.

O conceito foi levado à escala real e adaptado num SAET comercial. Foi então modelada uma análise de custo para determinar a competitividade com outras formas de armazenamento de energia térmica atualmente usado na indústria de CES.

Tay [32] para explorar a disposição de SAET latentes e a sua implicação na eficiência, estudou a implementação de um sistema de tubos de aquecimento aplicado a SAET usando PCM de uma, duas e quatro baterias de tubos. Foi observado que o desenho pode entregar uma alta densidade de armazenamento energético com um fator de compactação acima dos 90%. Para além de que com suficiente área de

transmissão de calor, alta densidade de tubos, a energia que pode ser armazenado pode atingir valores acima os 70%.

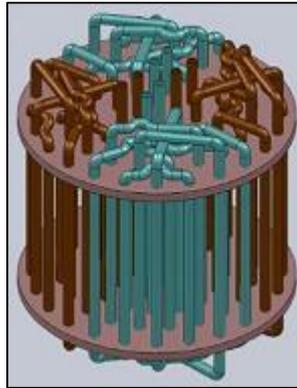


Figura 11 - Representação esquemática do banco de quatro tubos.

O autor conclui que a eficiência da transmissão de calor entre o SAET e o PCM segue uma tendência decrescente em linha com o caudal mássico e para os três desenhos apresentadas, um, dois e três bancos de tubos. A maior eficiência é obtida para o desenho com maior área de transmissão de calor, quatro tubos. A eficiência média durante o processo de mudança de fase foi determinada pela variação da média de temperatura de entrada e de saída. A eficiência media dá uma indicação da performance da eficiência e foi calculada pela seguinte equação:

$$\varepsilon = \frac{T_{in} - T_{out}}{T_{in} - T_{PCM}} \quad (3)$$

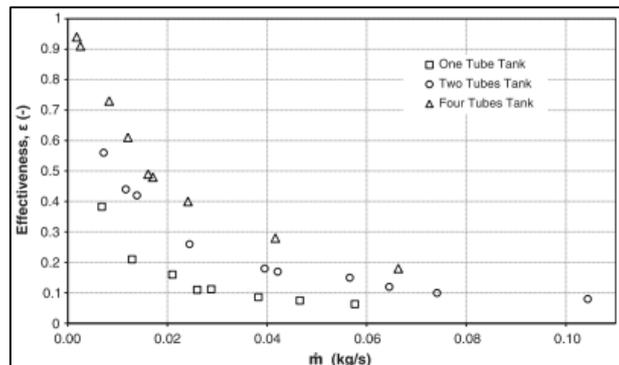


Figura 12 – Eficiência do PCM usado num SAET latente contra o caudal mássico de fluido no sistema de tubos quentes.

2.2.5 TECNOLOGIA TÊXTIL

Para Mondal, [19] a incorporação de materiais de mudança de fase em têxteis por revestimento ou encapsulamento para produção de tecidos inteligentes termorreguláveis suscitou interesse. Por conseguinte, foi feita uma tentativa para rever o princípio de funcionamento dos materiais de mudança de fase e das aplicações para regulação de temperatura em têxteis. Tal foi conseguido pela incorporação de materiais mudanças de fase na estrutura do próprio têxtil.

Os conceitos de conforto térmico, roupas para o ambiente frio, materiais de mudança de fase foram revistos. Algumas aplicações recentes de materiais de mudança de fase incorporados em têxteis são demonstradas.

Finalmente, o mercado de materiais de mudança de fase na área têxtil e alguns desafios são mencionados neste artigo de revisão.

Zuckerman [20] propõe uma invenção patenteada com o objetivo de proporcionar um aperfeiçoamento à composição de um têxtil com um material de mudança de fase na sua matriz para controlo de temperatura sem perder as propriedades originais do tecido.

A mesma aplicação é estudada por Loschi [21] onde se descreve o desenvolvimento de revestimentos poliméricos baseados na formação de complexos Poli (etilenoglicol) (600, 1000 e 1450) e o poliácido itacónico que foi usado como materiais de mudança de fase como elemento constituinte de têxteis termorreguladores.

2.2.6 APLICAÇÕES MÉDICAS

No campo da medicina, desafios como o aquecimento de fluidos intravenosos em locais de acidentes têm sido tradicionalmente difíceis devido à falta de aquecedores de fluidos portáteis adequados que não dependem da rede elétrica ou bateria. Um aquecedor protótipo de calor latente aqueceu consistentemente sangue de aproximadamente 4°C para cerca de 35°C a velocidades típicas de fluxos clínicos.

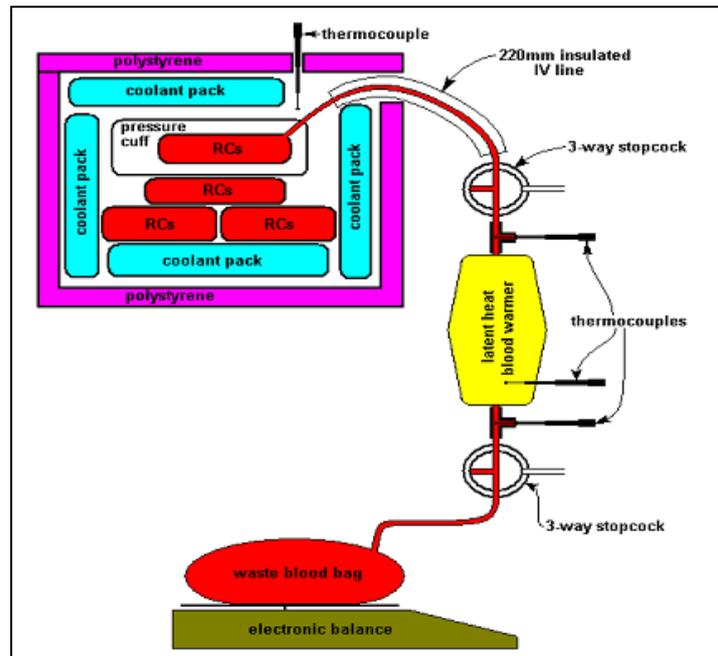


Figura 13 - Representação esquemática da montagem laboratorial.

O aquecimento do sangue armazenado com o calor latente não afetou a integridade das células vermelhas mais do que o aquecedor por calor aprovado. McEwen [22] concluiu ainda que uso de calor latente sob a forma de materiais de mudança de fase como fonte de energia pode aquecer satisfatoriamente sangue frio ou outros fluidos intravenosos a temperaturas perto do corpo, sem quaisquer efeitos adversos.

Ainda outra área, Junghanss T, [23] e S. Braxmeier [24] exploraram a segurança, tolerabilidade e eficácia do uso de materiais de mudança de fase na aplicação a sistemas de termoterapia.

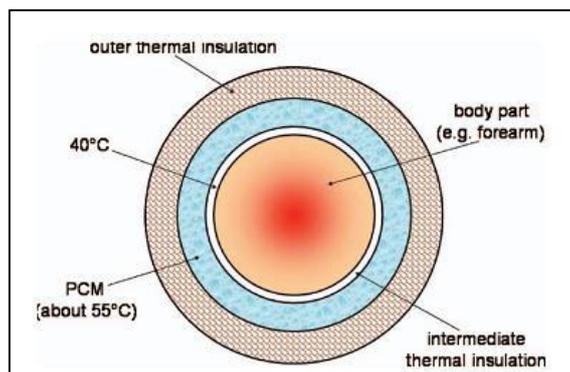


Figura 14 - A ligadura térmica atua sobre o elemento corporal mantendo a temperatura no patamar desejado por um período de tempo mais extenso.

O PCM selecionado, acetato de sódio tri-hidratado ($C_2H_3NaO_2 \cdot 3H_2O$) é amplamente utilizado em almofadas de calor de bolso comerciais, é fácil de aplicar, recarregável em água quente, não-tóxico e não perigoso para o ambiente. Ambos concluem que a aplicação foi bem tolerada e a aceitação das ligaduras de materiais de mudança de fase foi muito elevada. O dispositivo de aplicação de calor baseado em materiais de mudança de fase reutilizável parece perfeitamente adequado para tratar condições clínicas. Um protótipo foi fabricado e utilizado numa prova. Os dados experimentais foram analisados e a resposta termorreguladora avaliada.

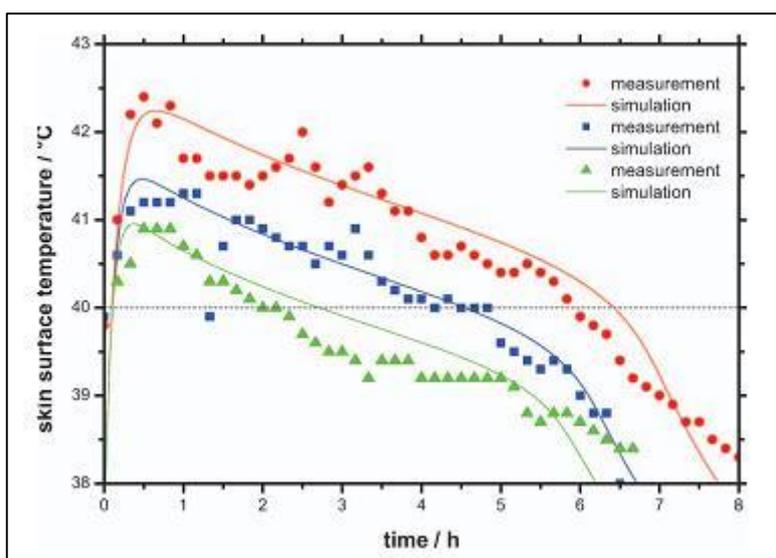


Figura 15 - A dispersão de pontos obtidos nos ensaios sobreposta às linhas de tendência simuladas corroboram a validade dos resultados obtidos.

A curto prazo a temperatura da pele foi mantida numa gama de temperaturas aceitável por quatro a cinco horas. Finalmente, os autores concluem ainda que o uso de materiais de mudança de fase nas ligaduras térmicas são um dispositivo ideal para o tratamento térmico da úlcera de Buruli. A ligadura térmica é fácil de aplicar e económica, portanto, está bem adequada para uso em países de baixos recursos.

Hauer, A, [15], com base no facto de que o aparecimento de febre no período neonatal pode ser mortal, desenvolveu um método alternativo de controlo de temperatura em recém-nascidos usando PCM para controlar a temperatura corporal a níveis seguros. Um modelo teórico foi confirmado como correto pelos resultados

práticos obtidos após evolução de dois protótipos usados em animais, onde se obteve redução do patamar de temperatura do alvo de 3°C durante 72 horas.

2.2.7 TECNOLOGIA AVAC

No campo do aquecimento, ventilação e ar condicionado, AVAC, Zafer [17] explora aplicações comerciais que usam materiais de mudança de fase e a sua aplicação para controlo de temperatura. Em comparação com sistemas térmicos energéticos, como chillers refrigerados a ar, o uso de materiais de mudança de fase oferece uma melhoria de 17 a 36% no coeficiente de performance do equipamento dependendo do equipamento e do local da instalação.

Ainda em bombas de calor o autor expõe melhorias significativas pelo armazenamento de energia residual através de materiais de mudança de fase e indica reduções até 50% de consumo de energia no tamanho da instalação por reduzir os picos e espalhar a carga diariamente.

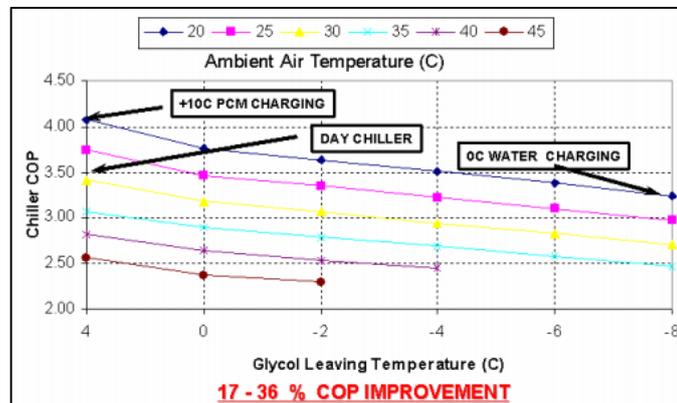


Figura 16 - Comparação de carga de SAET latentes à base de PCM contra os sistemas convencionais de arrefecimento por água e glicol.

Sistemas passivos de aquecimento, bombas de calor, sistemas de armazenamento solares e arrefecimento convectivo de estruturas são igualmente tidos em conta neste estudo onde são referenciadas melhorias globais significativas.

Zalba, Marín, Cabeza [13] usando um circuito fechado de ar com hélices para movimentar o ar, um aquecedor e um arrefecedor para colocar o ambiente a uma determinada temperatura e um sistema de armazenamento de energia latente testaram dois PCM, um com base numa liga, 34% C16 e 66% C18, de temperatura de fusão no intervalo de 19,5 a 22,2°C, outro da Rubitherm, RT25 de temperatura de fusão no intervalo 20-24°C. Usando a técnica DOE, calcularam respostas de parâmetros de saída tendo como base a espessura de parede das capsulas PCM, temperatura do ar e caudal de ar.

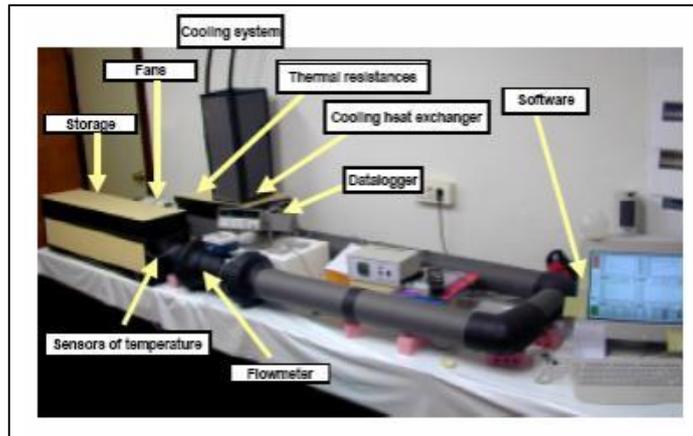


Figura 17 - Bancada de ensaio do SAET latente com recurso a PCM.

Dos resultados surgiram as conclusões seguintes: A tendência das curvas foi a esperada; o processo foi mais rápido quando a espessura da parede da capsula é menor, quando a diferença de temperatura entre o ar e a temperatura de fusão do PCM é maior, e quando o caudal é maior.

As curvas de transferência de calor mostraram duas etapas no processo, uma primeira com baixa resistência à condução onde o efeito da convecção no fenómeno de transferência de calor é dominante e uma segunda etapa onde se observa maior resistência térmica.

Apesar das cápsulas com menor espessura terem possibilitado uma fusão e solidificação mais rápida, pode-se observar que a espessura da cápsula pode ser otimizada.

2.2.8 CONSTRUÇÃO CIVIL

James e Delaney [27] avaliaram o potencial técnico de materiais de mudança de fase na redução a carga energética em edifícios comerciais e apresentam soluções e aplicações para diversos componentes de construção como cera de parafina micro encapsuladas, misturas de sais eutéticos, ou materiais orgânicos para placas divisórias interiores, blocos de teto, painéis de chão entre outros. A reter a diminuição de espessura de parede PCM quando comparada com materiais convencionais para a mesma massa térmica.

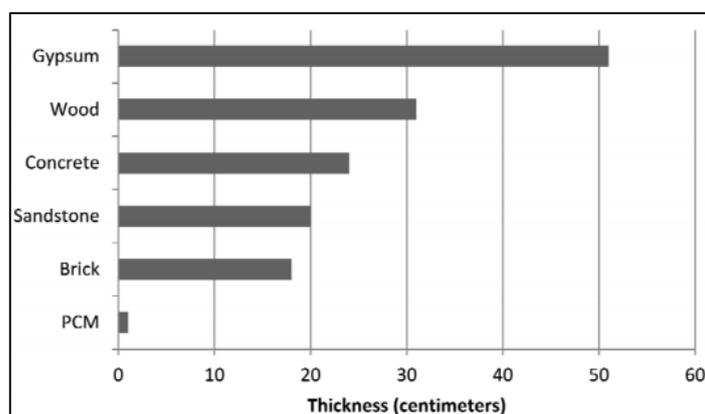


Figura 18 - Comparação da espessura necessária de uma parede contendo PCM contra espessuras de materiais convencionais para a mesma carga térmica.

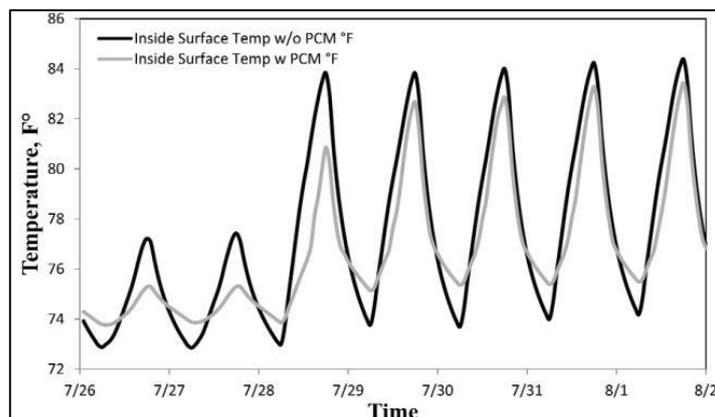


Figura 19 - Comparação do perfil de temperatura com e sem PCM numa parede de edifício e para o interior da divisão.

Finalmente, concluem a redução projetada e carga de arrefecimento em edifícios comerciais de 335 a 1005 GW/h/ano.

2.2.9 ELETRÔNICA

No campo da eletrônica a aplicação de materiais de mudança de fase é igualmente explorada. Para codificar informações em discos CD, DVD, o gravador utiliza o laser de gravação, que é forte o suficiente para aquecer o composto à temperatura de derretimento. Simpson e Fons [28] indicam em estudos de tecnologia de memórias baseadas em materiais de mudança de fase, baseada em compostos GST, Germânio-antimônio-telúrio, como um candidato para substituir memórias *Flash* para aplicações de armazenamento não volátil de dados. Ficou demonstrado que compostos $\text{GeTe/Sb}_2\text{Te}_3$ de mudança de fase IPCM, dispositivos de armazenamento de dados com comutação reduzida de energia, melhoram o ciclo de vida a escrever apagar são mais rápidos nas velocidades de comutação. Em conclusão, a interface entre o Sb_2Te_3 GeTe controla a comutação local atômica dos átomos de Ge, resultando em uma transição de fase, com uma redução substancial de perdas entrópicas. Como resultado, os dispositivos de memória RAM IPCM consomem uma ordem de magnitude menos de energia durante o processo de comutação e mostram a capacidade de resposta de comutação melhorada.

Com base nesses resultados, acreditam que os mais eficientes e mais rápidos dispositivos de memória de mudança de fase serão desenvolvidos com nano-estruturas.

No campo da eletrônica de mísseis, a gestão térmica é um assunto significativo, os sistemas eletrônicos são cada vez mais compactos e novas abordagens são necessárias pelo que a integração de PCM nos sistemas de controlo de temperatura dos módulos eletrônicos pode beneficiar no período transiente onde temperaturas acima dos 80°C são atingidas ponto em que os sistemas de convecção forçada deixam de ser eficazes. Após simulações teóricas foram realizados ensaios práticos que demonstram a melhoria.

Tabela 4 - Comparação entre simulações e modelo analítico para uma potência a dissipar de 20 W.

	Analytical model	2D model	3D model	Measurement
Paraffin	12 min	7 min	5 min	12 min @ 79°C
Hydrated salt	17 min	16 min	18 min	23 min @ 80°C
Solid Solid	21 min	21 min	26 min	23min @ 82°C

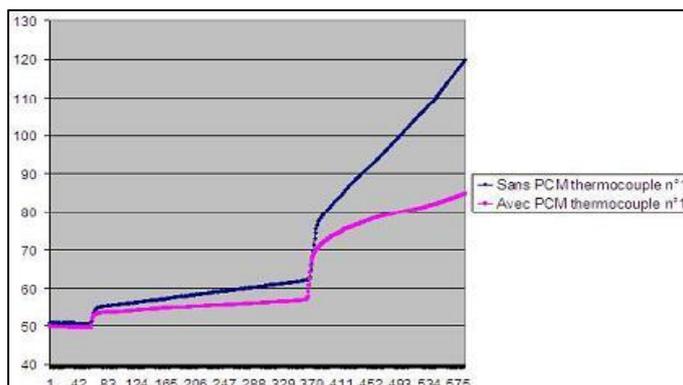


Figura 20 - Comparação do comportamento da evolução da temperatura da placa integrada do processador com e sem recurso a SAET latente por PCM.

2.2.10 FÍSICA APLICADA: ÓTICA

Da mesma forma em aplicações óticas, Kats [29] mostra que a absorção perfeita pode ser atingida em sistemas constituídos por uma única camada de materiais de mudança de fase. Este projeto é implementado com uma camada ultrafina de VO₂, Dióxido de vanádio sobre safira, a temperatura ajustada na vizinhança da transição de fase, levando a 99,75% de absorção. A simplicidade estrutural e grande ajuste de faixa de 80% para 0,25% na refletividade são promissores para emissores térmicos, moduladores ou bolómetros.

2.2.11 OPTIMIZAÇÃO DE SAET LATENTES E PCM

Com o intuito de melhorar as já existentes propriedades de alta densidade de armazenamento de energia térmica por unidade de volume, Heinz [31] procurou através da micro encapsulação de parafinas criar um fluido onde estas cápsulas se dispersam e aumentam a capacidade de armazenamento e transferência de calor. O autor conclui em concentrações até 50% de micro cápsulas em água, o aumento de capacidade e de armazenamento de energia, no entanto a viscosidade também aumenta o que impõe limites por perda de capacidade de bombagem do fluido. Finalmente, observa-se que para descargas de alta intensidade um trocador de calor é favorável. Para armazenamentos de libertação energética a longo prazo a potência máxima de descarga necessária é tipicamente mais baixa em comparação com o volume de armazenamento.

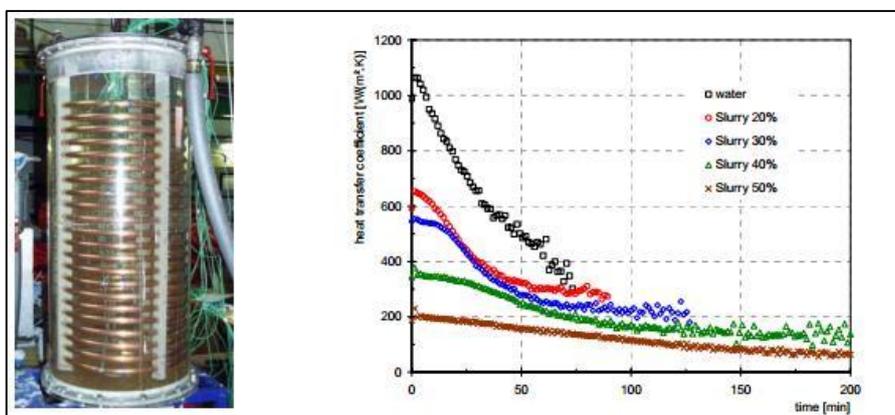


Figura 21 - Para o trocador de calor apresentado, à direita, o coeficiente de armazenamento de calor para diferentes produtos tem a tendência decrescente apresentada.

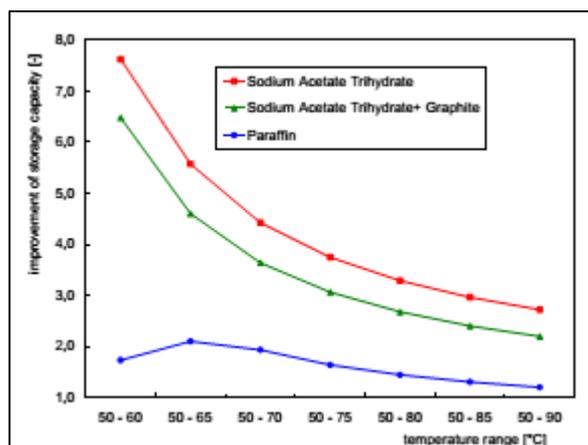


Figura 22 - Melhoria da densidade volumétrica de armazenamento comparado com a água e para três materiais PCM.

- 3 - MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

3.1 INTRODUÇÃO

O processo de desenvolvimento do método de testes tendo como base os métodos de otimização de Taguchi e uma instalação laboratorial de ar condicionado P.A. Hilton A575, presente no laboratório de Termo fluídos. É expectável, dadas as trocas de calor indicadas na figura 23, que a transmissão de energia para o fluido que se escoia internamente pelo tubo q_1 aconteça. No entanto o fluxo para o exterior q_2 e a migração de calor entre os lóbulos do tubo indicados como q_3 poderão reduzir a eficiência global de transmissão de calor ao fluido. Aguarda-se que baixos caudais de escoamento de fluido proporcionem maior troca de calor, assim como maior potencial de troca de calor para um gradiente térmico entre fluido e PCM mais amplo. Da mesma forma um fluxo em escoamento turbulento e um alto gradiente térmico com o PCM proporcionarão maiores trocas convectivas com o exterior quanto maiores as suas magnitudes que poderão no limite anular as trocas com o fluido. Alterar o conjunto de parâmetros controláveis pretende-se compreender qual a influência particular de cada um sobre os outros e a condição de saída de forma mais objetiva comprovar a possibilidade de aquecer fluídos de baixo número de Reynolds, usando materiais de mudança de fase.

