



Desenvolvimento de uma plataforma experimental para o estudo de um reservatório para armazenamento de energia térmica

XAVIER OLIVEIRA FERREIRA

outubro de 2024

**Desenvolvimento de uma plataforma
experimental para o estudo de um
reservatório para armazenamento de
energia térmica**

Xavier Oliveira Ferreira

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica, Área de Especialização em
Energia**

Orientador: Professor Doutor Rui Filipe Neves de Araújo Rego
Co-orientador: Professor Doutor Fernando Aristides da Silva Ferreira de Castro

Júri:

Presidente:

Elza Fonseca, Professor Coordenador, ISEP

Vogais:

Abel Rouboa, Professor Associado, FEUP

Rui de Araújo Rego, Professor Adjunto, ISEP

Porto, Setembro 2024

Dedicatória

A vocês, pais e avós, a minha eterna gratidão.

Agradecimentos

Gostaria de expressar o meu profundo agradecimento a todos aqueles que tornaram possível a conclusão deste importante capítulo da minha vida.

Em primeiro lugar, agradeço ao ISEP e a todos os docentes que me acompanharam ao longo destes dois anos de mestrado. O conhecimento e a dedicação de cada um foram fundamentais para a minha formação e crescimento académico.

Ao meu orientador, Prof. Doutor Rui Rego, e ao meu co-orientador, Prof. Doutor Fernando Aristides, deixo o meu sincero agradecimento pela orientação e pelas valiosas sugestões que enriqueceram este trabalho.

Um agradecimento também ao Eng. Joaquim Monteiro, pelo incansável apoio durante as inúmeras horas passadas no LAVAC. A sua ajuda foi crucial para a realização deste projeto, e por isso estou-lhe extremamente grato.

À minha família, que tornou tudo isto possível, não há palavras que expressem o meu agradecimento. O vosso apoio incondicional, especialmente nos momentos mais difíceis e decisivos, foi a base que me permitiu alcançar este objetivo.

Por fim, mas não menos importante, gostaria de agradecer à minha namorada e aos meus amigos mais próximos, pelo vosso apoio incondicional, paciência e motivação ao longo deste percurso. A vossa presença foi fundamental para manter o equilíbrio e a motivação, e sem vocês, esta jornada teria sido muito mais difícil.

A todos, o meu mais sincero obrigado.

Resumo

Os sistemas Armazenamento de Energia Térmica (*Thermal Energy Storage*) (TES) desempenham um papel essencial na promoção da eficiência energética, ao permitir a acumulação de energia térmica para ser utilizada mais tarde. Isto contribui para uma gestão otimizada dos recursos energéticos e para uma maior integração de fontes de energia renovável.

O objetivo deste trabalho foi estudar o desempenho de um sistema TES, através da construção de uma plataforma experimental. Esta plataforma permitiu a realização de testes experimentais em condições controladas, com o intuito de avaliar de forma detalhada o comportamento de um sistema TES.

A metodologia adotada baseou-se numa revisão bibliográfica de investigações experimentais sobre sistemas TES, o que permitiu identificar os parâmetros críticos para a análise do seu desempenho. Posteriormente, foi desenvolvida uma plataforma experimental dedicada à realização dos ensaios, onde foram implementadas metodologias de medição e análise para a recolha de dados. Por fim, estes dados foram analisados, de forma a comparar os resultados obtidos com as tendências identificadas na literatura.

Este processo possibilitou a validação do conhecimento previamente adquirido e permitiu identificar oportunidades de melhoria no desempenho da plataforma experimental e do sistema TES em estudo.

PALAVRAS-CHAVE: Energia térmica, Sistema TES, Plataforma experimental, Processo de carregamento, Processo de descarga

Abstract

Thermal Energy Storage (TES) systems play a crucial role in promoting energy efficiency by allowing thermal energy to be stored for later use. This contributes to an optimized management of energy resources and greater integration of renewable energy sources.

The objective of this work was to study the performance of a TES system through the construction of an experimental platform. This platform allowed for experimental tests to be carried out under controlled conditions, with the aim of thoroughly evaluating the behavior of a TES system.

The methodology was based on a bibliographic review of experimental research on TES systems, which allowed the identification of critical parameters for performance analysis. Subsequently, an experimental platform was developed specifically for conducting the tests, where measurement and analysis methodologies were implemented to collect data. Finally, these data were analyzed in order to compare the results obtained with the trends identified in the literature.

This made it possible to validate previously acquired knowledge and to identify opportunities for improvement in the performance of the experimental platform and the TES system studied.

KEYWORDS: Thermal energy, TES system, Experimental platform, Charging process, Discharging process

Índice

Índice Figuras	xvii
Índice de Tabelas	xix
Acrónimos e Símbolos	xxi
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento e motivação	1
1.2 Objetivos de investigação	2
1.3 Opções metodológicas	2
1.4 Estrutura da dissertação	3
2 Revisão Bibliográfica	5
2.1 Armazenamento de energia térmica em sistemas TES	5
2.1.1 Meios de armazenamento	5
Armazenamento sobre a forma de calor sensível	6
Armazenamento sobre a forma de calor latente	7
2.1.2 Mecanismos de armazenamento	8
Sistemas Passivos	8
Sistemas Ativos	8
2.1.3 Ciclos de armazenamento	9
Diários	9
Sazonais ou de longa duração	9
2.1.4 Distribuição da energia armazenada	10
Esquema centralizado	10
Esquema distribuído	10
2.2 Indicadores de performance de sistemas TES	11
2.2.1 Primeira lei da termodinâmica	11
Energia térmica	11
Eficiência dos processos de carregamento e descarga	12
<i>Capacity ratio</i>	12
2.2.2 Segunda lei da termodinâmica	13
Análise exergética e entrópica	13
2.2.3 Estratificação térmica	15
Espessura da termoclina	16
Número MIX	17
Número de estratificação	18
2.2.4 Números adimensionais	18
Número de Richardson	19
Número de Péclet	20

	Número de Reynolds	21
	Número de Froude	22
2.3	Fatores que influenciam o desempenho de sistemas TES	23
2.3.1	Parâmetros operacionais	23
	Caudal	23
	Temperatura de funcionamento	24
	Processos de carregamento e descarga	25
	Distribuição do escoamento	26
2.3.2	Parâmetros geométricos	28
	Forma e volume	28
	Posições de entrada e saída do FT	28
2.4	Estudos experimentais de sistemas TES	29
3	Desenvolvimento da Plataforma Experimental	33
3.1	Descrição da plataforma experimental	33
3.1.1	Epicentro	33
3.1.2	Circuito primário	34
3.1.3	Circuito secundário	35
	Zona de simulação do consumo de energia	35
	Fonte de energia térmica	36
	Bypass	36
3.1.4	Zona de enchimento	37
3.1.5	Zona de aquisição de dados	38
3.2	Validação do funcionamento da plataforma experimental	38
3.2.1	Comportamento do circuito primário	39
3.2.2	Controlo da temperatura no circuito primário	40
	Caldeira elétrica	40
	VMT	42
	Depósito de inércia primário	43
3.2.3	Disponibilidade do caudal no circuito primário	44
3.2.4	Comportamento do circuito secundário	45
3.2.5	Controlo da temperatura no circuito secundário	46
	<i>Setpoint</i> da BCR	46
3.2.6	Disponibilidade do caudal no circuito secundário	46
	Bomba de circulação B2	46
3.2.7	Controlo do caudal no circuito primário e secundário	47
4	Metodologia Experimental	49
4.1	Sistema TES	49
4.2	Pontos de medição	50
4.2.1	Nomenclatura dos pontos de medição	50
4.2.2	Instrumentação	51
	Medição de temperatura	52
	Medição de caudal	52
4.3	Condições de ensaio	53
4.3.1	Procedimento	53
	Carregamento	53
	Descarga	53
4.4	Critério de finalização	54

4.4.1	Temperatura no interior do sistema TES	54
4.4.2	Temperatura à entrada e saída do sistema TES	55
4.5	Análise de dados	56
4.5.1	Nomenclatura dos dados de cada ensaio	57
5	Análise de Resultados	59
5.1	Análise da distribuição de temperatura	59
5.1.1	Processo de carregamento	59
5.1.2	Processo de descarga	60
5.2	Análise dos indicadores de performance	61
5.2.1	Energia térmica	62
5.2.2	Eficiência dos processos de carregamento e descarga	64
5.2.3	<i>Capacity ratio</i>	66
5.2.4	Análise exergética e entrópica	68
	Rendimento exergético	68
	Rendimento entrópico	70
5.2.5	Espessura da termoclina	72
5.2.6	Número MIX	74
5.2.7	Número de Richardson	76
5.2.8	Número de Péclet	78
5.2.9	Número de Reynolds	80
5.2.10	Cenário global	83
6	Conclusão	87
6.1	Desempenho da plataforma experimental	87
6.1.1	Controlo da temperatura	87
6.1.2	Controlo do caudal	87
6.2	Desempenho do sistema TES	88
6.2.1	Indicadores de performance	88
6.2.2	Parâmetros operacionais	89
	Processo de carregamento	89
	Processo de descarga	89
6.2.3	Parâmetros geométricos	90
6.3	Trabalhos futuros	91
	Referências	93
	Apêndice A	101
A.1	Componentes da plataforma experimental	101
A.1.1	VMT	101
A.1.2	Vaso de expansão	102
A.1.3	Válvula de segurança	102
A.1.4	Grupo de enchimento	103
A.1.5	Separador de microbolhas	103
A.1.6	Válvula de retenção	104
A.2	Validação do funcionamento da plataforma experimental	104
A.2.1	Circuito primário	104
	Caldeira elétrica	105
	VMT	106

DIP	107
A.2.2 Circuito secundário	109
Bomba de circulação B2	111
A.3 Montagem da instrumentação	112
A.3.1 Calibração das sondas de medição de temperatura	112
Banho térmico	112
A.3.2 Configuração do caudalímetro ultrassónico	113
A.3.3 Programação do data logger	114
Conexão das sondas de medição de temperatura	115
Conexão do modulo emissor de impulsos do contador	116
Conexão do caudalímetro ultrassónico	116
A.4 Etapas do procedimento experimental	116
A.4.1 Processo de carregamento	117
Primeiro momento	117
Segundo momento	118
Terceiro momento	119
A.4.2 Processo de descarga	120
Primeiro momento	120
Segundo momento	121
Terceiro momento	121
A.5 Considerações e cuidados	122
Apêndice B	125
B.1 Repositório de análise de dados	125
B.1.1 Pasta Ensaios	125
B.1.2 Pasta Gráficos	125
B.1.3 Pasta Termoclina	126
B.1.4 Pasta Verificações	126
B.1.5 Ficheiros de análise individual dos ensaios	127
B.1.6 Ficheiros de análise conjunta dos ensaios	127
B.2 Ajuste de curva no <i>Origin</i>	127
Anexo A	129
A.1 Esquema inicial	130
A.2 Esquema final	131
Anexo B	133
B.1 Caldeira elétrica <i>BAXI CML-15</i>	134
B.2 <i>Chiller RCAT EASY.A.P.M.5.Z1</i>	136
B.3 <i>BCR McQuay M5AC 020 CR</i>	138
B.4 <i>RTD KIMO Instruments</i>	139
B.5 Contador <i>Enermeter PR15</i>	141
Anexo C	145
C.1 Esquema atual	146
C.2 Proposta de melhoria	147

Anexo D	149
D.1 analise_carregamento.ipynb	151
D.2 analise_descarga.ipynb	166
D.3 analise_carregamento_graficos.ipynb	180
D.4 analise_descarga_graficos.ipynb	184
 Anexo E	 187
E.1 Processo de carregamento	188
E.1.1 Distribuição da temperatura	188
E.1.2 Energia armazenada	189
E.1.3 Eficiência do processo de carregamento	190
E.1.4 <i>Capacity ratio</i>	191
E.1.5 Rendimento exergético	192
E.1.6 Rendimento entrópico	193
E.1.7 Espessura da termoclina	194
E.1.8 MIX	195
E.1.9 Número de Richardson	196
E.1.10 Número de Peclet	197
E.1.11 Número de Reynolds à entrada do sistema TES	198
E.1.12 Número de Reynolds no interior do sistema TES	199
E.2 Processo de descarga	200
E.2.1 Distribuição da temperatura	200
E.2.2 Energia armazenada	201
E.2.3 Eficiência do processo de descarga	202
E.2.4 <i>Capacity ratio</i>	203
E.2.5 Rendimento exergético	204
E.2.6 Rendimento entrópico	205
E.2.7 Espessura da termoclina	206
E.2.8 MIX	207
E.2.9 Número de Richardson	208
E.2.10 Número de Peclet	209
E.2.11 Número de Reynolds à entrada do sistema TES	210
E.2.12 Número de Reynolds no interior do sistema TES	211

Lista de Figuras

2.1	Materiais de armazenamento de energia térmica em sistemas TES [1]	5
2.2	Princípio de funcionamento dos PCM [2]	7
2.3	Sumário dos indicadores de performance de sistemas TES [3]	11
2.4	Diferenças entre a situação ideal e real [4]	14
2.5	Diferentes níveis de estratificação em sistemas TES [5]	16
2.6	Jato de admissão do FT em sistemas TES [5]	24
2.7	Estrutura do equalizador [6]	27
2.8	Fenómeno " <i>dead zone</i> " [7]	29
2.9	Esquemas das plataformas de ensaio de sistemas TES	30
3.1	Epicentro da plataforma experimental	34
3.2	Central energética do LAVAC	34
3.3	Depósito de inércia secundário	35
3.4	Bomba de calor reversível	36
3.5	Bypass do circuito secundário	37
3.6	Circuito de enchimento da plataforma experimental	37
3.7	Zona de aquisição de dados da plataforma experimental	38
3.8	Primeiro teste do circuito primário (<i>Setpoint</i> = 50°C)	39
3.9	Segundo teste do circuito primário (<i>Setpoint</i> = 60°C)	39
3.10	Terceiro teste do circuito primário (<i>Setpoint</i> = 70°C)	40
3.11	Comportamento dinâmico da caldeira (<i>Setpoint</i> = 30°C)	40
3.12	Instalação da VMT no circuito primário	42
3.13	Comportamento da VMT	42
3.14	Instalação do DIP no circuito primário	43
3.15	Comportamento do circuito primário com a adição do DIP	44
3.16	Evolução do caudal com as alterações no circuito primário	44
3.17	Primeiro teste do circuito secundário (<i>Setpoint</i> = 15°C)	45
3.18	Segundo teste do circuito secundário (<i>Setpoint</i> = 15°C)	45
3.19	Terceiro teste do circuito secundário (<i>Setpoint</i> = 15°C)	45
3.20	Instalação da bomba de circulação B2	47
3.21	BCR e bomba de circulação B2 vs Bomba de circulação B2	47
3.22	Adição das VEHE aos circuitos primário e secundário	48
4.1	Sistema TES	49
4.2	Nomenclatura dos pontos de medição	51
4.3	Diferença de 0,5°C entre todos os sensores do sistema TES	54
4.4	Diferença de 0,5°C entre a temperatura de entrada e saída do sistema TES	56

5.1	Efeito da temperatura de carregamento na distribuição de temperatura do sistema TES	59
5.2	Efeito do caudal de carregamento na distribuição de temperatura do sistema TES	60
5.3	Efeito da temperatura inicial de descarga na distribuição de temperatura do sistema TES	60
5.4	Efeito do caudal de descarga na distribuição de temperatura do sistema TES	61
5.5	Evolução da energia térmica armazenada no interior do sistema TES	63
5.6	Evolução da eficiência dos processo de carregamento e descarga . . .	65
5.7	Evolução do <i>Capacity ratio</i>	67
5.8	Evolução do rendimento exergético	69
5.9	Evolução do rendimento entrópico	71
5.10	Influência da temperatura na espessura da termoclina durante o processo de carregamento	73
5.11	Influência da temperatura na espessura da termoclina durante o processo de descarga	73
5.12	Influência do caudal na espessura da termoclina durante o processo de carregamento	74
5.13	Influência do caudal na espessura da termoclina durante o processo de descarga	74
5.14	Evolução do número MIX	76
5.15	Evolução do número de Richardson	77
5.16	Relação entre o Ri e a espessura da termoclina	78
5.17	Evolução do número de Péclet	79
5.18	Relação entre o Ri e o Pe	79
5.19	Relação entre o Pe e a Espessura da termoclina	80
5.20	Evolução do número de Reynolds durante o processo de carregamento	81
5.21	Evolução do número de Reynolds durante o processo de descarga . . .	81
5.22	Relação entre o Ri e o Re_{in}	82
5.23	Relação entre o Pe e o Re_{TES}	82
A.1	Corte da válvula misturadora termostática	101
A.2	Corte do vaso de expansão	102
A.3	Corte da válvula de segurança	103
A.4	Corte do grupo de enchimento	103
A.5	Corte do separador de microbolhas	104
A.6	Corte da válvula de retenção	104
A.7	Percurso inicial do circuito primário	105
A.8	Alteração da configuração e do percurso do circuito primário	106
A.9	Adição da VMT ao circuito primário	107
A.10	Adição do DIP ao circuito primário	108
A.11	Percurso do pré-aquecimento do DIP	109
A.12	Percurso do circuito secundário	110
A.13	Percurso de pré-estabelecimento da temperatura do DIS	111
A.14	Instalação da bomba de circulação B2 no circuito secundário	112
A.15	Percurso do primeiro momento do processo de carregamento	118
A.16	Percurso do segundo momento do processo de carregamento	119

A.17	Percurso do terceiro momento do processo de carregamento	120
A.18	Percurso do segundo momento do processo de descarga	121
A.19	Percurso do último momento do processo de descarga	122
B.1	Estrutura base do repositório de análise de dados	125
B.2	Estrutura da pasta Ensaios	125
B.3	Estrutura da pasta Gráficos	126
B.4	Estrutura da pasta Termoclina	126
B.5	Estrutura da pasta Verificações	127

Lista de Tabelas

2.1	Influência do Ri na estratificação térmica	20
2.2	Influência do Re_{in} na estratificação térmica	22
2.3	Influência do caudal de FT no desempenho de sistemas TES	23
2.4	Influência da temperatura no desempenho de sistemas TES	25
2.5	Influência da relação H/D na performance de sistemas TES	28
4.1	Dimensões do sistema TES	50
4.2	Características metrológicas dos RTD da <i>KIMO Instruments</i>	52
4.3	Características metrológicas do contador PR15 da <i>Enermeter</i>	52
4.4	Condições dos ensaios do sistema TES	54
5.1	Energia térmica armazenada	63
5.2	Energia térmica consumida	63
5.3	Picos de eficiência do processo de carregamento	65
5.4	Picos de eficiência do processo de descarga	65
5.5	Valor final do <i>Capacity ratio</i> no processo de carregamento	67
5.6	Valor final do <i>Capacity ratio</i> no processo de descarga	67
5.7	Picos de rendimento exergético para o processo de carregamento	69
5.8	Picos de rendimento exergético para o processo de descarga	69
5.9	Valor mínimo de rendimento entrópico para o processo de carregamento	71
5.10	Valor mínimo de rendimento entrópico para o processo de descarga	71
5.11	Avaliação dos indicadores de performance em função dos parâmetros operacionais durante o processo de carregamento	85
5.12	Avaliação dos indicadores de performance em função dos parâmetros operacionais durante o processo de descarga	86
A.1	Níveis de regulação da válvula misturadora termostática	102
A.2	Conexão da instrumentação ao data logger	115
A.3	Configuração dos componentes para os ensaios de carregamento	117
A.4	Configuração dos componentes para os ensaios de descarga	120

Acrónimos e Símbolos

Lista de Acrónimos

AQS Água Quente Sanitária

BCR Bomba de Calor Reversível

CFD Mecânica dos Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics*)

CSP Energia Solar Concentrada (*Concentrated Solar Power*)

DIP Depósito de Inércia Primário

DIS Depósito de Inércia Secundário

EUA Estados Unidos da América

FT Fluido de Trabalho

IEA Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency*)

IRENA Agência Internacional de Energia Renovável (*International Renewable Energy Agency*)

ISEP Instituto Superior de Engenharia do Porto

LAVAC Laboratório de Aquecimento Ventilação e Ar condicionado

P.PORTO Instituto Politécnico do Porto

PCM Materiais de Mudança de Fase (*Phase Change Materials*)

RTD Detetores de Temperatura por Resistência (*Resistance Temperature Detectors*)

TES Armazenamento de Energia Térmica (*Thermal Energy Storage*)

UE União Europeia

VEHE Válvula de Equilíbrio Hidráulico Estática

VMT Válvula Misturadora Termostática

Lista de Símbolos

α	Difusividade térmica	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
β	Coefficiente de expansão volumétrico	$[K^{-1}]$
ΔT	Diferença de temperatura	$[K]$
$\dot{m}$	Caudal mássico	$[kg \cdot s^{-1}]$
$\dot{v}$	Caudal volúmico	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
ϵ	Eficiência	$[-]$
η	Rendimento	$[-]$
μ	Viscosidade dinâmica	$[Pa \cdot s]$
ρ	Massa volúmica	$[kg \cdot m^{-3}]$
σ	<i>Capacity ratio</i>	$[-]$
θ	Temperatura adimensional	$[-]$
ζ	Exergia	$[J]$
A	Área	$[m^2]$
c_p	Calor específico	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
D	Diâmetro	$[m]$
E	Energia	$[J]$
Fr	Número de Froude	$[-]$
g	Aceleração gravítica	$[m \cdot s^{-2}]$
H	Altura do sistema TES	$[m]$
i	Instante	$[s]$
j	Camada térmica	$[-]$
k	Condutividade térmica	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
M	Momento de energia	$[J \cdot m]$
m	Massa	$[kg]$
N	Número de camadas térmicas	$[-]$
Pe	Número de Péclet	$[-]$
Q	Calor	$[J]$
Re	Número de Reynolds	$[-]$

Ri	Número de Richardson	$[-]$
s	Entropia	$[J \cdot K^{-1}]$
Str	Número de estratificação	$[-]$
T	Temperatura	$[K]$
u	Energia interna	$[J]$
V	Volume	$[m^3]$
v	Velocidade	$[m \cdot s^{-1}]$
W	Trabalho	$[N \cdot m]$

1 Introdução

Este capítulo introdutório, tem como objetivo fornecer uma visão geral do trabalho realizado. Nele, serão apresentados o enquadramento e a motivação que impulsionou a pesquisa, os objetivos que conduziram o estudo, a metodologia adotada para a sua realização e uma breve descrição da estrutura desta dissertação.

1.1 Enquadramento e motivação

A exploração da energia está ligada ao desenvolvimento humano desde os primórdios da humanidade até à atualidade. Ao longo dos séculos, as comunidades têm descoberto diversas formas de aproveitar energia, que permitem satisfazer as necessidades que vão surgindo com a contínua evolução do planeta Terra.

Segundo os dados mais recentes, publicados pela Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency*) (IEA) [8], no ano de 2022, o consumo global de energia atingiu aproximadamente 440 EJ. Destes, a indústria foi a principal consumidora, representando 38%, seguida pelos edifícios com 30%, e o setor de transportes com 26%. As demais áreas de utilização contribuíram com os restantes 6%.

As fontes de energia térmica, podem ser classificadas como renováveis e não renováveis, de acordo com a forma como a energia é produzida. Ainda que, as fontes de energia não renovável, foram sempre predominantes, a crescente consciência ambiental, que surgiu com a crise do petróleo nos anos 70, tem impulsionado a procura por alternativas mais sustentáveis. Estas alternativas, incidem principalmente no aproveitamento da energia solar, eólica, hídrica e biomassa, que representam fontes de energia renovável.

Mais recentemente, os pacotes de recuperação económica pós-pandemia Covid-19 e a crise energética global desencadeada pela guerra na Ucrânia, levaram ao aumento dos preços dos combustíveis fósseis. Desta forma, diversos países reforçaram o apoio político às energias renováveis, tornando-as assim mais competitivas. De acordo com os dados fornecidos por várias organizações, entre elas, a IEA e a Agência Internacional de Energia Renovável (*International Renewable Energy Agency*) (IRENA) [9], em 2022, houve um acréscimo de 295 GW na capacidade de produção de energia através de fontes renováveis, representando 83% da nova capacidade de produção instalada, globalmente.

Mesmo com o desenvolvimento de fontes de energia mais limpas, as perdas de energia térmica, especialmente o calor que é dissipado nos processos realizados pela indústria, continua a ser um campo que precisa de ser otimizado. O aproveitamento da energia e a redução das perdas de calor são temas cada vez mais estudados com o objetivo de aumentar a eficiência energética e reduzir os efeitos negativos no meio ambiente.

Os dados disponibilizados pela IEA [10], demonstram que, o investimento em eficiência energética na indústria, impulsionado por novas políticas na União Europeia

(UE), Estados Unidos da América (EUA) e vários mercados asiáticos, cresceu 20% desde 2020, atingindo aproximadamente 46 bilhões de euros em 2023. Iniciativas como, "*The Net-Zero Industry Act*" e "*The Green Deal Industrial Plan*", por parte da UE, visam reduzir burocracias, aprimorar habilidades e expandir financiamentos, de forma a capacitar o fabrico de tecnologias mais eficientes.

O crescente impulso na eletrificação e nas energias renováveis está a transformar o papel das tecnologias disponíveis, privilegiando a otimização dos sistemas para retirar o maior proveito possível.

Entre as tecnologias que se revelaram elementos fundamentais para as fontes de energia renovável, os sistemas TES desempenham um papel fulcral na otimização da eficiência energética. Um dos exemplos mais comuns da sua aplicabilidade, é a possibilidade de acumular a energia térmica obtida através de painéis solares ou fotovoltaicos, em períodos de alta produtividade, para que esta seja utilizada, posteriormente, quando a procura é maior ou a produção é limitada.

A capacidade de armazenar energia térmica ajuda a lidar com os desafios de intermitência associados a algumas fontes de energia térmica, proporcionando uma fonte de energia estável e contínua quando necessário. Esta capacidade não só melhora a fiabilidade do fornecimento de energia, mas também desempenha um papel crucial ao maximizar a utilização da energia disponível, aumentando assim a eficiência associada à fonte de energia térmica em que estes são aplicados.

1.2 Objetivos de investigação

O objetivo principal desta investigação é desenvolver uma plataforma experimental funcional, que permita a realização de estudos do comportamento de sistemas TES em diversas configurações e cenários.

Os objetivos secundários desta investigação foram delineados para analisar o comportamento dinâmico de um sistema TES, com o intuito de validar o conhecimento adquirido durante a revisão bibliográfica, bem como identificar oportunidades de avanço e melhoria.

O Laboratório de Aquecimento Ventilação e Ar condicionado (LAVAC) do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) foi o local escolhido para a montagem da plataforma experimental, uma vez que este, dispõe das instalações adequadas para conduzir os ensaios propostos.

1.3 Opções metodológicas

O primeiro passo desta investigação, consistiu na realização de uma revisão abrangente da literatura relacionada com sistemas TES e estudos experimentais neste âmbito, a fim de entender o contexto atual, identificar lacunas no conhecimento existente e estabelecer uma base sólida para o trabalho subsequente.

De seguida, foi montada a plataforma experimental. Isto, incluiu a seleção e aquisição dos equipamentos adequados, bem como a configuração e integração dos componentes necessários para criar um ambiente experimental funcional e controlado.

A fase seguinte, consistiu na execução de diversos ensaios de um sistema TES. Os ensaios foram, cuidadosamente, planeados e executados de acordo com metodologias estabelecidas, de modo a garantir a precisão e a repetibilidade dos resultados obtidos.

Por último, os dados obtidos ao longo dos ensaios foram analisados e interpretados de forma a extrair conclusões. Estas permitiram otimizar a configuração da plataforma experimental e contribuíram para o avanço do conhecimento sobre o comportamento do sistema TES em estudo.

1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está dividida em seis capítulos, sendo estes:

- Capítulo 1 - Apresenta-se o contexto do tema, os objetivos, a metodologia adotada e a estrutura da dissertação;
- Capítulo 2 - Realiza-se uma revisão crítica da literatura sobre estudos experimentais de sistemas TES;
- Capítulo 3 - Descreve-se detalhadamente a plataforma experimental desenvolvida para o estudo de sistemas TES;
- Capítulo 4 - Explica-se os procedimentos experimentais e técnicas de análise utilizados no estudo de um sistema TES específico;
- Capítulo 5 - Apresenta-se e discute-se os resultados obtidos nos ensaios realizados;
- Capítulo 6 - Sintetiza-se as principais conclusões, desafios encontrados e propõem-se direções para trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

Este capítulo, propõe uma incursão abrangente na literatura atual relacionada com sistemas TES e estudos experimentais neste âmbito. Num cenário global, cada vez mais orientado para a eficiência energética e a transição para fontes renováveis, os sistemas TES surgem como componentes críticos para a estabilidade e avanço dos sistemas energéticos. Esta revisão, procura destacar os avanços, as tendências e as questões fundamentais que permeiam o desenvolvimento e a aplicação destes sistemas.

2.1 Armazenamento de energia térmica em sistemas TES

2.1.1 Meios de armazenamento

A eficiência dos sistemas TES, depende significativamente das propriedades dos materiais escolhidos para armazenar e libertar a energia térmica [11].

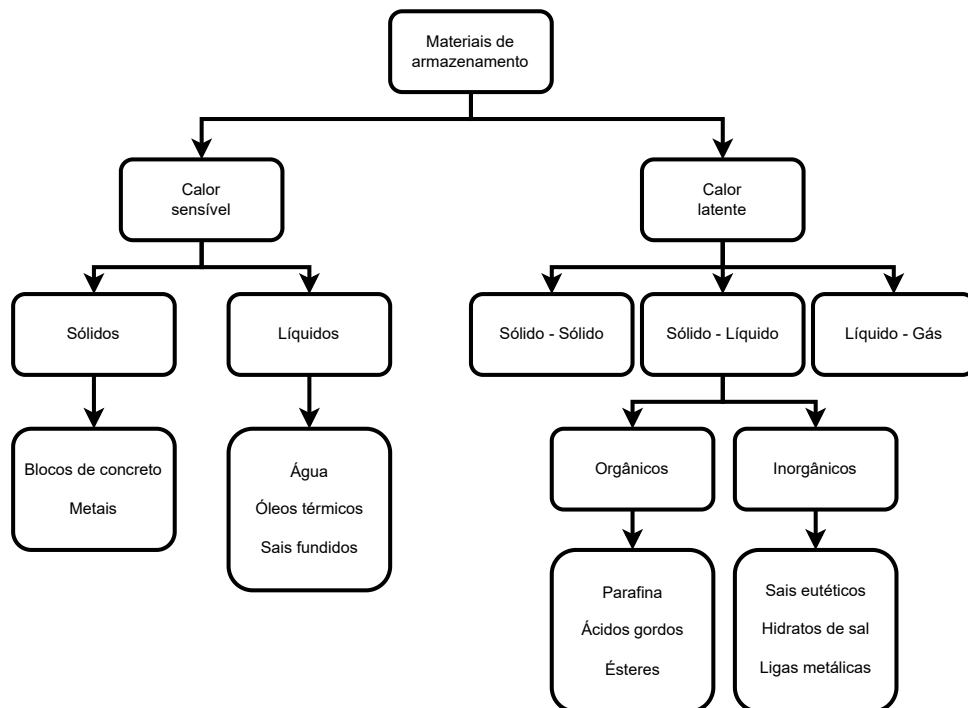


Figura 2.1: Materiais de armazenamento de energia térmica em sistemas TES [1]

Para aplicações de baixa temperatura (menos de 50°C), é crucial escolher materiais capazes de armazenar energia a temperaturas mais baixas, sem que hajam perdas significativas. Estes devem garantir que a energia seja armazenada e libertada de forma eficiente e em grandes quantidades por unidade de massa ou volume.

Deste modo, são preferidos materiais com boa condutividade térmica e com elevado calor específico [12].

Para aplicações de elevada Temperatura (acima de 175°C), são preferidos materiais com uma maior capacidade de operar em temperaturas mais elevadas sem que sofram deterioração significativa. A capacidade do material manter as suas propriedades estruturais e químicas em temperaturas extremas é fundamental para um desempenho consistente ao longo do tempo, assim como a eficiência na transferência do calor armazenado, de modo a garantir que a energia seja absorvida e libertada de forma rápida e eficaz [12].

Em ambos os casos, a escolha do material de armazenamento de energia térmica depende das condições específicas da aplicação, como custo, disponibilidade, eficiência energética e vida útil do sistema.

Os materiais de armazenamento de energia térmica, presentes no diagrama da Figura 2.1, podem armazenar energia sobre a forma de calor latente e sensível [13]. Cada uma dessas formas, possui propriedades distintas que permitem a absorção, retenção e libertação de energia térmica em diferentes intervalos de temperatura.

Armazenamento sobre a forma de calor sensível

O armazenamento de energia sobre a forma de calor sensível, consiste em armazenar a energia térmica em função do calor específico do material, sem que haja qualquer mudança de fase. O calor armazenado é proporcional à massa volúmica, ao volume e à variação de temperatura do material ou fluido que mantém a energia no depósito.

Diversos materiais são utilizados para armazenamento de calor sensível. A água é um exemplo versátil, devido ao seu elevado calor específico, facilidade de acesso e custo acessível. Pode ser utilizada nos estados gasoso, líquido ou sólido, de acordo com a aplicação, sem riscos ambientais significativos [14].

Os óleos térmicos apresentam vantagens em termos de estabilidade a temperaturas elevadas, no entanto, possuem um calor específico inferior e uma menor condutividade térmica do que a água. Estes, são mais dispendiosos, e em caso de fugas no estado gasoso, podem ser prejudiciais para o ambiente [15].

Os sais fundidos são, preferencialmente, aplicados em casos onde as temperaturas são mais elevadas, devido ao seu elevado ponto de ebulição e à sua estabilidade térmica a altas temperaturas. São acessíveis e de baixo custo, porém, possuem baixa condutividade térmica e fracas propriedades de escoamento, o que pode levar ao desgaste das tubagens, a falha por fadiga, e ao aumento dos custos de bombeamento [15].

Já os metais, embora ofereçam um amplo intervalo de temperaturas de funcionamento e alta capacidade de armazenamento de calor sensível, apresentam algumas desvantagens. São corrosivos, inflamáveis e no geral têm um custo elevado, limitando assim a sua aplicação [15].

Os blocos de concreto, são utilizados como estrutura interna nos depósitos e trocam calor através do contacto com outros componentes do sistema TES. São baratos, têm boas propriedades mecânicas e os seus resíduos podem ser reaproveitados. Contudo, têm um calor específico e uma condutividade térmica bastante menores em relação aos restantes exemplos [16].

O armazenamento de energia sobre a forma de calor sensível, é viável devido aos materiais utilizados, geralmente, serem de fácil acessibilidade e estáveis a altas

temperaturas. O facto de grande parte destes materiais possuírem um calor específico elevado, permite o armazenamento de quantidades significativas de energia num vasto intervalo de temperaturas de funcionamento.

Armazenamento sobre a forma de calor latente

A energia térmica pode ser armazenada de forma quase isotérmica em certas substâncias através do calor latente gerado durante mudanças de fase. Atualmente, a transição sólido-líquido é, predominantemente, usada e as substâncias associadas a essa transformação são chamadas de Materiais de Mudança de Fase (*Phase Change Materials*) (PCM), que operam segundo o princípio demonstrado na Figura 2.2.

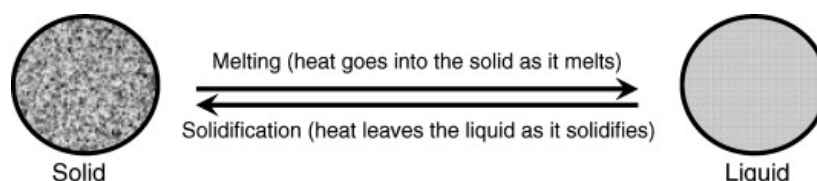


Figura 2.2: Princípio de funcionamento dos PCM [2]

Sistemas de armazenamento que utilizam PCM, podem ser mais compactos se comparados aos sistemas que lidam apenas com um único estado físico. No entanto, o design e a seleção dos meios de transferência de calor podem ser mais desafiadores, devido à variação do volume do material associado a estas transformações [14].

Existem várias categorias de materiais usados para armazenar calor latente, sendo os mais comuns, materiais orgânicos e inorgânicos, além de certos metais e suas ligas. Os materiais orgânicos incluem parafina, ácidos gordos e ésteres. A parafina é amplamente utilizada, porém cara. Os ácidos gordos são mais baratos, mas têm mudanças de volume drásticas. Os ésteres têm boa estabilidade química, mas são caros, e têm massa volúmica e condutividade térmica baixas. [1].

Já os materiais inorgânicos, operam em temperaturas mais altas que os orgânicos. Os sais, nomeadamente, os sais eutéticos, possuem um ponto de fusão alto e podem armazenar calor sensível e latente. Contudo, têm baixa condutividade térmica e as suas propriedades são ajustáveis, tornando difícil prever a sua capacidade de armazenamento. Os hidratos de sal apresentam a vantagem de operarem a temperaturas inferiores à da zona de conforto humano, além de possuírem um elevado calor latente. Contudo, compartilham as mesmas limitações dos sais eutéticos [1].

Os Metais e suas ligas, possuem elevado volume específico e elevada condutividade térmica, porém são caros, pesados e sensíveis a alterações na sua estrutura devido aos ciclos térmicos a que estarão expostos. Os elevados coeficientes de expansão térmica podem danificar os reservatórios, e o sobrearrefecimento de alguns destes materiais também representa uma condicionante para a sua aplicabilidade [1].

O armazenamento de calor latente apresenta uma densidade energética superior, devido ao facto de este ser maior que o calor sensível, o que ajuda a manter a temperatura do fluido constante durante períodos de baixa oferta de energia. No entanto, o principal desafio está na baixa condutividade térmica dos materiais usados para armazenar calor latente, o que pode limitar a eficiência da transferência de calor e exigir estratégias adicionais para otimizar o seu desempenho. Embora alguns

materiais possam ser inflamáveis, a maioria não é tóxica, o que contribui para uma aplicação mais segura e ampla.

2.1.2 Mecanismos de armazenamento

Sistemas Passivos

Os sistemas passivos de armazenamento de energia térmica são projetados para armazenar e libertar energia sem a necessidade de dispositivos mecânicos ou ações externas. Estes sistemas exploram processos naturais ou propriedades específicas dos materiais para desempenhar essa função.

Uma das abordagens mais comuns destes sistemas, envolve o uso de PCM. Nos edifícios, os PCM podem ser integrados em elementos estruturais ou revestimentos para regular a temperatura interna. Durante o dia, absorvem o excesso de calor e à noite libertam-no, ajudando a manter uma temperatura interna mais estável, reduzindo assim a necessidade de aquecimento ou arrefecimento artificial [17].

No campo dos têxteis, os PCM são incorporados em tecidos para proporcionar conforto térmico. Quando a temperatura ambiente muda, esses materiais absorvem ou libertam calor para manter uma temperatura corporal mais constante, oferecendo uma sensação térmica mais confortável [2].

Os sistemas passivos, especialmente os baseados em PCM, representam uma forma eficiente e sustentável de armazenar e utilizar energia térmica em diferentes áreas, reduzindo o consumo de energia e contribuindo para a mitigação do impacto ambiental.

Sistemas Ativos

Os sistemas ativos de armazenamento de energia térmica utilizam dispositivos mecânicos para fazer circular um Fluido de Trabalho (FT). São aplicados em ambientes de altas temperaturas, visando uma troca de calor eficiente, de um grande caudal mássico ou volúmico, por convecção forçada.

Existem diversas configurações para esses sistemas. Os sistemas que utilizam reservatórios como depósitos de energia térmica, operam com o FT como transmissor primário de energia, de forma a aquecer o fluido ou material que permanece no interior dos mesmos. Estes, podem ter diversos arranjos, incluindo sistemas diretos ou indiretos de dois reservatórios ou sistemas de um só reservatório [13].

Os sistemas de camadas compactas possuem um depósito com camadas isolantes, permitindo o contacto direto entre o FT e o material que está a armazenar a energia, otimizando assim a transferência de calor entre ambos [18].

Os sistemas de camadas de fluidos são utilizados em ambientes de temperaturas muito elevadas. Nestes sistemas, as partículas sólidas retêm o calor e são transportadas por um fluido de alta velocidade para distribuir a energia térmica [19].

Os sistemas com blocos, necessitam de tubos no seu interior, por onde circula o FT, para que haja troca de calor entre ambos e seja possível armazenar e libertar a energia térmica [16].

As diversas configurações destes sistemas, são aplicadas em vários cenários industriais, com destaque para as centrais de Energia Solar Concentrada (*Concentrated Solar Power*) (CSP), oferecendo alternativas para armazenar de forma eficaz e utilizar de maneira inteligente a energia térmica.

2.1.3 Ciclos de armazenamento

Diários

Os sistemas de armazenamento de energia térmica com ciclos diários, armazenam a energia térmica acumulada durante o dia para atender às necessidades térmicas durante a noite.

São várias as aplicações industriais e domésticas, que utilizam ciclos diários para aproveitar a energia térmica. Nas centrais CSP, os sistemas TES, são concebidos para armazenar energia térmica durante o dia, para uso posterior durante a noite. Geralmente, estes usam sais fundidos ou óleos térmicos como meios de armazenamento [13].

No fornecimento de Água Quente Sanitária (AQS), a energia térmica é armazenada no sistema TES e a transferência de calor com o coletor solar pode ser realizada por termossifão ou bombeamento de um FT [13].

Estes sistemas aproveitam a energia térmica durante o período em que esta se encontra disponível, para utiliza-la, posteriormente, suprimindo as necessidades de aquecimento ou arrefecimento quando a fonte principal não está ativa.

Sazonais ou de longa duração

Em regiões de elevadas latitudes, onde os dias de verão são longos e os invernos rigorosos, a necessidade de aquecimento de espaços e AQS é considerável. Nestes casos, os sistemas TES desempenham um papel crucial, armazenando o excesso de energia durante os períodos de maior produção, para uso posterior. No entanto, o tempo e a quantidade a ser armazenada são desafios a serem superados, bem como a distribuição estável e eficiente dessa energia.

Dentro dos métodos de armazenamento, os sistemas subterrâneos surgem como uma alternativa viável. Os sistemas TES subterrâneos são revestidos com plástico e de seguida enchidos com gravilha e água. A água vai empurrar a gravilha para os lados e para baixo, fazendo com que a mesma suporte a estrutura, reduzindo desta forma os custos de construção destes sistemas [20].

Os sistemas TES aquíferos, são sistemas geológicos subterrâneos naturalmente existentes, que contêm água a uma pressão superior à atmosférica, o que facilita a sua extração. A água proveniente das profundezas de lagos, capitalizando a baixa temperatura das mesmas, tem sido explorada para arrefecimento durante o verão. Essa abordagem foi implementada em projetos como o *Purdy's Wharf* e *Enwave, Toronto System* [21]. Apesar de ser uma alternativa mais acessível em termos monetários, requer condições geológicas específicas, raramente encontradas [13].

O armazenamento de calor em condutas subterrâneas (*borehole* TES), pode também ser viável em locais com solo específico e que tenham elevada condutividade térmica [22].

Entre estes, os sistemas TES subterrâneos e aquíferos são os mais promissores, contudo os requisitos geológicos deste ultimo, limitam bastante a sua aplicação, sendo este também um fator preponderante no armazenamento de energia térmica em sistemas *borehole* TES.

2.1.4 Distribuição da energia armazenada

Esquema centralizado

Na centralização do armazenamento de energia térmica, a energia é retida num sistema TES, numa zona próxima à sua fonte, sendo esta, posteriormente, distribuída para consumo através de uma rede de tubagens ou canais específicos.

Sob esse esquema, diversas aplicações podem ser encontradas em diferentes contextos. Em regiões de latitude elevada, como na Europa, os sistemas centralizados de armazenamento de energia térmica foram combinados com centrais CSP com armazenamento diurno e com armazenamento sazonal. Nas cidades de *Kungälv* e *Nykvarn*, na Suécia foram construídas duas centrais CSP com armazenamento diurno, que possuem diversos sistemas TES, em que a energia armazenada, é distribuída para uso doméstico ou industrial através de uma rede de aquecimento urbano [20]. Além disso, em *Friedrichshafen*, na Alemanha, foi também construída uma central CSP com armazenamento sazonal, que possui apenas um sistema TES, em que a energia armazenada durante períodos onde esta tem maior disponibilidade, será utilizada durante os meses mais frios do ano [20].

Ambos os casos, ilustram a aplicação destes sistemas em diferentes locais, adequando-se às necessidades de armazenamento e distribuição de energia térmica em climas específicos.

Esquema distribuído

Num esquema distribuído de armazenamento de energia térmica, os sistemas são propriedade dos proprietários dos edifícios e são empregados para usar a energia armazenada, durante os períodos de baixa procura, nos períodos onde as necessidades são maiores.

Desta forma, foram adotadas diversas estratégias para otimizar o uso da energia armazenada. A estratégia de armazenamento total, consiste na utilização de um sistema de apoio, durante os momentos de menor procura, enquanto nos picos de consumo a energia é obtida a partir do sistema TES. Outra estratégia, é o armazenamento parcial com nivelamento de carga, na qual, o sistema de apoio opera em capacidade parcial durante os picos de consumo e a restante energia é fornecida pelo sistema TES [13].

Adicionalmente, existem métodos de armazenamento móvel, que são utilizados quando a ligação direta entre fornecedor e consumidor não é possível. Isso inclui configurações como os sistemas TES móveis de sorção [23], ou os sistemas TES móveis que armazenam calor latente através do uso de PCM [24].

Estas estratégias de otimização do uso da energia armazenada, revelam abordagens flexíveis e adaptáveis para lidar com variações das necessidades energéticas. Desde o armazenamento total até ao parcial, com diferentes modos de operação, cada estratégia procura equilibrar o uso do sistema de apoio e do sistema TES conforme as necessidades. Além disso, os métodos de armazenamento móvel, como os sistemas TES de sorção e os que utilizam PCM, demonstram a versatilidade e a procura intensa por eficiência no armazenamento e utilização da energia térmica.

2.2 Indicadores de performance de sistemas TES

De um modo geral, a avaliação do desempenho dos sistemas TES pode ser dividida em duas abordagens distintas: através de representações visuais e através de indicadores de performance. As representações visuais, embora forneçam detalhes locais das distribuições de temperatura ou velocidade, não conseguem oferecer uma visão direta do desempenho global dos sistemas TES. Para uma análise abrangente do desempenho de um sistema TES integrado num sistema energético completo, são necessários indicadores de desempenho mais abrangentes.