A convecção é o principal modo de transferência de calor presente neste estudo, figura 23, assim foram considerados para a formulação das experiências, quatro fatores de entrada que mais influenciam a transferência de calor entre fluídos:

- Temperatura de entrada do fluido, a temperatura que se regista na entrada imediatamente antes do início do tubo tendo em conta que este percorre um circuito desde a fonte até ao local de registo.
- Caudal do fluido, a quantidade de massa de fluido em função do tempo que atravessa a secção de todo o comprimento de tubo.
- A temperatura ambiente, a temperatura da atmosfera envolvente em redor ao tubo e que preenche a secção da instalação laboratorial.
- A velocidade ambiente, a velocidade do ar da atmosfera envolvente.

Como parâmetro de saída foram selecionados dois:

- A energia transmitida ao fluido;
- Temperatura de saída do fluido, a temperatura à saída imediatamente após o final do tubo.

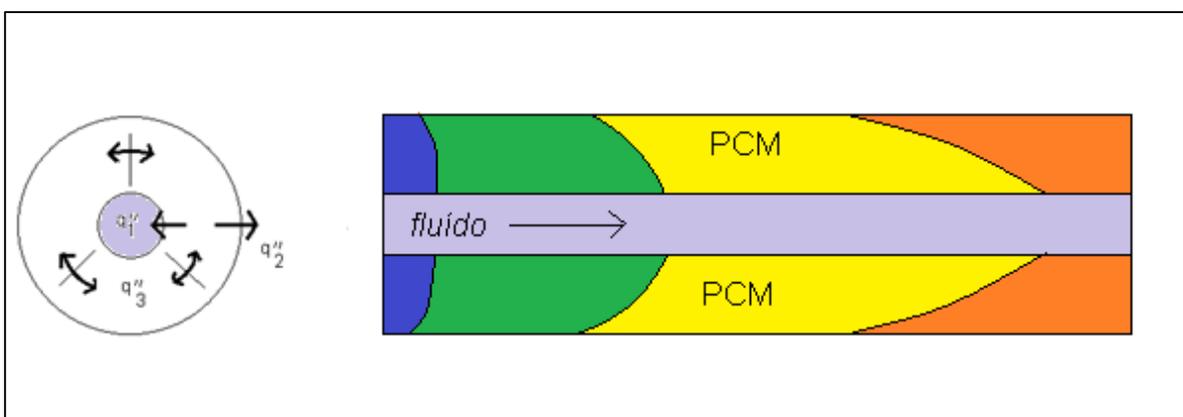


Figura 23 - trocas de calor convectivas e condutivas em regime transiente angulares q''_3 , radiais q''_1 e q''_2 e axiais para a troca de calor entre um caudal de fluido perfeitamente desenvolvido e de baixo número de Reynolds e um PCM em seu redor.

3.2 DESENVOLVIMENTO DO PLANO EXPERIMENTAL

3.2.1 MÉTODO DE TAGUCHI, DOE

O planeamento experimental (design of experiments - DOE) consiste em estudar o comportamento de um sistema utilizando um número mínimo de ensaios. Tendo por princípio simplificar e clarificar a utilização de um plano experimental, o japonês Dr. Genichi Taguchi desenvolveu um método que se tornou numa ferramenta indispensável para obter a combinação ótima de diferentes parâmetros. Este método ficou denominado, de “Método de Taguchi”,

A metodologia de Taguchi baseia-se em planos experimentais que utiliza matrizes ortogonais, permitindo planificar os ensaios por forma a diminuir o número de experiências e obter uma interpretação rápida dos resultados. Outras das vantagens deste método consiste na possibilidade de estudar um elevado número de fatores, detetando eventuais interações entre eles, modelizando os resultados e possibilitando a obtenção de resultados com elevada precisão. Este tipo de projeção experimental pode ser realizado em tempos aceitáveis e custos reduzidos, sendo os resultados comparáveis a uma projeção a grande escala. Tradicionalmente, a influência de determinada variável é estudada de forma independente, isto é, a análise da influência de um determinado fator é feita fixando todos os outros fatores e medindo a resposta do sistema. As informações obtidas limitam o conhecimento do sistema que, para ser complexo, implica uma verificação experimental extensiva e por vezes impraticável. O número total de experiências, N_{total} , envolvidas na caracterização de um sistema com k_i fatores, variando cada um a n_i níveis, é dado pela equação (4):

$$N_{total} = n_i^{k_i} \quad (4)$$

O plano experimental composto pelas N_{total} experiências denomina-se de plano fatorial completo. De forma a melhor compreender a resposta do SAET latente, foi desenvolvido um plano de experiências de três níveis. Nível baixo, médio e alto, impostos a quatro fatores de entrada num total de oitenta e um testes. Este valor é demasiado pesado seja em tempo de execução ou custo de materiais. A aplicação do método de Taguchi obedeceu as etapas seguintes:

- Etapa 1: Identificação dos fatores, capítulo 3.1;
- Etapa 2: Planeamento e realização das experiências, capítulos 3.3 a 3.5;
- Etapa 3: Predição dos níveis ótimos dos fatores para os parâmetros de saída. 4.4.

Da aplicação do método de Taguchi, resulta uma redução do plano fatorial completo em $\frac{81}{3} = 27$ testes, e seguidamente $\frac{27}{9} = 9$ testes. Valor escolhido para o número de testes executar, anexos 7.3.1 a 7.3.3. A redução pode evoluir até à unidade ponto em que pouca informação se retira. A matriz L_9 , anexo 7.3.2 especifica nove ensaios experimentais a serem conduzidos. A redução é válida porque o desenho é ortogonal, uma propriedade que permite que o efeito de cada fator seja separado individualmente. Sendo a matriz ortogonal, quando comparados dois níveis do mesmo fator podemos ter a certeza de que o fator consequente terá o mesmo efeito no anterior. Este facto é importante porque possibilita a comparação sob várias condições em vez de fixar uma condição como numa aproximação fator a fator.

A tabela 5 representa a tabela final usada para a execução de ensaios onde estão identificados os testes a realizar. O desenvolvimento do plano fatorial completo encontra-se no anexo 7.3 Desenvolvimento do Plano de Taguchi L81 para L9.

3.2.2 FATORES DE CONTROLO

Após redução da matriz fatorial completa e obtenção da tabela reduzida, tabela 5, seleccionaram-se os ensaios indicados Y1 Y14 Y27, Y33 Y43 Y47, Y62, Y72, Y76.

Tabela 5- para cada nível e parâmetro controlável a seleção de testes não se repete ao mesmo nível.

L9			Temperatura	Temperatura	Temperatura
			fluido nível	fluido nível	fluido nível
Velocidade ambiente nível mínimo	Temperatura ambiente nível mínimo	Caudal fluido nível mínimo	Y1	Y2	Y3
		Caudal fluido nível médio	Y13	Y14	Y15
		Caudal fluido nível máximo	Y25	Y26	Y27
	Temperatura ambiente nível médio	Caudal fluido nível médio	Y31	Y32	Y33
		Caudal fluido nível máximo	Y43	Y44	Y45
		Caudal fluido nível mínimo	Y46	Y47	Y48
	Temperatura ambiente nível máximo	Caudal fluido nível máximo	Y61	Y62	Y63
		Caudal fluido nível máximo	Y70	Y71	Y72
		Caudal fluido nível médio	Y76	Y77	Y78

Tabela 6 – A aplicação da redução da tabela 5 às condições de teste.

Teste número	A	B	C	D	V ambiente (m s ⁻¹)	T ambiente (°C)	\dot{m} Fluido (Kg / s)	T fluido (°C)
	1	Mínimo	Mínimo	Mínimo	Mínimo	1	10	0,005
2	Mínimo	Médio	Médio	Médio	1	15	0,010	10
3	Mínimo	Alto	Alto	Alto	1	20	0,015	15
4	Médio	Mínimo	Médio	Alto	1,5	10	0,010	15
5	Médio	Médio	Alto	Mínimo	1,5	15	0,015	5
6	Médio	Alto	Mínimo	Médio	1,5	20	0,005	10
7	Alto	Mínimo	Alto	Médio	2	10	0,015	10
8	Alto	Médio	Mínimo	Alto	2	15	0,005	15
9	Alto	Alto	Médio	Mínimo	2	20	0,010	5

A interpretação dos resultados é feita através da análise dos efeitos individuais de cada fator nas respostas do sistema. Para o estudo da otimização do parâmetro de saída é efetuado uma seleção da melhor conjugação de efeitos consoante influência dos parâmetros na resposta, da qual se seleccionou a solução maior melhor, quanto maior o efeito na saída melhor o resultado obtido.

3.2.3 FATORES DE RUÍDO

Os fatores de ruído introduzem variação nos parâmetros de controlo por cada teste realizado e que influenciam a confiança do resultado final. Foram identificados os seguintes fatores de ruído:

- O tempo de reação para início de teste;
- A temperatura à qual o tubo é carregado para início do teste para além da T_i ;
- As perdas energéticas sensíveis na transição do tubo entre a estufa onde se carrega inicialmente o tubo e montagem na estação e início do teste.

Por apenas ter sido validado uma ronda de ensaios não se calculou o rácio sinal/ruído para controlo de erro na repetição de ensaios.

3.3 DESENVOLVIMENTO DA INSTALAÇÃO LABORATORIAL

A instalação laboratorial está apetrechada com um circuito para recirculação de ar, um sistema de monitorização e controlo e outro de captação e registo de dados. O equipamento tem a capacidade de criar condições térmicas específicas condicionadas ao volume recirculado, podendo por exemplo, reproduzir ambientes térmicos extremos. A figura 24 ilustra a instalação laboratorial.

Os principais elementos que compõem a instalação laboratorial são um ventilador centrífugo com velocidade variável, atuado por um motor monofásico de 120W a 230VAC, 50Hz, capaz de um caudal máximo de 0,13 m³/s [67], um pré-aquecedor de ar, composto por duas resistências de 1kW cada, localizadas após o ventilador, um arrefecedor/desumidificador com tubo para recolha de condensados, unidade de refrigeração com evaporador, condensador e compressor que se utiliza com fluido de refrigeração refrigerante R134a, um reaquecedor de ar, composto por uma resistência de 1 kW e 2 de 0,5 kW, localizadas após o condensador e um humidificador, composto por uma electroválvula de controlo digital normalmente fechada e um reservatório de água de enchimento automático.

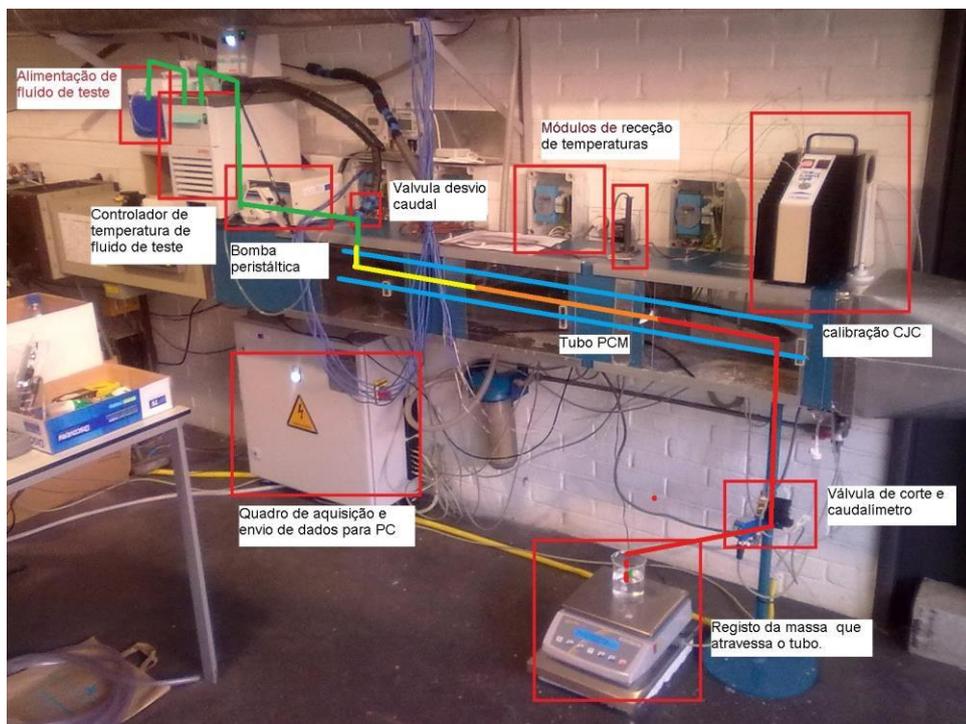


Figura 24 – Aspeto final da estação laboratorial aplicada ao estudo de PCM.

3.3.1 DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO DA INSTALAÇÃO

Ar, forçado dentro da conduta pelo ventilador com velocidade controlada, é aquecido através do controlo das resistências elétricas ou arrefecido à passagem pelo refrigerador. Uma série de sensores de temperatura dispostos de forma manipulável, um caudalímetro e anemómetro de fio quente captam os sinais pretendidos que serão registados com a cadência pretendida. Outro anemómetro e termo higrómetro enviam sinais repetidamente para controlar as condições ambientais através de um software desenvolvido para o efeito onde se inserem valores numéricos para a velocidade e temperatura do fluido que serão controlados por lógica PID.

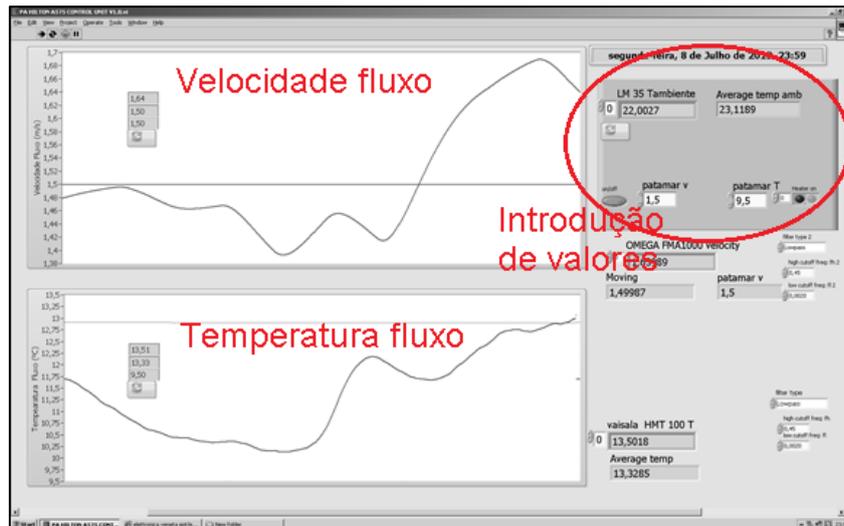


Figura 25 - Janela de controlo do software desenvolvido.

Após estabilização das condições do fluxo, prepara-se o caudal de fluido de teste iniciando o controlador de temperatura e ligando a bomba peristáltica para recircular o fluido. O fluido de teste é água corrente, armazenada no depósito 1 com enchimento automático e com ligação por vazo comunicante ao depósito do controlador de onde se extrai o fluido sempre à temperatura desejada.

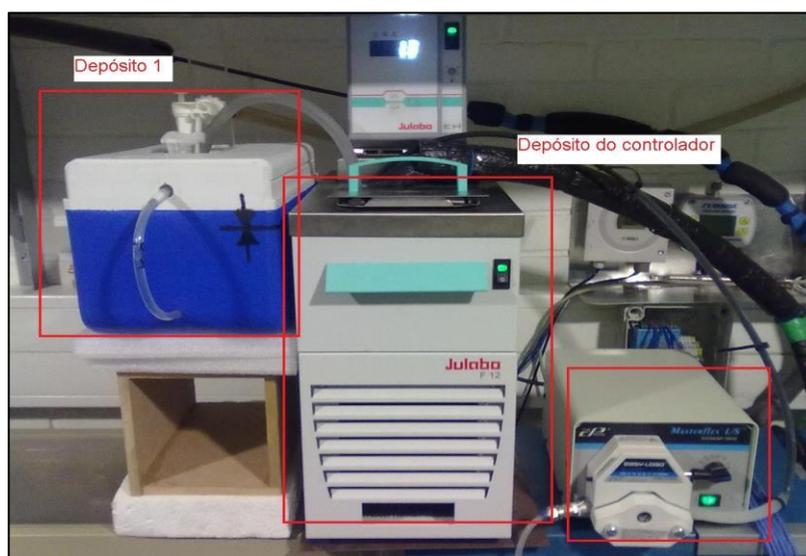


Figura 26 - Estação de preparação de fluido de teste.

O diagrama da montagem laboratorial concebida está representado na figura 27.

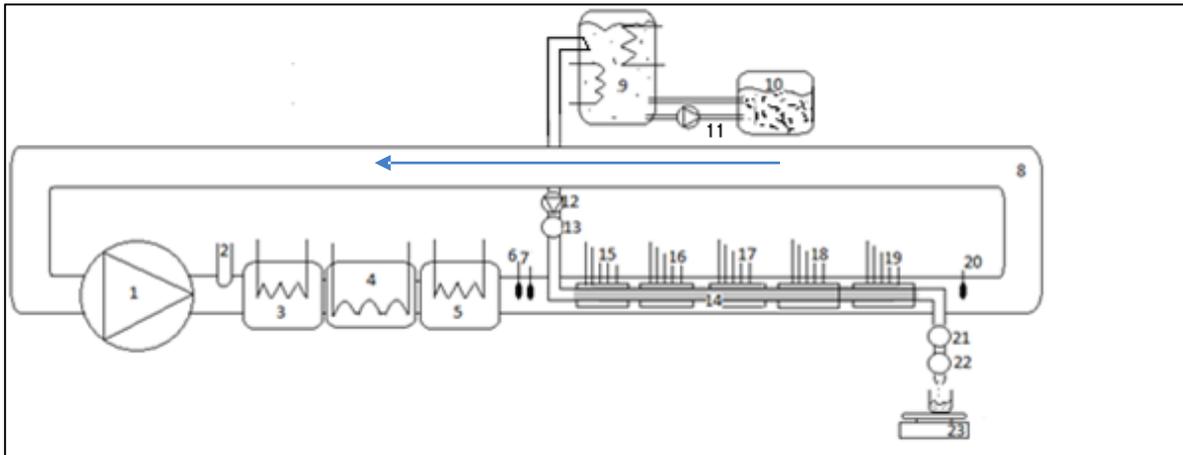


Figura 27 - Esquema da instalação laboratorial instalada.

Tabela 7 - Lista de equipamentos distribuídos na estação laboratorial.

1.Ventilador centrífugo;	10. Reservatório térmico de alimentação de fluido de teste.
2.Humidificador;	11. Bomba peristáltica Master Flex L/S
3.Resistências elétricas de 2 kW;	12. Regulador conta-gotas;
4.Desumidificador;	13. Válvula de corte;
5.Resistências elétricas de 1 kW;	14. Tubo de circulação de fluido de teste com lóbulos de PCM.
6.Transdutor de velocidade e temperatura OMEGA FMA1000;	15. a 19. Terminal de Termopares
7.Termo higrómetro Vaisala HMT100;	20. Transdutor de velocidade digitron HLX
8.Conduto de recirculação de ar;	21.Transdutor de caudal EGE SDN
9.Aquecedor/Arrefecedor de fluidos e bomba Julabo F12 e Julabo EH;	22. Válvula reguladora de caudal ASCO SCG
	23. Balança Kern FCB

3.3.2 DESCRIÇÃO DAS PLATAFORMAS DE CONTROLO E MONITORIZAÇÃO

O controlo do processo térmico é assegurado pela utilização de uma placa de aquisição de dados juntamente com uma solução de controlo difuso criada na plataforma Labview®. Numa placa PCI-6025E da National Instruments são utilizadas quatro entradas AI de 12 bits para adquirir a temperatura ambiente exterior à instalação e a temperatura ambiente condicionada, a humidade relativa e velocidade do ar dentro da conduta. Duas saídas analógicas AO de 12 bits são usadas para o comando do desumidificador e do ventilador centrífugo. Da mesma forma três portas DO são utilizadas para enviar os sinais de controlo das resistências elétricas e do humidificador. O PC utilizado tem um processador de Intel® geração Pentium® DualCore de 2,25 GHz e com 2 GB de RAM. O esquema da plataforma de hardware está representado na figura seguinte.

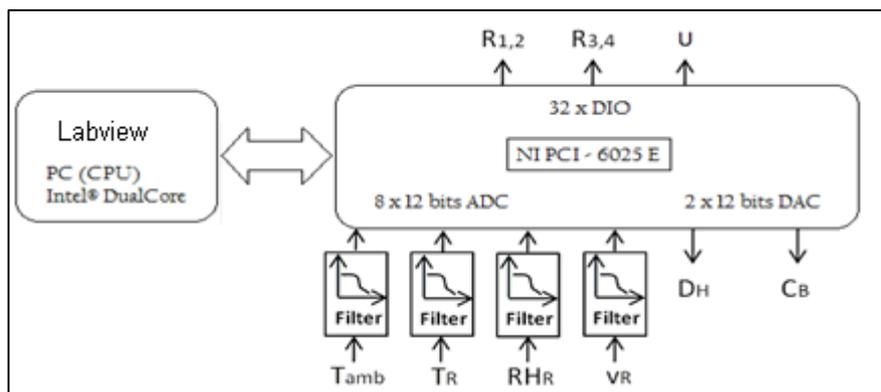


Figura 28 - Esquema das plataformas de hardware conjugadas.

Tabela 8 - Descrição dos sinais DA IO manipulados referentes à figura 28.

CB:	Ventilador Centrífugo;
DH:	Desumidificador;
R1,2:	Resistências Elétricas 1 e 2 de 2 kW cada;
R3,4:	Resistências Elétricas 3 e 4 de 1kW cada;
RHR:	Humidade Relativa Real;
Tamb:	Temperatura Ambiente;
TR:	Temperatura Real;
U:	Humidificador;
Vr:	Velocidade Real.

A aquisição e registo de dados da instalação laboratorial preparada para estudar a utilização de materiais de mudança de fase em escoamentos de baixo número de Reynolds é efetuada pela conjugação de uma interface de comunicação industrial juntamente com uma solução criada em linguagem Labview® da National Instruments. São utilizadas duas portas AIO de 8 bits para adquirir a temperatura num máximo de 40 pontos, estabilizar e medir o caudal, medir a velocidade do ar dentro da conduta e registar o caudal mássico de fluido transportado. O PC utilizado tem um processador de Intel® Core i3 de 2,6 GHz e com 2 GB de RAM. O esquema da plataforma de hardware está representado na figura seguinte.

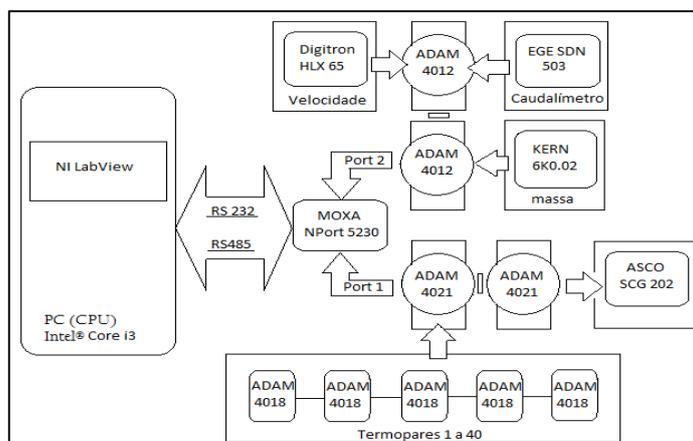


Figura 29 - Esquema das plataformas de hardware de registo onde as setas indicam o sentido da comunicação.

Por cada módulo de temperatura representado na figura 29 como ADAM 4018, um canal está consecutivamente ligado a um termopar de referência conectado ao calibrador CJC da figura 24 para que a cada momento se registre a diferença de valores entre a referência 0°C CJC e a leitura no fluido ou PCM. Como todos os termopares foram previamente calibrados a zero graus neste equipamento, podemos ter uma noção do erro de leitura nos termopares

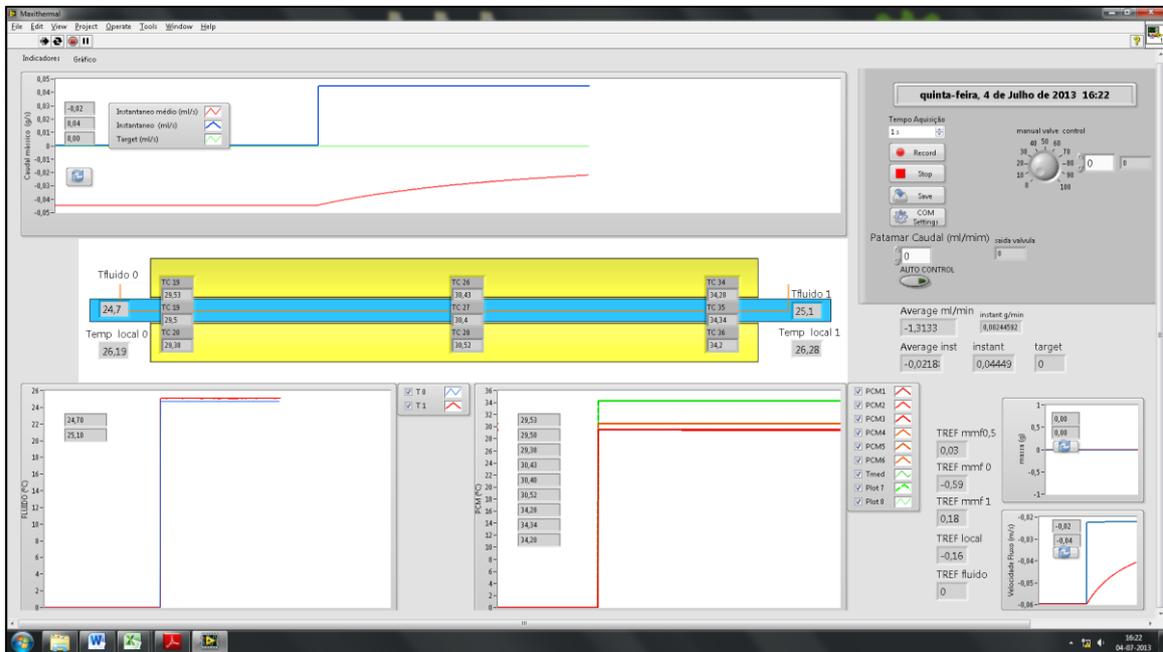


Figura 30 - Ilustração da tela secundária onde se registam temporariamente e de forma gráfica os valores obtidos.

A manutenção de velocidade e temperatura do ar ambiente e caudal de fluido foi efetuada por controlo proporcional integrativo derivativo, PID, com os parâmetros devidamente ajustados à minimização da amplitude do pico inicial de erro, e do número de curvas de correção para que a estabilização seja o mais rápida possível.

3.4 DESENVOLVIMENTO DO TUBO PCM

3.4.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE

Dos muitos compostos que têm sido estudados como materiais de mudança de fase os mais utilizados comercialmente são os sais hidratados e as parafinas. O materiais de mudança de fase utilizado que proporcionou a obtenção dos dados seguintes foi o PureTemp™ 35 ad empresa Puretemp. Este material de mudança de fase tem origem vegetal e apresenta ainda as seguintes características dadas pelo fornecedor na tabela 5.

Tabela 9 – Características físicas do material de mudança de fase utilizado nos testes, adaptado de anexo 7.2

Calor específico líquido	2.72 J/g °C
Calor específico sólido	2.44 J/g °C
Solubilidade em água	Insolúvel
Aparência	Líquido incolor, sólido ceroso
Temperatura de mudança de fase	35 °C
Densidade	0,85 g/ml

Para confirmação da temperatura mudança de fase foi entregue uma amostra para processamento, a análise foi executada no departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro recorrendo a um modelo 4000 da Perkin Elmer, laboratório de Nano fluídos, departamento de Mecânica do qual se obteve o gráfico da figura 31 de onde se comprova que na descarga o PCM tem temperatura de mudança de fase aos 30°C e na carga aos 35°C. Como seria de esperar, a histerese, a capacidade de conservação de energia na ausência do estímulo que a gerou, está presente no ciclo completo de carga descarga.

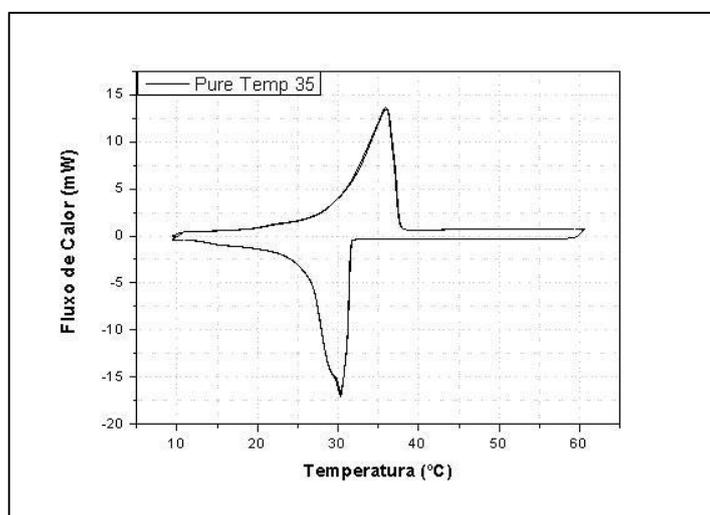


Figura 31 - Calorimetria diferencial de varrimento obtida para o PCM Puretemp 35.

3.4.2 CARACTERIZAÇÃO DO TUBO PARA PCM

Com o objetivo de compreender o comportamento do material de mudança de fase foram desenvolvidos protótipos de tubo contendor do material para o aquecimento de fluidos. O tubo em PVC de extrusão foi desenvolvido em parceria entre a Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Mecânica, TEMA e a empresa Maxiplás, Plásticos de Engenharia Lda. A estrutura base está representada na figura 18 e tem as características seguintes: diâmetro exterior 14 mm, diâmetro interior 3,5 mm, a espessura da parede é de 1 mm, estas medições foram feitas com uma craveira com um erro sistemático $\pm 0,1$ mm e aleatório não determinado de leitura pelo operador. Dado processo de fabricação por extrusão, processo contínuo e de afinação persistente, amostras têm de ser cortadas em secções de cerca de 1000 mm à medida das necessidades. Por esses factos nenhuma parcela é igual e notam-se diferenças entre a volumetria de cada lóbulo. No entanto após estudo da volumetria de um lote de tubos, chegou-se ao valor de 23,45 ml por lóbulo e por metro de tubo ou 70,34 ml por tubo. A volumetria foi calculada preenchido cada lóbulo com água após medindo a sua massa numa balança Kern FCB de erro $\pm 0,02$ g.

Tabela 10 – Valores de volume obtidos para os lóbulos de três tubos distintos, os erros são de $\pm 0,02$ g.

	Tubo 1 massa (g)	Tubo 2 massa (g)	Tubo 3 massa (g)
Lóbulo 1	22,500	21,240	22,480
Lóbulo 2	27,000	26,380	27,000
Lóbulo 3	21,540	21,320	21,560
Média por lóbulo e por metro de tubo	23,680	22,980	23,680

Por tubo determinou-se um total médio de 70,34 g de água o que equivale a no mínimo de 59,79 ml de PCM. Dada a redução de volume visível de mudança de fase sólida para líquida foi adicionado no máximo 5 ml de PCM depois do primeiro ciclo de carga onde se retiram bolhas de ar aprisionadas pelo que um tubo PCM tem entre 59,79 e 64,79 ml de PCM.

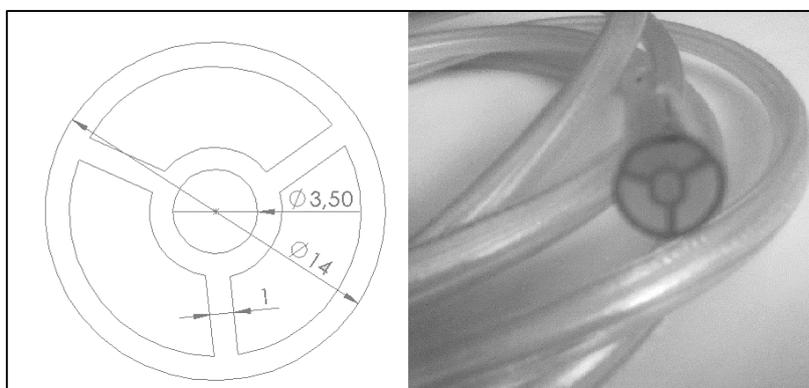


Figura 32 – À esquerda, dimensões do tubo, à direita representação do tubo PCM após extrusão.

As temperaturas do fluido e do PCM ao longo do teste foram registadas recorrendo a termopares dispostos em três por zona de medição, um termopar por lóbulo contendor em ambas as extremidades e a meia distância entre estes pontos, um à entrada e outro à saída em contacto com o fluido. Os termopares foram colocados no tubo recorrendo à penetração da parede e colocação das sondas no seu interior.

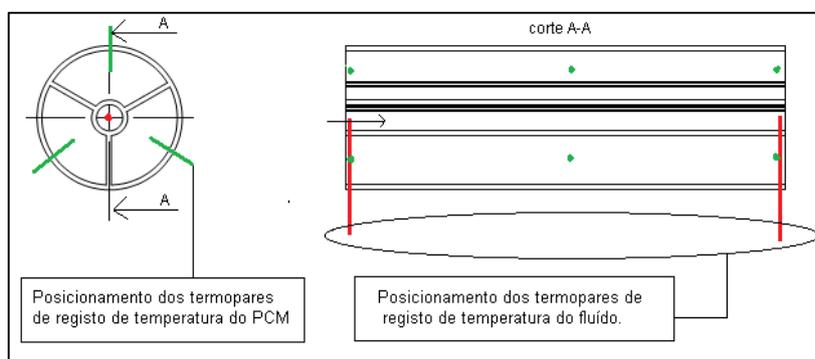
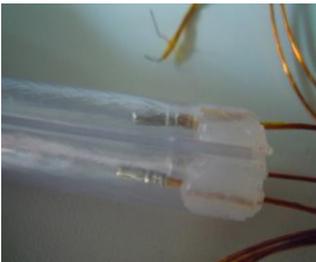
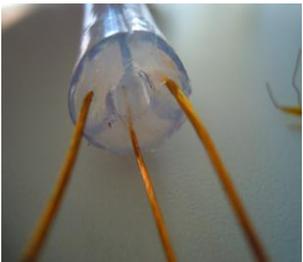


Figura 33 – Diagrama identificativo do posicionamento de termopares no tubo PCM, de forma radial à esquerda e ao longo do eixo de simetria.

Com o objetivo de validar o comportamento do SAET latente, seguiu-se o plano experimental indicado anteriormente. Para efeitos de cálculo de energia acumulada no sistema foi produzida uma montagem que consiste na colocação em linha de termopares de modo a reproduzir o gradiente térmico originado pela passagem do fluido no interior do SAET. Mais, para seguir a evolução do processo de mudança de fase no material de mudança de fase foram igualmente dispostos termopares de forma linear tal como descrito em Dimano M. N. R. [30]

3.5 DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO EXPERIMENTAL

3.5.1 DESCRIÇÃO DA PREPARAÇÃO DOS TUBOS

		<p>Cortou-se 1020 mm de tubo onde se marcou 10 mm desde cada ponta em todo o perímetro do tubo. De igual modo marcou-se o meio. Por cada lóbulo numerou-se de 1 a 3.</p>	
			<p>Usando um selante de silicone preencheu-se a área dos lóbulos marcada anteriormente em apenas um dos lados do tubo.</p>
		<p>Depois de seco introduz-se um termopar por lóbulo até a capsula estar completamente no interior.</p>	
		<p>Na marca anteriormente feita no centro do tubo, 500mm, furou-se a parede exterior na posição indicada na figura e para os três lóbulos.</p>	



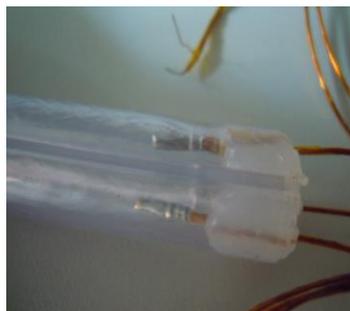
Introduziram-se por cada furo, 1 termopar Gefran. De notar que a capsula ficou completamente imersa no interior do tubo. Seguidamente sela-se a superfície envolvente ao furo e termopar com silicone



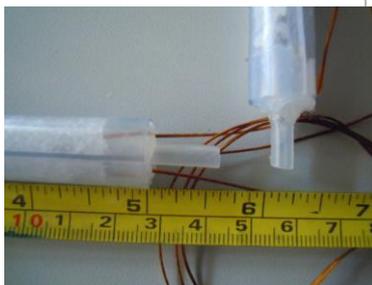
Preparou-se material de mudança de fase colocando-o num forno ou estufa 20 °C acima do seu ponto de mudança de fase durante 30 a 60 minutos. Os tubos já preparados e repousados por 24h devem ser incluídos no forno pelo mesmo período assim como todo o material usado para o enchimento dos tubos.



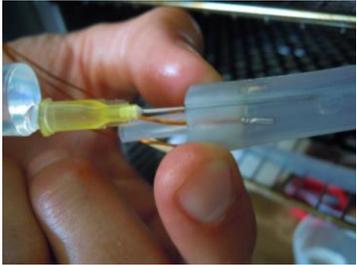
Após estadia no forno, colocou-se o tubo como indicado na figura, Na vertical com a extremidade selada para baixo. Para proceder ao seu enchimento, repetiu-se o processo para os três lóbulos.



Para acelerar o processo de solidificação do materiais de mudança de fase poderá ser colocado o tudo num ambiente refrigerado. Depois de solidificado, selou-se com silicone a extremidade do tubo ainda aberta e depois de seco o silicone introduziram-se termopares.



Cortadas duas porções de 25mm de tubo PVC D6d3mm inseriram-se nas extremidades do tubo materiais de mudança de fase numa profundidade de 10 mm.

		<p>Prepara-se o tubo na estufa até liquidificar e retiraram-se as bolsas de ar dos lóbulos por adição de materiais de mudança de fase através de uma seringa penetrando o silicone de uma extremidade.</p>
		<p>Conectaram-se as tomadas de módulos aos termopares tendo atenção à polaridade. Identificou-se o tubo.</p>

3.5.2 DESCRIÇÃO DE PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

Após montagem do SAET, este necessita de ser energizado pelo que se testaram vários métodos para o efeito sendo no final, selecionado o mais eficaz. Foram rejeitados os métodos de aquecimento por imersão em água acima da temperatura de fusão em placa de aquecimento com agitador magnético por não ter capacidade térmica suficiente o que se transcreveu em tubos parcialmente liquidificados após uma hora de aquecimento. O aquecimento por passagem de fluido quente acima da temperatura de fusão do PCM mostrou-se viável e interessante porque foi efetuado com o tubo permanentemente montado na estação de teste laboratorial. No entanto apenas se conseguiu um ciclo de aquecimento diário. O acumulador de água mostrou ter grande resistência ao aquecimento de todo o volume. Mais, a tubagem da estação ganha energia térmica que dificulta, quando da troca de canais, a estabilização da temperatura do caudal de fluido de teste que deverá ser imediata. Assim, o método escolhido foi o aquecimento dos tubos por convecção em forno a 60°C durante 20 minutos. Após o qual se transporta a amostra para a estação laboratorial e se conecta como descrito no capítulo 3.5.4.



Figura 34 – O repouso das amostras antes de serem introduzidas na estação laboratorial oi feita com recurso a ma estufa.

3.5.3 DESCRIÇÃO DE PREPARAÇÃO DA ESTAÇÃO

A estação é iniciada pelo menos trinta minutos antes do teste para que a estabilização ocorra e se encontrem no início do teste as condições mais próximas possíveis dos alvos estabelecidos para cada teste. O software controla as condições ambientais e estabiliza em minutos. O fluido de teste é condicionado vindo da rede de água potável a 15°C para um depósito com enchimento auto regulável onde migra para o chiller por sistema de vasos comunicantes conforme figura 27. Aqui é mantido até 5°C abaixo da temperatura de entrada de fluido, definida para cada teste para que no percurso desde o chiller até à entrada do tubo PCM compense os ganhos de temperatura. Assim a distância entre a produção e distribuição deve ser o mínimo possível e os materiais escolhidos devem minimizar a convecção. O fluido é colocado a circular por dentro do ambiente condicionado e é retirado momentos antes da ligação do tubo PCM para ensaio. Este procedimento serve para minimizar mais uma vez o pico de erro à entrada. Este foi um processo iterativo de tentativa erro que resultou nos dados seguintes de temperatura de ajuste do chiller:

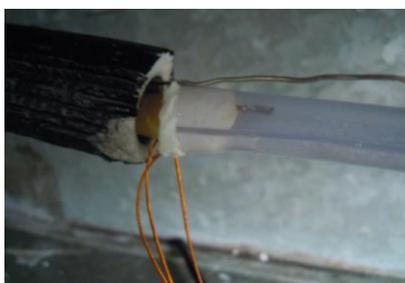
Tabela 11 - Ajustes de temperatura ao chiller para estabilização de temperatura de entrada do fluido.

Número de testes experimentais		V _{ambiente} (m/s)	T _{ambiente} (°C)	\dot{m} Fluido (kg / s)	T _{fluido} (°C)	T _{chiller} (°C)	T _{ajuste} (°C)
	1	1	10	0,005	5	5	0
	2	1	15	0,010	10	7	-3
	3	1	20	0,015	15	10	-5
	4	1,5	10	0,010	15	17	2
	5	1,5	15	0,015	5	2	-3
	6	1,5	20	0,005	10	7	-3
	7	2	10	0,015	10	9	-1
	8	2	15	0,005	15	14	-1
	9	2	20	0,010	5	1	-4

3.5.4 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE CONEXÃO À ESTAÇÃO, INÍCIO E PARAGEM DE TESTE.

Previamente dá-se a paragem temporária do controlo na estação após estabilização dos fatores controláveis às condições ideais aproximadas para que se introduza o tubo PCM na estação.

Tabela 12 - Passos de execução do início dos testes experimentais.



Após transportar o tubo da estufa até à estação laboratorial, percurso onde se tenta minimizar as perdas por convecção colocando uma manga térmica sobre este, ligou-se o tubo ao conector de borracha de saída.

	<p>Seguidamente ligou-se o tubo ao conector de entrada retirando a manga. Para esta conexão deverá seguir-se em primeiro lugar o processo descrito tendo em conta que se selecionou o chiller para a temperatura de entrada do fluido e que se ligou a bomba peristáltica para circular o fluido.</p>
	<p>Para-se a bomba peristáltica e desvia-se o circuito para a posição circuito fechado. Desliga-se a tubagem re-circulante e conecta-se o tubo de teste. Desvia-se o circuito para a posição circuito aberto. Ligam-se as tomadas de termopares aos respetivos módulos.</p>

3.5.5 DESCRIÇÃO DO ÍNICO, FINAL E DE TESTE E PARÂMETROS ACOMPANHADOS.

Dá-se início à gravação de dados selecionando primeiro a taxa de amostragem que foi definida na frequência de dez segundos. Este comando inicia o controlo dos parâmetros que após pré estabilização encontram-se agora mais próximos dos objetivos minimizando os desvios. Os dados registados estão indicados na tabela 13:

Tabela 13 - Parâmetros registados durante os testes, unidades e erros das sondas.

Frequência de aquisição	10 s	$T_{pcm@0m\ 2}$	$^{\circ}C$
Vambiente	$\pm 0,06\ m/s$	$T_{pcm@0m\ 3}$	$^{\circ}C$
Massa	$\pm 0,02\ g$	$T_{@0C\ CJC}$	$0^{\circ} \pm 0.1^{\circ}C$
$T_{\text{fluido saída}}$	$^{\circ}C$	$T_{pcm@0.5m\ 1}$	$^{\circ}C$
$T_{@0C\ CJC}$	$0^{\circ} \pm 0.1^{\circ}C$	$T_{pcm@0.5m\ 2}$	$^{\circ}C$
$T_{\text{fluido entrada}}$	$^{\circ}C$	$T_{pcm@0.5m\ 3}$	$^{\circ}C$
$T_{@0C\ CJC}$	$0^{\circ} \pm 0.1^{\circ}C$	$T_{@0C\ CJC}$	$0^{\circ} \pm 0.1^{\circ}C$
$T_{\text{ambiente1}}$	$^{\circ}C$	$T_{pcm@1m\ 1}$	$^{\circ}C$
$T_{\text{ambiente2}}$	$^{\circ}C$	$T_{pcm@1m\ 2}$	$^{\circ}C$
$T_{\text{ambiente3}}$	$^{\circ}C$	$T_{pcm@1m\ 3}$	$^{\circ}C$
$T_{pcm@0m\ 1}$	$^{\circ}C$	$T_{@0C\ CJC}$	$0^{\circ} \pm 0.1^{\circ}C$

Abrindo a válvula de saída liberta-se o caudal e dá-se início ao registo de dados. O teste apenas se inicia se a temperatura registada nos termopares do PCM se encontra acima da temperatura de mudança de fase em pelo menos 5° para garantir o registo de toda a fase latente. Acompanha-se o teste e confirma-se que todos os parâmetros controláveis, velocidade e temperatura do ar, caudal de entrada, temperatura do fluido estão

estáveis. A paragem do teste é efetuada quando a temperaturas de registo do fluido à saída atinge os 20°C. Concluiu-se o teste fechando a válvula de corte de saída de fluido e parando o registo de dados. Os dados de desvio à temperatura de referência de zero grausT@0C CJC não foram incluídos nos resultados por serem significativamente baixos e abaixo de 0,5°C.



Figura 35 - Ilustração do posicionamento do tubo na estação de testes.

- 4 - RESULTADOS

4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E VALORES CALCULADOS

Os resultados apresentados na tabela 14 e correspondentes para os testes restantes foram obtidos experimentalmente pelos equipamentos da instalação, à exceção do Caudal mássico de fluido (kg / s) e Potência fornecida (W), Energia disponibilizada (J) e Re descritas no capítulo 4.3.

4.1.1 TESTE 1

Tabela 14 – Resultados registados no teste 1.

Tempo de teste (s)	740
Massa de fluido energizada (g)	52,64
Caudal mássico de fluido (kg / s)	$0,25 \times 10^{-3}$
v_m do ambiente (m / s)	0,96
T_m do ambiente (°C)	9,61
T_m de entrada do fluido (°C)	9,40
Potência fornecida (W)	0,24
Energia disponibilizada (J)	387,96
Re, laminar	36

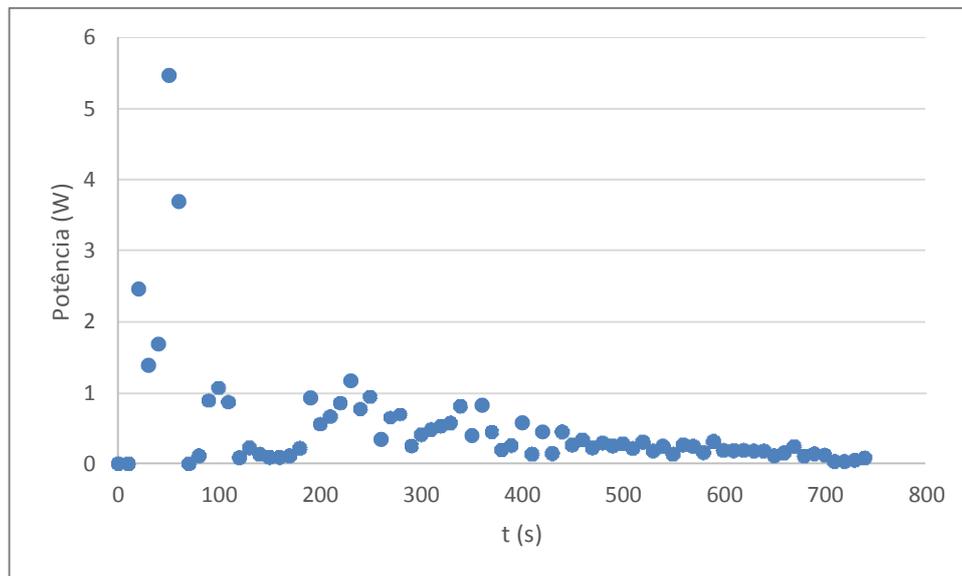


Figura 36 – Potência disponibilizada ao fluído durante o ensaio.

Este teste disponibilizou 387,96J de energia ou 0,24 W para 740 segundos de teste e para os fatores de controlo no nível mínimo, A1B1C1D1. A potência segue o esperado tendo uma amplitude entre pontos superior no início do teste onde há ainda um gradiente térmico superior etapa após a qual converge e com menor declive, figura 36.