Njoku et al. [3], reuniram uma série de indicadores presentes na literatura atual, organizando-os em categorias diferentes, de acordo com as bases para as suas derivações, tal como consta no diagrama da Figura 2.3.

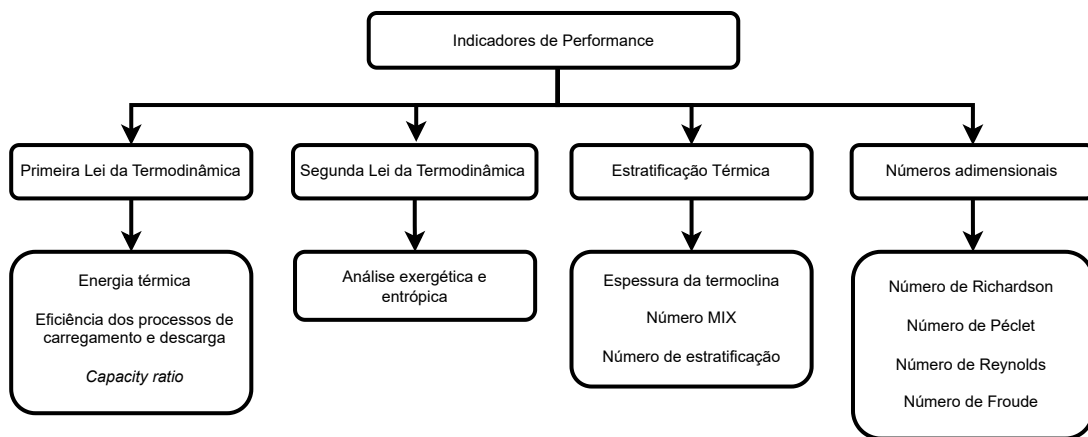


Figura 2.3: Sumário dos indicadores de performance de sistemas TES [3]

2.2.1 Primeira lei da termodinâmica

Em conformidade com o princípio da conservação de energia, é possível obter indicadores de performance que podem quantificar a energia térmica armazenada. Esta caracterização quantitativa é essencial para avaliar a eficiência do sistema TES em armazenar e disponibilizar energia.

Energia térmica

Com base na primeira lei da termodinâmica, diversos autores [25, 26, 27, 28, 29], definiram a quantidade total de energia térmica armazenada num sistema TES num dado instante, através Equação 2.1.

$$E_i = (\rho_i \cdot c_{p_i} \cdot (T_i - T_{ini}) \cdot V) \quad (2.1)$$

Em que:

- E_i : Energia térmica;
- ρ_i : Massa volúmica;

- c_{pi} : Calor específico;
- T_i : Temperatura no interior do sistema TES no instante i ;
- T_{ini} : Temperatura inicial no interior do sistema TES;
- V : Volume.

Eficiência dos processos de carregamento e descarga

A eficiência dos processos de carregamento e descarga (ϵ_{ch} e ϵ_{dis}), assim como, o efeito cíclico dessas operações, influenciam numa escala considerável a quantidade de energia armazenada num sistema TES.

Lou et al. [5], durante o seu estudo e de uma forma mais simplificada, apresentaram as eficiências dos processos de carregamento e descarga, conforme demonstrado pelas Equações 2.2 e 2.3, respetivamente.

$$\epsilon_{ch} = \frac{E_{in} - E_{out}}{E_{in}} = \frac{\int_0^i \dot{m} c_p T_{in}(i) - T_{out}(i) di}{\int_0^i \dot{m} c_p T_{in}(i) - T_{ini} di} \quad (2.2)$$

$$\epsilon_{dis} = \frac{E_{out} - E_{in}}{E_{stored}} = \frac{\int_0^i \dot{m} c_p T_{out}(i) - T_{in}(i) di}{\dot{m} c_p T_{ini}} \quad (2.3)$$

Em que:

- $\dot{m}$: Caudal mássico;
- c_p : Calor específico;
- T_{in} : Temperatura de entrada do FT no sistema TES;
- T_{out} : Temperatura de saída do FT do sistema TES;
- T_{ini} : Temperatura inicial no interior do sistema TES.

Capacity ratio

Lou et al. [5], propuseram ainda outro indicador de performance, o *Capacity ratio*, representado pelas Equações 2.4 e 2.5 para o processo de carregamento e para o processo de descarga (σ_{ch} e σ_{dis}), respetivamente. Este, demonstra a relação entre a energia térmica real armazenada e a capacidade máxima do depósito armazenar energia térmica.

Portanto, o valor deste é igual a 1 durante operações de carregamento/descarga completas, mas é inferior a 1 durante operações parciais de carregamento/descarga.

$$\sigma_{ch} = \frac{E_{in} - E_{out}}{V \cdot ((\rho c_p T_{max}) - (\rho c_p T_{min}))} \quad (2.4)$$

$$\sigma_{dis} = \frac{E_{out} - E_{in}}{V \cdot ((\rho c_p T_{max}) - (\rho c_p T_{min}))} \quad (2.5)$$

Em que:

- E_{in} : Energia admitida no sistema TES;
- E_{out} : Energia retirada do sistema TES;
- V : Volume de armazenamento do sistema TES;
- ρ : Massa volúmica;
- c_p : Calor específico;
- T_{max} e T_{min} : Temperaturas máxima e mínima no interior do sistema TES, respetivamente.

2.2.2 Segunda lei da termodinâmica

Os indicadores referidos, anteriormente, utilizam como base a primeira lei da termodinâmica. Esta, estabelece a equivalência entre o calor e o trabalho, embora tenha a limitação de não demonstrar a qualidade da energia em função do estado do sistema. Neste sentido, é possível observar na literatura mais recente, a presença de uma análise exergética e entrópica.

Análise exergética e entrópica

Esta técnica, consiste numa análise baseada na combinação da primeira e da segunda lei da termodinâmica. A exergia é definida como o potencial de trabalho de uma substância relativamente a um estado de referência, permitindo assim avaliar o quão próximo é o desempenho do sistema TES ao ideal. A entropia mede a desordem de um sistema e reflete as perdas irreversíveis de energia, permitindo uma identificação mais precisa das causas, dos locais e da magnitude das perdas energéticas.

Shah and Furbo [4] e *Solé et al.* [30], ao longo do tempo foram formulando, desenvolvendo e aprimorando esta análise, através da desagregação que se segue.

Ao dividirem um sistema TES em "N" camadas horizontais, cada uma com massa m_j e temperatura T_j , a variação de energia disponível devido à alteração do sistema de um estado inicial (0) para um estado final (1), na mesma camada, desprezando a energia cinética e potencial, é dada pela Equação 2.6, enquanto o balanço entrópico associado à mesma alteração é dado pela Equação 2.7.

$$m_j \cdot (u_{1,j} - u_{0,j}) = Q_{0-1,j} + W_{0-1,j} \quad (2.6)$$

$$m_j \cdot (s_{1,j} - s_{0,j}) \geq \int_0^1 \frac{dQ_j}{T_{0,j}} \quad (2.7)$$

Em que:

- m_j : Massa da camada j ;
- $u_{1,j}$ e $u_{0,j}$: Energia interna da camada j no estado final e inicial, respetivamente;
- $Q_{0-1,j}$: Calor da camada j ;

- $W_{0-1,j}$: Trabalho da camada j ;
- $s_{1,j}$ e $s_{0,j}$: Entropia da camada j no estado final e inicial, respetivamente;
- $T_{0,j}$: Temperatura inicial da camada j .

Ao considerarem que esta alteração é um processo reversível e que a temperatura do estado inicial (0) é constante, as Equações 2.6 e 2.7 foram reformuladas de acordo com as Equações 2.8 e 2.9.

$$m_j \cdot (u_{1,j} - u_{0,j}) = Q_{0-1,j}^{rev} + W_{0-1,j}^{rev} \quad (2.8)$$

$$m_j \cdot (s_{1,j} - s_{0,j}) = \frac{Q_{0-1,j}^{rev}}{T_{0,j}} \quad (2.9)$$

Resolvendo a Equação 2.9 em ordem a $Q_{0-1,j}^{rev}$, substituindo na Equação 2.8 a expressão obtida, e organizando a mesma de forma a isolar $W_{0-1,j}^{rev}$ num dos lados da equação, obtiveram a Equação 2.10.

$$W_{0-1,j}^{rev} = m_j \cdot (u_{1,j} - u_{0,j}) + m_j \cdot T_0 \cdot (s_{0,j} - s_{1,j}) = \zeta_{1-0,j} \quad (2.10)$$

Na Equação 2.10, $\zeta_{1-0,j}$ corresponde à exergia associada à alteração do sistema TES de um estado 0 para um estado 1 numa camada j . Para essa camada j , a variação da entropia é dada pela Equação 2.11 e a variação da energia interna é dada pela Equação 2.12.

$$(s_{1,j} - s_{0,j}) = c_p \cdot \ln \frac{T_{0,j}}{T_{1,j}} \quad (2.11)$$

$$(u_{1,j} - u_{0,j}) = c_p \cdot (T_{1,j} - T_{0,j}) \quad (2.12)$$

Ao inserirem na Equação 2.10, as Equações 2.11 e 2.12, e somando a expressão obtida para todas as camadas que compõem o depósito, chegaram à exergia total associada à alteração do sistema TES de um estado 0 para um estado 1, dada pela Equação 2.13.

$$\zeta_{1-0} = \sum_{j=1}^N c_{p_j} \cdot \left[m_j \cdot (T_{1,j} - T_{0,j}) + m_j \cdot T_{0,j} \cdot \ln \frac{T_{0,j}}{T_{1,j}} \right] \quad (2.13)$$

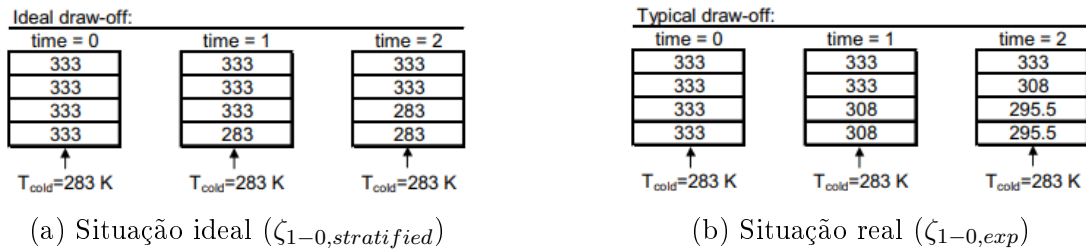


Figura 2.4: Diferenças entre a situação ideal e real [4]

Ao compararem a situação real ($\zeta_{1-0, exp}$) com a situação ideal ($\zeta_{1-0, stratified}$), ambas exemplificadas na Figura 2.4, definiram uma eficiência exergética (η_ζ), dada pela Equação 2.14.

$$\eta_{\zeta} = \frac{\zeta_{1-0,exp}}{\zeta_{1-0,stratified}} \quad (2.14)$$

Por outro lado, definiram a eficiência entropica (η_s), como a diferença de entropia entre o depósito no início do processo (s_0) e a evolução real ($s_{0-1,exp}$), dividida pela diferença de entropia entre o depósito no início do processo (s_0) e a evolução ideal ($s_{0-1,stratified}$), através da Equação 2.15.

$$\eta_{s_{dis}} = \frac{s_0 - s_{0-1,exp}}{s_0 - s_{0-1,stratified}} \quad (2.15)$$

Deste modo, valores próximos de 0 indicam que os processos de carregamento e descarga resultaram num aumento da desordem do sistema, aproximando-os da condição de total mistura. Por outro lado, valores próximos de 1 sugerem que os processos de carregamento e descarga preservaram a ordem do sistema, aproximando-os da condição ideal de estratificação.

2.2.3 Estratificação térmica

Os indicadores de performance baseados na estratificação térmica, analisam a evolução do gradiente de temperatura no interior do sistema TES no espectro temporal e espacial.

A estratificação térmica é um fenómeno natural que ocorre no interior dos sistemas TES, onde o FT se separa em camadas com diferentes temperaturas.

Esta separação, ocorre devido às diferenças de massa volúmica, que fazem com que, as camadas mais quentes subam para a parte superior do depósito e as mais frias permaneçam na parte inferior.

Uma característica comum deste fenómeno, é a existência de uma região estreita com um elevado gradiente de temperatura, intitulada termoclina, que separa as camadas térmicas do FT. A termoclina cria uma barreira térmica que dificulta a transferência de calor, afetando a eficiência do armazenamento de energia [31].

Por sua vez, a distribuição da temperatura, tem um impacto significativo na qualidade da energia armazenada num sistema TES. *Haller et al.* [32], conduziram um estudo de um reservatório de água estratificado e outro totalmente misturado, onde observaram um aumento de 6% na eficiência do armazenamento de energia térmica e um aumento de 20% na eficiência do sistema energético como um todo, quando a estratificação térmica estava bem estabelecida.

Desta forma, a estratificação térmica, ilustrada na Figura 2.5, assim como, a estabilidade e espessura da termoclina, são dois fatores preponderantes na eficiência energética não só do próprio sistema TES mas também de um sistema energético no seu todo.

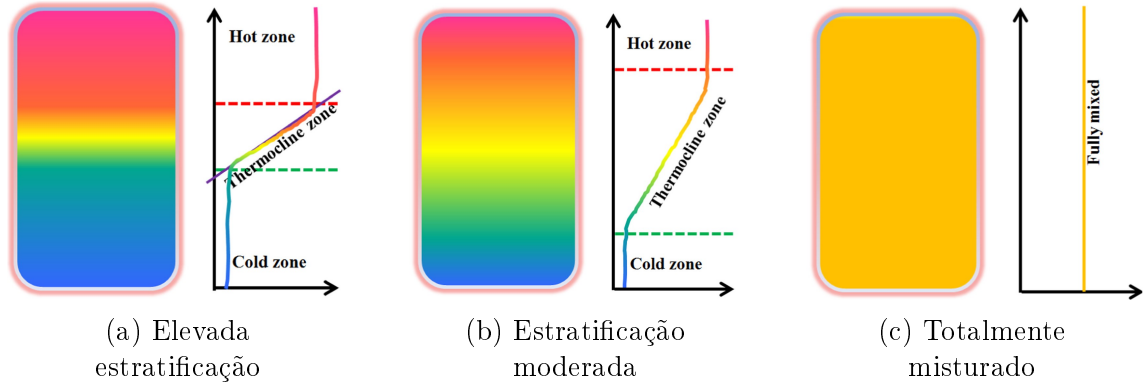


Figura 2.5: Diferentes níveis de estratificação em sistemas TES [5]

Espessura da termoclina

A espessura da termoclina, foi um indicador introduzido por *Musser and Bahnfleth* [33], que propuseram uma definição baseada na adimensionalização da distribuição da temperatura no interior do sistema TES. Para delimitar a zona da termoclina, estes autores assumiram que esta se encontra entre 10% a 15% abaixo do valor máximo e acima do valor mínimo da temperatura adimensional, que é definida pela Equação 2.16.

$$\theta_{i,j} = \frac{T_{i,j} - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \quad (2.16)$$

Em que:

- $\theta_{i,j}$: Temperatura adimensional da camada j no instante i ;
- $T_{i,j}$: Temperatura da camada j no instante i ;
- T_{max} e T_{min} : Temperaturas máxima e mínima no interior do sistema TES, respetivamente.

Outros autores [34, 35], confirmaram que a distribuição de temperatura em sistemas TES apresenta um perfil em "S". Deste modo, *Bayon and Rojas* [36], deram continuidade à abordagem anterior e propuseram uma versão melhorada da mesma. Dado que, um perfil em S pode ser representado por uma função sigmoideal, estes autores, aproximaram a distribuição da temperatura no interior do reservatório de acordo com a equação 2.17.

$$\theta(Z, Z_c, S) = \theta_{min} + \frac{\theta_{max} - \theta_{min}}{1 + \exp(-S \cdot (Z - Z_c))} \quad (2.17)$$

Em que:

- S : Variância da curva de temperatura da função sigmoideal;
- Z : Posição adimensional do ponto de medição de temperatura;
- Z_c : Posição adimensional do centro da termoclina;
- θ_{max} e θ_{min} : Temperatura adimensional máxima e mínima, respetivamente.

Os valores obtidos experimentalmente foram ajustados para o intervalo de tempo durante o qual a termoclina esteve presente no interior do reservatório. Os resultados demonstraram que este método foi bastante eficaz, obtendo uma variância do gradiente de temperatura máxima de 3,6%.

Número MIX

Em diversos estudos neste âmbito [6, 37, 38, 39], o número MIX surge como um indicador utilizado para avaliar a eficiência da mistura durante o processo de carregamento ou descarga, de um sistema TES. Este indicador é derivado do momento de energia, que é calculado integrando o calor sensível ao longo de cada segmento horizontal "j" do sistema TES. A soma desses "N" segmentos horizontais, conforme expresso na Equação 2.18, representa o momento total de energia do sistema TES.

$$M = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j \cdot E_j \quad (2.18)$$

Em que:

- N : Número total de camadas térmicas;
- y_j : Altura do ponto de medição de temperatura da camada j ;
- E_j : Energia da camada j .

Num reservatório perfeitamente estratificado, a energia total armazenada depende do volume ocupado pelo FT frio e quente. Em contraste, num reservatório totalmente misturado, considera-se que o volume ocupado pelo FT é o volume total do depósito.

O momento total de energia num armazenamento perfeitamente estratificado é calculado com base nas temperaturas do FT quente e frio. Durante o processo de carregamento, a temperatura do FT frio é igual à temperatura inicial do reservatório, enquanto a temperatura do FT quente é assumida como a temperatura medida na parte superior do mesmo. O volume da camada correspondente ao FT frio varia em função do volume total de FT no reservatório, subtraído pelo volume de FT adicionado durante o processo.

Durante o processo de descarga, o procedimento é invertido. A temperatura do FT frio é igual à temperatura medida na parte inferior do reservatório, e a temperatura do FT quente é assumida como a temperatura inicial do reservatório. O volume da camada correspondente ao FT quente evolui de forma semelhante ao do FT frio durante o processo de carregamento.

Para um armazenamento totalmente misturado, o momento total de energia é calculado com base na média ponderada das temperaturas medidas ao longo do comprimento axial do reservatório em cada instante.

O número MIX, dado pela Equação 2.19, é representado pela razão entre a diferença do momento de energia de um armazenamento perfeitamente estratificado ($M_{stratified}$) e o armazenamento experimental (M_{exp}), e a diferença do momento de energia entre um armazenamento perfeitamente estratificado ($M_{stratified}$) e um armazenamento totalmente misturado ($M_{fullmixed}$). Desta forma, conclui-se que, $MIX = 0$ representa um reservatório perfeitamente estratificado e $MIX = 1$ representa

um reservatório totalmente misturado, por isso, quanto menor for o número MIX, melhor será a estratificação térmica no sistema TES.

$$MIX = \frac{M_{stratified} - M_{exp}}{M_{stratified} - M_{fullmixed}} \quad (2.19)$$

Número de estratificação

Enquanto o número MIX se concentra na energia degradada instantaneamente durante a mistura das camadas térmicas, existe um outro indicador, o número de estratificação (Str), dado pela Equação 2.20, que representa o gradiente de temperatura na direção vertical do sistema TES. Este indicador, conforme definido por *Fernandez-Seara et al.* [40, 41], é calculado pela razão entre a média dos gradientes de temperatura em dois nós j distintos, em qualquer momento dos processos de carregamento ou descarga, dada pela Equação 2.21, e o gradiente médio máximo de temperatura, dado pela Equação 2.22.

$$Str = \frac{\overline{(\partial T / \partial z)_i}}{\overline{(\partial T / \partial z)_{max}}} \quad (2.20)$$

$$\overline{(\partial T / \partial z)_i} = \frac{1}{N-1} \left[\sum_{j=1}^{N-1} \left(\frac{T_{j+1}^i - T_j^i}{\Delta z} \right) \right] \quad (2.21)$$

$$\overline{(\partial T / \partial z)_{max}} = \frac{T_{max} - T_{min}}{(N-1) \cdot \Delta z} \quad (2.22)$$

Em que:

- N : Número total de camadas térmicas;
- T_j^i : Temperatura da camada j no instante i ;
- T_{j+1}^i : Temperatura da camada $j+1$ no instante i ;
- Δz : Diferença de altura entre os pontos de medição;
- T_{max} e T_{min} : Temperaturas máxima e mínima no interior do sistema TES, respetivamente.

2.2.4 Números adimensionais

Os indicadores de performance, podem também ser obtidos através da análise dimensional. Esta, constitui uma ferramenta essencial na análise e avaliação de diversas áreas, fornecendo informações valiosas sobre o desempenho e as características de sistemas físicos.

Desta forma, a exploração da importância e do papel destes números adimensionais como indicadores de performance de um sistema TES, permite uma compreensão mais aprofundada do comportamento dos mesmos.

Número de Richardson

O número de Richardson (Ri), é utilizado de forma bastante proeminente por muitos autores [3, 28, 42, 43, 44, 45, 46], para avaliar a estratificação no interior de sistemas TES.

Sempre que dois fluidos de massa volúmica diferente interagem, a força de flutuação entra em ação e influencia a mistura e o movimento do FT no interior do sistema TES, determinando assim a estratificação.

Em termos práticos, o Ri representa a razão entre a energia potencial necessária para misturar o fluido e a energia cinética turbulenta disponível para essa mistura, sendo este dado pela Equação 2.23.

$$Ri = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot H}{v_s^2}, \quad v_s = \frac{\dot{v}}{A_{inlet}} \quad (2.23)$$

Em que:

- g : Aceleração da gravidade;
- β : Coeficiente de expansão volumétrico;
- ΔT : Diferença de temperatura entre o topo e a base do sistema TES;
- H : Altura do sistema TES;
- v_s : Velocidade característica de entrada do FT no sistema TES;
- $\dot{v}$: Caudal volúmico
- A_{inlet} : Área da entrada do FT no sistema TES.

Chandra and Matuska [7] afirmam que, num escoamento com um Ri baixo, a energia cinética turbulenta é relativamente alta em comparação com as forças de flutuação, facilitando a penetração do escoamento na região da termoclina. Em contraste, durante o ciclo de descarga, um escoamento com um Ri elevado tinha um potencial inadequado para penetrar nas camadas superiores quentes. Da mesma forma, no ciclo de carregamento, o FT quente com um Ri elevado não tinha potencial suficiente para penetrar nas camadas frias inferiores.

Castell et al. [28], identificaram os parâmetros adimensionais mais utilizados para caracterizar a estratificação térmica num sistema TES e estudaram a sua adequação. O Ri revelou-se o melhor indicador para definir a estratificação, no entanto, a sua maior desvantagem, é apenas representa-la de forma qualitativa, sendo difícil avalia-la quantitativamente através deste.

Por conseguinte, o Ri requer uma situação de referência para quantificar a estratificação dentro do reservatório. No caso de não haver referência, o parâmetro apenas é útil para comparação entre diferentes estudos. Assim, foi feita uma recolha de informação literária, presente na Tabela 2.1, que permite, através de valores concretos, perceber a influência deste parâmetro na avaliação da estratificação térmica nos sistemas TES.