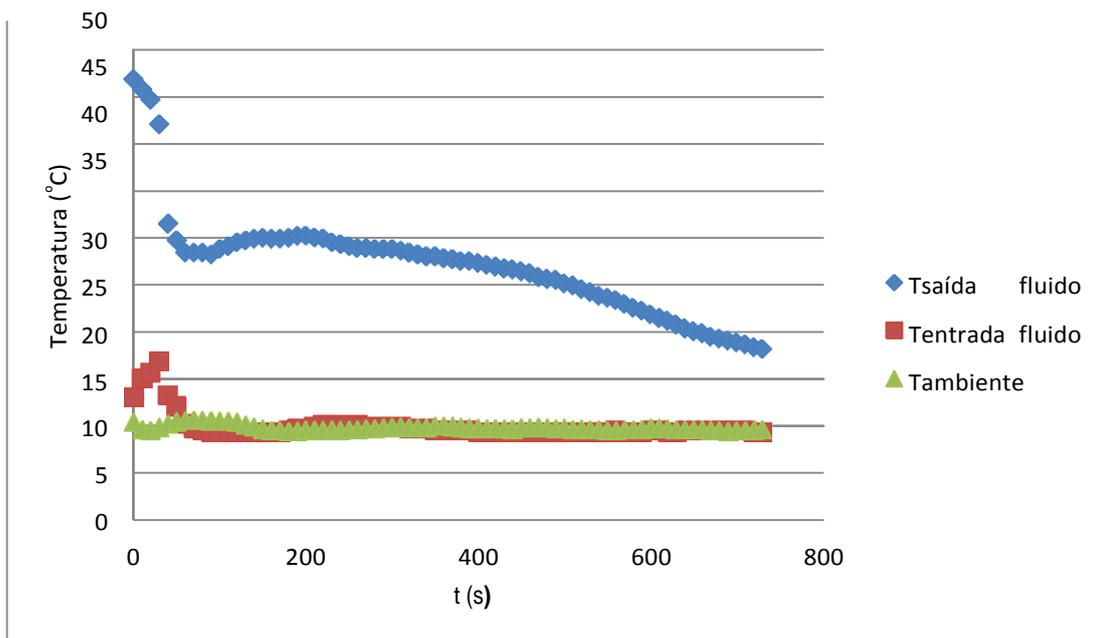


Figura 37 – Temperatura de saída, de entrada do fluido e temperatura ambiente.

A correção inicial das temperaturas do fluido à entrada e à saída é rápida e visível na figura 37. A transmissão de energia pelo PCM ao fluido é visível e declina com o tempo como se observa na temperatura de saída do fluido.

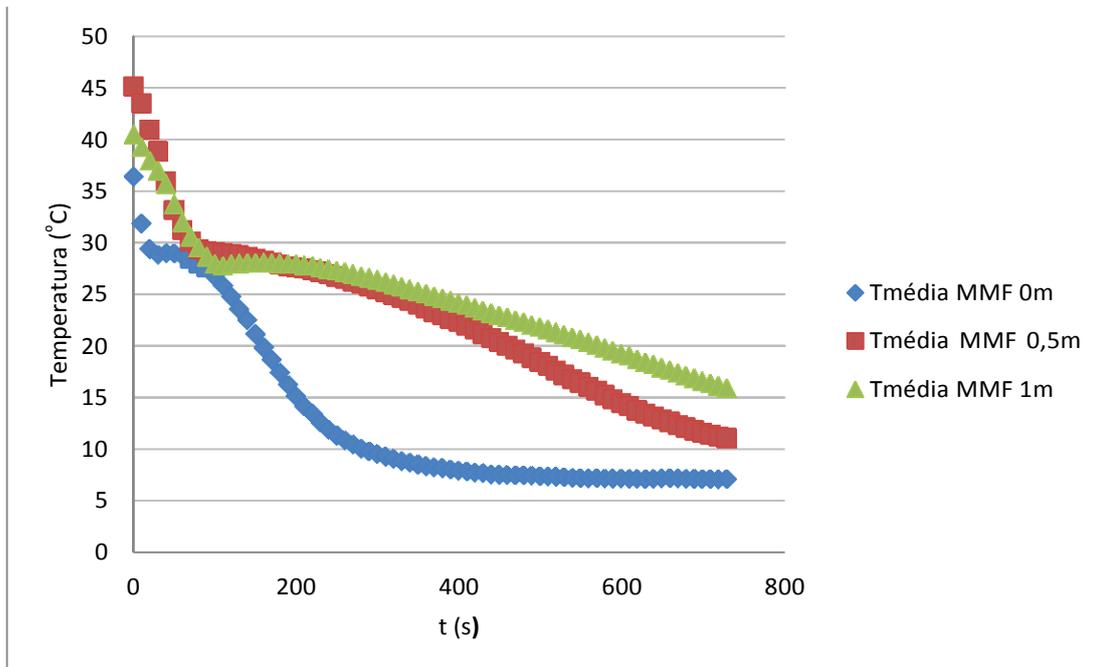


Figura 38 - Temperatura média do material de mudança de fase nas posições 0; 0,5 e 1 m.

A temperatura do PCM no início do ensaio estabiliza à volta dos 30°C e aí se mantém por cerca de 100 segundos. Após os 100 segundos a temperatura do PCM na posição inicial do tubo perde a capacidade rapidamente enquanto as posições a meio e no final do tubo desenham patamar mais longo que poderá indicar o patamar de mudança de fase, figura 38.

4.1.2 TESTE 2

Tabela 15 – Resultados registados no teste 2.

Tempo de teste (s)	520
Massa de fluido energizada (g)	78,34
Caudal mássico de fluido (g / s)	0,26
v_m do ambiente (m / s)	0,89
T_m do ambiente ($^{\circ}\text{C}$)	14,79
T_m de entrada do fluido ($^{\circ}\text{C}$)	10,90
Potência média fornecida (W)	1,50
Energia disponibilizada (J)	1133,01
Re, laminar	124

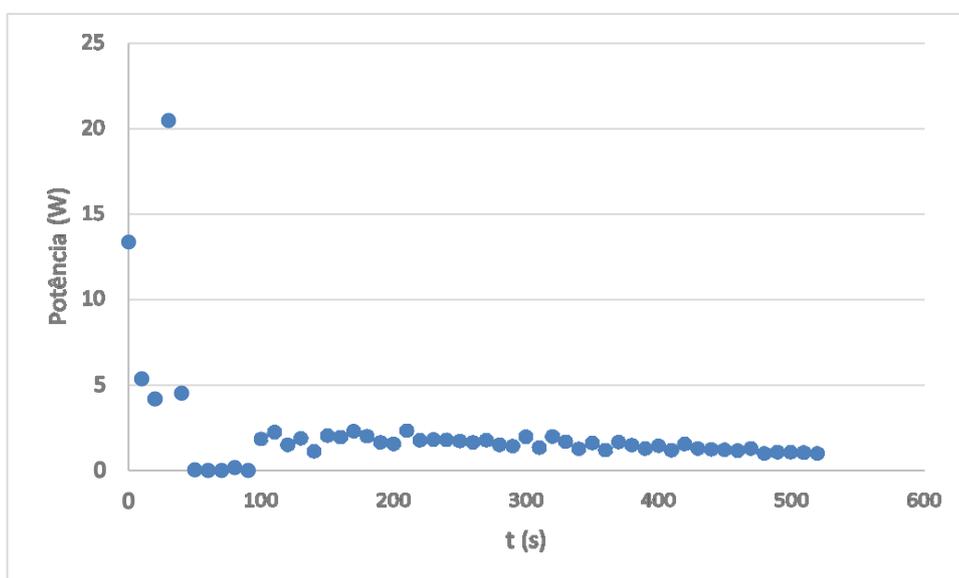


Figura 39 - Potência disponibilizada do fluido durante o ensaio laboratorial.

Este teste disponibilizou 1,13 kJ de energia ou 1,5 W para 520 segundos de teste e para os fatores de controlo A1B2C2D2. A potência segue o esperado tendo uma amplitude entre pontos superior no início do teste onde há ainda um gradiente térmico superior etapa após a qual converge e com menor declive, figura 39.

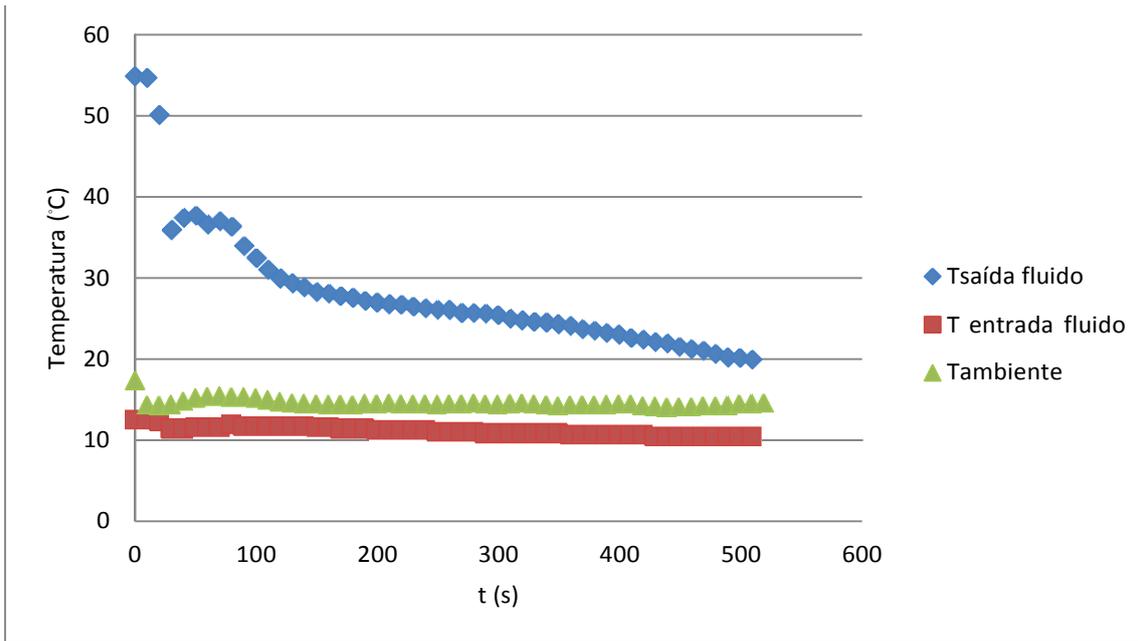


Figura 40 - Temperatura de saída e entrada do fluido e temperatura do ambiente.

A correção inicial das temperaturas do fluido à entrada e à saída é rápida e visível na figura 40. A transmissão de energia pelo PCM ao fluido é visível e declina com o tempo como se observa na temperatura de saída do fluido, figura 40.

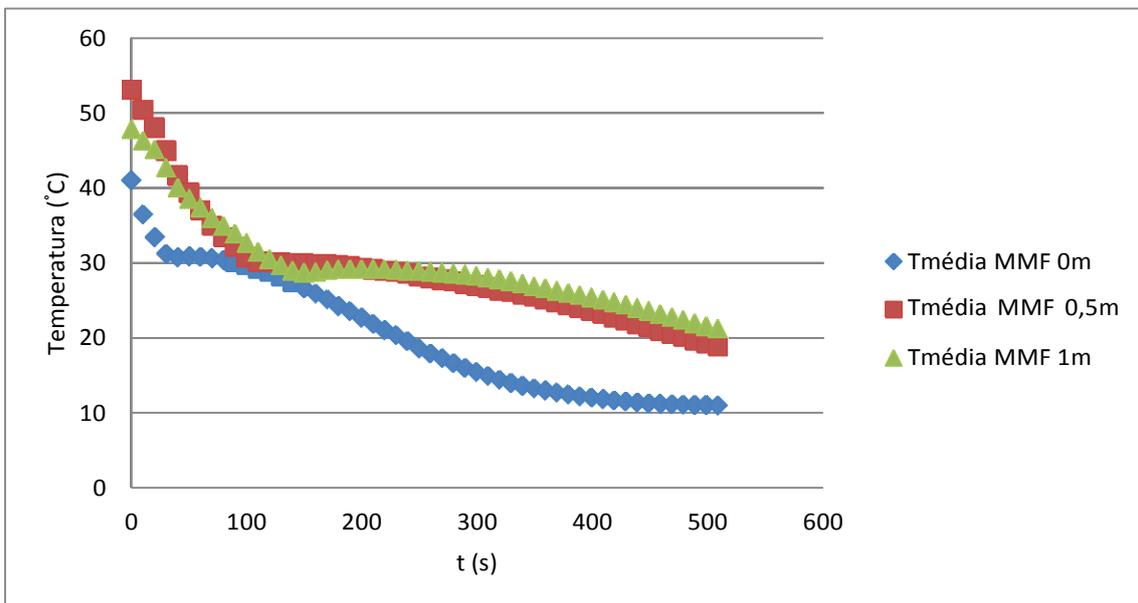


Figura 41 – Temperatura média do material de mudança de fase de fase nas posições 0; 0,5 e 1 m.

É muito idêntico ao teste 1, contudo tem a particularidade de demonstrar pelo observado na figura 41 um efeito interessante, a temperatura do PCM no início do tubo estabiliza aos 30°C e aí se mantém por cerca de 100 segundos. Após os 100 segundos a temperatura do PCM a meio do tubo desenha um patamar idêntico até aos 200 segundos altura em que a temperatura do PCM no final do tubo segue a mesma tendência. Este facto

leva a crer que nesse patamar de temperatura e no sentido do escoamento se propaga a mudança de fase a temperatura constante a que se refere a transmissão de energia latente, figura 41.

4.1.3 TESTE 3

Tabela 16 – Resultados registados no teste 3.

Tempo de teste (s)	630
Massa de fluido energizada (g)	161,32
Caudal mássico de fluido (g / s)	0,19
v_m do ambiente (m / s)	0,99
T_m do ambiente ($^{\circ}\text{C}$)	20,15
T_m de entrada do fluido ($^{\circ}\text{C}$)	14,7
Potência média fornecida (W)	2,31
Energia disponibilizada (J)	1830,97
Re, laminar	148

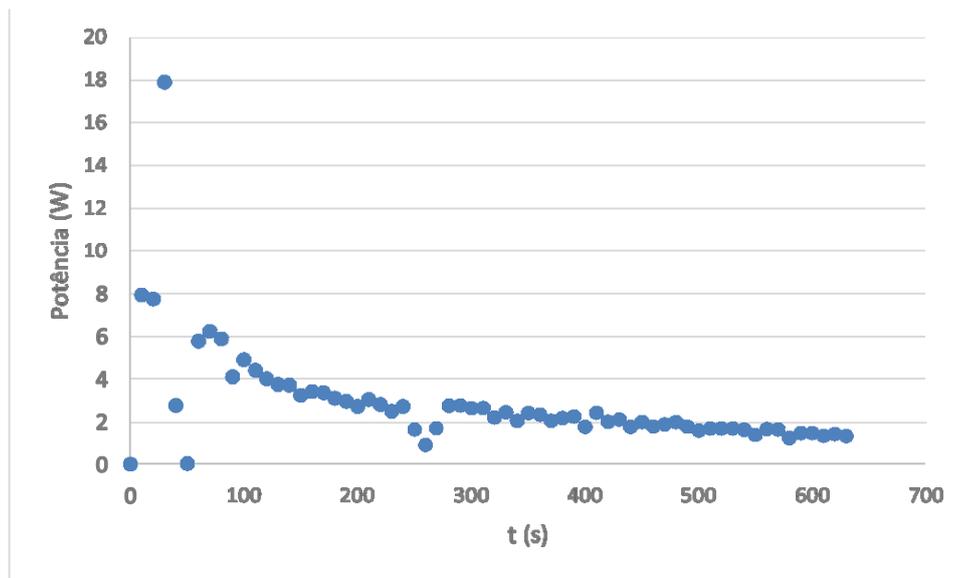


Figura 42 - Potência disponibilizada do fluido durante o ensaio laboratorial.

Este teste disponibilizou 1,8 kJ de energia. Os fatores de controlo são A1B3C3D3. A disponibilização de energia segue uma dispersão de pontos mais regular e decaí mais lentamente., figura 42.

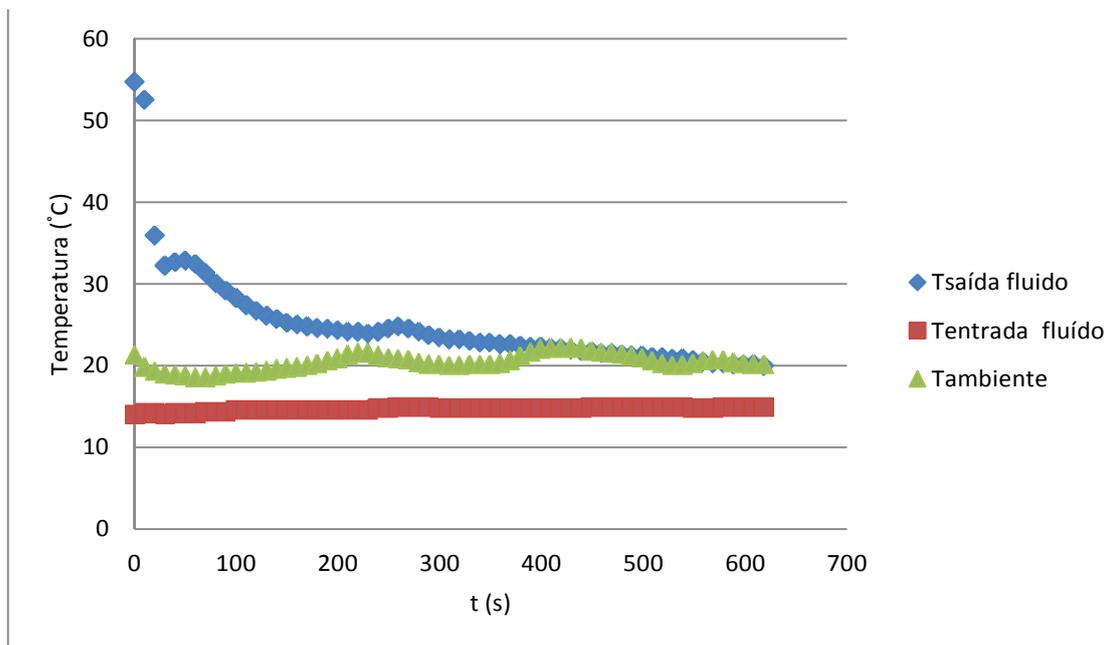


Figura 43 - Temperatura de saída e entrada do fluido e temperatura do ambiente.

A correção inicial das temperaturas do fluido à entrada e à saída é rápida e visível na figura 43. Este teste sofreu um pico na temperatura aos 250 segundos por razão não identificada, figura 43.

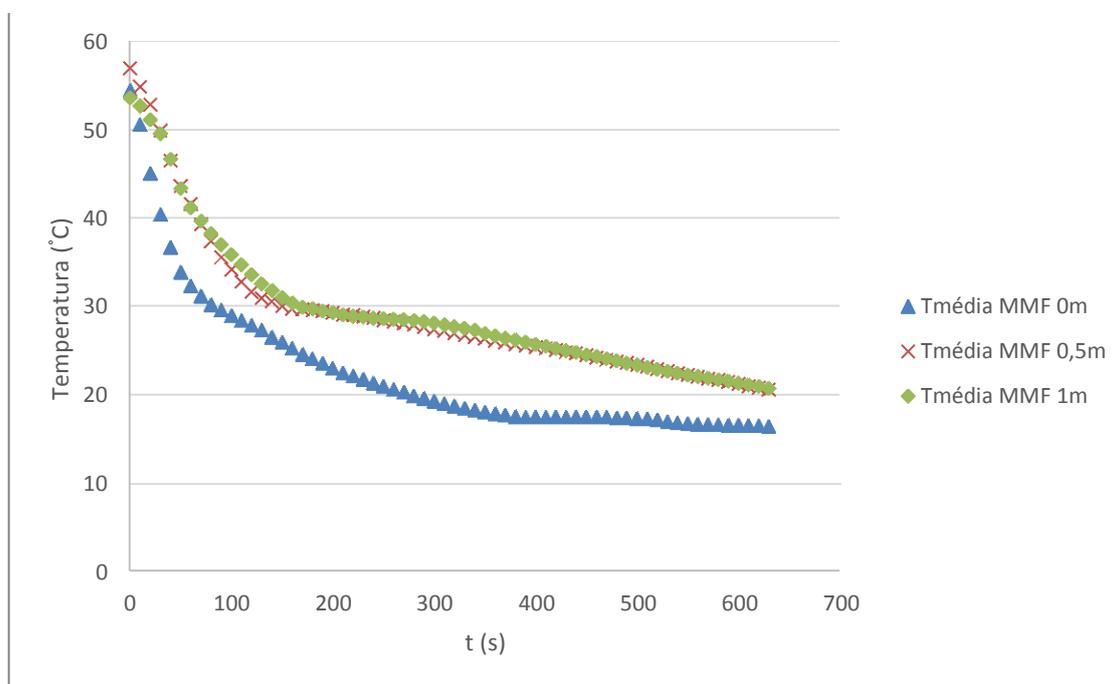


Figura 44 - Temperatura média do material de mudança de fase nas posições 0; 0,5 e 1 m.

A temperatura do PCM no início do ensaio estabiliza à volta dos 30°C e aí se mantém por cerca de 100 segundos. Após a temperatura do PCM na posição inicial do tubo perde a capacidade rapidamente enquanto

as posições a meio e no final do tubo desenham patamar mais longo que poderá indicar o patamar de mudança de fase, figura 44.

4.1.4 TESTE 4

Tabela 17 – Resultados registados no teste 4.

Tempo de teste (s)	530
Massa de fluido energizada (g)	88,3
Caudal mássico de fluido (g / s)	0,16
v_m do ambiente (m / s)	1,45
T_m do ambiente ($^{\circ}C$)	10,27
T_m de entrada do fluido ($^{\circ}C$)	15,2
Potência média fornecida (W)	1,23
Energia disponibilizada (J)	811,20
Re, laminar	113

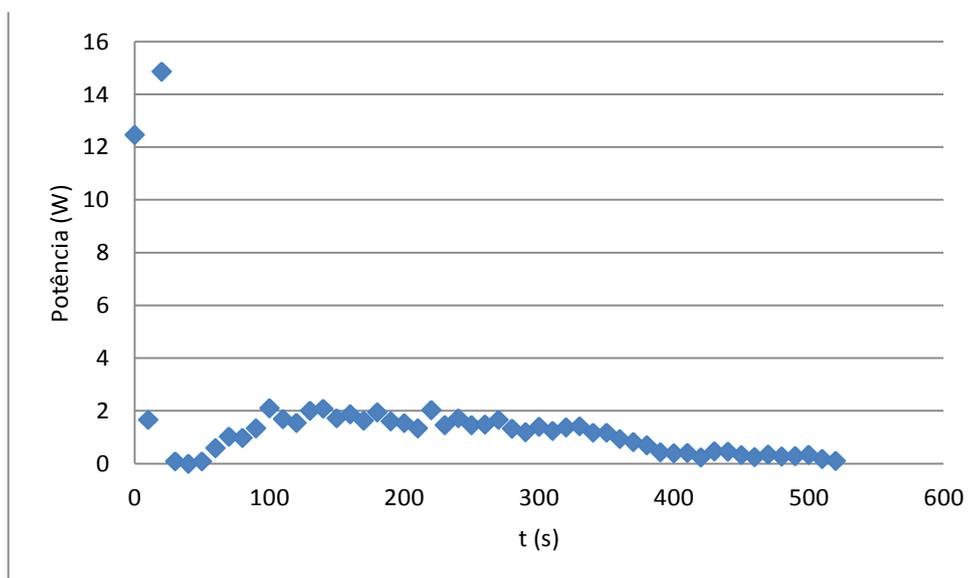


Figura 45 - Energia disponibilizada do fluido durante o ensaio laboratorial.

O teste 4 caracterizou-se pelos fatores de controlo nos patamares seguintes, A2B1C2C3. A disponibilização de energia neste ensaio rapidamente estabiliza tendo quase uma distribuição horizontal e num total de 0,8 kJ, figura 45.

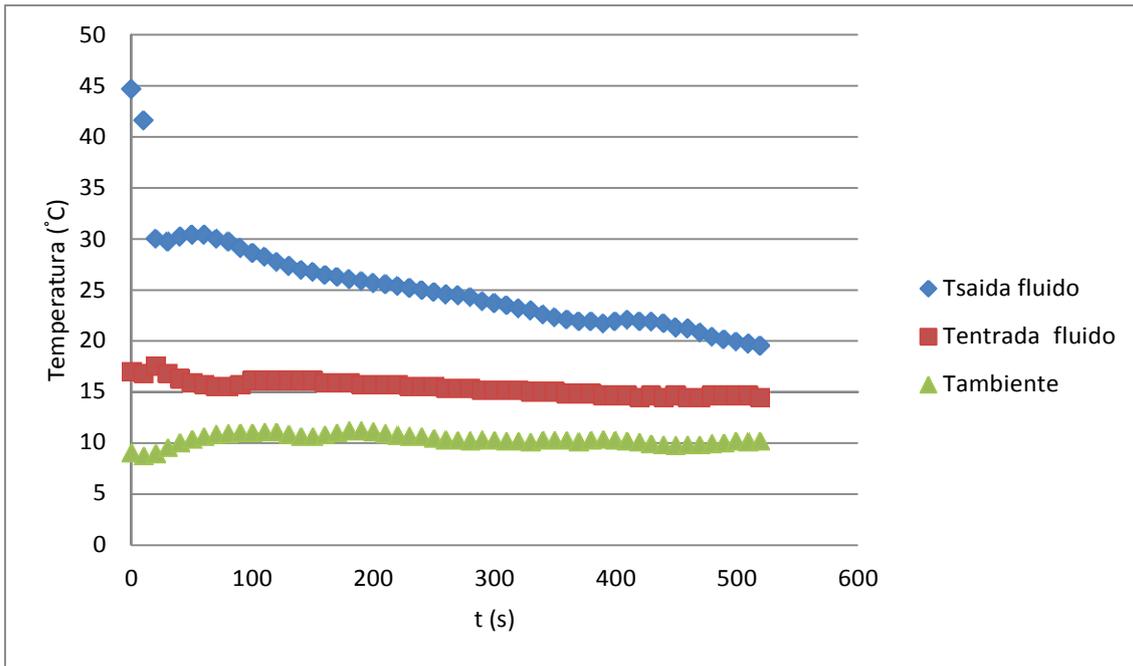


Figura 46 - Temperatura de saída e entrada do fluido e temperatura do ambiente.