Tabela 2.1: Influência do Ri na estratificação térmica

Autor	Valores	Conclusão
<i>Yee and Lai</i> [42]	0,01 - 100	Inicialmente, a inércia dominou, não permitindo o estabelecimento da estratificação térmica. À medida que este foi subindo, a estratificação térmica tornou-se mais evidente.
<i>Chandra and Matuska</i> [43]	0,01 – 40	À medida que este aumentou, a estratificação térmica melhorou.
<i>van Berkel et al.</i> [44]	10 – 20	Ocorreu mistura em valores próximos de 10, enquanto que, a partir de 15 começou a haver melhorias na estratificação térmica.
<i>Zurigat et al.</i> [45]	3,6	A geometria da entrada teve uma influência significativa na estratificação térmica.
<i>Ghajar and Zurigat</i> [46]	10	O efeito da geometria da entrada deixa de ter influência na estratificação térmica.

Número de Péclet

O número de Péclet (Pe), dado pela Equação 2.24, é definido como a razão entre a taxa de convecção e de difusão de uma quantidade de massa, impulsionada pelo gradiente de temperatura vertical ao longo do depósito.

$$Pe = \frac{v_t \cdot H}{\alpha}, \quad \alpha = \frac{k}{\rho \cdot cp}, \quad v_t = \frac{\dot{v}}{A_{TES}} \quad (2.24)$$

Em que:

- H : Altura do sistema TES;
- v_t : Velocidade característica do FT no interior do sistema TES;
- α : Difusividade térmica;
- k : Condutibilidade térmica;
- ρ : Massa volúmica;
- c_p : Calor específico;
- $\dot{v}$: Caudal volúmico;
- A_{TES} : Área da base do sistema TES.

Thomas et al. [26], constataram que, a análise do Pe , pode ser compreendida de melhor forma, através da combinação deste com o Ri . A interpretação de ambos, fornece uma caracterização mais precisa da estratificação térmica, permitindo uma melhor avaliação do comportamento da energia no interior de um sistema TES.

Kere et al. [47], concluíram que, à medida que o Pe aumentou, a transferência de energia térmica foi mais eficaz. Isto, pode ser explicado por um escoamento mais turbulento que resulta numa redução da resistência à transferência de calor.

Chandra and Matuska [7], observaram também que um Pe elevado, visualmente representou uma termoclina mais fina, dado que, isso implica uma menor difusividade térmica devido ao gradiente vertical de temperatura, que por sua vez, contribui para uma menor degradação da termoclina.

Castell et al. [28], concluíram que, com um Pe reduzido, a difusividade térmica ao longo do reservatório provocou a degradação da termoclina.

Estes estudos, evidenciaram que, a análise conjunta do Pe e Ri permite uma melhor compreensão da transferência de energia e da estratificação térmica no interior de um sistemas TES. Um Pe elevado favorece a transferência de calor por convecção forçada e preserva a termoclina, enquanto um Pe baixo aumenta a difusividade térmica, acelerando a degradação da termoclina, o que compromete a eficiência do sistema. Assim, o equilíbrio entre esses parâmetros é essencial para otimizar o desempenho dos TES.

Número de Reynolds

O número de Reynolds (Re_{TES} e Re_{in}) é um indicador crucial dos diferentes regimes de escoamento, representando a relação entre as forças de inércia e as forças viscosas, tal como consta na Equação 2.25. O escoamento é laminar para Re até 2100 ou 2300, transitório até 4000, e turbulento acima de 4000.

$$Re_{TES} = \frac{\rho \cdot v_t \cdot D_{TES}}{\mu}, \quad Re_{in} = \frac{\rho \cdot v_s \cdot D_{inlet}}{\mu} \quad (2.25)$$

Em que:

- $Re_{TES,in}$: Número de Reynolds do sistema TES e de entrada do FT no sistema TES, respetivamente;
- $D_{TES,inlet}$: Diâmetro da base do sistema TES e da entrada do FT no sistema TES, respetivamente;
- $v_{t,s}$: Velocidade característica no interior do sistema TES e de entrada do FT no sistema TES, respetivamente;
- μ : Viscosidade dinâmica do FT.

Castell et al. [28], desenvolveram um estudo com diferentes caudais, onde concluíram que o Re_{in} por si só, não se revelou adequado para avaliar a estratificação no sistema TES estudado, porém pode fornecer informações adicionais quando usado em conjunto com o Ri .

Chung et al. [48], estudaram a influência do Re_{in} , sendo que, este mostrou ser o parâmetro mais dominante, em conjunto com a configuração do difusor, desempenhando ambos um papel significativo na estratificação do sistema TES estudado.

Observando os estudos presentes na Tabela 2.2, é possível concluir que, à medida que Re_{in} aumenta, a entrada do FT, não só penetra a região da termoclina, mas também estimula processos turbulentos que intensificam a mistura, afetando a qualidade da energia armazenada, e prejudicando assim a estratificação térmica no interior do sistema TES.

Tabela 2.2: Influência do Re_{in} na estratificação térmica

Autor	Valores	Conclusão
<i>Dehghan and Barzegar</i> [49]	500 – 5000	Com o aumento do Re_{in} , a difusão turbulenta intensificou o processo de mistura, fornecendo mais impulso ao fluido que entra.
<i>Chandra and Matuska</i> [43]	1400, 2840, 4270 e 6440	O aumento do Re_{in} , esteve associado a uma diminuição na eficiência de descarga, devido à penetração mais profunda da água fria na região da termoclina e à formação de vórtices que intensificaram a mistura.
<i>Elatar et al.</i> [50]	5400, 9400 e 16200	À medida que o Re_{in} aumentava, a inércia associada tornava-se cada vez mais intensa, fazendo com que, durante o processo de descarga, o fluido frio subisse e arrasta-se o fluido circundante, intensificando assim o processo de mistura.

No que diz respeito ao Re_{TES} , e com base no que foi constatado para o Pe , ambos os parâmetros devem ser acompanhados em conjunto, de modo a que seja alcançado um equilíbrio entre eles. A análise conjunta destes parâmetros, juntamente com o Ri pode ser crucial para alcançar esse equilíbrio [28, 26].

Número de Froude

O número de Froude (Fr) é um indicador usado para o design do difusor ou do canal de entrada do FT no sistema TES, representando a relação característica entre as forças de inércia e de flutuação, sendo por isso inversamente proporcional à raiz quadrada do Ri , como demonstrado na Equação 2.26.

$$Fr = \frac{1}{\sqrt{Ri}} \quad (2.26)$$

Chung et al. [48], desenvolveram, através de métodos numéricos, diversos estudos com o objetivo de analisar, sistematicamente, o efeito de vários tipos de fatores de design no desempenho de um sistema TES. O efeito do Fr , foi um dos parâmetros abordados neste estudo. Os resultados obtidos, demonstram que o desempenho do sistema TES melhora à medida que o Fr diminui. Contudo, no que diz respeito ao estudo global, a contribuição do Fr foi praticamente desprezável, devido à projeção do canal de entrada do FT e dos difusores, ter sido feita de modo a que o Fr assumisse um intervalo de valores previamente estudados e recomendados por dois autores [51, 52].

Kaloudis et al. [53], através do uso de Mecânica dos Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics*) (CFD), investigaram numericamente os fenôme-

nos relacionados com o caudal na região de entrada durante o processo de descarga. Considerando uma evolução detalhada no tempo dos campos de velocidade e temperatura dentro do reservatório, sobre uma ampla faixa de Fr junto à zona de saída, foi demonstrada a importância do mesmo na espessura da termoclina. Foi concluído que, nesta zona $Fr \leq 1$ é o ideal para que não haja perdas de energia significativas, durante o processo de descarga.

Ambos os estudos, demonstram que, o Fr é um parâmetro útil na avaliação do design do canal de entrada e saída do FT em sistemas TES. Este, influencia a estratificação térmica e as perdas de energia, sendo que, a sua redução pode melhorar o desempenho do armazenamento e do fornecimento da energia.

2.3 Fatores que influenciam o desempenho de sistemas TES

Monitorizar os fatores que impactam diretamente o desempenho dos sistemas TES, através da análise dos indicadores de performance, é crucial para garantir um bom desempenho. Contudo, estes indicadores apenas analisam e caracterizam certos aspectos do sistema em si, e por isso é necessário perceber quais dos parâmetros operacionais e geométricos têm influência nos valores que são obtidos para os indicadores de performance dos sistemas TES.

2.3.1 Parâmetros operacionais

Caudal

O caudal do FT admitido num sistema TES, desempenha um papel crucial na distribuição e circulação da energia térmica. Ao ajustar o caudal de admissão do FT, é possível controlar a quantidade de energia térmica que está a ser transferida para o sistema TES num determinado momento. É essencial garantir que esta seja distribuída e mantida no sistema TES de forma eficaz, assegurando o funcionamento do mesmo conforme projetado.

Tabela 2.3: Influência do caudal de FT no desempenho de sistemas TES

Referência	Caudal	Conclusão
<i>Chandra and Matuska</i> [43]	200 a 800 l/hora	Caudais mais baixos, asseguraram uma melhor estratificação térmica, durante o processo de carregamento.
<i>He et al.</i> [54]	0,3 a 0,9 m ³ /h	O aumento do caudal durante o processo de carregamento, provocou o aumento da espessura da termoclina.
<i>Wang et al.</i> [55]	1 a 6 l/min	Para uma geometria de entrada direta, o aumento do caudal durante o processo de carregamento, e a consequente diminuição do Ri , provocaram um aumento do número MIX.
<i>Castell et al.</i> [28]	1 a 8 l/min	O pico de eficiência do processo de descarga com caudais maiores foi semelhante ao dos caudais mais baixos, porém, este foi atingido mais cedo.

Dehghan and Barzegar [49], através de CFD, estudaram a influência do caudal de FT num sistema TES. Foi observado que, o aumento do caudal, faz com que as linhas de caudal passem de um padrão controlado pela flutuação para um padrão controlado pela inércia, provocando a mistura entre as camadas térmicas.

Wu et al. [56], constataram que, a variação da velocidade de entrada do FT no sistema TES, se traduz numa tendência consistente de redução do tempo efetivo do processo de descarga. Contudo, este aumento resultou numa diminuição geral da eficiência deste processo.

Os estudos que constam na Tabela 2.3, vêm reforçar que, caudais mais elevados, podem levar a uma mistura mais intensa entre as camadas térmicas, o que pode comprometer a estratificação térmica desejada.

Assim, pode existir um caudal ótimo para uma dada estrutura e temperatura operativa. Encontrar o equilíbrio adequado para o caudal de FT é fundamental para assegurar a eficiência do armazenamento de energia térmica e manter a estratificação necessária para um desempenho ideal do sistema TES.

Temperatura de funcionamento

A diferença de massa volúmica entre o FT de entrada e o FT ambiente, resultante da diferença de temperatura entre ambos, afeta a estratificação térmica dos sistemas TES. Quando o FT admitido tem uma massa volúmica inferior, como ilustrado na Figura 2.6a, a estratificação térmica não é muito afetada, sendo este fenómeno conhecido como flutuação positiva. Enquanto que, se o FT admitido tiver uma massa volúmica superior, como demonstrado na Figura 2.6b, poderá causar alguma instabilidade na estratificação térmica, sendo este acontecimento denominado de flutuação negativa [5]. Aparentemente, a diferença de temperatura entre as camadas térmicas do sistema TES determina a força de impulsão dos jatos térmicos, portanto, o intervalo de temperaturas operacionais é um parâmetro crucial no desempenho dos sistemas TES.

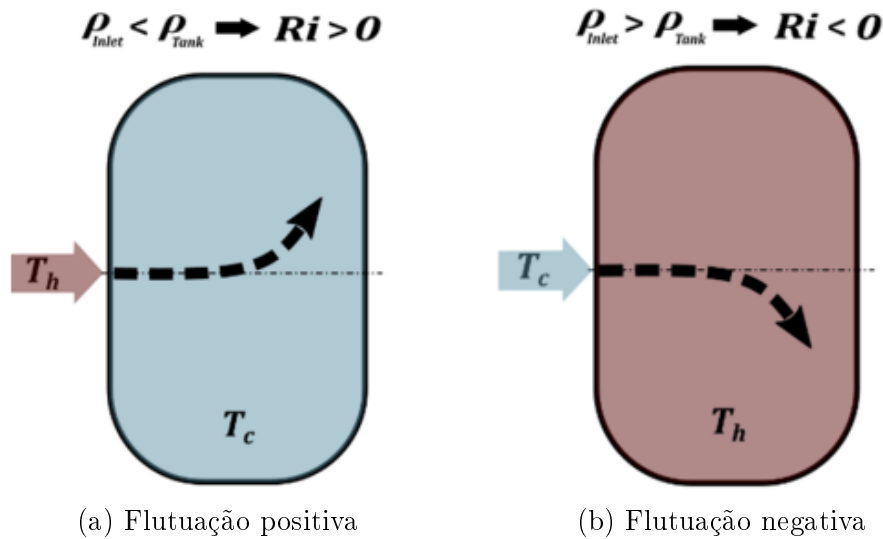


Figura 2.6: Jato de admissão do FT em sistemas TES [5]

A investigação experimental de *Al-Habaibeh et al.* [57], que introduziu uma nova tecnologia de análise da estratificação térmica de sistemas TES, denominada

"water snake", demonstrou claramente o movimento da trajetória do FT devido à diferença de massa volúmica, enfatizando os fenómenos de flutuação positiva e negativa, referidos anteriormente.

Tabela 2.4: Influência da temperatura no desempenho de sistemas TES

Autor	T_{ch} [°C]	T_{dis} [°C]	Conclusão
<i>Sun et al.</i> [58]	20, 40, 60 e 80	10 e 30	Um aumento na diferença de temperatura resultou no aumento da espessura da termoclina, destruindo a estratificação térmica, durante o processo de carregamento.
<i>Lou et al.</i> [59]	50, 60 e 70	20	Um aumento na diferença de temperatura refletiu-se numa melhor estratificação térmica, durante o processo de carregamento.
<i>Yaici et al.</i> [60]	60	25, 30, 35 e 40	A estratificação térmica melhorou com o aumento da diferença de temperatura, durante o processo de carregamento e descarga.
<i>Majumdar et al.</i> [61]	60	15, 25 e 35	Um aumento na diferença de temperatura resultou num aumento na eficiência dos processos de carregamento e descarga.

Os estudos apresentados na Tabela 2.4 revelam resultados divergentes acerca dos efeitos da variação da temperatura operativa nos sistemas TES. Alguns estudos sugerem que um ΔT elevado pode controlar a mistura, melhorando a estratificação e reduzindo o comprimento de penetração do jato térmico de entrada do FT.

Contudo, um outro estudo indica que uma variação mais acentuada do ΔT acelera a destruição da estratificação, devido ao resultante aumento da espessura da termoclina. Por conseguinte, a definição do intervalo de temperaturas operacionais deve ser estudado e escolhido, cuidadosamente, para garantir o melhor desempenho possível.

Processos de carregamento e descarga

A monitorização dos parâmetros operacionais durante os processos dinâmicos de carregamento e descarga, é essencial para manter a estabilidade da termoclina, garantir uma transferência de calor adequada e compreender as nuances da estratificação térmica em diferentes condições de operação.

Chandra and Matuska [7], enfatizaram a importância da monitorização contínua dos parâmetros operacionais hidrodinâmicos e termodinâmicos para manter a estabilidade da termoclina durante os ciclos de carregamento e descarga. Concluíram ainda que, a estabilidade da termoclina é fundamental para garantir uma transferência de calor eficiente e para minimizar a mistura das camadas térmicas, contribuindo assim para a manutenção do desempenho ideal do sistema TES.

Lou et al. [62], apesar de terem testado, através de CFD, ciclos completos de carregamento e descarga, destacaram que, em condições reais de funcionamento de sistemas TES, o efeito cíclico destes processos, exerce um impacto significativo na energia térmica armazenada.

He et al. [54], observaram, experimentalmente, as características cíclicas de processos consecutivos de carregamento e descarga. Foi detetado um comportamento de convergência, onde a distribuição da temperatura no final de cada ciclo, a duração dos mesmos e a utilização de energia tendem a estabilizar à medida que o número de ciclos aumenta. Deste modo, concluíram que este padrão resulta da diferença entre as condições iniciais e os critérios de término dos processos de carregamento e descarga.

Modi et al. [63] trouxeram uma abordagem inovadora, considerando a variação nas durações dos ciclos de carregamento e descarga, algo muitas vezes negligenciado em estudos anteriores. Eles observaram que as diferenças na duração entre esses ciclos, decorrentes de critérios de interrupção e perdas térmicas para o ambiente, são descobertas significativas. Essas descobertas desafiam a suposição anterior de durações iguais para ambos os ciclos e destacam a importância de entender e considerar essas variações para o dimensionamento adequado destes sistemas.

Estes estudos, fornecem uma visão holística dos processos dinâmicos de carregamento e descarga e do seu impacto na estabilidade da termoclina e na estratificação térmica. A compreensão destes elementos é essencial para otimizar o desempenho dos sistemas TES, garantindo uma eficiência ideal na transferência e manutenção da energia térmica armazenada.

Distribuição do escoamento

Os sistemas TES, não se restringem apenas a simples orifícios de entrada e saída do FT. Muitas vezes, são adotadas outras abordagens para gerir de melhor forma o escoamento do FT. O FT admitido, geralmente, apresenta massa volúmica e velocidade significativamente diferentes em comparação com o FT no interior do sistema TES, o que perturba o estado inicial do escoamento.

Fernandez-Seara et al. [41], obtiveram resultados, que sugerem, que um tipo particular de configuração dos canais de entrada e saída com caudais específicos, contribui para uma melhor eficiência de descarga e um melhor estabelecimento da termoclina.

Tarlet et al. [64], concluíram que, a integração de um distribuidor e de um coletor ramificado em múltiplas escalas assegura a distribuição uniforme do escoamento. Observaram ainda que, a instalação de defletores, proporciona um arranjo local do escoamento cruzado, eliminando em grande parte, as zonas passivas de recirculação, melhorando assim a estratificação térmica.

Afrin et al. [65], analisaram numericamente dois tipos distintos de distribuidores de caudal, onde as direções das aberturas dos orifícios foram orientadas para a área principal de armazenamento do FT e para o ponto superior ou inferior do depósito. Verificou-se que, a direção do escoamento do distribuidor pode afetar, notavelmente, a distribuição da velocidade. Desta forma, surgiu um interesse significativo num novo tipo de distribuidores, os quais geram um escoamento invertido através da instalação de obstáculos planos, inclinados ou móveis, ou pela adaptação da orientação das aberturas dos orifícios.

Lou et al. [62], inferiram que, a distribuição uniforme da velocidade ao longo das secções horizontais não assegura uma estratificação térmica mais eficaz. A presença de velocidades mais elevadas próximas às paredes laterais auxilia na suavização do avanço das frentes térmicas, resultando em melhor desempenho do sistema TES. Observaram ainda que, a otimização de um defletor de orifício superior ou inferior pode ser vantajosa tanto para processos de carregamento ou descarga, e que, a combinação de dois defletores otimizados oferece maior eficiência nos processos de carregamento, descarga e global.

Wang et al. [6], foram mais ambiciosos, e decidiram estudar a presença de um novo dispositivo, denominado equalizador, na entrada do FT no depósito experimental, cuja estrutura pode ser observada na Figura 2.7. O equalizador, admite o FT a partir da posição 1. Na posição 2, existem vinte e quatro furos com um diâmetro de 3 mm na parede do tubo, permitindo que o FT passe pelos furos para a cavidade interna do equalizador e, de seguida, através dos cinquenta e cinco furos de 3 mm de diâmetro, na posição 3, para a cavidade externa do equalizador. O escoamento muda de direção na posição 4 e depois, passa pelos cento e oitenta furos com diâmetro de 3 mm, na posição 5. A direção do escoamento, muda novamente na posição 6 e, finalmente, o FT é enviado para o interior do depósito na posição 7. Assim, quando o FT de baixa temperatura entra no reservatório experimental, ao passar, primeiramente, pelo equalizador, não é misturado diretamente com o FT a uma temperatura superior. Além disso, devido à ação de amortecimento do equalizador, a velocidade do FT frio é reduzida, enquanto a direção do escoamento também muda, permitindo a este estabelecer-se no fundo do reservatório, enfraquecendo assim, o processo de mistura entre as camadas térmicas do sistema TES. Os resultados obtidos, foram bastante satisfatórios, resultando numa clara melhoria da estratificação térmica e da eficiência dos processos de carregamento e descarga em relação à geometria de entrada direta.

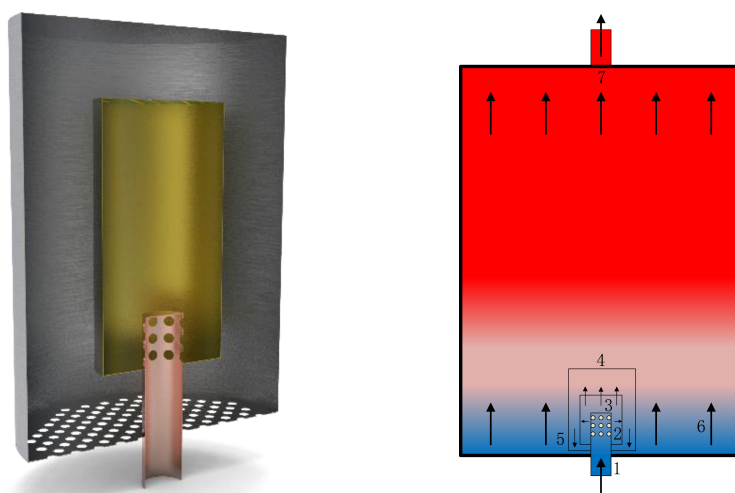


Figura 2.7: Estrutura do equalizador [6]

Desta forma, pode-se concluir que o controlo da distribuição do escoamento desempenha um papel fundamental na melhoria da estratificação térmica nos sistemas TES, contribuindo para uma maior eficiência dos processos de carregamento e descarga.

2.3.2 Parâmetros geométricos

Forma e volume

Os sistemas TES possuem uma capacidade máxima de armazenamento, que aumenta conforme o tamanho e a forma do seu depósito, que por sua vez, é determinada pelo volume específico do meio de armazenamento escolhido. A forma e o tamanho do reservatório têm influência direta sobre as perdas de calor para o ambiente, já que a área da superfície exposta varia conforme essa geometria, resultando em diferentes quantidades de energia dissipada, consoante a geometria do depósito e o isolamento do mesmo.

Com base nos estudos referidos na Tabela 2.5, reservatórios com uma relação H/D mais baixa, tendem a dificultar a formação adequada da termoclina e a estratificação térmica, afetando negativamente a temperatura de saída. Por outro lado, reservatórios com uma relação H/D mais alta mostraram problemas de mistura entre os fluidos quente e frio, comprometendo a eficiência do sistema.

Tabela 2.5: Influência da relação H/D na performance de sistemas TES

Referência	H/D	Conclusão
<i>Lou et al.</i> [62]	0,5; 1 e 2	O reservatório menos esguio não permitiu o desenvolvimento adequado da termoclina, afetando também a temperatura de saída. Com uma relação de 2, a mistura entre as camadas térmicas aumentou, reduzindo assim o desempenho global. Os melhores resultados foram obtidos com uma relação de 1.
<i>Carmona et al.</i> [66]	1,1 a 1,6	Concluíram que a eficiência exergética tende a ser mais alta para uma relação de 1,1 e diminui à medida que este valor aumenta.
<i>Mertens et al.</i> [67]	0,05 a 0,75	A eficiência térmica foi aumentando à medida que a relação também aumentou, sendo que, o pico de eficiência foi atingido para uma relação de 0,75.

Idealmente, o design do reservatório deve garantir uma estratificação adequada das camadas térmicas e minimizar perdas de calor laterais, em comparação com a transferência de calor vertical. Estas considerações são fundamentais para o desempenho ideal de um sistema TES.

Posições de entrada e saída do FT

Nos sistemas TES, a disposição estratégica dos pontos de entrada e saída do FT desempenha um papel crucial na eficiência do armazenamento. A posição desses pontos dentro do sistema tem um impacto significativo na capacidade de manter camadas térmicas distintas, afetando diretamente a estratificação térmica.

Chandra and Matuska [7] apresentam vários pré-requisitos para a otimização de sistemas TES, entre os quais, se destacam as posições de entrada e saída do FT. Devido às variações da massa volúmica do FT em função da temperatura, as posições de entrada e saída influenciam significativamente a estratificação térmica e a zona de armazenamento designada.

Estes autores, alertam ainda para a minimização do fenómeno conhecido como "*dead zone*", ilustrado na Figura 2.8. Este, refere-se à área do sistema TES onde

o FT permanece estagnado e não contribui para a eficiência do processo devido às variações da massa volúmica, resultando numa redução significativa da eficiência global do sistema TES. Deste modo, concluíram que, posicionar os pontos de entrada e saída o mais próximo possível do topo e da base do depósito, respetivamente, pode ajudar a reduzir a mistura e maximizar a zona efetiva de armazenamento de energia térmica.

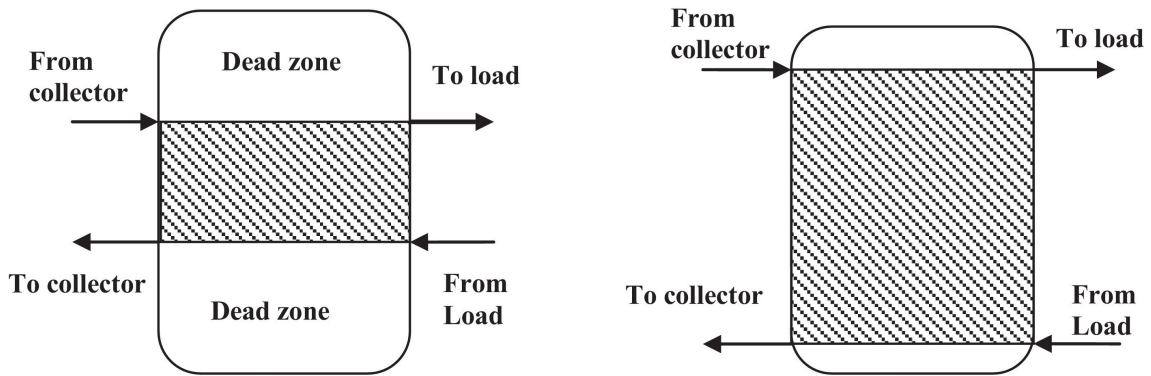


Figura 2.8: Fenómeno "dead zone" [7]

Farmahini [68], para além de estudar as posições de entrada e saída do FT, avaliou ainda o diâmetro e o ângulo de entrada e saída do FT. Tal como *Chandra and Matuska*, observou que, mudar as posições de entrada e saída para a base e para o topo do reservatório, respetivamente, reduz a duração da mistura inicial e, portanto, é formada uma camada de difusão mais fina, resultando numa melhor estratificação térmica. Concluiu ainda que, reduzir o diâmetro da entrada e da saída, assim como, aumentar o ângulo de entrada do FT, diminui a mistura inicial dentro do depósito e, conseqüentemente, a estratificação térmica ocorre mais cedo, resultando numa maior exergia.

Assari et al. [69], concluíram ainda que, a saída do FT frio teve uma influência menor na estratificação térmica. Isto, deve-se ao facto, de que a saída deste, não provocou uma mistura intensa no interior do sistema TES, dado que, em comparação com a entrada do FT quente, que teve um efeito mais pronunciado na mistura inicial, este desempenhou um papel secundário na dinâmica de estratificação térmica do sistema.

Deste modo, a otimização das posições de entrada e saída do FT num sistema TES torna-se crucial para maximizar a eficiência da estratificação térmica. Posicionar esses pontos de forma próxima ao topo e à base do reservatório, respetivamente, reduz a mistura e amplia a área efetiva de armazenamento de energia.

2.4 Estudos experimentais de sistemas TES

A compreensão e avaliação detalhada dos estudos experimentais de sistemas TES, desenvolvidos por diversos autores [26, 43, 54, 55], é essencial para entender como são concebidas as instalações e os meios utilizados nas investigações científicas.

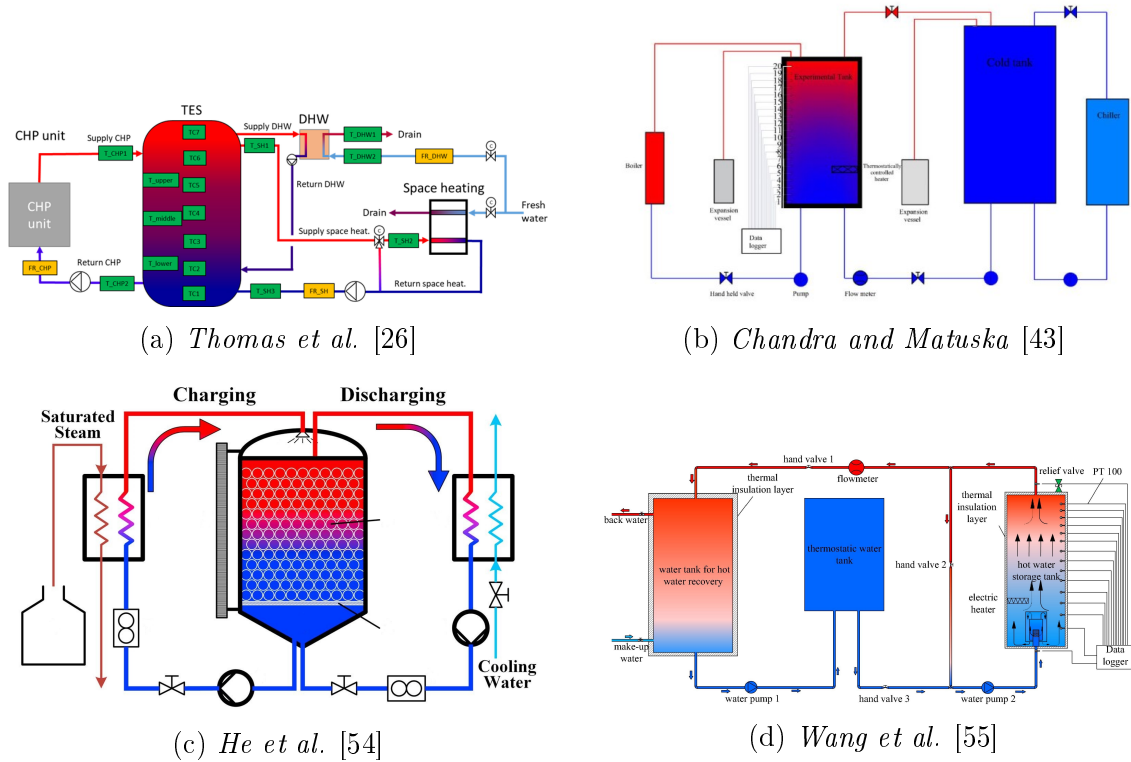


Figura 2.9: Esquemas das plataformas de ensaio de sistemas TES

Thomas et al. [26], através da instalação representada na Figura 2.9a, exploraram a estratificação térmica de um sistema TES implementado num sistema de cogeração. A energia térmica foi armazenada, num reservatório experimental com volume de 750 litros.

A unidade de cogeração, responsável por fornecer energia térmica ao sistema TES, é alimentada a gás natural. A instalação possuía ainda um permutador de calor para gerar AQS, e uma válvula de três vias para alimentar um circuito de aquecimento de um espaço.

O sistema TES foi carregado pela unidade de cogeração, que opera no modo *on/off*, aquecendo a água no reservatório experimental quando este estava "totalmente descarregado" até que este volta-se a estar "totalmente carregado".

O processo de descarga, consistiu em transferir a energia térmica para o permutador de calor para gerar AQS e para o circuito de aquecimento de um espaço. No entanto, para facilitar a análise dos testes, apenas o circuito de aquecimento de um espaço, foi utilizado no processo de descarga.

Foram instalados sete termopares do tipo K, distribuídos pela altura do depósito experimental, três sensores PT-500 no centro, no topo e na base do mesmo, e os restantes sensores presentes na instalação eram PT-100. A intenção era espaçar, uniformemente, os sensores, para criar volumes parciais quase idênticos para cada segmento. Contudo, devido ao facto de este ser um depósito comercial, não foi, inteiramente, possível. Para medir caudais foram utilizados caudalímetros magnético-indutivos. Todos estes instrumentos de medição, contabilizaram uma incerteza relativa abaixo dos 1,5%.

Chandra and Matuska [43], com recurso à plataforma experimental, representada na Figura 2.9b, avaliaram as características operacionais de um sistema TES. O

depósito experimental, possuía um volume de 397 litros, com 550 mm de diâmetro e 1905 mm de altura.

Este depósito estava conectado, a outro depósito, com cerca do dobro do tamanho, onde foi armazenada água fria, arrefecida por um *chiller*. A instalação, contava ainda com uma caldeira elétrica e uma resistência elétrica acoplada ao sistema TES, cujo objetivo, é aquecer a água.

O processo de carregamento, foi realizado através de dois métodos. Inicialmente, foi usada a resistência elétrica presente na metade inferior do sistema TES, e posteriormente, foi utilizada a caldeira elétrica. O objetivo deste processo foi aquecer a água no interior do depósito experimental, até próximo dos 60°C.

O processo de descarga, foi realizado acionando as válvulas de estrangulamento, que permitiam que a água circulasse do reservatório que contém água fria para o depósito experimental, e vice-versa, sendo que, nesta fase o *chiller* permaneceu desligado. Quando o processo de descarga fosse concluído, o circuito entre os dois reservatórios era cessado e o circuito do *chiller* era aberto para arrefecer o depósito de água fria para futuros ensaios.

A distribuição vertical da temperatura, foi medida através de 20 sensores de temperatura PT-100, colocados ao redor da parede externa do depósito experimental na direção vertical. Este, ficou assim dividido em 20 segmentos horizontais iguais. As saídas dos sensores foram registadas por um *data logger* em intervalos de 5 segundos. O caudal foi medido através de um transmissor *Sitrans FM Mag 5000*, da *Siemens*, cuja precisão era de 0,4%.

He et al. [54], através da configuração experimental presente na Figura 2.9c, investigaram a influência do uso de PCM como meio de armazenamento de energia térmica num sistema TES. O depósito experimental utilizado nesta instalação possuía um diâmetro interno de 900 mm e uma altura de 1100 mm, permitindo o armazenamento de mais de 750 litros de água. No interior do depósito, uma placa perfurada suportava uma camada de PCM, que atuava como o meio primário de armazenamento de energia térmica. Para assegurar uma distribuição uniforme do caudal de entrada do FT quente, foi instalado um bico em espiral na entrada do mesmo no sistema TES.

Um gerador de vapor, foi utilizado como fonte de energia térmica para simular a extração de uma turbina a vapor, presente numa unidade de cogeração, e a água da rede foi utilizada como fonte fria. A instalação conta ainda com dois permutadores de placas, onde é feita a transferência de calor com o gerador de vapor e com a água da rede.

O processo de carregamento consistiu em aquecer a água no interior do reservatório experimental através da permuta de calor com o gerador de vapor, até que esta atingisse a temperatura necessária.

O processo de descarga, foi caracterizado, pela extração da água quente pelo topo do reservatório, que de seguida, circulou pelo permutador que troca calor com a água da rede, retornando, novamente, ao depósito experimental a partir da sua entrada, situada na base do mesmo.

Para medir a distribuição de temperatura ao longo do comprimento vertical do reservatório experimental, foram utilizados, trinta e três termopares do tipo K. Adicionalmente, cinco termopares do tipo K, monitorizaram as temperaturas de entrada e saída durante os processos de carregamento e descarga, bem como a temperatura ambiente. Estes dados foram registados automaticamente a cada 10 segundos por

um *data logger*, e a precisão dos termopares era de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Os caudais foram medidos com caudalímetros de turbina, cuja precisão era de $\pm 0,01\text{ m}^3/\text{h}$.

Wang *et al.* [55], por intermédio da instalação representada na Figura 2.9d, conduziram um estudo, cujo objetivo foi determinar a influência da geometria de entrada de um sistema TES na sua eficiência e na estratificação térmica no seu interior. O depósito experimental tinha uma capacidade de 60 litros, um diâmetro de 350 mm e uma altura de 600 mm.

Este, continha uma resistência elétrica, que foi responsável por aquecer a água no seu interior até à temperatura desejada. Esta plataforma de ensaio, possuía ainda um reservatório de água termostático, capaz de manter a água a uma temperatura inferior à do depósito experimental, e um outro reservatório por onde recirculou a água quente proveniente do depósito experimental até ao reservatório de água termostático.

Os ensaios foram realizados para três geometrias de entrada diferentes: entrada direta, por três camadas com orifícios e por um equalizador. O processo de carregamento consistiu em aquecer a água no interior do reservatório experimental até 70°C , através da resistência elétrica, presente no seu interior.

Quando esta temperatura ficou estabelecida, deu-se início ao processo de descarga. Este, consistiu em abrir as válvulas de seccionamento necessárias e ajustar o caudal através da bomba de circulação, permitindo que a água fria fosse inserida no reservatório experimental, até que a diferença de temperatura ao longo do depósito fosse inferior a $0,5^{\circ}\text{C}$.

Para medir a temperatura, foram instalados na direção axial do reservatório, catorze sensores PT-100 a uma distância de 4 cm do sensor adjacente. Os sinais elétricos emitidos pelos sensores foram enviados para um *data logger*, para que os dados obtidos fossem registados. O caudal foi medido através de um caudalímetro eletromagnético *Optiflux 5300* da *Krohne*.

Com base nos estudos apresentados, é possível estabelecer um panorama sobre as metodologias e técnicas utilizadas para investigar o desempenho de sistemas TES. Assim, as orientações retiradas destas configurações experimentais, como o posicionamento dos sensores, o controlo de temperatura e a medição dos parâmetros operacionais, permitem antecipar e resolver potenciais constrangimentos durante os ensaios experimentais.

3 Desenvolvimento da Plataforma Experimental

Neste capítulo, será abordado o desenvolvimento da plataforma experimental designada para os ensaios de sistemas TES. Inicialmente, será apresentada uma descrição geral da configuração inicial da plataforma experimental. De seguida, será realizada a validação do seu funcionamento, assim como a descrição da sua evolução, resultante dos processos de otimização, até à configuração final.

Para complementar este capítulo, o Apêndice A, detalha o funcionamento da plataforma experimental, assim como cada componente que a compõe. Este, aborda ainda aspetos relacionados com a montagem da plataforma experimental, detalhes acerca dos testes efetuados durante a sua otimização, e considerações essenciais para garantir o seu bom funcionamento.

3.1 Descrição da plataforma experimental

O esquema de princípio inicial, apresentado no Anexo A, serviu como base para o desenvolvimento da plataforma experimental. Esta, utiliza água como FT, devido à sua acessibilidade e adequação às condições da instalação. A sua configuração inicial foi organizada em diversos grupos, cada um com uma função específica:

- Epicentro - Local onde serão inseridos os sistemas TES a investigar;
- Circuito primário - Responsável por fornecer energia térmica ao sistema TES;
- Circuito secundário - Responsável por simular o consumo da energia térmica armazenada no sistema TES;
- Zona de Enchimento - Responsável por manter estável a pressão da instalação;
- Zona de Aquisição de dados - Responsável por adquirir os dados provenientes das medições realizadas durante os ensaios.

3.1.1 Epicentro

Nesta zona central da plataforma experimental, é montado o sistema TES em estudo. Esta área permite a instalação do sistema TES de modo a conectá-lo aos circuitos primário e secundário de forma simples e eficaz, possibilitando a sua troca quando se pretender estudar um sistema TES diferente.

Para além disso, como representado na Figura 3.1, na periferia do local onde serão inseridos os sistemas TES, estão presentes uma bomba de circulação, designada como B1, um equipamento de medição de caudal, quatro sensores de medição de temperatura colocados nas entradas e saídas dos circuitos primário e secundário, e um filtro de impurezas.

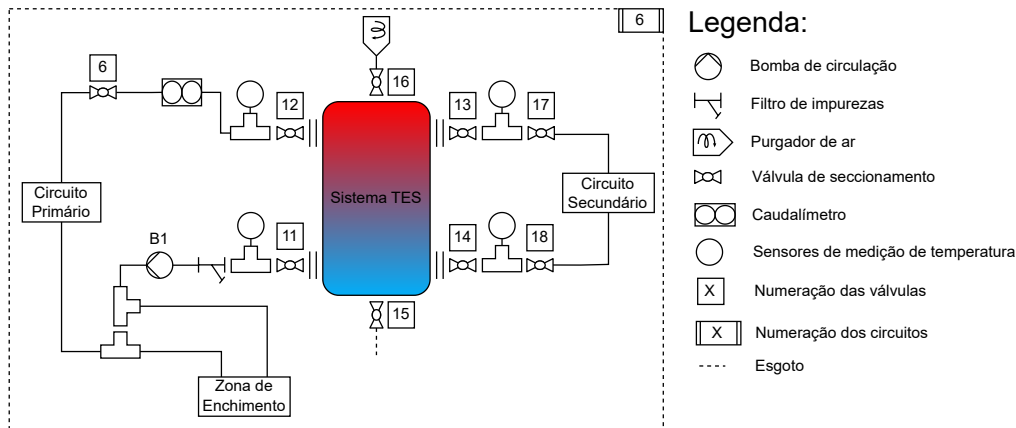


Figura 3.1: Epicentro da plataforma experimental

- Sensores de medição de temperatura: Estão estrategicamente posicionados para registrar as temperaturas;
- Equipamento de medição de caudal: Regista continuamente o volume de água que atravessa as suas passagens ao longo do tempo;
- Bomba de circulação B1: Tem como objetivo criar uma diferença de pressão, que permita à água transferir energia entre o circuito primário e o sistema TES em estudo;
- Filtro de impurezas: Desempenha um papel crucial ao purificar a água, removendo partículas sólidas e detritos provenientes do sistema TES para evitar danos nos equipamentos do circuito primário.

3.1.2 Circuito primário

O circuito primário é constituído pela central energética do LAVAC. Nesta, destacam-se a caldeira elétrica *BAXI CML-15* e o *chiller RCAT EASY.A.P.M.5.Z1*, complementados pelas bombas de circulação B3 e B4, e um vaso de expansão, conforme ilustrado na Figura 3.2.

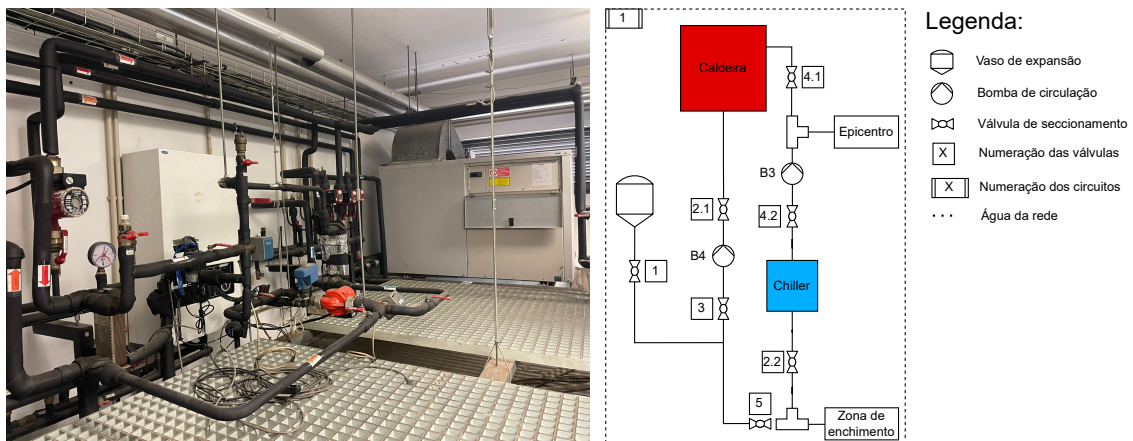


Figura 3.2: Central energética do LAVAC

- Bombas de circulação B3 e B4: Permitem movimentar a água e transportar a energia térmica produzida pela caldeira e pelo *chiller*;
- Vaso de expansão: Desempenha um papel crucial na mitigação do aumento de pressão da água, resultante do seu aquecimento na caldeira elétrica.

A caldeira elétrica e o *chiller* são essenciais no circuito primário, sendo estes os principais responsáveis pelo fornecimento de energia térmica à instalação. Ambos os equipamentos possuem um termostato de regulação manual que ajusta a temperatura da água com base na sua temperatura de retorno aos mesmos. Adicionalmente, estes equipamentos estão revestidos com isolamento térmico para minimizar as perdas de calor e estão ainda equipados com dispositivos de segurança para proteção contra falhas ou sobrecargas. As fichas técnicas de ambos os equipamentos, constam no Anexo B.

3.1.3 Circuito secundário

O circuito secundário da plataforma experimental é subdividido em três áreas distintas. A primeira área é destinada à simulação do consumo da energia oriunda do sistema TES, a segunda possui uma fonte de energia térmica, e a terceira permite realizar um bypass, possibilitando a mistura da água proveniente do sistema TES com a água proveniente do circuito secundário.

Zona de simulação do consumo de energia

Neste setor específico do circuito secundário, ilustrado na Figura 3.3, está localizado um reservatório de inércia com capacidade para cerca de 300 litros, denominado de Depósito de Inércia Secundário (DIS) para simplificar a sua identificação na plataforma experimental, sucedido de um filtro de impurezas.

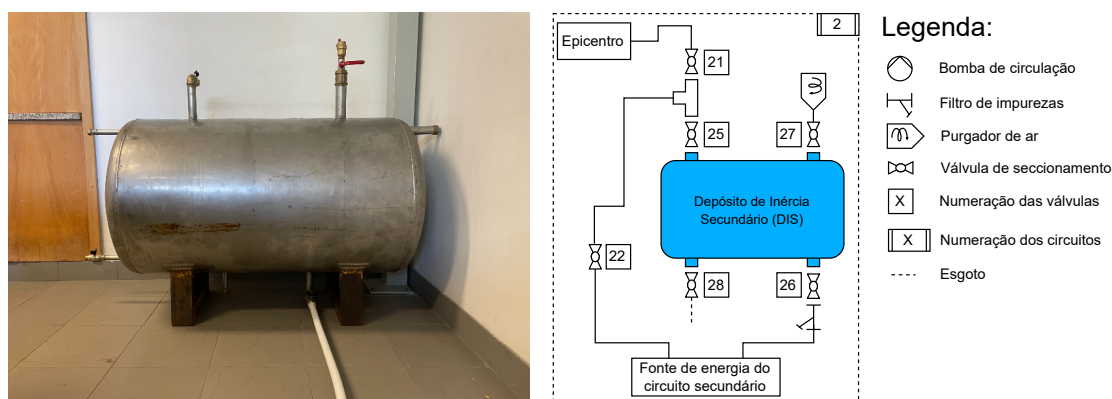


Figura 3.3: Depósito de inércia secundário

- DIS: Permite a simulação do consumo da energia térmica armazenada no sistema TES em estudo;
- Filtro de impurezas: Tem a importante tarefa de remover partículas sólidas e outros detritos da água proveniente do DIS, prevenindo possíveis obstruções e garantindo o funcionamento adequado da BCR.