Enquanto as temperaturas de entrada e ambiente permanecem razoavelmente constantes a temperatura de entrada do fluido segue uma tendência que apresenta ter quatro patamares distintos aos 30, 25, 22 e 20°C, figura 46. É um resultado interessante de explorar.

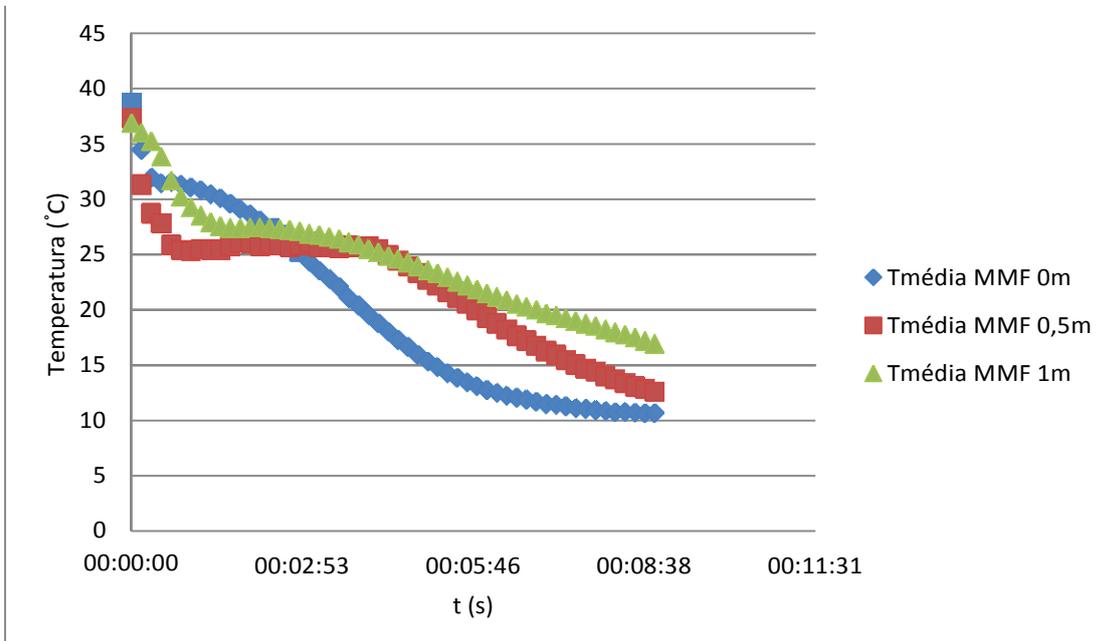


Figura 47- Temperatura média do material de mudança de fase nas posições 0; 0,5 e 1 m.

Apesar da temperatura do PCM no final do tubo não obedecer à tendência, as restantes posições aparecem com um patamar desta vez aos 25°C bastante prolongado, precisamente o efeito que se pretende estender e que corresponde mais uma vez à mudança de fase e libertação de energia a temperatura constante, figura 47.

4.1.5 TESTE 5

Tabela 18 – Resultados registados no teste 5.

Tempo de teste (s)	180
Massa de fluido energizada (g)	44,14
Caudal mássico de fluido (g / s)	0,15
v_m do ambiente (m / s)	1,45
T_m do ambiente ($^{\circ}\text{C}$)	15,04
T_m de entrada do fluido ($^{\circ}\text{C}$)	5,2
Potência média fornecida (W)	3,46
Energia disponibilizada (J)	1334,56
Re, laminar	495

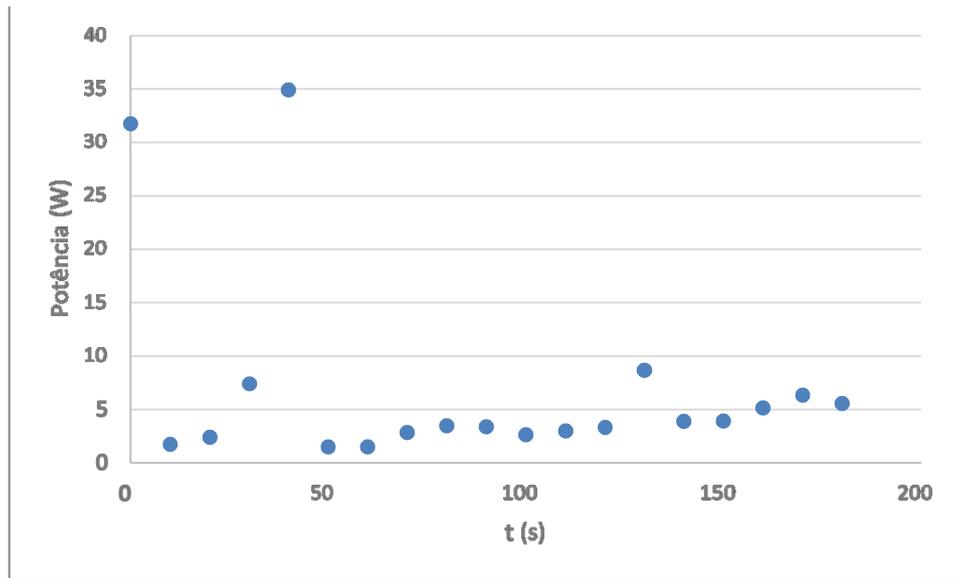


Figura 48 - Potência disponibilizada do fluido durante o ensaio laboratorial.

O teste 5 caracterizou-se na combinação de fatores A2B2C3D1, disponibilizou 1,3 kJ de energia. Este é o ensaio mais rápido e que menos tempo levou a atingir o patamar dos 20 $^{\circ}\text{C}$. É o teste que mais influencia na disponibilização de energia. De registar que a entrega de energia segue uma tendência contrária até ao momento. Tem neste caso declive crescente, sugerindo que liberta mais energia para o final do ensaio, figura 48.

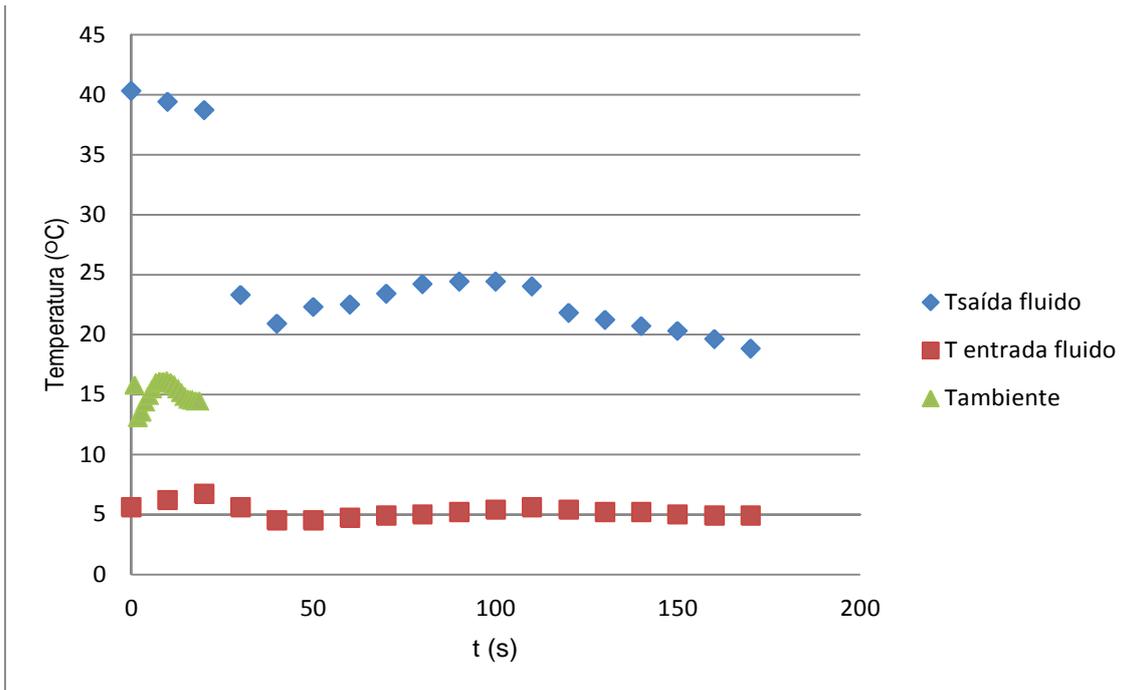


Figura 49 - Temperatura de saída e entrada do fluido e temperatura do ambiente.

Enquanto as temperaturas de entrada e ambiente permanecem razoavelmente constantes a temperatura de entrada do fluido cai drasticamente e mantém-se durante grande parte do ensaio entre os 20 e os 25°C, figura 49.

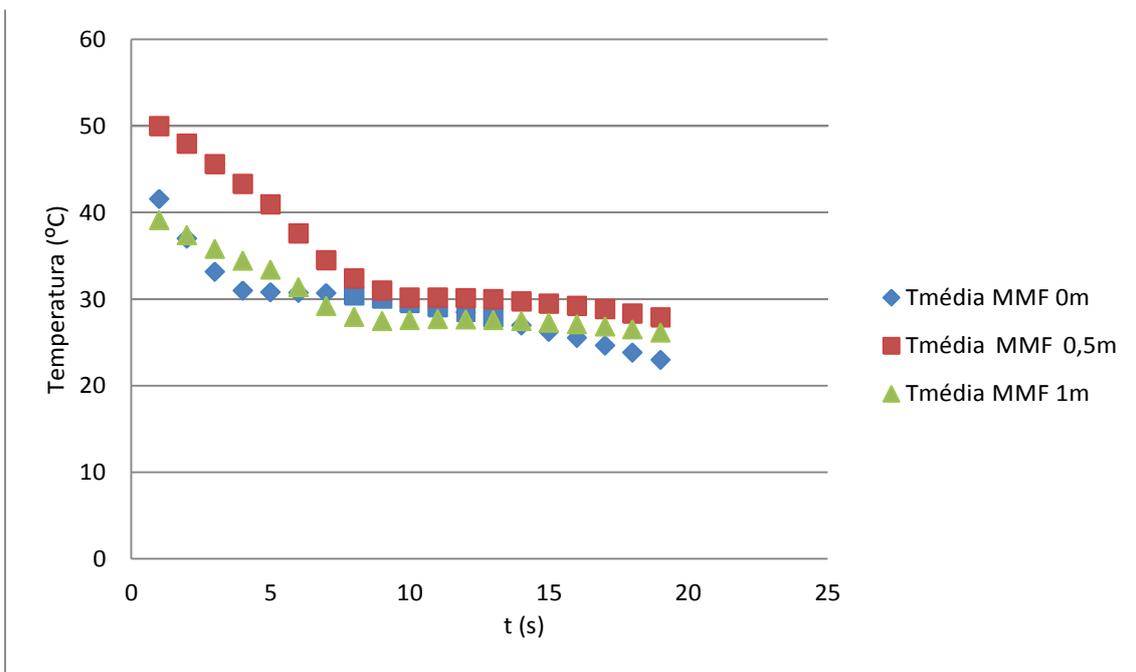


Figura 50 - Temperatura média do material de mudança de fase nas posições 0; 0,5 e 1 m.

As temperaturas do PCM desenham um patamar que poderá indicar o patamar de mudança de fase, figura 50.

4.1.6 TESTE 6

Tabela 19 – Resultados registados no teste 6.

Tempo de teste (s)	1040
Massa de fluido energizada (g)	85,68
Caudal mássico de fluido (g / s)	0,170
v_m do ambiente (m / s)	1,47
T_m do ambiente (°C)	18,62
T_m de entrada do fluido (°C)	11,10
Potência média fornecida (W)	0,52
Energia disponibilizada (J)	987,70
Re, laminar	29

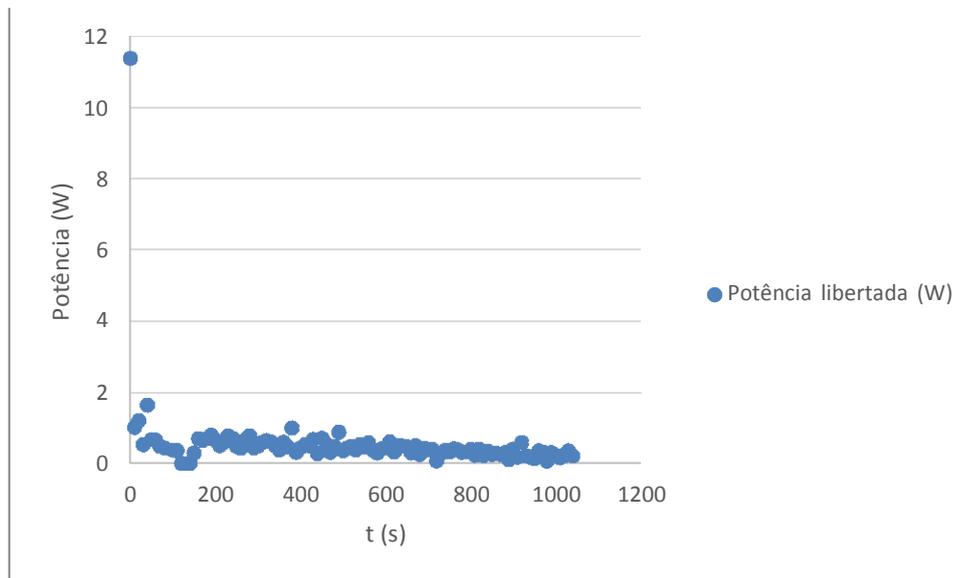


Figura 51 – Potência disponibilizada do fluido durante o ensaio laboratorial.

Com os parâmetros A2B3C1D2 obtivemos os gráficos seguintes que caracterizam a disponibilização de energia de forma muito estável, figura 51, com um total energético disponibilizado de 0,98 kJ no teste mais longo a decair aos 20°C, figura 51.

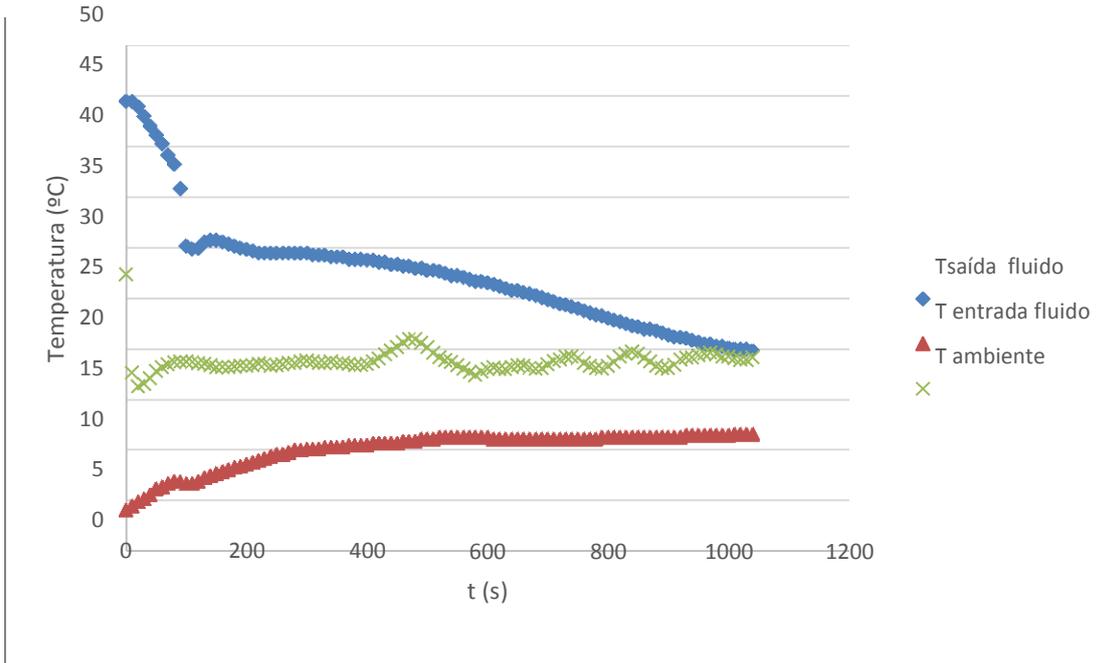


Figura 52 - Temperatura de saída e entrada do fluido e temperatura do ambiente.

Enquanto as temperaturas de entrada permanece razoavelmente constante a temperatura ambiente do fluido segue uma tendência irregular, figura 52.

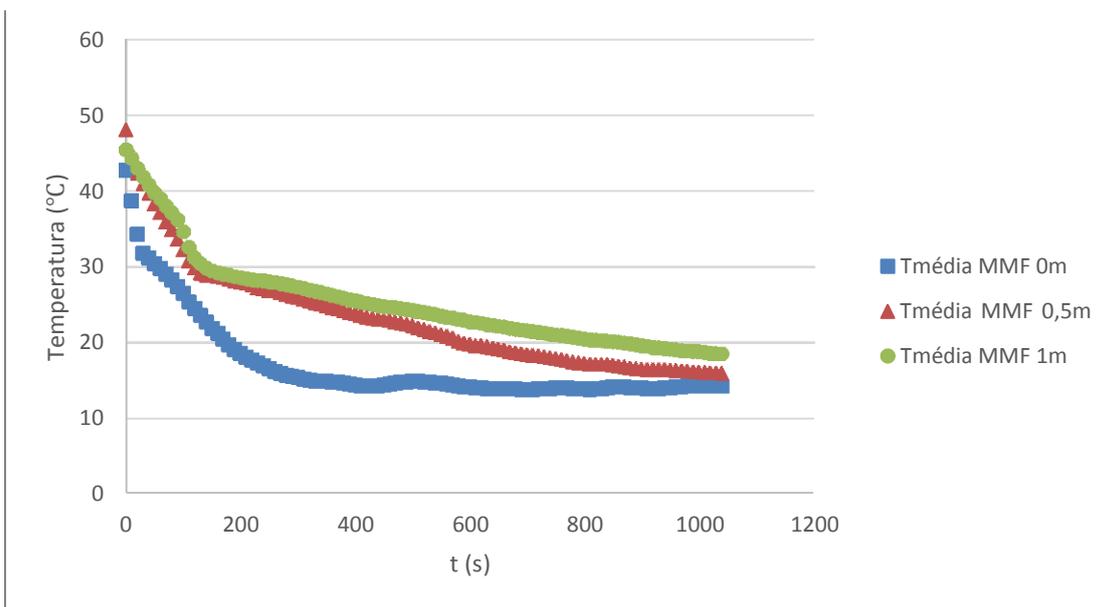


Figura 53 - Temperatura média do material de mudança de fase nas posições 0; 0,5 e 1 m.

As temperaturas do PCM nas três posições não apresentam a manutenção da temperatura aos 30°C por um patamar prolongado, no entanto, as posições médias e finais do tubo apresentam uma entrada no patamar que rapidamente se dilui, figura 53.

4.1.7 TESTE 7

Tabela 20 – Resultados registados no teste 7.

Tempo de teste (s)	320
Massa de fluido energizada (g)	59,82
Caudal mássico de fluido (g / s)	0,08
v_m do ambiente (m / s)	1,91
T_m do ambiente (°C)	11,23
T_m de entrada do fluido (°C)	9,8
Potência média fornecida (W)	2,41
Energia disponibilizada (J)	826,94
Re, laminar	218

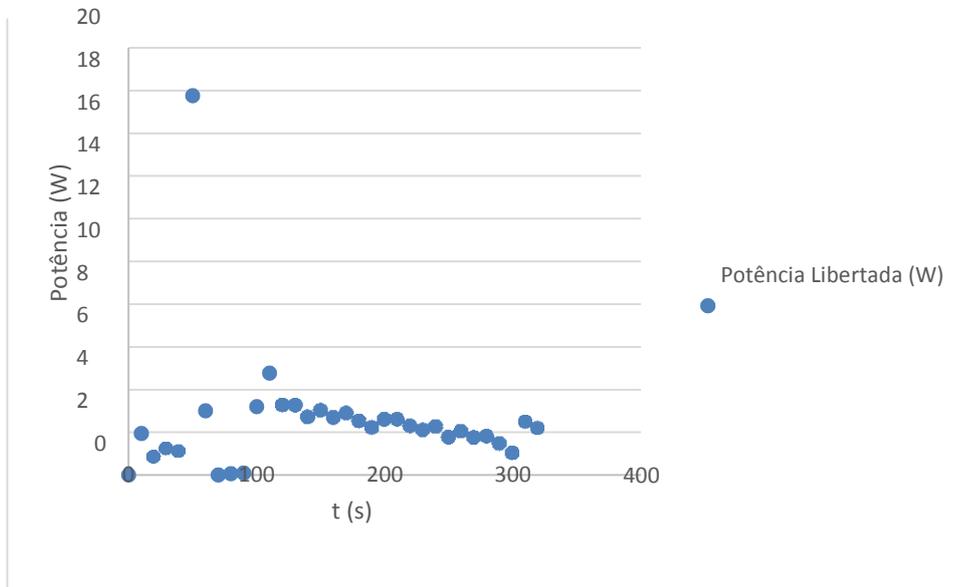


Figura 54 - Potência disponibilizada do fluido durante o ensaio laboratorial.

O teste 7 caracterizou-se pela conjugação A3B1C3D2 que levou a obter 0,83 kJ de energia. Comportou-se de forma regular, figura 54.

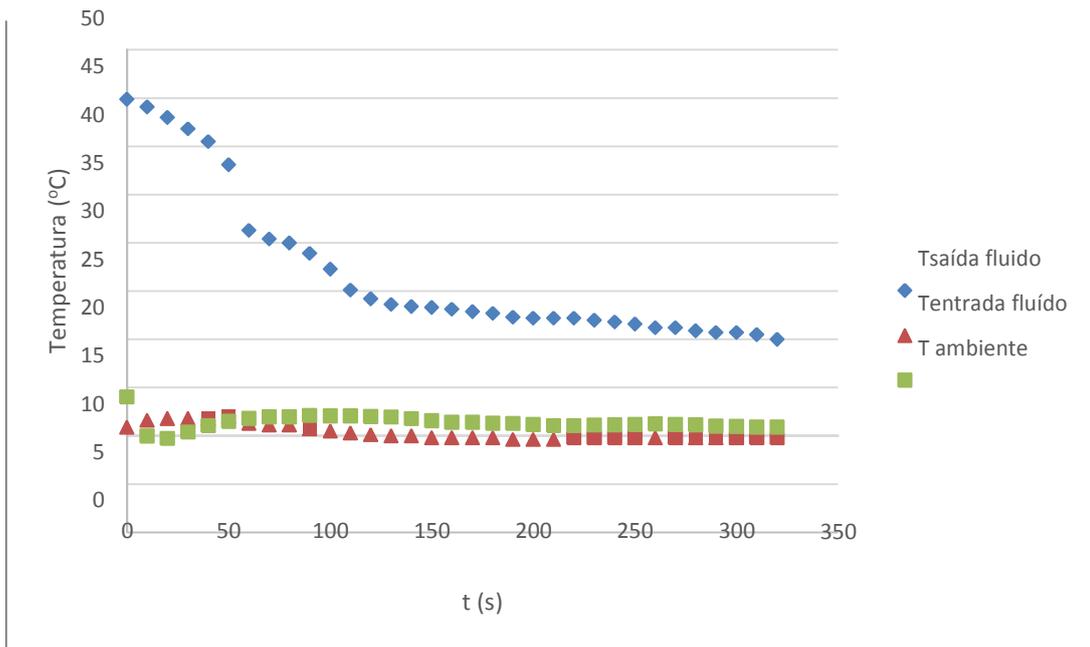


Figura 55 - Temperatura de saída e entrada do fluido e temperatura do ambiente.

As temperaturas de entrada e ambiente permanecem razoavelmente estáveis na figura 55.

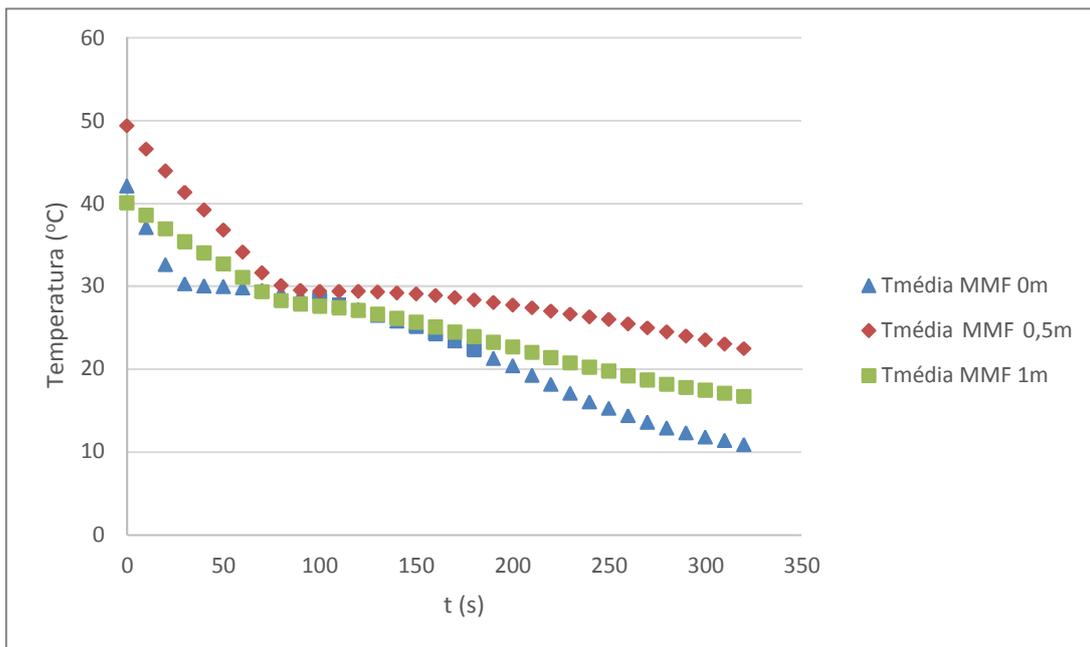


Figura 56 - Temperatura média do material de mudança de fase nas posições 0; 0,5 e 1 m.

O patamar aos 30°C está presente para as três posições de leitura de temperatura de PCM e na ordem que se esperaria, 0m, 0,5m e após 1m, figura 56.

4.1.8 TESTE 8

Tabela 21 – Resultados registados no teste 8.

Tempo de teste (s)	790
Massa de fluido energizada (g)	63,28
Caudal mássico de fluido (g / s)	0,073
v_m do ambiente (m / s)	1,99
T_m do ambiente (°C)	15,56
T_m de entrada do fluido (°C)	15,80
Potência média fornecida (W)	0,19
Energia disponibilizada (J)	192,55
Re, laminar	37

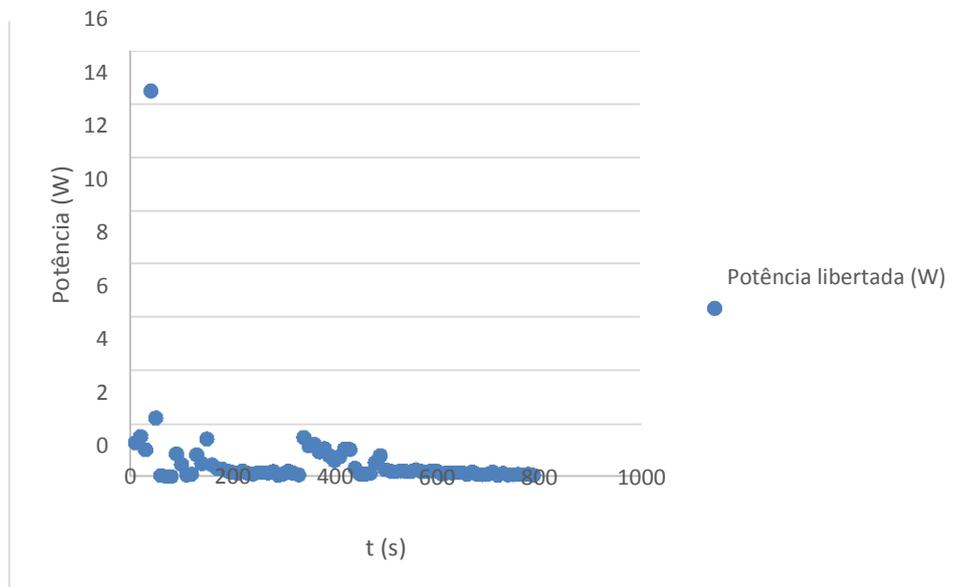


Figura 57 - Potência disponibilizada do fluido durante o ensaio laboratorial.

O teste 8 marca os parâmetros A3B1C1D3 para libertar 0,193 k em 790 segundos. Alguma variação está presente do início do teste aos 200 segundos e repetidamente dos 350 aos 450 segundos. Perturbações como erro de leitura de temperatura ou bolhas de ar presentes no tubo poderam ter sido causa do efeito mencionado, figura 57.

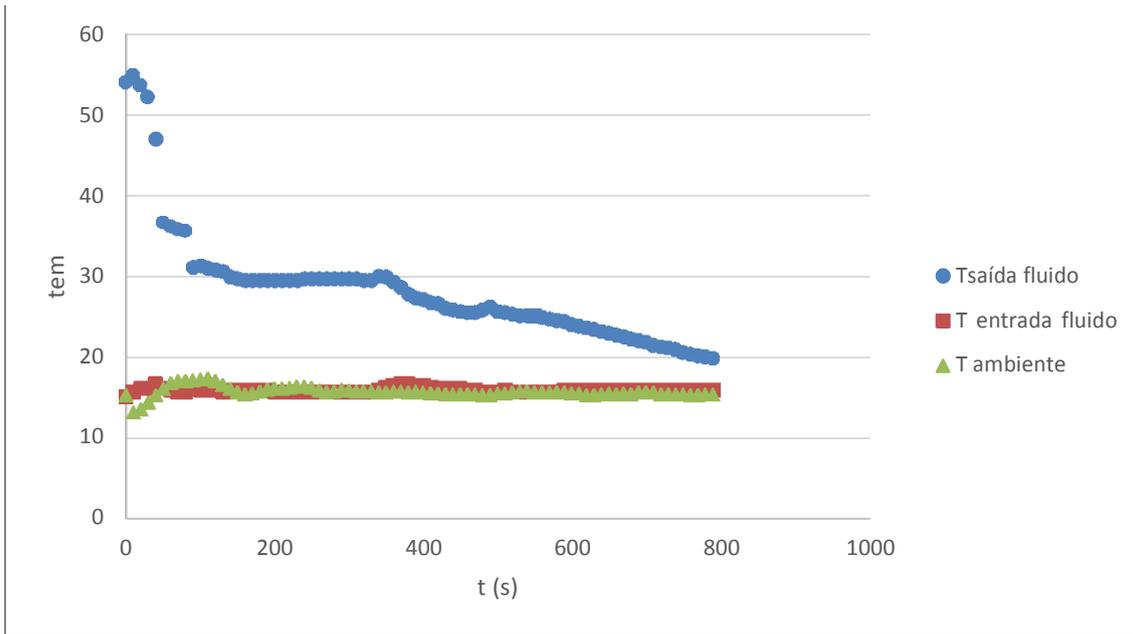


Figura 58 - Temperatura de saída e entrada do fluido e temperatura do ambiente.

As temperaturas de entrada e ambiente permanecem razoavelmente estáveis na figura 58.

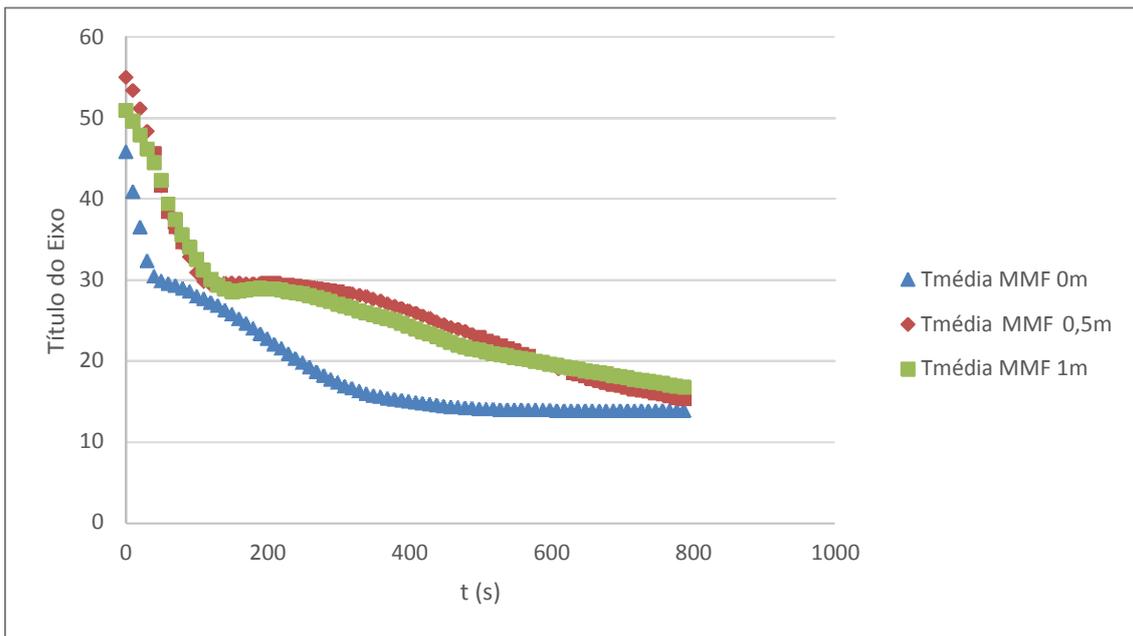


Figura 59 - Temperatura média do material de mudança de fase nas posições 0; 0,5 e 1 m.

As temperaturas do PCM na posição inicial e final do tubo representam o patamar de mudança de fase, figura 59.

4.1.9 TESTE 9

Tabela 22 – Resultados registados no teste 9.

Tempo de teste (s)	630
Massa de fluido energizada (g)	93,80
Caudal mássico de fluido (g / s)	0,081
v_m do ambiente (m / s)	1,97
T_m do ambiente (°C)	20,42
T_m de entrada do fluido (°C)	8,20
Potência média fornecida (W)	1,39
Energia disponibilizada (J)	1182,29
R, laminar	86

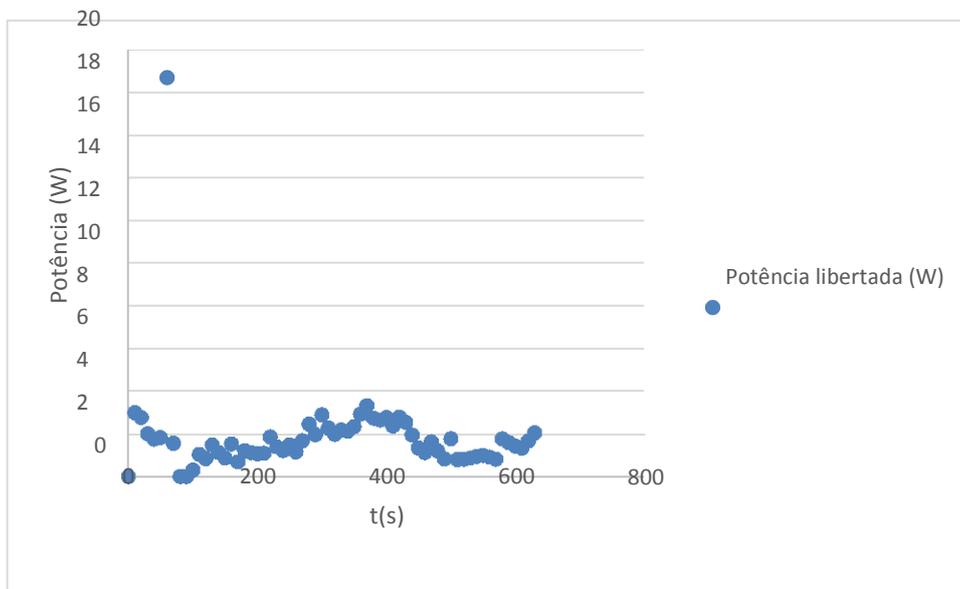


Figura 60 – Potência disponibilizada do fluido durante o ensaio laboratorial.

O teste 9 apresenta após seleção de parâmetros A3B3C2D1, 0,19 J e 630 segundos de teste. Alguma variação existente na entrega de energia assim como na temperatura de saída do fluido, figura 60.

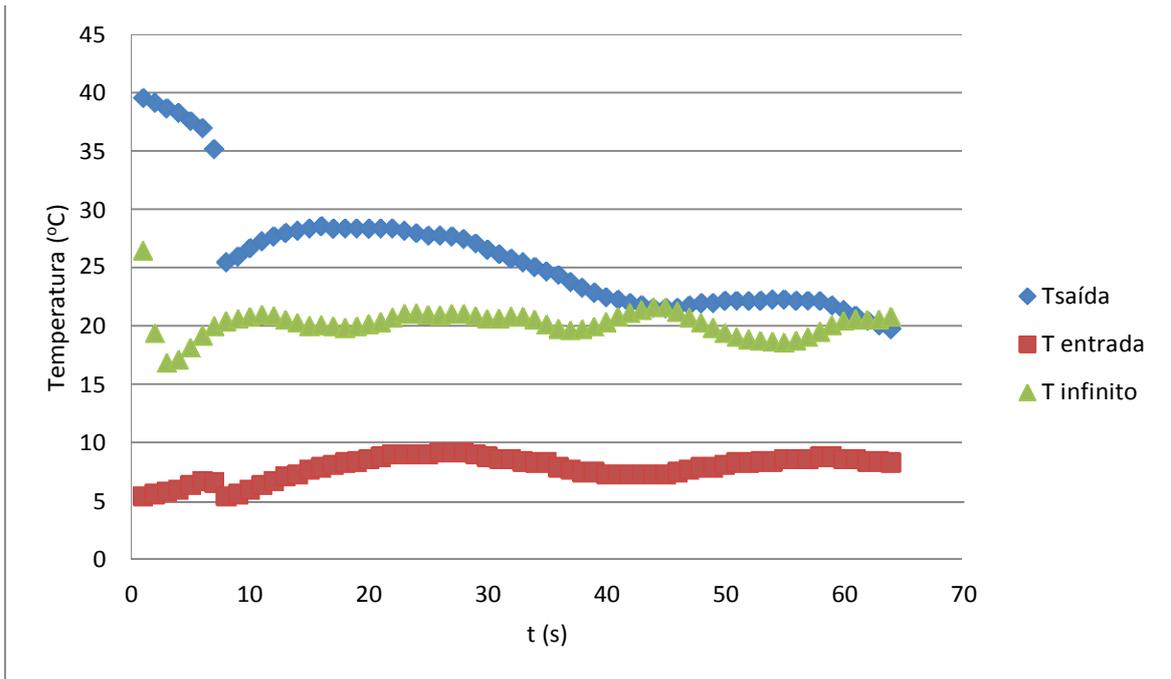


Figura 61 – Temperatura de saída e entrada do fluido e temperatura do ambiente.

As temperaturas de entrada e ambiente permanecem razoavelmente estáveis na figura 61.

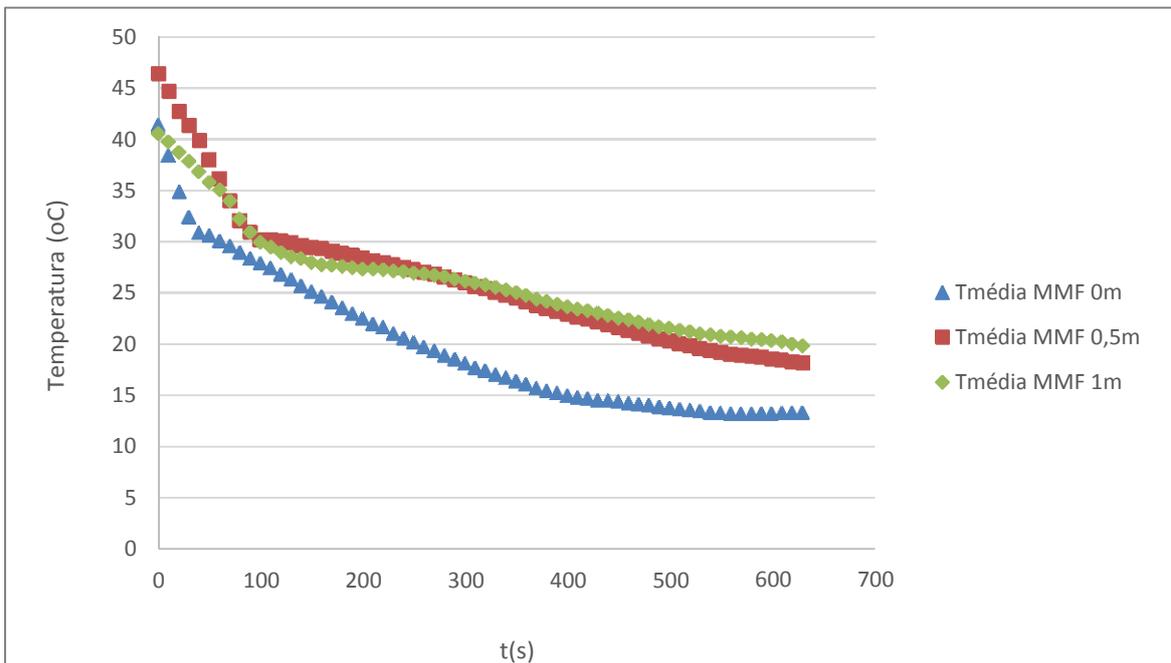


Figura 62 – Temperatura do material de mudança de fase nas posições 0; 0,5 e 1 m.

As temperaturas do PCM na posição inicial média e final do tubo não representam o patamar de mudança de fase.

4.2 RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS TESTES 1 A 9

Os resultados são válidos. Obtidos os perfis de podemos calcular a potência libertada média \bar{P} (W) calculada com base na equação 4, Onde \dot{m} é o caudal mássico (kg/s) e Δt é o intervalo de tempo entre o instante n e o instante $n-1$ e igual a dez segundos.

4.2.1 DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA

A potência foi calculada com base na seguinte expressão;

$$\bar{P} = \frac{\dot{m} \cdot c_{p_{H_2O}} \cdot \Delta T}{\Delta t} \text{ (W)} \quad (4)$$

4.2.2 DETERMINAÇÃO DA ENERGIA

A energia total é o somatório da energia a cada intervalo de registo;

$$Q = \bar{P} * \Delta t \text{ (J)} \quad (5)$$

4.2.3 DETERMINAÇÃO DO CAUDAL

Da mesma forma o Caudal mássico de fluido (kg / s) foi calculado usando a expressão:

$$\dot{m} = m * \Delta t \text{ (kg / s)} \quad (6)$$

Tabela 23 – Resultados registados nos testes 1 a 9.

Teste	\dot{m} fluido (g / s)	v ambiente média (m / s)	T ambiente média (°C)	T fluido entrada (°C)	\bar{P} (W)	Q (kJ)	Tempo de teste (s)
1	0,073	0,96	9,61	9,4	0,24	0,39	740
2	0,163	0,89	14,79	10,9	1,5	1,13	480
3	0,256	0,99	20,15	14,7	2,26	1,83	630
4	0,165	1,45	10,27	15,2	1,23	0,81	530
5	0,245	1,45	15,05	5,2	3,47	1,33	180
6	0,083	1,47	18,62	11,1	0,52	0,99	1040
7	0,192	1,91	11,23	9,8	2,24	0,83	320
8	0,081	1,99	15,56	15,8	0,19	0,19	790
9	0,149	1,97	20,42	8,2	1,39	1,18	630

4.2.4 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE REYNOLDS

O número de Reynolds do escoamento de fluido de cada ensaio foi calculado com base na expressão seguinte,

$$Re = \frac{vD}{\mu} \quad (7)$$

Na qual: Re é o número de Reynolds; v é a velocidade do fluido (m/s); D é o diâmetro da tubagem (m), μ a viscosidade cinemática do fluido (m²/s).

Para escoamentos em regime laminar o número de Reynolds é inferior a 2000. Entre esse valor e 4000 encontra-se uma zona crítica, na qual não se pode determinar com segurança a perda de carga. Para as condições de escoamento perfeitamente desenvolvido em tubo circular fechado se o resultado de Re no escoamento for superior a 4000, o movimento nas condições correntes, será sempre turbulento. Pelo que se conclui que os escoamentos são todos laminares.

Antes do calculo de Re, determinou-se a velocidade do escoamento que do qual apenas registamos o caudal com base na equação:

$$Q = v \cdot A \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (8)$$

Tabela 24 - Parâmetros determinados para obtenção do número de Reynolds.

Teste número	\dot{m} fluido (kg / s)	T _{fluido entrada} (°C)	μ (m/s ²)	Tempo de teste (s)	Velocidade caudal (m/s)	Re
1	0,073	9,4	9,86193E-05	740	0,0103	36
2	0,163	10,9	0,000339482	480	0,0353	124
3	0,256	14,7	0,000406228	630	0,0422	148
4	0,165	15,2	0,000311228	530	0,0324	113
5	0,245	5,2	0,001360706	180	0,1415	495
6	0,083	11,1	7,9784E-05	1040	0,0083	29
7	0,192	9,8	0,000599822	320	0,0624	218
8	0,081	15,8	0,000102501	790	0,0106	37
9	0,149	8,2	0,000236438	630	0,0246	86

4.3 DESVIOS ENTRE VALORES ALVO E OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE

A tabela 22 apresenta os erros cometidos entre os patamares pretendidos para o controlo de parâmetros e os realmente obtidos. Em condições laboratoriais a aproximação aos valores objetivos é sempre sujeita a erros não controláveis. O parâmetro de controlo com mais desvio é a temperatura do fluido, de entrada. No máximo e para o teste 1 obteve-se um desvio de 88%. O controlo a temperatura não ultrapassa os 11 % do teste 2, o caudal não ultrapassa os 23% no teste 7, a temperatura ambiente erra por 12% no teste 7.

Tabela 25 - Desvios entre valores alvo e obtidos experimentalmente.

Teste Número	Vambiente alvo (m/s)	Vambiente obtido (m/s)	Desvio (%)	Tambiente alvo (°C)	Tambiente obtido (°C)	Desvio (%)	Caudal mássico	Caudal mássico fluido obtido	Desvio (%)	Tfluido alvo (°C)	Tfluido obtido (°C)	Desvio (%)
1	1	0,96	4	10	9,61	4	5	4,39	12	5	9,4	-88
2	1	0,89	11	15	14,79	1	10	9,79	2	10	10,9	-9
3	1	0,99	1	20	20,15	-1	15	15,36	-2	15	14,7	2
4	1,5	1,45	3	10	10,27	-3	10	9,92	1	15	15,2	-1
5	1,5	1,45	3	15	15,05	0	15	14,71	2	5	5,2	-4
6	1,5	1,47	2	20	18,62	7	5	4,95	1	10	11,1	-11
7	2	1,91	5	10	11,23	-12	15	11,5	23	10	9,8	2
8	2	1,99	1	15	15,56	-4	5	4,87	3	15	15,8	-5
9	2	1,97	2	20	20,42	-2	10	8,93	11	5	8,2	-64

4.4 APLICAÇÃO E RESULTADOS DA ANÁLISE DE TAGUCHI

4.4.1 ENERGIA TRANSMITIDA AO FLUÍDO

Após determinados os fatores e níveis de atuação, tabela 26, reduzido o número total de experiências a efetuar, anexo 7.3.1 a 7.3.3 e selecionados os ensaios a realizar, partiu-se para a parte experimental que se encontra resumida na tabela 27.

Tabela 26 - fatores de controlo e níveis de controlo de fator.

Fatores de controlo	Nível 1	Nível 2	Nível 3
A v_{ambiente} (m/s)	1	1,5	2,0
B T_{ambiente} (°C)	10	15	20
C \dot{m}_{fluido} (g/min)	5	10	15
D T_{fluido} (°C)	5	10	15

Tabela 27 – Distribuição dos resultados de energia disponibilizada ao fluído.

Teste número	A	B	C	D	Q (J)
	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	1133,01
3	1	3	3	3	1830,97
4	2	1	2	3	811,20
5	2	2	3	1	1334,56
6	2	3	1	2	987,70
7	3	1	3	2	826,94
8	3	2	1	3	192,55
9	3	3	2	1	1182,29

A análise de Taguchi inicia-se tendo o número de experiências realizadas:

Número de pontos: $n=9$

Podemos então calcular o somatório dos resultados a cada nível e para cada fator, e seguidamente determinar a média de cada um.

$$\text{Pontuação total: } T = \sum_{i=1}^n y_i = 8687,18$$

$$\text{Pontuação média: } \bar{T} = \frac{T}{n} = 965,24$$

Procedeu-se ao cálculo dos somatórios de fatores por nível, isto é, a soma de todas as ocorrências de nível 1, 2 ou 3, para cada um dos fatores isoladamente ou ainda a soma parcial:

$$\text{Soma parcial: } A_1 = 387,96 + 1133,01 + 1830,97 = 3351,94$$

Da qual surgiu a tabela 28.

Tabela 28 – Somas parciais por nível de atuação.