Fonte de energia térmica

A fonte de energia do circuito secundário, precedida de um separador de microbolhas, conforme ilustrado na Figura 3.4, é uma Bomba de Calor Reversível (BCR) *McQuay M5AC 020 CR*. A capacidade desta unidade de aquecer e arrefecer a água, é crucial para a flexibilidade da plataforma experimental, pois permite a simulação de uma ampla gama de condições operacionais de consumo da energia térmica armazenada no sistema TES. A ficha técnica deste equipamento, consta no Anexo B.

O circuito interior da BCR divide-se em duas partes distintas: uma para o percurso da água a ser aquecida ou arrefecida, e outra para o trajeto do fluido frigorígeno R-410A. Inicialmente, a água é aspirada pela bomba de circulação integrada e conduzida ao permutador de calor de placas, onde se dá a transferência de calor com o fluido frigorígeno R-410A. Dependendo da necessidade e da configuração da BCR, a válvula de quatro vias ajusta o trajeto do R-410A para aquecer ou arrefecer a água. No modo de aquecimento, o R-410A absorve calor do ar no evaporador e transfere-o para a água no permutador. No arrefecimento, o R-410A absorve calor da água no permutador e liberta-o no evaporador.

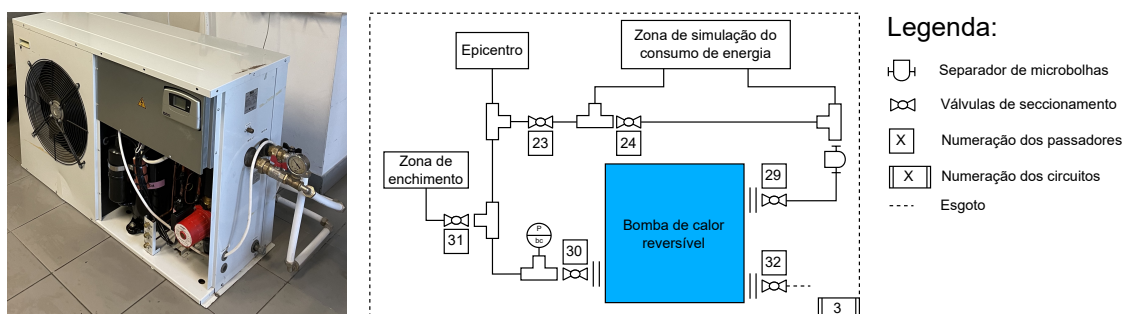


Figura 3.4: Bomba de calor reversível

- Separador de microbolhas: Remove pequenas bolhas do circuito, evitando assim a formação de bolsões de ar que poderiam comprometer a eficiência da transferência de calor e o funcionamento adequado da BCR

A BCR é controlada por um termostato que interrompe o seu funcionamento quando a temperatura desejada da água à entrada deste equipamento é alcançada. Nesse momento, apenas a bomba de circulação integrada permanece ativa para distribuir a água pelo circuito secundário, se necessário.

Bypass

A zona de bypass do circuito secundário, ilustrada na Figura 3.5, tem como principal componente, uma Válvula Misturadora Termostática (VMT). Nesta zona encontram-se ainda dois equipamentos de medição de caudal e uma válvula de retenção.

- VMT: Assume um papel crucial nesta parte do circuito secundário, sendo responsável por misturar a água proveniente do sistema TES com a água do DIS, previamente colocada à temperatura desejada pela BCR, obtendo assim uma mistura que permite simular diferentes cenários como produção de AQS ou aquecimento de espaços;

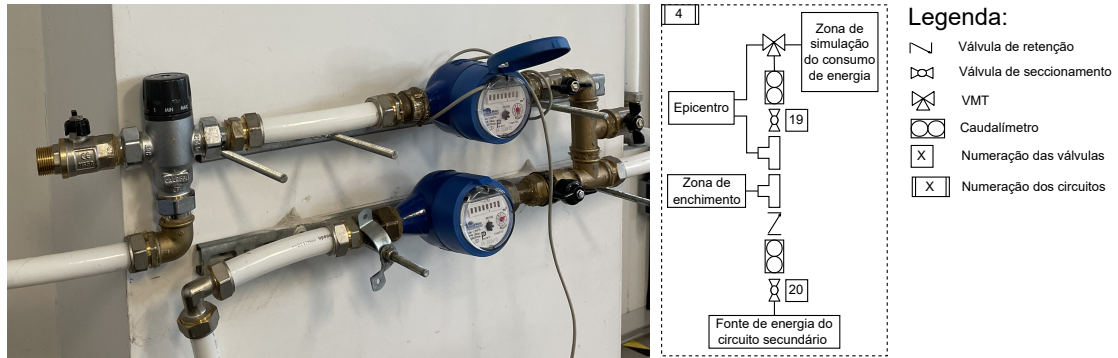


Figura 3.5: Bypass do circuito secundário

- Equipamentos de medição de caudal: Registam o volume de água que os atravessa ao longo do tempo;
- Válvula de retenção: Garante que a água não retrocede para a saída da BCR.

3.1.4 Zona de enchimento

O circuito de enchimento, ilustrado na Figura 3.6, possui como principais componentes, um vaso de expansão equipado com uma válvula de segurança e um grupo de enchimento, seguido de uma válvula de retenção e antecedido de um filtro de impurezas.

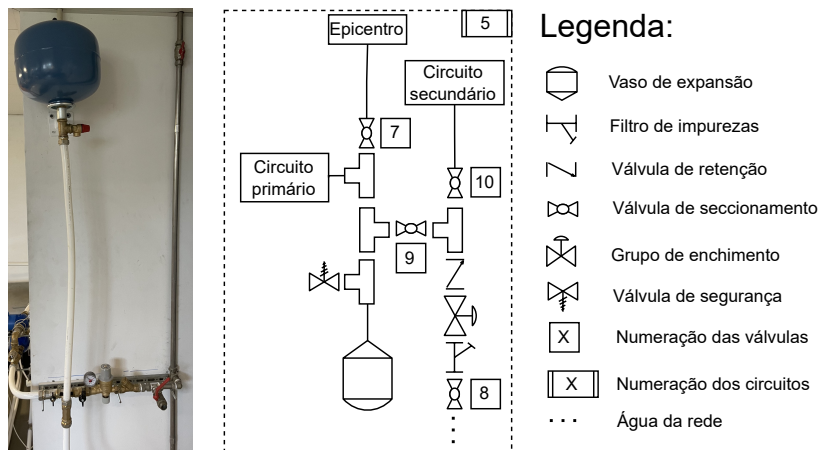


Figura 3.6: Circuito de enchimento da plataforma experimental

- Vaso de expansão: Tem como objetivo, neutralizar o aumento do volume da água, induzido pelo aumento da sua temperatura;
- Válvula de segurança: Acoplada ao vaso de expansão, tem como função descarregar para o exterior da plataforma experimental o excesso de água quando o vaso de expansão e os restantes componentes não são suficientes para controlar a pressão da instalação, evitando que esta atinja níveis perigosos para os seus equipamentos;

- Grupo de enchimento: Tem como função, manter a pressão da instalação estável, de acordo com o valor regulado, procedendo automaticamente à reabastecimento da água em falta;
- Válvula de retenção: Permite não alterar o sentido do escoamento, evitando assim o retorno de possíveis contaminações resultantes da operação da plataforma experimental, para a água da rede;
- Filtro de impurezas: Tem a importante tarefa de remover partículas sólidas e outros detritos da água proveniente da rede, prevenindo possíveis obstruções e garantindo o funcionamento adequado de todos os componentes da instalação.

3.1.5 Zona de aquisição de dados

A zona de aquisição de dados da plataforma experimental, ilustrada na Figura 3.7, é composta por um computador e um *data logger* DT80 series 2 da *dataTaker*.

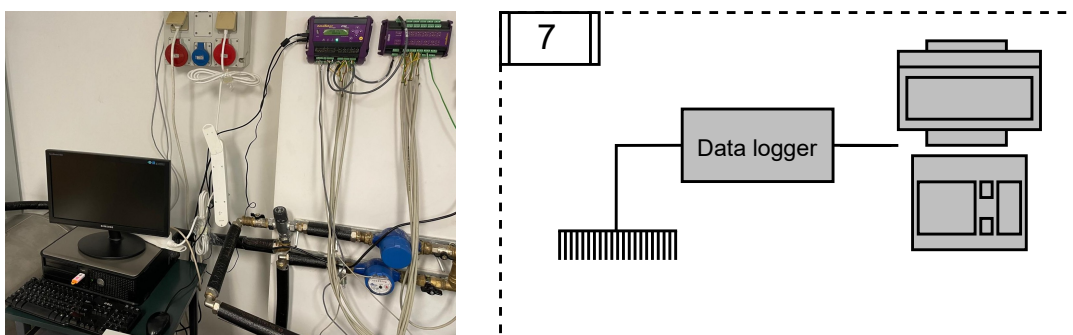


Figura 3.7: Zona de aquisição de dados da plataforma experimental

- *data logger*: Desempenha um papel crucial na aquisição e armazenamento dos dados provenientes dos instrumentos de medição. Este equipamento, pode ser programado para recolher dados de forma contínua ao longo de um intervalo de tempo, permitindo obter medições em intervalos regulares.
- Computador: Assume um papel central nesta configuração, servindo como uma interface para o controlo e monitorização das atividades experimentais. Através do *software* associado ao *data logger*, é possível iniciar e interromper as medições, assim como visualizar em tempo real os dados recolhidos.

3.2 Validação do funcionamento da plataforma experimental

Assegurar que a instalação fornece água a uma temperatura e caudal constante durante os ensaios é crucial para garantir a fiabilidade e consistência dos resultados obtidos. Variações nestes parâmetros podem introduzir incertezas, comprometendo a precisão e repetibilidade dos resultados.

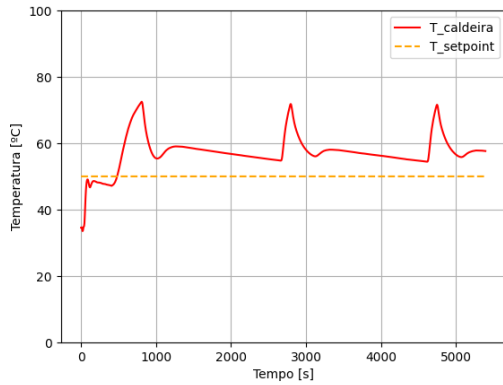
Assim, foi crucial manter estáveis tanto o circuito primário quanto o circuito secundário. Durante esta fase, foram conduzidos diversos testes que ajudaram a identificar as limitações da instalação e a encontrar formas de ultrapassá-las ou minimizá-las.

3.2.1 Comportamento do circuito primário

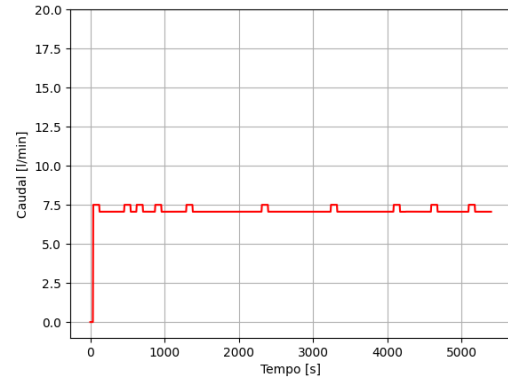
Inicialmente, avaliou-se o desempenho do circuito primário, realizando três testes distintos. Os resultados destes testes, constam nas Figuras 3.8, 3.9 e 3.10.

Com base nas Figuras 3.8a, 3.9a e 3.10a, observa-se um padrão inicial consistente da caldeira nos três testes. No entanto, a temperatura da água fornecida por este equipamento não se mantém constante ao longo do tempo, apresentando variações significativas. Esta instabilidade é inadequada para a realização dos ensaios do sistema TES, onde é crucial manter uma temperatura estável. Além disso, é importante salientar que nos três ensaios, a caldeira aquece a água além do *setpoint* estabelecido.

Relativamente ao caudal, conforme evidenciado nas Figuras 3.8b, 3.9b e 3.10b, verifica-se que este se manteve praticamente constante ao longo dos três testes realizados. Isto sugere que, apesar de algumas variações insignificantes, o caudal permaneceu estável durante o período de medição.

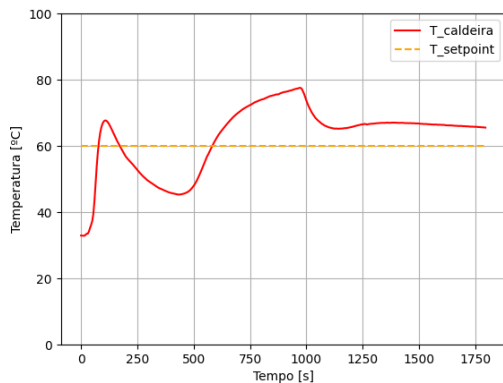


(a) Evolução da temperatura produzida pela caldeira elétrica

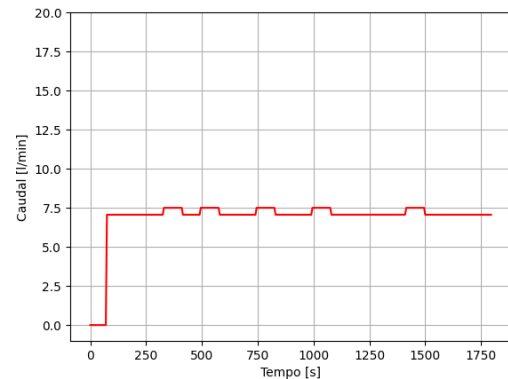


(b) Evolução do caudal do circuito primário

Figura 3.8: Primeiro teste do circuito primário (*Setpoint* = 50°C)

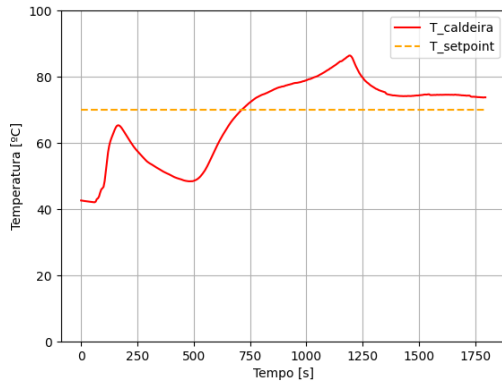


(a) Evolução da temperatura produzida pela caldeira elétrica

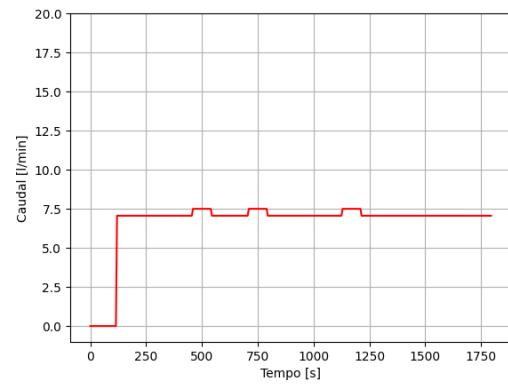


(b) Evolução do caudal do circuito primário

Figura 3.9: Segundo teste do circuito primário (*Setpoint* = 60°C)



(a) Evolução da temperatura produzida pela caldeira elétrica



(b) Evolução do caudal do circuito primário

Figura 3.10: Terceiro teste do circuito primário ($Setpoint = 70^{\circ}\text{C}$)

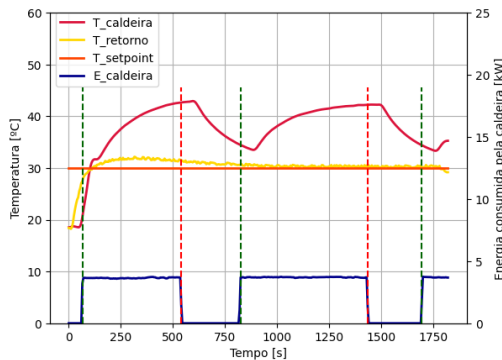
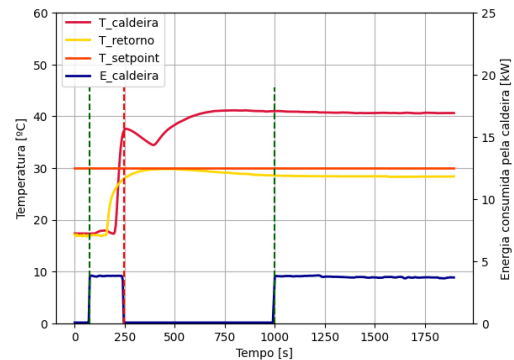
3.2.2 Controlo da temperatura no circuito primário

Caldeira elétrica

O comportamento imprevisível e inconsistente da caldeira elétrica surgiu como o maior condicionante do circuito primário, representando o principal desafio a ser superado.

Primeiramente, foram realizados dois novos testes com o objetivo de determinar os momentos em que a caldeira ligava e desligava, para que fosse possível compreender o funcionamento deste equipamento e avaliar a possibilidade de o controlar. Para este propósito, um medidor de energia foi conectado à caldeira para registar os momentos em que esta consumia energia elétrica, transformando-a em energia térmica para aquecer a água.

Antes de iniciar estes testes, surgiu a ideia de fazer com que a água que retorna do sistema TES à caldeira passasse primeiramente pelo DIS, pré-estabelecido a uma determinada temperatura, fazendo com que a caldeira recebesse água a uma temperatura constante. Com este método, procurava-se alcançar uma temperatura constante na água quente fornecida pela caldeira. Os resultados obtidos, constam na Figura 3.11.

(a) Temperatura de pré-aquecimento do DIS = 32°C (b) Temperatura de pré-aquecimento do DIS = 28°C Figura 3.11: Comportamento dinâmico da caldeira ($Setpoint = 30^{\circ}\text{C}$)

A Figura 3.11a, demonstra que enviar água a uma temperatura superior ao *setpoint* da caldeira não resulta numa melhoria do seu comportamento. Observa-se um padrão bastante semelhante ao obtido anteriormente (Figuras 3.8a, 3.9a e 3.10a), o que indica a ineficácia deste método.

Contudo, foi possível retirar algumas conclusões valiosas com o medidor de energia, em relação à resposta da caldeira. A tracejado vermelho, estão marcados os instantes em que a caldeira desligou, enquanto o tracejado verde marca os instantes em que a caldeira ligou. Analisando a figura 3.11a, onde a caldeira está a receber água a uma temperatura superior ao seu *setpoint*, e desprezando o primeiro momento em que a caldeira é ligada devido à ativação da bomba de circulação B1, ao cruzar os restantes instantes com a temperatura a que a caldeira estava a enviar a água para o sistema TES, torna-se possível apurar qual o intervalo de temperaturas em que a caldeira permanece ativa. Deste modo, foi possível constatar que a caldeira desligou-se ao segundo 540 e ao segundo 1435, onde foi registada uma temperatura de aproximadamente $42,5^{\circ}\text{C}$ em ambos os instantes. Enquanto isso, esta voltou a ligar-se quando a temperatura atingiu aproximadamente $34,5^{\circ}\text{C}$ nos instantes 825 e 1695.

A Figura 3.11b, representa o comportamento da caldeira a receber água a uma temperatura inferior ao seu *setpoint*. O comportamento deste equipamento melhorou significativamente, observando-se um padrão mais uniforme após o período de estabilização inicial. Desprezando novamente o primeiro momento em que a caldeira ligou, pelas mesmas razões enunciadas anteriormente, a caldeira desligou-se ao segundo 245 e voltou a ligar-se ao segundo 1000. No instante em que a caldeira é desligada, a temperatura da água fornecida pela mesma era sensivelmente 37°C , enquanto a temperatura de retorno registou um valor de aproximadamente 28°C . No instante em que a caldeira é ligada, a temperatura da água fornecida pela mesma era sensivelmente 41°C , enquanto a temperatura de retorno registou um valor de aproximadamente 28°C . Analisando estes dados, em congruência com os resultados obtidos no teste anterior, conclui-se que nos momentos em que a caldeira se desligou e ligou, as temperaturas da água fornecida pela mesma, estão dentro do intervalo verificado anteriormente.

Deste modo, a temperatura de retorno à caldeira, surge como principal responsável para este comportamento, uma vez que, ao atingir um valor superior a 28°C , a caldeira desliga-se, permanecendo nesse estado até que a temperatura volte a ser inferior a 28°C . Após este momento, a temperatura da água fornecida pela caldeira, assumiu um valor constante até ao final do teste e a caldeira também permaneceu ligada, uma vez que a temperatura de retorno não voltou a ser superior a 28°C .

Apesar desta análise ter sido essencial para aumentar o conhecimento sobre o comportamento e a dinâmica da caldeira, a prolongada duração da instabilidade verificada nos momentos iniciais deste segundo teste (cerca de dez minutos) poderá ter implicações significativas nos ensaios do sistema TES. Este método, implica ainda que, de acordo com a temperatura desejada para a água fornecida pela caldeira ao sistema TES em estudo, seja feita uma pré-análise semelhante à que foi realizada. Isto, revela que esta solução seria pouco eficiente, exigindo, portanto, a necessidade de encontrar outra solução.

VMT

Neste contexto, surgiu uma nova possibilidade que, presumivelmente, resolveria o problema associado às variações significativas da temperatura da água fornecida pela caldeira.

A solução encontrada consistiu na instalação de uma VMT a jusante da caldeira e a montante do sistema TES, conforme demonstrado na Figura 3.12. Aproveitando o *chiller* existente na central energética do LAVAC para fornecer água a uma temperatura significativamente inferior à da caldeira, garante-se assim, teoricamente, através do ajuste da VMT, a produção de uma mistura a uma temperatura constante.

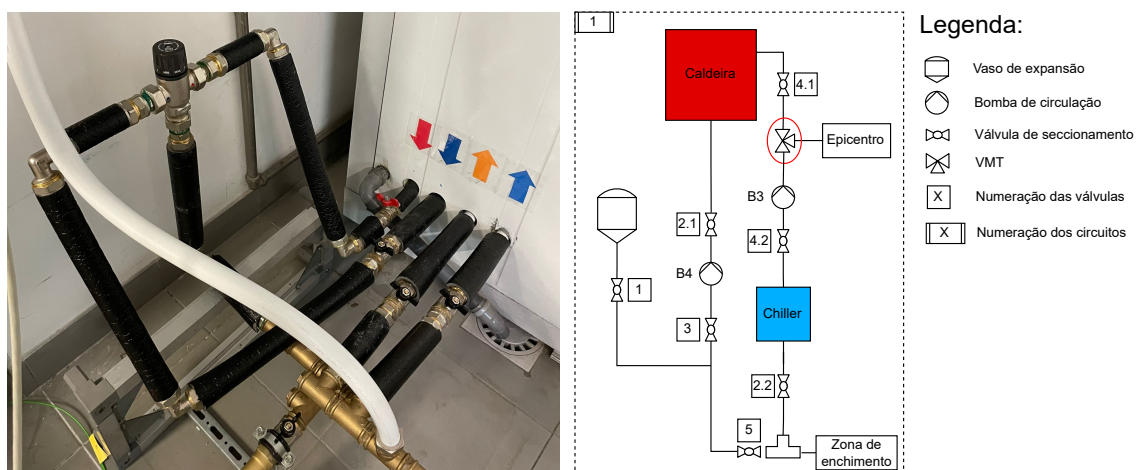


Figura 3.12: Instalação da VMT no circuito primário

Para avaliar o comportamento da água fornecida ao sistema TES com a nova configuração, foram realizados dois testes. Os resultados obtidos, constam na Figura 3.13.

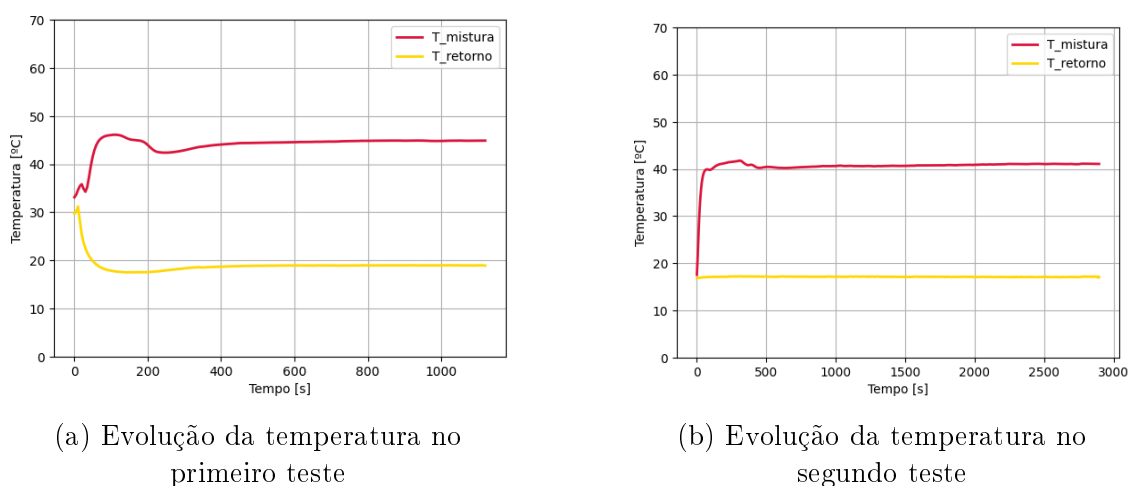


Figura 3.13: Comportamento da VMT

Na Figura 3.13a, é possível observar que a mistura produzida pela VMT, mantém-se constante, após um momento inicial de estabilização. Esta oscilação inicial, embora durasse menos tempo em comparação com o verificado anteriormente, continua a ser uma condicionante.

Para contornar este incidente, ao pré-estabelecer a temperatura do DIS para efetuar o retorno à caldeira, manteve-se a bomba de circulação integrada da BCR em funcionamento por mais alguns minutos após este equipamento se desligar. Esta medida assegura a recirculação da água entre o DIS e a BCR, garantindo que esta já atingiu uma temperatura estável assim que for enviada para o sistema TES.

Na Figura 3.13b, é possível observar uma temperatura de retorno mais estável, que por sua vez, provoca também uma diminuição da oscilação inicial da temperatura fornecida pela VMT. A longa duração deste segundo teste, demonstra ainda que a VMT é capaz de produzir uma mistura a uma temperatura constante por um longo período de tempo.

Depósito de inércia primário

No entanto, no decorrer dos ensaios anteriores, foi notado um comportamento anômalo por parte do *chiller*. A conclusão a que se chegou, foi que este não tinha potência suficiente para arrefecer a água proveniente do DIS até à temperatura adequada para a mistura, rapidamente, resultando num funcionamento contínuo e excessivo deste equipamento durante todo o ensaio. Para prevenir futuras complicações, foi necessário cessar o retorno da água ao *chiller*.

Concluiu-se que uma alteração exequível neste circuito, que poderia contornar este problema, seria a instalação de um depósito de inércia entre a VMT e a central energética do LAVAC, conforme ilustrado na Figura 3.14.

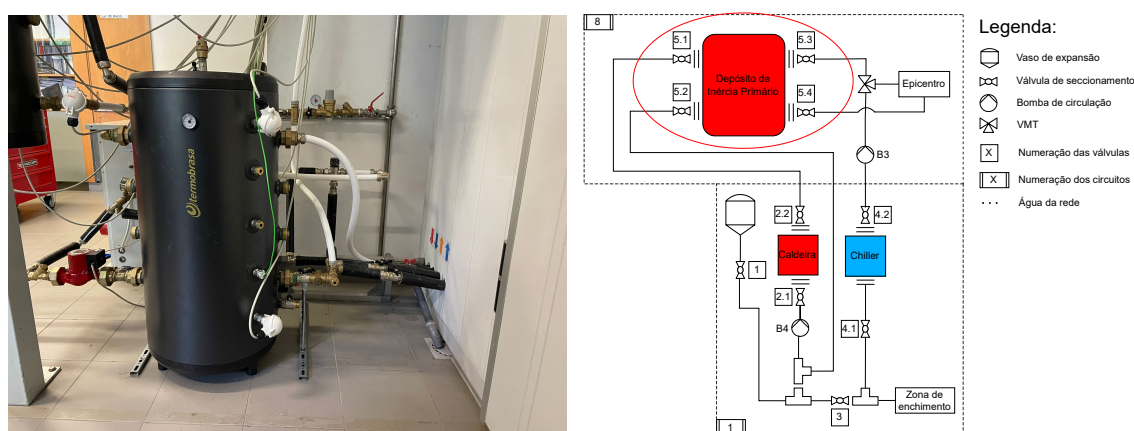
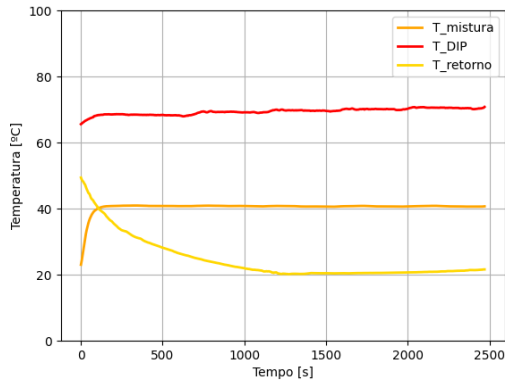


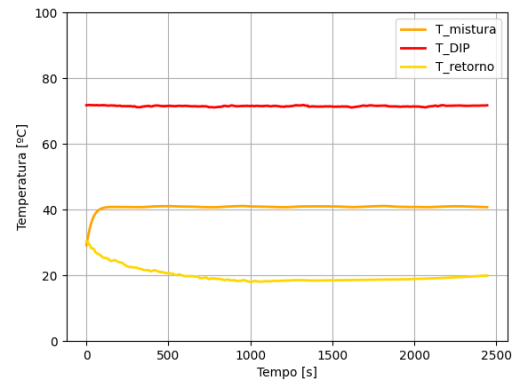
Figura 3.14: Instalação do DIP no circuito primário

Desta forma, a VMT recebia a água pré-aquecida desse depósito, denominado de Depósito de Inércia Primário (DIP), e a água proveniente do *chiller*. O retorno da água proveniente do sistema TES passou a ser enviado para o DIP, que presumivelmente, devido à sua inércia, não deveria comprometer o sucesso dos testes efetuados. Foram então realizados dois testes, cujos resultados obtidos, constam na Figura 3.15.

Com base nos resultados apresentados na Figura 3.15, pode-se concluir que o comportamento da mistura produzida pela VMT, manteve-se constante ao longo de todo o período de medição. Além disso, o comportamento do DIP revelou-se bastante satisfatório, uma vez que, a sua inércia foi suficiente para assegurar a estabilidade necessária.



(a) Evolução da temperatura no primeiro teste



(b) Evolução da temperatura no segundo teste

Figura 3.15: Comportamento do circuito primário com a adição do DIP

3.2.3 Disponibilidade do caudal no circuito primário

Durante todas estas alterações no circuito primário da plataforma experimental, o caudal foi enviado para segundo plano, e por isso é necessário averiguar quais as consequências que estas modificações tiveram sobre o mesmo. As medições do caudal do circuito primário para todos os testes realizados, constam na Figura 3.16.

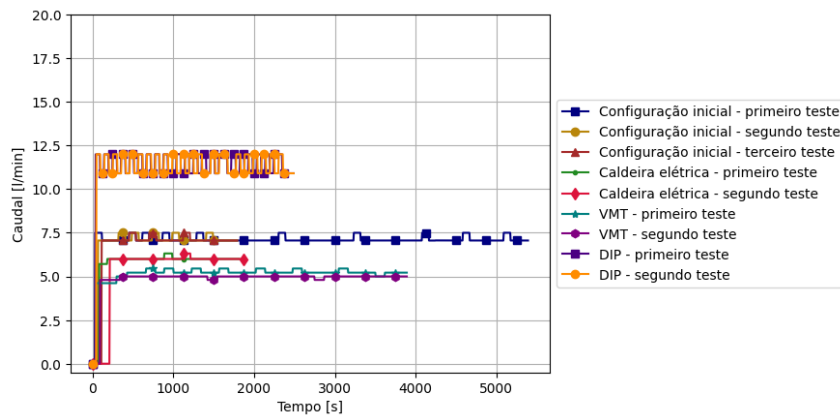


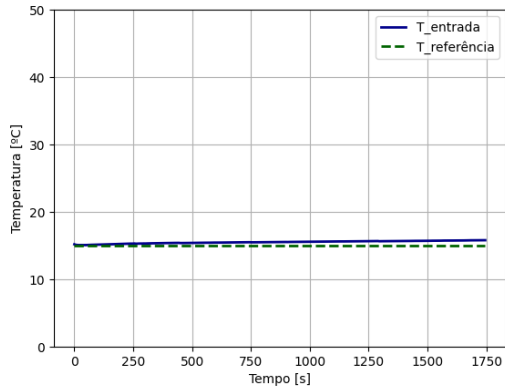
Figura 3.16: Evolução do caudal com as alterações no circuito primário

Analisando a Figura 3.16, é possível observar que as mudanças que influenciaram negativamente a disponibilidade do caudal no circuito primário ocorreram na alteração do retorno à caldeira, e na instalação da VMT.

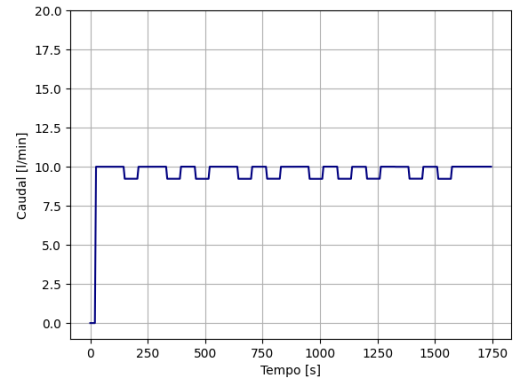
Entre estas mudanças, o caudal máximo do circuito primário reduziu de aproximadamente 7,5 l/min para cerca de 5,5 l/min. Um caudal máximo de 5,5 l/min no circuito primário representava um valor aquém do aceitável, podendo tornar-se uma condicionante para a realização dos ensaios do sistema TES.

Contudo, com a adição do DIP, os resultados evidenciam uma clara subida do caudal disponível no circuito primário, uma vez que se diminui consideravelmente a perda de carga do circuito. Anteriormente, o caudal máximo era de 5,5 l/min, contudo, com esta alteração, esse valor aumentou para aproximadamente 12 l/min, proporcionando um intervalo que permite uma maior flexibilidade para a realização dos ensaios.

3.2.4 Comportamento do circuito secundário

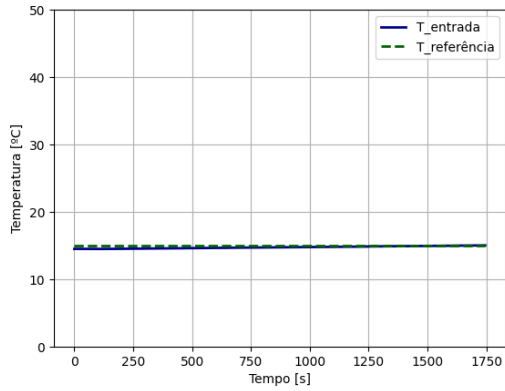


(a) Evolução da temperatura fornecida pelo circuito secundário

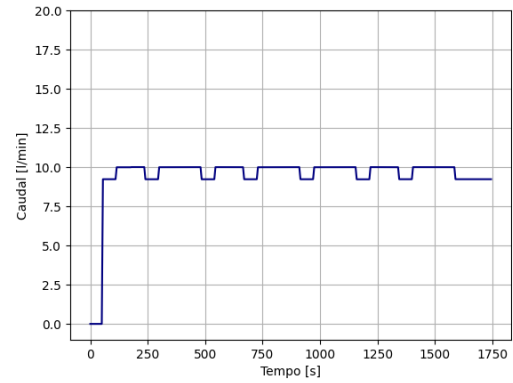


(b) Evolução do caudal do circuito secundário

Figura 3.17: Primeiro teste do circuito secundário ($Setpoint = 15^{\circ}\text{C}$)

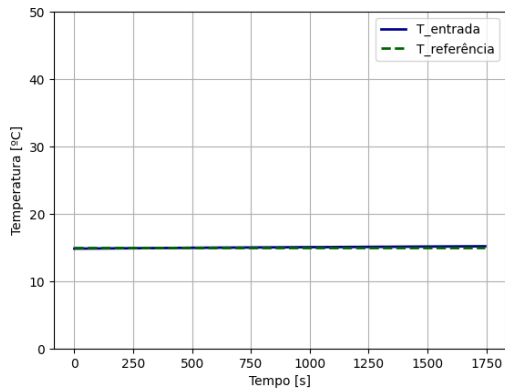


(a) Evolução da temperatura fornecida pelo circuito secundário

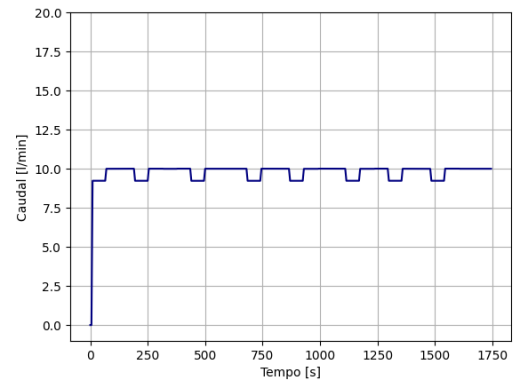


(b) Evolução do caudal do circuito secundário

Figura 3.18: Segundo teste do circuito secundário ($Setpoint = 15^{\circ}\text{C}$)



(a) Evolução da temperatura fornecida pelo circuito secundário



(b) Evolução do caudal do circuito secundário

Figura 3.19: Terceiro teste do circuito secundário ($Setpoint = 15^{\circ}\text{C}$)

Para avaliar o desempenho do circuito secundário, foram realizados três testes. Os resultados obtidos constam nas Figuras 3.17, 3.18 e 3.19.

Observando as Figuras 3.17a, 3.18a e 3.19a, verifica-se um comportamento linear da temperatura fornecida ao sistema TES, que se mantém constante ao longo do tempo e bastante próxima da temperatura desejada.

O caudal, conforme demonstrado nas Figuras 3.17b, 3.18b e 3.19b, assim como a temperatura, manteve-se constante ao longo do tempo, apresentando apenas algumas variações pouco significativas, tal como aconteceu no circuito primário.

3.2.5 Controlo da temperatura no circuito secundário

Setpoint da BCR

A temperatura fornecida pelo circuito secundário revelou-se o menor dos problemas da instalação, visto que a combinação da BCR com o DIS se mostrou ideal para este propósito.

O ajuste do *setpoint* da BCR foi identificado como o fator mais relevante neste contexto, pois um valor adequado permite manter aproximadamente 300 litros de água a uma temperatura constante. Adicionalmente, a estabilidade térmica proporcionada pela inércia do DIS garante que as variações de temperatura sejam minimizadas.

3.2.6 Disponibilidade do caudal no circuito secundário

O caudal do circuito secundário, é resultante da diferença de pressão que a bomba integrada da BCR consegue vencer em relação à perda de carga do circuito. Deste modo, o caudal máximo do circuito secundário, ronda os 10 l/min. Este valor embora inferior ao do circuito primário, constitui também um intervalo bastante razoável e dentro da expectativa para o estudo dos sistemas TES.

Bomba de circulação B2

No entanto, à medida que se reduziu a velocidade na bomba integrada da BCR, para se perceber quais os caudais que as diferentes velocidades da mesma produziam, foi encontrada uma nova condicionante. Esta, foi sinalizada pela BCR, que automaticamente se desligou e acionou o alarme de erro "*Water flow pressure*". A razão por detrás disto, reside na transferência de calor entre a água e o fluido frigorígeno, que é fundamental para o manter a uma temperatura adequada. Se o caudal de água for demasiado baixo, a energia do fluido frigorígeno não é transferida de forma eficaz, o que pode levar ao congelamento do mesmo, podendo causar danos ao equipamento.

Para resolver este problema, foi instalada uma nova bomba de circulação (B2) à entrada do DIS, conforme ilustrado na Figura 3.20, cuja função é complementar a bomba integrada da BCR. Desta forma, a bomba integrada da BCR será acionada quando for necessário pré-estabelecer o DIS a uma determinada temperatura, e quando for necessário um caudal superior ao máximo conseguido pela bomba de circulação B2. Quando se pretender circular a água presente no DIS para o sistema TES em estudo, no intervalo produzido pela bomba de circulação B2, apenas esta será acionada. Para analisar os caudais que esta nova configuração do circuito secundário disponibiliza, foram feitos quatro ensaios.

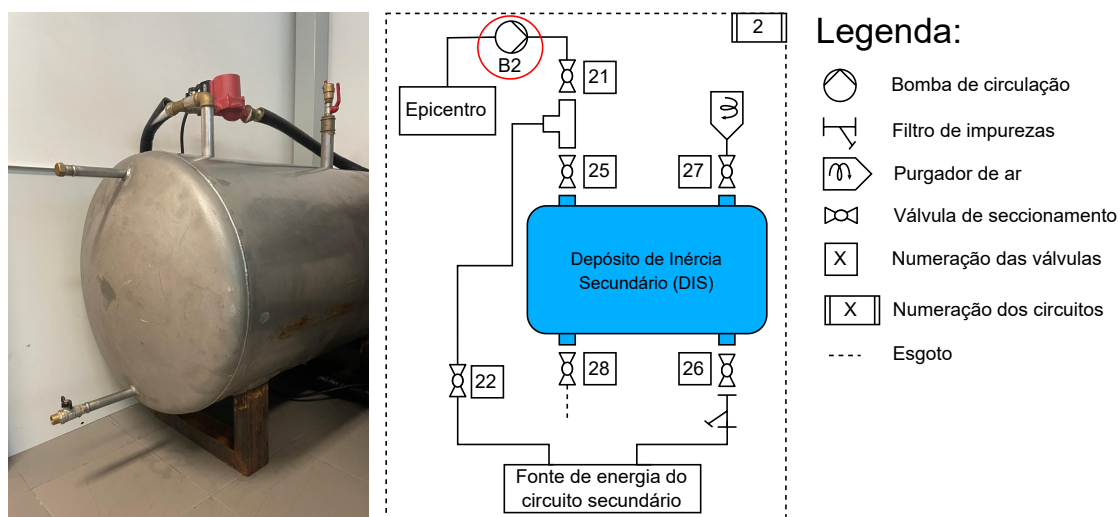


Figura 3.20: Instalação da bomba de circulação B2

Na Figura 3.21, é possível observar que a bomba de circulação B2 apenas consegue fornecer um caudal máximo de 7 l/min. Apesar deste valor ser inferior ao expectável, a conjugação de ambas as bombas permite alcançar um caudal total de aproximadamente 14 l/min. As pequenas variações que já tinham vindo a ser observadas, são de uma magnitude baixa e portanto foram consideradas desprezáveis. Esta configuração garante um intervalo de operação significativamente mais amplo, o que é vantajoso para testes que requeiram valores superiores aos que a bomba de circulação B2 pode fornecer sozinha.

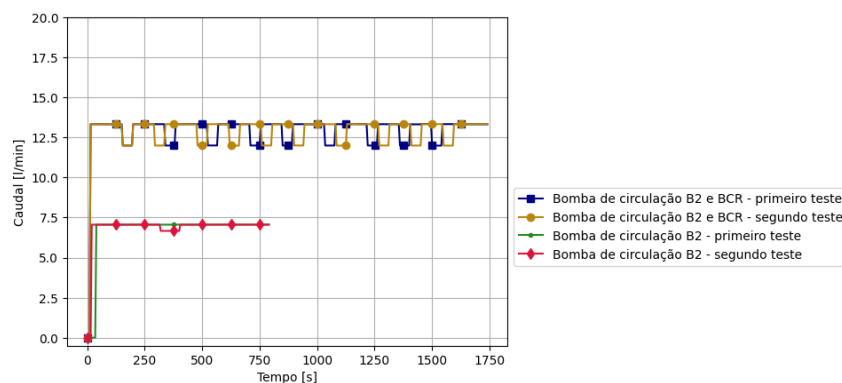


Figura 3.21: BCR e bomba de circulação B2 vs Bomba de circulação B2

3.2.7 Controlo do caudal no circuito primário e secundário

Até então, a única forma de controlar o caudal dos circuitos primário e secundário da plataforma experimental, era ajustando manualmente as válvulas de seccionamento e as velocidades das bombas de circulação. Para melhorar a eficiência deste controlo, foram instaladas duas Válvula de Equilíbrio Hidráulico Estática (VEHE), uma no circuito primário e outra no circuito secundário, conforme ilustrado na Figura 3.22.

Estas válvulas permitem ajustar manualmente a sua abertura para regular o caudal de água em cada circuito. Através deste mecanismo, é possível aumentar ou diminuir o caudal, assegurando uma distribuição equilibrada e eficiente.

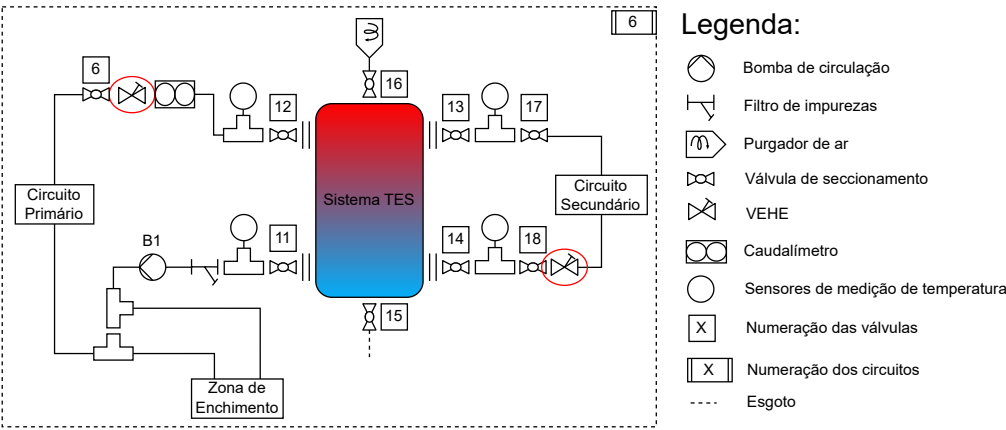


Figura 3.22: Adição das VEHE aos circuitos primário e secundário

Todas estas alterações culminaram no esquema de princípio final da plataforma experimental, presente no Anexo A.