Nível	A V_{ambiente}	B T_{ambiente}	C m_{fluido}	D T_{fluido}
nivel1	3351,94	1568,21	1568,21	2904,81
nivel2	3133,46	2660,12	3126,50	2947,65
nivel3	2201,78	4000,96	3992,47	2834,72

Seguidamente calculou-se a média de cada fator calculado anteriormente,

$$\text{Média soma parcial: } \bar{A}_1 = \frac{A_1}{n} = 372,44$$

De forma a comparar níveis de fatores constroeu-se uma tabela de resposta compilando os resultados do ponto anterior, médias das somas parciais e igualmente estima-se a interação de cada fator e interação calculando a diferença entre níveis e por fator de controlo.

Tabela 29 - Tabela de resposta de fatores onde se representam igualmente as diferenças entre níveis.

Nível	A V_{ambiente}	B T_{ambiente}	C m_{fluido}	D T_{fluido}
nivel1	372,44	174,25	174,25	322,76
nivel2	348,16	295,57	347,39	327,52
nivel3	244,64	444,55	443,61	314,97
nivel1/2	-24,28	121,32	173,14	4,76
nivel2/3	-103,52	148,98	96,22	-12,55
nivel1/3	-127,80	270,31	269,36	-7,79

Podemos agora estimar a magnitude do efeito de cada fator pela comparação dos fatores principais que são as diferenças entre níveis. Da tabela de resposta podemos ver que o efeito caudal do fluido tem efeito severo. O próximo passo é apresentar graficamente os efeitos mais marcantes de fatores e suas interações. Dado que mudanças em níveis com fraco efeito tem baixa influência na transmissão de energia, podem ser ignorados. Quanto maior o declive das linhas maior a influência do efeito.

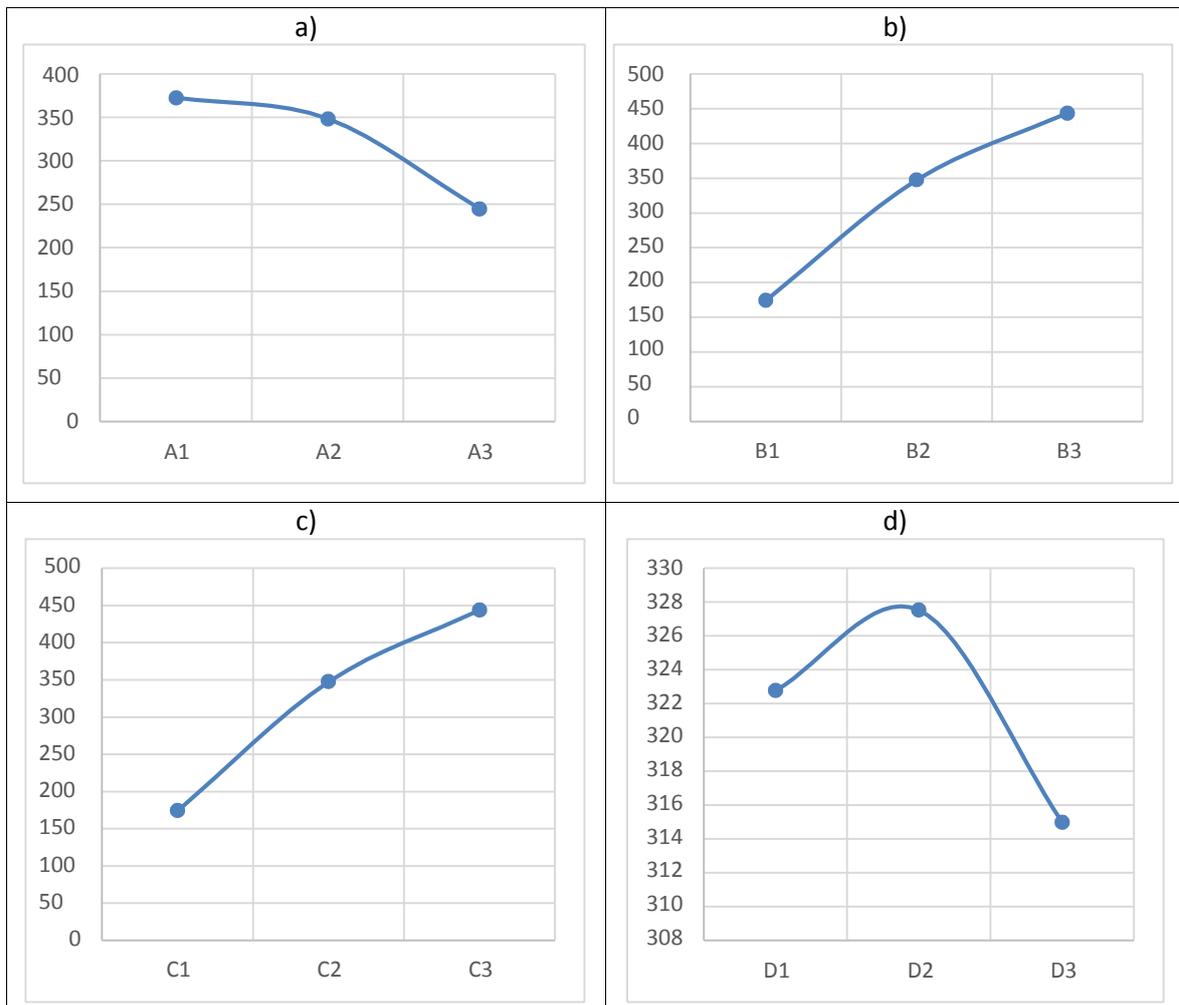


Figura 63 – a) Resposta do parâmetro vambiente b) B Ambiente c) C *m* fluido d) D T fluido

Da análise da figura 64 conclui-se o seguinte o efeito na transmissão de energia:

- Velocidade ambiente: Decresce a transmissão de energia com o aumento de velocidade;
- Temperatura ambiente: Aumenta a transmissão de energia com o aumento de velocidade;
- Caudal fluido: Aumenta a transmissão de energia com o aumento de caudal;
- Temperatura fluido: Aumenta a transmissão de energia até ao nível 2 onde se dá a inversão.

4.4.2 MAXIMIZAÇÃO DE FATORES PARA ENTREGA DE ENERGIA

Os fatores para a maximização da energia transmitida ao fluido são apresentados de seguida. A energia transmitida ao fluido é uma característica maior melhor pelo que se escolhem as iterações de maior magnitude e assim concluímos que A1 é recomendável, B3 é recomendável, C3 é recomendável, D2 é recomendável.

A sugestão para maximização é: A1 B3 C3 D1, ou velocidade ambiente 1,0 m/s, temperatura ambiente 20°C, permite um gradiente de temperatura com o tubo menor que com o fluido o que minimiza a transferência de calor para o ambiente, caudal de fluido 15 g/min, alto caudal proporciona alta troca de calor, e temperatura do fluido 5 °C, proporciona o maior gradiente possível entre o fluido e o PCM.

4.4.3 INFLUENCIADOS FATORES CONTROLÁVEIS NA ENTREGA DE ENERGIA

Após calculada a pontuação da análise de Taguchi podemos determinar a magnitude de influência de cada parâmetro controlável como na tabela 30. Analisando o nível 1, o parâmetro A tem 35,68% de influência sobre os restantes, é dominante ao nível 1. Para o nível 2 encontramos predominância de A, 26,40% seguida de C 26,34 não menos influente. No nível máximo, 3, B é dominante, 30,71%.

A análise dos parâmetros controláveis individualmente, tabela 31 por variação do nível de controle demonstra que para o parâmetro A o nível 1 é de influência forte, 38,58% sendo o nível 3 de menos. O parâmetro B é mediamente influenciado pelo nível 1 mas aumenta para os próximos. O parâmetro C mantém o comportamento do fator B. Contrariamente o parâmetro D é influenciado pelos níveis 1 a 3 de forma muito idêntica. Este parâmetro não é decisivo na transmissão de energia.

Tabela 1 – Influência entre fatores controláveis e para cada nível na energia disponibilizada.

A v_{ambiente}	B T_{ambiente}	C \dot{m}_{fluido}	D T_{fluido}
35,68%	16,70%	16,70%	30,92%
26,40%	22,41%	26,34%	24,84%
16,90%	30,71%	30,64%	21,76%

Tabela 2 - Influência entre níveis de controle e para cada fator na energia disponibilizada.

Nível 1	Nível 2	Nível 3
38,58%	36,07%	25,35%
19,06%	32,33%	48,62%
18,05%	35,99%	45,96%
33,44%	33,93%	32,63%

4.4.4 TEMPO DE DECAIMENTO DE TEMPERATURA A 20°C

Tabela 3 - Distribuição dos resultados de energia disponibilizada ao fluido.

Teste número	A	B	C	D	Tempo de teste (s)
	1	1	1	1	740
	2	1	2	2	480
	3	1	3	3	630
	4	2	1	2	530
	5	2	2	3	180
	6	2	3	1	1040
	7	3	1	3	320
	8	3	2	1	790
	9	3	3	2	630

Tabela 33 - Somas parciais por nível de atuação.

Nível	A $V_{ambiente}$	B $T_{ambiente}$	C \dot{m}_{fluido}	D T_{fluido}
Nivel1	185	1590	2570	1550
Nivel2	175	1450	1640	1840
Nivel3	174	2300	1130	1950

Tabela 34 - Tabela de resposta de fatores onde se representam igualmente as diferenças entre níveis.

Nível	A $V_{ambiente}$	B $T_{ambiente}$	C \dot{m}_{fluido}	D T_{fluido}
Nivel1	20,56	176,67	285,56	172,22
Nivel2	19,44	161,11	182,22	204,44
Nivel3	19,33	255,56	125,56	216,67
Nivel1/2	-1,11	-15,56	-103,33	32,22
Nivel2/3	-0,11	94,44	-56,67	12,22
Nivel1/3	-1,22	78,89	-160,00	44,44

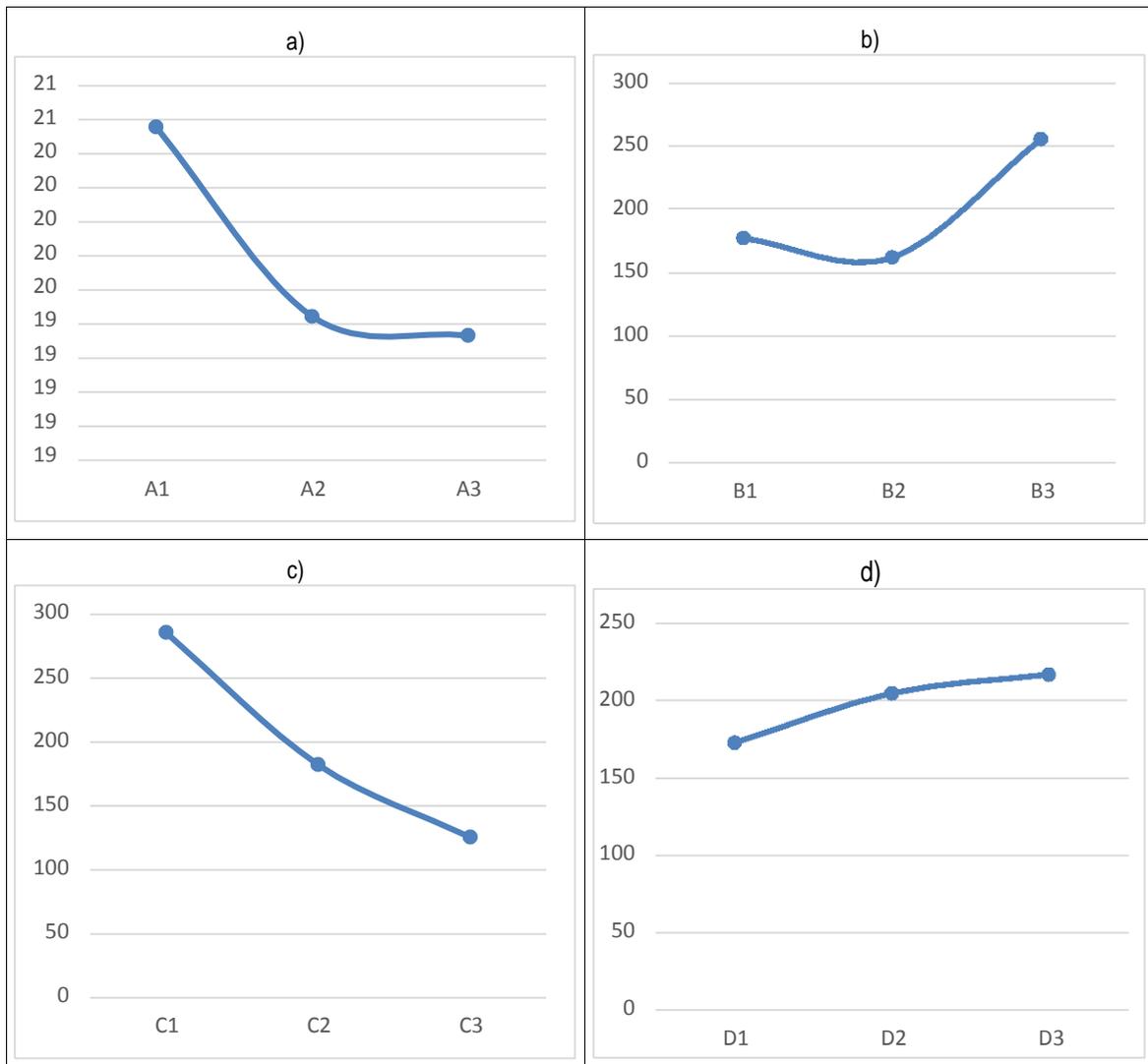


Figura 64 - a) Resposta do parâmetro vambiente b) B Tambiente c) C \dot{m}_{fluido} d) D Tfluido

Da análise da figura 65 conclui-se o seguinte o efeito no decaimento de temperatura a 20°C:

- Velocidade ambiente: Decresce a transmissão de energia com o aumento de velocidade;
- Temperatura ambiente: Aumenta a transmissão de energia com o aumento de velocidade do nível 2 para 3, quando de 1 para 2 decresce ligeiramente;
- Caudal de fluido: Decresce transmissão de energia com o aumento de nível de caudal;
- Temperatura fluido: Aumenta a transmissão de energia com o aumento de temperatura.

4.4.5 MAXIMIZAÇÃO DE FATORES PARA PROLONGAMENTO DE TEMPO DE TESTE

Os fatores para a maximização do tempo de decaimento a 20°C são apresentados de seguida. O tempo de decaimento da temperatura é uma característica maior melhor pelo que se escolhem as iterações de maior magnitude e assim concluímos que A1 é recomendável, B3 é recomendável, C1 é recomendável e D3 é recomendável. De forma prática sugere-se a velocidade ambiente 1,0 m/s, pouca convecção no exterior do tubo, temperatura ambiente 20°C, permite um gradiente de temperatura com o tubo menor que com o fluido o que minimiza a transferência de calor para o ambiente, caudal de fluido 5 g/min, baixo caudal proporciona redução na troca de calor o que prolonga a disponibilidade, temperatura do fluido 15 °C, prolonga a disponibilização energética por ser um gradiente térmico menor, quando comparado à otimização do ponto 4.4.2.

4.4.6 INFLUÊNCIA DOS FATORES CONTROLÁVEIS NO TEMPO DE DECAIMENTO DE TEMPERATURA A 20°C

Analisando desta vez a tabela 35, conclui-se no nível 1, o parâmetro A como pouco influente 3,14% de influência sobre os restantes parâmetros, sendo o dominante o parâmetro C, caudal mássico, 43,60%. Para o nível 2 encontramos predominância de D, 36,04%. No nível máximo B é dominante, 41,41%. A análise dos parâmetros controláveis individualmente por variação do nível de controlo, tabela 36 demonstra que para o parâmetro A, o nível 1, 34,64% domina. O parâmetro B é altamente influenciado pelo nível 3, 43,07%. Para o parâmetro C a influência é de 48,13% no nível 1. Finalmente o parâmetro D é mediantemente influenciado pelos níveis 2 e 3.

Tabela 35 – Influência entre fatores controláveis e para cada nível no tempo de decaimento de temperatura a 20°C.

A V_{ambiente}	B T_{ambiente}	C \dot{m}_{fluido}	D T_{fluido}
3,14%	26,97%	43,60%	26,29%
3,43%	28,40%	32,13%	36,04%
3,13%	41,41%	20,35%	35,11%

Tabela 36 - Influência entre níveis de controlo e para cada fator no tempo de decaimento de temperatura a 20°C.

Nível 1	Nível 2	Nível 3
34,64%	32,77%	32,58%
29,78%	27,15%	43,07%
48,13%	30,71%	21,16%
29,03%	34,46%	36,52%

- 5 - CONCLUSÕES FINAIS E SUGESTÕES

5.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho realizado pretendeu-se testar o comportamento um sistema de aquecimento de fluídos por PCM que demonstrasse a viabilidade deste tipo de sistemas. Os resultados obtidos sugerem que existe uma boa aproximação em relação a sistemas modelados por outros autores. Analisando os resultados obtidos, pode concluir-se que o modelo experimental desenvolvido permite descrever genericamente o comportamento de um sistema de controlo de temperatura por convecção usando materiais termostáveis. O aquecimento de escoamentos laminares por materiais de mudança de fase é possível nas condições deste trabalho.

Para a utilização do aquecimento de fluídos por PCM otimizado recorreu-se à utilização do método de Taguchi de onde se concluiu que:

- Para a transmissão de energia a sugestão para optimização é: A1 B3 C3 D1, ou velocidade ambiente 1,0 m/s, pouca convecção no exterior do tubo, temperatura ambiente 20°C, permite um gradiente de temperatura com o tubo menor que com o fluído o que minimiza a transferência de calor para o ambiente, caudal de fluído 15 g/min, alto caudal proporciona alta troca de calor, e temperatura do fluído 5 °C, proporciona o maior gradiente possível entre o fluido e o PCM.

Da análise da figura 64 conclui-se o seguinte o efeito na transmissão de energia:

- Velocidade ambiente: Decresce a transmissão de energia com o aumento de velocidade;
 - Temperatura ambiente: Aumenta a transmissão de energia com o aumento de velocidade;
 - Caudal fluido: Aumenta a transmissão de energia com o aumento de caudal;
 - Temperatura fluido: Aumenta a transmissão de energia até ao nível 2 onde se dá a inversão.
-
- Para optimização do tempo de decaimento a 20°C sugere-se a velocidade ambiente 1,0 m/s. Pouca convecção no exterior do tubo, temperatura ambiente 20°C, permite um gradiente de temperatura com o tubo menor que com o fluído o que minimiza a transferência de calor para o ambiente, caudal de fluído 5 g/min, baixo caudal proporciona redução na troca de calor o que prolonga a disponibilidade, temperatura do fluído 15 °C, prolonga a disponibilização energética por ser um gradiente térmico menor, quando comparado à optimização do ponto 4.4.2.

Da análise da figura 65 conclui-se o seguinte o efeito no decaimento de temperatura a 20°C:

- Velocidade ambiente: Decresce a transmissão de energia com o aumento de velocidade;
- Temperatura ambiente: Aumenta a transmissão de energia com o aumento de velocidade do nível 2 para 3, quando de 1 para 2 decresce ligeiramente;
- Caudal de fluido: Decresce transmissão de energia com o aumento de nível de caudal;
- Temperatura fluido: Aumenta a transmissão de energia com o aumento de temperatura.

O máximo de energia transmitido ao fluido foi de 1,83 kJ, no teste 3, e o máximo de prolongamento de decaimento de temperatura a 20°C foi de 860 segundos no teste 6, 1040 segundos e sobre o pior resultado que foi o teste 5 com 180 segundos.

Os patamares de mudança de fase são visíveis sobretudo no teste 2, figura 41 e no teste 4 figura 47.

A influência da variação de nível para o fator D temperatura ambiente na disponibilização de energia parece não ser influente, Tabela 31. Da tabela 30, retiro que do nível 2 e 3 a influência de fatores isolados começa a ficar menos visível nas condições do trabalho.

A influência da variação de nível para os fatores A a D no decaimento de temperatura está bem definida, Tabela 36. Da tabela 35, retiro que o fator A, velocidade ambiente não é influente quando comparado com os restantes.

Os materiais de mudança de fase são efetivamente um bom método para obtenção de altos níveis de performance em armazenamento ou libertação de energia a qualquer patamar de temperatura. Concluiu-se que o material de mudança de fase tem um efeito muito favorável na ampliação do espaço temporal de libertação de energia a uma dada temperatura. Os materiais de mudança de fase têm duas propriedades favoráveis, uma densidade de armazenamento de energia elevado e libertam uma considerável quantidade de energia a temperatura constante, isto faz dos PCM uma alternativa.

5.2 SUGESTÃO PARA OTIMIZAÇÕES FUTURAS

Como trabalho futuro seria interessante estudar o comportamento de outros materiais de mudança de fase conjuntamente com novas geometrias de tubo. Na instalação e montagem experimental, será essencial melhorar o método de transferência dos tubos entre a estufa e a estação de ensaio para minimizar as perdas para o exterior e para que o tubo permaneça homogêneo em termos de temperatura. Recorrer a outros métodos de aquisição de dados será possível e interessante usando sensores de fibra ótica ou termopares hipodérmicos. A minimização das perdas é essencial.

Meios de aumento da eficiência do aquecimento do fluido, por alteração do interior do tubo, introdução de helicoides para aparecimento de fluxos secundários no fluido facilitaram a transmissão de energia. Um método para o cálculo da eficiência da transferência de calor para o fluido deverá ser idealizado.

- 6- REFERÊNCIAS

-
1. Gonçalves M. - *ESTUDO DE NOVOS MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE*. Aveiro, 2009, tese de mestrado.
 2. Sharma A. - *REVIEW ON THERMAL ENERGY STORAGE WITH PHASE CHANGE MATERIALS AND APPLICATIONS*, RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS 13 (2009) 318–345
 3. Abhat A.- *SHORT TERM THERMAL ENERGY STORAGE*, Revue Phys. Appl. 15 (1980) 477-501
 4. Sparavigna A. - *BEHAVIOUR OF THERMODYNAMIC MODELS WITH PHASE CHANGE MATERIALS UNDER PERIODIC CONDITIONS*, Energy and Power Engineering, 2011, 3, 150-157
 5. Gomez J. - *High-Temperature PCM Candidates for Thermal Energy Storage (TES) Applications*, Milestone Report NREL/TP-5500-51446
 6. Meling H. - *HEAT AND COLD STORAGE WITH PCM AN UP DO DATE INTRODUCTION INTO BSICS AND APPLICATIONS*, 2008, Springer, ISBN:978-3-540-68556-2
 7. Devahastin S., Saovakhon P. - *USE OF LATENT HEAT STORAGE TO CONSERVE ENERGY DURING DRYING*, Applied Thermal Engineering 26 (2006) 1705–1713
 8. Kappels T. - *NEW PHASE CHANGE MATERIAL BATTERY COOLANT ABSORBS 3X AS MUCH HEAT AS WATER*, GREEN CAR CONGRESS, online [disponível em: www.greencarcongress.com/2012/07/cryosolplus-20120713.html]
 9. Paksoy H. - *THERMAL ENERGY STORAGE FOR MORE EFFICIENT DOMESTIC APPLIANCES*, Academic Research Projects Unit of Çukurova University, Turquia, 2009
 10. Robak C. - *LATENT HEAT HERMAL ENERGY STORAGE WITH EMBEDDED HEAT PIPES FOR CONCENTRATING SOLAR POWER APPLICATIONS*, Connecticut, EUA, 2009
 11. A. H. Abedin, Rosen A. - *A CRITICAL REVIEW OF THERMOCHEMICAL ENERGY STORAGE SYSTEMS*, The Open Renewable Energy Journal, 2011, 4, 42-46
 12. A.S.Futane - *A REVIEW ON FREE COOLING THROUGH HEAT PIPE BY USING PHASE CHANGE MATERIALS*, International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST), 2011, ISSN : 0975-5462 Vol. 3 No. 6 June 2011
 13. Mehling A. - *ADVANCED THERMAL ENERGY STORAGE THROUGH PHASE CHANGE MATERIALS AND CHEMICAL REACTIONS FEASIBILITY STUDIES AND DEMONSTRATION PROJECTS*, International Energy Agency Implementing Agreement on Energy Conservation through Energy Storage, Annex 17
 14. Cabeza, L. Heiz, A. - *INVENTORY OF PHASE CHANGE MATERIALS (PCM)* , IEA SHC – Task 32 – ADVANCED STORAGE CONCEPTS, 2005
 15. Mashrae Z. - *PHASE CHANGE MATERIAL BASED ENERGY STORAGE MATERIALS AND GLOBAL APPLICATION EXAMPLES* , Leicesster, UK, CIBSE Technical Symposium 2011
 16. Hasenöhrl T. - *AN INTRODUCTION TO PHASE CHANGE MATERIALS AS HEAT STORAGE MEDIUM*, Lund, Suécia, Project Report MVK 160 Heat and Mass Transport, 2009
 17. S. Mondal - *PHASE CHANGE MATERIALS FOR SMART TEXTILES – An overview*, Applied Thermal Engineering 28 (2008) 1536–1550
 18. Zuckerman A. - *FABRIC COATING CONTAINING ENERGY ABSORBING PCM AND METHOD OF PRODUCING THE SAME*, Patent: 6,514,362 B1 02-04-2003, US006514362B1

-
19. Loschi P. – MMF *APLICADOS AO DESIGN DE TECIDOS INTELIGENTES*, XXVI PRÊMIO JOVEM CIENTISTA, Inovação Tecnológica nos Esportes, Belo Horizonte, MG, Brasil.
 20. McEwen P. - *CAN LATENT HEAT SAFELY WARM BLOOD IN VITRO TESTING OF A PORTABLE PROTOTYPE BLOOD WARMER*, BMC Emergency Medicine 2007, 7:8 doi:10.1186/1471-227X-7-8
 21. BRAXMEIER S. - *PHASE CHANGE MATERIAL FOR THERMOTHERAPY OF BURULI ULCER MODELING AS AN AID TO IMPLEMENTATION*, Journal of Medical Engineering & Technology, Vol. 33, No. 7, October 2009, 559–566
 22. Junghanss T. - *PHASE CHANGE MATERIAL FOR THERMOTHERAPY OF BURULI ULCER A PROSPECTIVE OBSERVATIONAL*, ISRCTN88392614 February 2009 | Volume 3 | Issue 2 | e380
 23. Mehling H. Kaalz P. - *LATENT HEAT STORAGE IN BUILDINGS : STORING HEAT AND COLD IN A COMPACT AND DEMAND-ORIENTED MANNER*, FIZ Karlsruhe GmbH, 2009, ISSN 1610-8302
 24. Khare S. - *SELECTION OF MATERIALS FOR HIGH TEMPERATURE LATENT HEAT ENERGY STORAGE*, Solar Energy Materials & Solar Cells 107 (2012) 20–27
 25. James B. Delaney P. - *PHASE CHANGE MATERIALS ARE THEY PART OF OUR ENERGY EFFICIENT FUTURE*, 2012 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings
 26. R. E. Simpson - *INTERFACIAL PHASE-CHANGE MEMORY*, DOI: 10.1038/NNANO.2011.96, 2012
 27. Kats A, Sharma D. - *ULTRA-THIN PERFECT ABSORBER EMPLOYING A TUNABLE PHASE CHANGE MATERIAL*, 10.1063/1.4767646, 2012
 28. Dimaano M. - *MEASUREMENT SYTEM FOR THE TEMPERATURE BEHAVIOR INVESTIGATION OF PHASE CHANGE MATERIALS*, Proceedings of Regional Symposium on Chemical Engineering, Singapore, Dec. 2000
 29. Pandian R. - *PHASE-CHANGE THIN FILMS RESISTANCE SWITCHING AND ISOTHERMAL CRYSTALLIZATION STUDIES*, ISBN (book): 978-90-367-3556-8, Tese PhD.
 30. Smith C.- *PRINCIPLES OF FLUID AND BLOOD WARMING IN TRAUMA*, INTERNATIONAL TRAUMACARE (ITACCS), Vol. 18, No. 1, 2008
 31. Satoh J. - *PERFORMANCE OF THREE SYSTEMS FOR WARMING INTRAVENOUS FLUIDS AT DIFFERENT FLOW RATES*, Anaesth Intensive Care 2006; 34:46-50
 32. Heinz A., Streicher W. - *APPLICATION OF PHASE CHANGE MATERIALS AND PCM-SLURRIES FOR THERMAL ENERGY STORAGE*, Graz, Austria, ENk6-CT2001-00507.
 33. Bozorg E. G. - *THERMAL TRANSPORT IN PHASE CHANGE MEMORY MATERIALS*, ANNUAL REVIEW OF HEAT TRANSFER, Vol. 15, 2012
 34. Gabriele C. S., Giacomo M. - *A NEURAL NETWORK INTERATOMIC POTENTIAL FOR THE PHASE CHANGE MATERIAL GETE*, :1201.2026v1, 2012
 35. Lonsdale J. - *IN-DEPTH TECHNOLOGY INNOVATION ASSESSMENT FOR SOLID WALL INSULATION*, London, Department of Energy and Climate Change, TRN70/11/2010

-
36. Childs K. - *POTENTIAL ENERGY SAVINGS DUE TO PHASE CHANGE MATERIAL IN A BUILDING WALL ASSEMBLY: AN EXAMINATION OF TWO CLIMATES*, Tennessee, EUA, Energy and Transportation Science Division ORNL/TM-2012/6, 2012
 37. Lavinia G. - *THERMAL ENERGY STORAGE WITH PHASE CHANGE MATERIAL*, DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING, Technical University of Cluj-Napoca, Romania, ISSN 1583-1078, 2012
 38. Caldwell M. A. - *NANOSCALE PHASE CHANGE MEMORY MATERIALS*, DOI: 10.1039/c2nr30541k, 2012
 39. Wuttig M. - *PHASE CHANGE MATERIALS CHALCOGENIDES WITH REMARKABLE PROPERTIES DUE TO AN UNCONVENTIONAL BONDING MECHANISM*, Phys. Status Solidi B249, No. 10, 1843–1850 (2012) /DOI10.1002/pssb.201200582
 40. Manteigas M. D. - *PHASE CHANGE MATERIALS FOR MISSILE ELECTRONICS*, 7th European Advanced Technology Workshop, MBDA, 2012
 41. Nath R. - *ENCAPSULATION OF HIGH TEMPERATURE PHASE CHANGE MATERIALS FOR THERMAL ENERGY STORAGE*, Florida, EUA, 2012, Tese de Mestrado.
 42. Entrop A G - *CHANGE MATERIALS TO STORE SOLAR ENERGY IN CONCRETE FLOORS DUTCH HOUSES*, Phys. Status Solidi B249, No. 10, 1843–1850 (2012) /DOI10.1002/pssb.201200582, 2011
 43. Xiong F. - *LOW-POWER SWITCHING OF PHASE-CHANGE MATERIALS WITH CARBON NANOTUBE ELECTRODES*, 10.1126/science.1201938 2011.
 44. Sharan G. - *BINARY PHASE CHANGE MATERIALS AND THEIR APPLICATIONS IN SOLAR THERMAL ENERGY STORAGE DEVICES*, ENERSTATE 2010, Dehradun, India, 2011
 45. Evola G. - *SIMULATION OF THE BEHAVIOUR OF PHASE CHANGE MATERIALS FOR THE IMPROVEMENT OF THERMAL COMFORT IN LIGHTWEIGHT BUILDINGS*, 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, 2011
 46. ANBARASU M. WUTTIG M. - *UNDERSTANDING THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF PHASE CHANGE MATERIALS FOR DATA STORAGE APPLICATIONS*, Journal of the Indian Institute of Science VOL 91:2 2011
 47. Tay N.H.S. - *EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF TUBES IN A PHASE CHANGE THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEM*, Applied Energy 90 (2012) 288–297
 48. Ovshinsky S. R. - *THE BASIS FOR ELECTRONIC MECHANISMS IN OVONIC PHASE CHANGE MEMORIES*, E*PCOS201, 2011
 49. Phase Change Material Products Ltd. - *PLUS ICE Phase Change Material Products*, 2011
 50. Portaspana J. C. - *HIGH TEMPERATURE THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEMS BASED ON LATENT AND THERMO-CHEMICAL HEAT STORAGE*, Vienna, Austria July 2011
 51. Chiu J. - *HEAT TRANSFER ASPECTS OF USING PHASE CHANGE MATERIAL IN THERMAL ENERGY STORAGE APPLICATIONS*, KTH School of Industrial Engineering and Management Division of Heat and Power Technology, 2011
 52. Lee S. H. - *THE EFFECT OF INFUSION RATE AND CATHETER LENGTH ON THE TEMPERATURE OF WARMING FLUID*, Korean Society of Anesthesiologists, 2010

-
53. Bhatt V. S. - *THERMAL ENERGY STORAGE CAPACITY OF SOME PHASE CHANGING MATERIALS AND IONIC LIQUIDS*, International Journal of ChemTech Research, 2010, SSN : 0974-4290
 54. Schossig P. – *PHASE CHANGE MATERIALS FOR STORAGE APPLICATIONS*, Fraunhofer Institute for solar energy systems ISE, PREHEAT Intersolar, 2007
 55. Shilei L. - *EXPERIMENTAL STUDY AND EVALUATION OF LATENT HEAT STORAGE IN PHASE CHANGE MATERIALS WALLBOARDS*, Energy and Buildings 39 (2007) 1088–1091
 56. Demirbas M.F. - *THERMAL ENERGY STORAGE AND PHASE CHANGE MATERIALS AN OVERVIEW*, Energy Sources, Part B, 1:85–95,2006, DOI: 10.1080/009083190881481
 57. Sharma S. D. - *PHASE CHANGE MATERIALS FOR LOW TEMPERATURE SOLAR THERMAL SYSTEMS*, Res. Rep. Fac. Eng. Mie Univ., Vol. 29, pp. 31-64 (2004)
 58. Mohammed M. F. - *A REVIEW ON PHASE CHANGE ENERGY STORAGE MATERIALS AND APPLICATIONS*, Energy Conversion and Management 45 (2004) 1597–1615
 59. Zalba B. - *REVIEW ON THERMAL ENERGY STORAGE WITH PHASE CHANGE MATERIALS, HEAT TRANSFER ANALYSIS AND APPLICATIONS*, Applied Thermal Engineering 23 (2003) 251–283
 60. Hawlader M. N. A. - *ENCAPSULATED PHASE CHANGEMATERIALS FOR THERMAL ENERGY STORAGE: EXPERIMENTS AND SIMULATION*, Int. J. Energy Res. 2002; 26:159}171 (DOI: 10.1002/er.773)
 61. Ohtsuka N. - *EVALUATION OF FOUR TECHNIQUES OF WARMING INTRVENOUS FLUIDS*, J Anesth (2002) 16:145–149
 62. Georgi Pavlov - *BUILDING THERMAL ENERGY STORAGE CONCEPTS AND APPLICATIONS*, ICIEE, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, 2800-Lyngby, Denmark
 63. Coutinho J. A. - *materiais de mudança de fase PARA ISOLAMENTO TÉRMICO E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA*, CICECO, Departamento de Química da Universidade de Aveiro
 64. M. Kenisarin, K. Mahkamov, *SOLAR ENERGY STORAGE USING PHASE CHANGE MATERIALS*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11 (2007) 1913–1965
 65. G. Taguchi – *INTRODUCTION TO QUALITY ENGINEERING, COURSE MANUAL*, American supplier institute incorporated, Dearborn, MI, USA, 1987
 66. http://www.omikk.bme.hu/archivum/angol/htm/telkes_m.htm em 12/05/2013
 67. C. N. Boeri – *SECAGEM CONVETIVA DE PRODUTOS LIENTARES: OTIMIZAÇÃO E CONTROLO*, Departamento Engenharia mecânica.

- 7 - ANEXOS

7.1 ESPECIFICAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS USADOS

 <p>Figura 65 - Termo higrómetro Vaisala HMT100</p>	<p><u>Vaisala HMT100</u>: Termo higrómetro;</p> <ul style="list-style-type: none">- <i>Temperatura:</i><ul style="list-style-type: none">- Sonda Pt1000 IEC 751 1/3 classe B- Variação e exactidão: 40°F a 176°F ($\pm 0,36^\circ\text{F}$) ou 40°C a 80°C ($\pm 0,2^\circ\text{C}$)- <i>Humidade Relativa:</i><ul style="list-style-type: none">- Sonda Vaisala HUMICAP 180- Variação e exactidão: 0% - 90% ($\pm 1,7\%$ entre 15°C e 25°C) ou 90% - 100% ($\pm 2,5\%$ entre 15°C e 25°C)
--	---

 <p>Figura 66 - Ilustração do equipamento Omega FMA1002R.</p>	<p><u>Omega FMA1002R</u>: transmissor de velocidade;</p> <ul style="list-style-type: none">- <i>Velocidade do ar:</i><ul style="list-style-type: none">- Sonda: resistência de 100 Ohm.- Alcance: 0 – 1000 FPM ou 0.01 10 ms⁻¹.- Precisão: 1,5% da escala completa.- <i>Temperatura do ar:</i><ul style="list-style-type: none">- Sonda: Resistência de 2x1000 Ohm.- Alcance: -40 a 121°C.- Precisão: 0,5% da escala completa.- <i>Transdutor Velocidade e Temperatura:</i><ul style="list-style-type: none">- Tempo de resposta: 250 ms.- Humidade relativa operacional: 0 a 95% sem condensação.
---	--

 <p>Figura 67 –Kern FCB 6K0.02B</p>	<p><u>Kern FCB 6K0.02B</u>, balança digital.</p> <ul style="list-style-type: none">- <i>Massa</i><ul style="list-style-type: none">- Tipo do prato: Rectangular de quatro apoios.- Dimensões: 340x240 mm²- Capacidade: 6100 g.- Precisão: 0,02 g.- Repetibilidade: 0,04 g.- Linearidade: ± 0.1 g.
--	--

 <p>HLX65 - B</p>	<p><u>Digitron HLX65</u>: transdutor de velocidade</p> <ul style="list-style-type: none">- <i>Velocidade do ar:</i><ul style="list-style-type: none">- Sonda: Anemómetro de fio quente.- Alcance: 0 a 10 m/s- Precisão: (a 20 °C, 45% HR e 1 atm ± 0.2 m/s $\pm 3\%$)- Temperatura de serviço: -25 a 50 °C
--	---

<p>Figura 68 - Digitron HLX65</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Repetibilidade <0.3 % <li style="padding-left: 20px;">- Sensibilidade <0.2 % - Histerese: <0.5 %
-----------------------------------	---

<p><u>MOXA NPort 5230</u>: Interface TCP/IP RS232-485</p>	
 <p>Figura 69 – Ilustração do equipamento Moxa 5230</p>	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Comunicação</i> - Número de portas: 1 x RS-232, 1 x RS-485. - Velocidade: 10/100 Mbps, auto MDI/MDIX. - Protocolos de comunicação: ICMP, IP, TCP, UDP, DHCP, BOOTP, Telnet, DNS, SNMP V1, HTTP, SMTP, SNTP. - Compatibilidade: Windows 95/98/ME/NT/2000, Windows XP/2003/Vista/2008/7 x86/x64, Embedded CE 5.0/6.0, XP Embedded.

<p><u>Master Flex L/S</u>: Bomba peristáltica.</p>	
 <p>Figura 70 - Ilustração do equipamento Masterflex L/S.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Caudal</i> - Alcance: 0.42 - 1130 ml/min. - Tipo de controlo: Variação da velocidade 7 – 200 rpm. - Incerteza: ± 5% em toda a gama.

<p><u>EGE SDN 503/1 GA</u>; Transdutor de Caudal.</p>	
 <p>Figura 71 - Ilustração do equipamento EGE SDN 503.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Caudal</i> - Sonda: STK412 S- A4. - Alcance: Água: 1 – 150 cm/s. - Temperatura de funcionamento: -20 a 80 °C. - Tempo de resposta: 2 s.

<p><u>ASCO SCG202A05 1V</u>: Válvula reguladora de caudal.</p>	
 <p>Figura 72 - Ilustração do equipamento Asco SCG202A051V.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Caudal</i> - Coeficiente de caudal: 0.05 m³/h ou 0.8 L/min - Pressão de funcionamento: 1 – 16 bar - Temperatura de funcionamento: -10 a 75 °C - <i>Características</i>

 <p>Figura 73 – Ilustração do equipamento</p>	<p><u>ADAM-4021</u>: Interface analógica de entrada AO.</p> <ul style="list-style-type: none"> - <i>Comunicação</i> Dependendo da sua configuração pode aceitar os seguintes formatos: EI, FSR, Hexadecimal - Saídas: 0 to 10 V, 0.0625 to 64 V/sec, 0 a 20 mA, ou 4 a 20 mA, 0.125 to 128 mA/seg
--	---

 <p>Figura 74 - Ilustração do equipamento ADAM 4018</p>	<p><u>ADAM-4018</u>: Interface de entrada para termopares</p> <ul style="list-style-type: none"> - <i>Comunicação</i>: Entrada Analógica resolução 16-bit - Número de canais: 6 Diferenciais, 2 single-ended. - Taxa de amostragem: 10 Amostras/seg. - Exactidão: $\pm 0.1\%$
--	--

 <p>Figura 75 - Ilustração do equipamento ADAM 4012</p>	<p><u>ADAM-4012</u>: Interface analógica de saída/entrada DIO</p> <ul style="list-style-type: none"> - <i>Comunicação</i>: ± 150 mV e ± 500 mV, ± 1 V, ± 5 V e ± 10 V, ± 20 mA (125Ω) - Número de canais: Dois canais digitais de saída e um canal digital de entrada. - <i>Compatibilidade</i>: Dependendo da sua configuração pode reenviar os seguintes formatos: EI, FSR, Hexadecimal.
---	--

 <p>Figura 76 - Ilustração do termopar Gefran tipo J</p>	<p><u>Gefran tipo J</u>: Termopar gefran</p> <ul style="list-style-type: none"> -sensibilidade $+10,1^\circ\text{C}$ - intervalo de funcionamento -40 a 100°C
---	--

 <p>Figura 77 - Equipamento termopar Tekon</p>	<p><u>Termopar TekOn tipo T</u>: Termopar tipo K BSTT11 1,6 KPT 1,2</p> <ul style="list-style-type: none"> - sensibilidade $+10,1^\circ\text{C}$ - intervalo de funcionamento 0 a 100°C
---	--

7.2 ESPECIFICAÇÃO DO PCM EM TESTE



Renewable Phase Change Technology

PureTemp™ Thermal Energy Storage Materials

PureTemp thermal energy storage materials offer new levels of performance in storing or releasing large quantities of thermal energy at any given temperature. Our proprietary formulations and patented manufacturing processes yield superior quality phase change materials at cost effective prices.

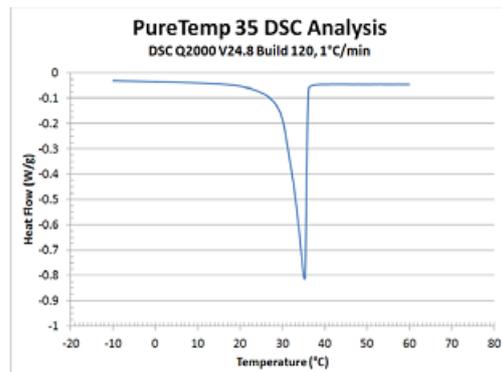
Some key properties:

- Thermal energy storage capacities which average 200 J/g
- Over 200 unique, engineered phase change transition temperatures between -40°C and 150°C
- Consistent, repeatable performance over thousands of thermal (melt/solidify) cycles
- 100% renewable – produced from agricultural sources, not petroleum
- Readily biodegradable and non-toxic

PureTemp 35 Technical Information

Appearance	Clear liquid, waxy solid
Melting Point	35°C
Heat storage capacity	180 J/g
Density	0.85 g/ml
Specific heat liquid	2.72 J/g°C
Specific heat solid	2.44 J/g°C
Solubility in water	Insoluble
Stability	Stable under normal conditions

Typical physical properties are listed in the table above.



Entropy Solutions, Inc.

151 Cheshire Lane N Suite 400, Plymouth, MN 55441

Tel: +1-952-941-0306 Email: info@puretemp.com

www.puretemp.com

©Entropy Solutions, Inc. All Rights Reserved

IMPORTANT NOTE: The preceding data is based on tests and experience which Entropy Solutions believes reliable, and is supplied for informational purposes only. Entropy Solutions expressly disclaims any liability whatsoever for damage or injury which results from the use of the preceding data and nothing contained therein shall constitute a guarantee, warranty, or representation (including freedom from patent liability) by Entropy Solutions with respect to the data, the product described, or its fitness for use for any specific purpose, even if that purpose is known to Entropy Solutions. Individual requirements may vary and each purchaser is urged to perform their own tests, experiments, and investigations in the use of this product. For detailed safety and handling information regarding these products, please refer to the respective PureTemp Material Safety Data Sheet.

7.3 DESENVOLVIMENTO DO PLANO DE TAGUCHI L81 PARA L9

7.3.1 MATRIZ EXPONÊNCIAL COMPLETA L81

Matriz representativa da totalidade de ensaios possíveis de executar com quatro fatores de controlo a três níveis onde Y1 a Y81 representam cada um dos ensaios possíveis das combinações de fatores identificados a cada linha e coluna.

L81

			Temperatura fluido nível mínimo	Temperatura fluido nível médio	Temperatura fluido nível alto
Velocidade ambiente nível mínimo	Temperatura ambiente nível mínimo	Caudal fluido nível mínimo	Y1	Y2	Y3
		Caudal fluido nível médio	Y4	Y5	Y6
		Caudal fluido nível máximo	Y7	Y8	Y9
	Temperatura ambiente nível médio	Caudal fluido nível mínimo	Y10	Y11	Y12
		Caudal fluido nível médio	Y13	Y14	Y15
		Caudal fluido nível máximo	Y16	Y17	Y18
	Temperatura ambiente nível máximo	Caudal fluido nível mínimo	Y19	Y20	Y21
		Caudal fluido nível médio	Y22	Y23	Y24
		Caudal fluido nível máximo	Y25	Y26	Y27
Velocidade ambiente nível médio	Temperatura ambiente nível mínimo	Caudal fluido nível mínimo	Y28	Y29	Y30
		Caudal fluido nível médio	Y31	Y32	Y33
		Caudal fluido nível máximo	Y34	Y35	Y36
	Temperatura ambiente nível médio	Caudal fluido nível mínimo	Y37	Y38	Y39
		Caudal fluido nível médio	Y40	Y41	Y42
		Caudal fluido nível máximo	Y43	Y44	Y45
	Temperatura ambiente nível máximo	Caudal fluido nível mínimo	Y46	Y47	Y48
		Caudal fluido nível médio	Y49	Y50	Y51
		Caudal fluido nível máximo	Y52	Y53	Y54
Texterna (°C) alto	Temperatura ambiente nível mínimo	Caudal fluido nível mínimo	Y55	Y56	Y57
		Caudal fluido nível médio	Y58	Y59	Y60
		Caudal fluido nível máximo	Y61	Y62	Y63
	Temperatura ambiente nível médio	Caudal fluido nível mínimo	Y64	Y65	Y66
		Caudal fluido nível médio	Y67	Y68	Y69
		Caudal fluido nível máximo	Y70	Y71	Y72
	Temperatura ambiente nível máximo	Caudal fluido nível mínimo	Y73	Y74	Y75
		Caudal fluido nível médio	Y76	Y77	Y78
		Caudal fluido nível máximo	Y79	Y80	Y81

7.3.2 MATRIZ REDUZIDA L27

Matriz representativa da redução para vinte e sete experiências

L27

			Temperatura fluido nível mínimo	Temperatura fluido nível médio	Temperatura fluido nível alto
Velocidade ambiente nível mínimo	Temperatura ambiente nível mínimo	Caudal fluido nível mínimo	Y1	Y2	Y3
		Caudal fluido nível máximo	Y7	Y8	Y9
	Temperatura ambiente nível médio	Caudal fluido nível mínimo	Y10	Y11	Y12
		Caudal fluido nível médio	Y13	Y14	Y15
		Caudal fluido nível médio	Y22	Y23	Y24
		Caudal fluido nível máximo	Y25	Y26	Y27
Velocidade ambiente nível médio	Temperatura ambiente nível mínimo	Caudal fluido nível mínimo	Y28	Y29	Y30
		Caudal fluido nível médio	Y31	Y32	Y33
		Caudal fluido nível médio	Y40	Y41	Y42
		Caudal fluido nível máximo	Y43	Y44	Y45
	Temperatura ambiente nível máximo	Caudal fluido nível mínimo	Y46	Y47	Y48
		Caudal fluido nível máximo	Y52	Y53	Y54
		Caudal fluido nível médio	Y58	Y59	Y60
		Caudal fluido nível máximo	Y61	Y62	Y63
	Temperatura ambiente nível médio	Caudal fluido nível mínimo	Y64	Y65	Y66
		Caudal fluido nível máximo	Y70	Y71	Y72
	Temperatura ambiente nível máximo	Caudal fluido nível mínimo	Y73	Y74	Y75
		Caudal fluido nível médio	Y76	Y77	Y78

7.3.3 MATRIZ REDUZIDA L9

Matriz representativa da redução para escolha de nove experiências, tendo em conta que a escolha deve ser ortogonal.

L9

			Temperatura fluido nível mínimo	Temperatura fluido nível médio	Temperatura fluido nível alto
Velocidade ambiente nível mínimo	Temperatura ambiente nível mínimo	Caudal fluido nível mínimo	Y1	Y2	Y3
		Caudal fluido nível médio	Y13	Y14	Y15
		Caudal fluido nível máximo	Y25	Y26	Y27
	Temperatura ambiente nível médio	Caudal fluido nível médio	Y31	Y32	Y33
		Caudal fluido nível máximo	Y43	Y44	Y45
		Caudal fluido nível mínimo	Y46	Y47	Y48
	Temperatura ambiente nível máximo	Caudal fluido nível máximo	Y61	Y62	Y63
		Caudal fluido nível máximo	Y70	Y71	Y72
		Caudal fluido nível médio	Y76	Y77	Y78