4 Metodologia Experimental

Com base na revisão bibliográfica feita na Secção 2, que proporcionou uma compreensão abrangente dos conceitos e estudos pré-existentes de sistema TES, delineou-se a metodologia a seguir nesta investigação.

Neste capítulo, serão descritos os métodos e técnicas utilizados no estudo do sistema TES. Primeiramente, apresenta-se o sistema TES, que será objeto de análise, seguido pelos pontos de medição. Posteriormente, são delineados os ensaios experimentais realizados e, por fim, descreve-se a forma como foram analisados os dados obtidos.

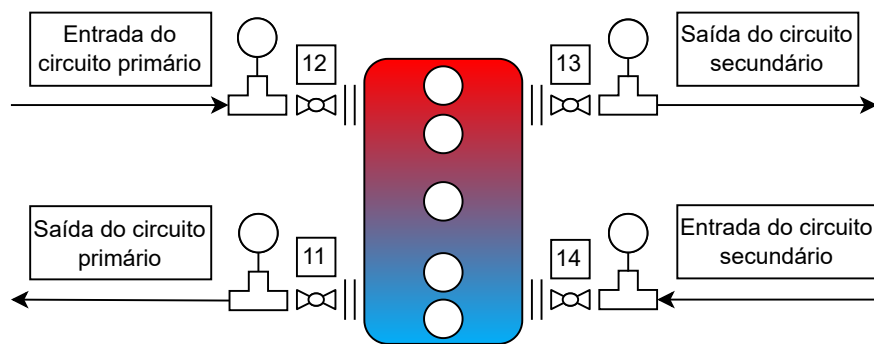
O Apêndice A, complementa este capítulo, detalhando aspetos relacionados com a montagem da instrumentação e o procedimento experimental para cada tipologia de ensaio.

4.1 Sistema TES

O sistema TES, que será alvo de investigação, é um termoacumulador de inércia produzido pela empresa Termobrasa. Este, tem uma capacidade para aproximadamente 50 litros e está isolado com granulado de cortiça. O seu esquema de projeto está documentado no Anexo C.



(a) Termobrasa
50 litros



(b) Entradas e Saídas dos circuitos primário e secundário

Figura 4.1: Sistema TES

Este, possui oito tomadas laterais designadas como entradas e saídas das fontes de energia, além de cinco orifícios onde foram instalados equipamentos de medição de temperatura, como demonstrado na Figura 4.1a. Adicionalmente, apresenta dois

orifícios localizados no topo e na base, destinados à instalação de purgadores. As suas dimensões estão discriminadas na Tabela 4.1

Tabela 4.1: Dimensões do sistema TES

Altura exterior/interior [m]	1,01/0,95
Diâmetro exterior/interior [m]	0,32/0,26
Relação H/D	3,65
Diâmetro das tomadas [m]	0,025
Espessura do isolamento [m]	0,03
Altura interior das tomadas [m]	0,05; 0,3; 0,65; 0,9
Altura interior dos sensores [m]	0,03; 0,205; 0,495; 0,785; 0,935

Conforme ilustrado na Figura 4.1b, e com base no que foi constatado na Secção 2.3.2 da revisão bibliográfica, as tubagens provenientes do circuito primário foram ligadas a um dos lados do sistema TES, com a entrada de água conectada à tomada superior e a saída à tomada inferior. Por outro lado, as ligações das tomadas do circuito secundário ao sistema TES foram realizadas de forma inversa, de modo que a água proveniente deste circuito entre pela tomada mais próxima da base e saia pela tomada mais próxima do topo do sistema TES.

4.2 Pontos de medição

Os pontos de medição atribuídos, permitem em cada ensaio, obter valores de temperatura e de caudal em zonas estratégicas da plataforma experimental.

As temperaturas foram medidas em três zonas distintas da instalação. Primeiramente, foram colocadas cinco sondas ao longo do comprimento axial do sistema TES. As temperaturas à entrada/saída dos circuitos primário e secundário no sistema TES foram também registadas, assim como a temperatura de retorno à caldeira e a temperatura da água proveniente da caldeira, ambas registadas por dois sensores instalados no DIP.

Quanto ao caudal, este foi medido também em três zonas distintas da plataforma experimental. Em cada um dos circuitos, primário e secundário, foram colocados, à entrada de cada um no sistema TES, dois equipamentos de medição de caudal. A terceira zona onde se mediu o caudal, foi no bypass do circuito secundário.

4.2.1 Nomenclatura dos pontos de medição

Cada um dos pontos de medição, foi denominado de acordo com uma nomenclatura, previamente definida, com o intuito de simplificar e facilitar o reconhecimento e a localização de cada um destes na plataforma experimental. Para identificar as temperaturas foi utilizada a letra "T" e para identificar os caudais foi utilizada a letra "C".

No que diz respeito às temperaturas, foram seguidas duas metodologias diferentes. Para as temperaturas que estão a ser registadas no interior dos depósitos, conforme ilustrado nas Figuras 4.2a e 4.2b, a estratégia foi a seguinte: T_{zz} .

Onde:

- zz = altura adimensional de cada um dos pontos de medição, a contar desde a base interior de cada depósito,

Para as temperaturas à entrada/saída dos circuitos primário e secundário, como representado na Figura 4.2a, a abordagem foi a seguinte: Tc_t .

Onde:

- $c = s$ ou p , conforme a entrada/saída corresponder ao circuito secundário ou primário, respetivamente;
- $t = i$ ou o , consoante a tomada corresponder à entrada/saída de cada circuito, respetivamente.

A nomenclatura dos pontos onde foram registados os caudais, tal como consta na Figura 4.2c, seguiu para todos a mesma metodologia, sendo esta a seguinte: Cl .

Onde:

- $l = s, p$ ou b , de acordo com o local onde está a ser feita a medição, ou seja, no circuito secundário, no circuito primário ou no bypass, respetivamente.

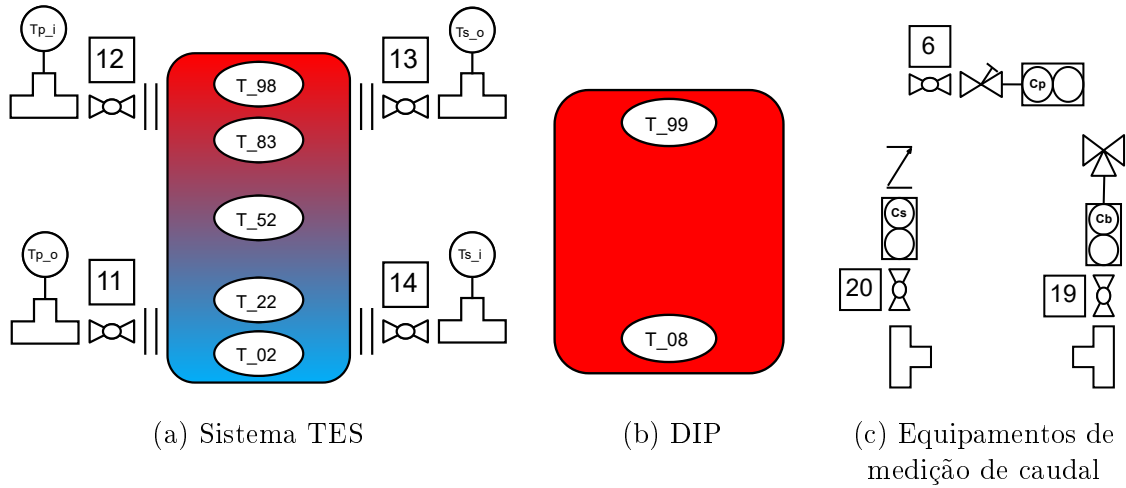


Figura 4.2: Nomenclatura dos pontos de medição

4.2.2 Instrumentação

Os instrumentos de medição foram essenciais para a condução adequada dos ensaios experimentais. Durante estes ensaios, o *data logger* desempenhou igualmente um papel fundamental ao registar e armazenar as medições obtidas pelos referidos instrumentos, assegurando o acompanhamento em tempo real das condições experimentais e o registo das variáveis relevantes.

Medição de temperatura

Os sensores de medição de temperatura utilizados, foram Detetores de Temperatura por Resistência (*Resistance Temperature Detectors*) (RTD) PT-100 e PT-1000 da *KIMO Instruments*. Os RTD PT-100 e PT-1000 foram selecionados em detrimento dos termopares devido à sua maior precisão e estabilidade, em consonância com as preferências apresentadas por outros investigadores na Secção 2.4 da revisão bibliográfica, os quais também elegeram RTD para a medição da temperatura dos pontos críticos das suas plataformas experimentais.

Estes sensores, funcionam com base na variação da resistência elétrica de um elemento condutor, geralmente platina, em resposta às mudanças de temperatura. Quando a temperatura aumenta, a resistência elétrica dos RTD aumenta de forma previsível e linear. Esse aumento na resistência é característico da platina e é medido com precisão para determinar a temperatura ambiente. Essa resposta é enviada para o *data logger*, que converte diretamente o valor da diferença de potencial resultante do aumento da resistência, devido à passagem de uma corrente elétrica conhecida, em temperatura e procede ao seu registo. As características metrológicas deste equipamento, constam na Tabela 4.2, e a ficha técnica completa destes equipamentos está presente no Anexo B.

Tabela 4.2: Características metrológicas dos RTD da *KIMO Instruments*

Intervalo de medição	Exatidão	Resolução
De -50°C a 400°C	De -50°C a 0°C : $\pm 0,55^{\circ}\text{C}$	0,01°C
	De 0°C a 100°C : $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$	
	De 100°C a 200°C: $\pm 0,8^{\circ}\text{C}$	
	De 200°C a 300°C: $\pm 1,3^{\circ}\text{C}$	
	De 300°C a 400°C: $\pm 1,8^{\circ}\text{C}$	

Medição de caudal

Os equipamentos utilizados para medir os caudais do circuito primário e secundário, assim como, do bypass, foram contadores volumétricos de pistão rotativo PR15 da *Enermeter*. Estes contadores, operam com base no deslocamento alternativo de um pistão dentro de uma câmara de medição. À medida que a água passa pela câmara, o pistão é acionado pela pressão da água, resultando num movimento rotativo. Este movimento rotativo é transmitido a um mecanismo de contagem, que regista as rotações do pistão. As características metrológicas deste equipamento, constam na Tabela 4.3, e a ficha técnica completa está presente no Anexo B.

Tabela 4.3: Características metrológicas do contador PR15 da *Enermeter*

Intervalo de Medição	Exatidão	Resolução
0,25 l/min a 50 l/min	De 0,25 l/min a 0,375 l/min: $\pm 5\%$	0,05 l
	De 0,375 l/min a 50 l/min: $\pm 2\%$	

O mecanismo de contagem utilizado foi um módulo emissor de impulsos *IZAR PULSE* e também da *Enermeter*. Este dispositivo, acoplado ao contador, utiliza sensores magnéticos para detetar cada rotação do pistão. Por cada 10 litros de

água que passam, é gerado um impulso elétrico, que é enviado posteriormente ao *data logger*, permitindo assim, de forma indireta, a medição do consumo de água ao longo de um determinado intervalo de tempo.

4.3 Condições de ensaio

Com base na revisão bibliográfica efetuada, optou-se por realizar duas tipologias de ensaios diferentes, sendo estes, processos de carregamento e descarga completos. As temperaturas e os caudais foram selecionados para permitir a comparação dos ensaios realizados com os resultados e conclusões obtidos por outros autores, e em consonância com os possíveis fatores que poderiam influenciar o desempenho do sistema TES, apresentados na Secção 2.3 da revisão bibliográfica. Assim, foram realizados dezoito, cujas condições estão detalhadas na Tabela 4.4.

4.3.1 Procedimento

O procedimento de cada ensaio é determinado pela sua finalidade específica, uma vez que, para os ensaios de carregamento e descarga, a plataforma experimental é seccionada de forma distinta. É relevante destacar que os processos de carregamento e descarga apresentam vários momentos distintos, os quais podem variar de acordo com o estado operacional do sistema TES no início de cada um destes.

Carregamento

O carregamento do sistema TES é essencialmente composto por três momentos distintos, sendo que, cada um desempenha um papel crucial no processo de fornecimento de energia térmica ao sistema TES.

- Primeiro momento: Colocar o sistema TES à temperatura inicial pretendida, garantindo uma distribuição uniforme da temperatura no interior do mesmo;
- Segundo momento: Pré-aquecer o DIP, para que seja fornecida água a uma temperatura elevada à VMT;
- Terceiro momento: Transferência efetiva da energia térmica para o sistema TES.

Descarga

O processo de descarga do sistema TES compreende também três momentos distintos, sendo que, cada um desempenha um papel crucial na simulação do consumo da energia térmica armazenada e no regresso do sistema TES ao estado inicial de operação.

- Primeiro momento: Colocar o sistema TES à temperatura inicial pretendida, garantindo uma distribuição uniforme da temperatura no interior do mesmo;
- Segundo momento: Toda a inércia do DIS é estabelecida para a temperatura na qual a descarga será realizada;

- Terceiro momento: Transferência efetiva de energia térmica entre o DIS e o sistema TES, simulando assim o consumo de toda a energia térmica armazenada, à medida que o sistema TES é descarregado.

Tabela 4.4: Condições dos ensaios do sistema TES

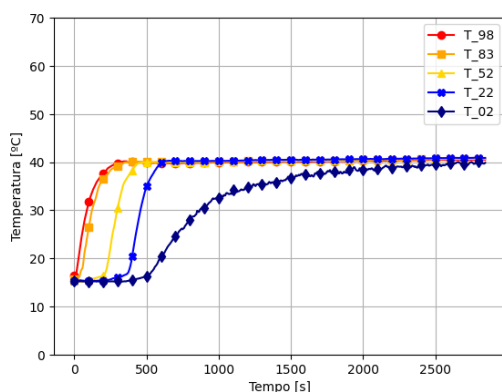
(a) Carregamento		
Temperaturas de entrada	Temperaturas iniciais	Caudais
60°C	15°C	2 l/min
50°C	-	4,5 l/min
40°C	-	7 l/min
(b) Descarga		
Temperaturas de entrada	Temperaturas iniciais	Caudais
15°C	60°C	2 l/min
-	50°C	4,5 l/min
-	40°C	7 l/min

4.4 Critério de finalização

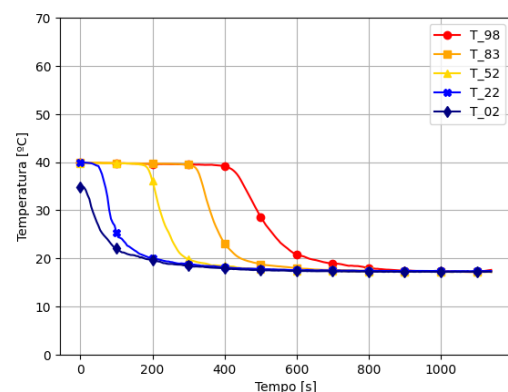
A definição precisa dos critérios para a conclusão dos ensaios de carregamento e descarga do sistema TES, é fundamental para otimizar o desempenho e minimizar perdas de informação acerca de fenómenos importantes na análise do comportamento do sistema TES.

4.4.1 Temperatura no interior do sistema TES

De acordo com o verificado pela maioria dos autores, conforme descrito na Secção 2.4, o critério de finalização de cada ensaio assenta na distribuição da temperatura no interior do sistema TES. Grande parte destes autores considerou o ensaio concluído quando a temperatura dos sensores posicionados verticalmente ao longo do sistema TES fosse muito próxima da temperatura pretendida.



(a) Evolução da temperatura interior do sistema TES durante o processo de carregamento



(b) Evolução da temperatura interior do sistema TES durante o processo de descarga

Figura 4.3: Diferença de 0,5°C entre todos os sensores do sistema TES

Deste modo, foram realizados dois ensaios para avaliar a viabilidade deste critério, assumindo uma diferença máxima de $0,5^{\circ}\text{C}$ entre todos os sensores como limite, de forma a considerar o erro de medição associado a estes. A distribuição da temperatura no interior do sistema TES, para ambos os ensaios, está apresentada na Figura 4.3.

Observando a Figura 4.3a, é possível verificar um comportamento diferenciado no sensor "T_02", que demonstrou maior dificuldade em atingir a temperatura final de carregamento em comparação com os restantes sensores. Este fenómeno resulta do posicionamento da saída do circuito primário no sistema TES. Conforme mencionado na Secção 2.3.2, diversos autores recomendam que as entradas e saídas das fontes de energia nos sistemas TES estejam localizadas o mais próximo possível da base e do topo, a fim de minimizar o fenómeno "*dead zone*".

Neste contexto, o sensor "T_02", estando localizado abaixo da saída do circuito primário do sistema TES, é afetado por este fenómeno, onde a transferência de calor ocorre predominantemente por difusão com a camada acima da saída do circuito primário, necessitando, portanto, de mais tempo para alcançar a temperatura final de carregamento.

No entanto, e como é possível observar na Figura 4.3b, durante o processo de descarga, todos os sensores colocados no sistema TES alcançaram a temperatura de descarga final. Contudo, em situações mais críticas, é possível que este fenómeno também ocorra, uma vez que o sensor "T_98" está posicionado acima da saída do circuito secundário.

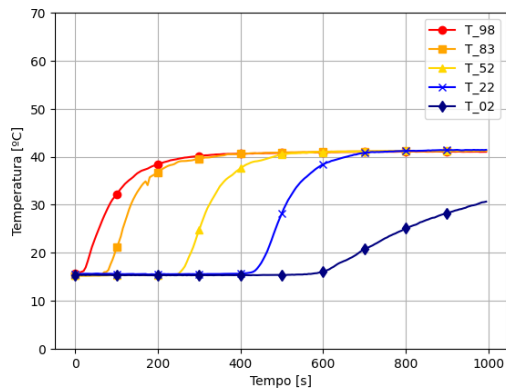
Deste modo, concluiu-se que este critério não é o mais adequado para os ensaios a realizar, uma vez que este não tem em conta o fenómeno "*dead zone*".

4.4.2 Temperatura à entrada e saída do sistema TES

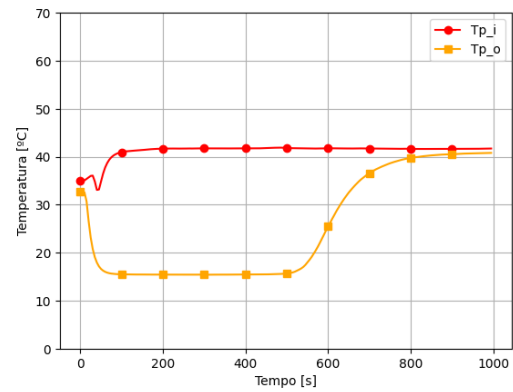
Uma vez que o fenómeno "*dead zone*" não pode ser evitado sem se alterar a estrutura do depósito e a configuração das entradas e saídas dos circuitos primário e secundário, foi necessário estabelecer um critério de finalização que se adequasse a estas condições.

Assim, surgiu a ideia de utilizar como critério de finalização a mesma diferença de $0,5^{\circ}\text{C}$, só que, ao invés de ser entre todas as sondas instaladas no sistema TES, ser apenas entre as sondas que registam as temperaturas à entrada e saída dos circuitos no sistema TES. Para avaliar a viabilidade deste critério, foram realizados novamente dois testes, cujos resultados estão apresentados na Figura 4.4.

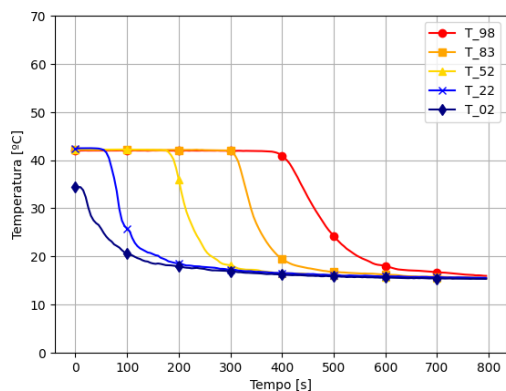
De acordo com os resultados obtidos, concluiu-se que este critério é mais adequado para os ensaios pretendidos, pois reduz substancialmente a duração dos mesmos sem comprometer significativamente a qualidade dos dados obtidos. Dado que o fenómeno "*dead zone*" não pode ser controlado e estará sempre presente em todos os ensaios, a sua influência é minimizada. Assim, o carregamento e a descarga são realizados de forma otimizada dentro das possibilidades do sistema TES em estudo.



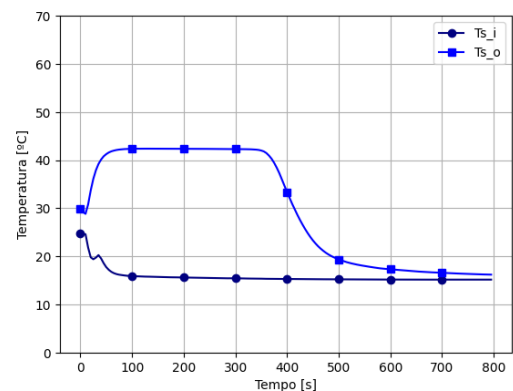
(a) Evolução da temperatura interior do sistema TES durante o processo de carregamento



(b) Evolução da temperatura de entrada/saída no sistema TES durante o processo de carregamento



(c) Evolução da temperatura interior do sistema TES durante o processo de descarga



(d) Evolução da temperatura de entrada/saída no sistema TES durante o processo de descarga

Figura 4.4: Diferença de 0,5°C entre a temperatura de entrada e saída do sistema TES

4.5 Análise de dados

Para analisar os dados obtidos em cada ensaio, foi necessário transferi-los do *data logger* para o computador, através do seu *software*, que os disponibiliza em formato *.csv*.

Para processar estes dados, foram desenvolvido diversos programas em *Python*. Estes, foram criados para ler e processar os dados de forma a obter representações gráficas que permitiram a análise dos mesmos, como já tem vindo a ser mostrado ao longo das secções anteriores.

Neste âmbito foram desenvolvidos seis programas, todos eles disponíveis no Anexo D. Cada um destes programas tem uma finalidade diferente:

- *analise_carregamento.ipynb*: Lê e processa os dados individualmente para o ensaio de carregamento pretendido;
- *analise_descarga.ipynb*: Lê e processa os dados individualmente para o ensaio de descarga pretendido;

- *analise_carregamento_graficos.ipynb*: Lê e processa os resultados obtidos para todos os ensaios de carregamento;
- *analise_descarga_graficos.ipynb*: Lê e processa os resultados obtidos para todos os ensaios de carregamento.

No Apêndice B, detalham-se alguns aspectos do processo de análise de dados.

4.5.1 Nomenclatura dos dados de cada ensaio

Para permitir a organização e leitura dos dados no programa desenvolvido, cada um dos arquivos *.csv* transferidos do *data logger*, após um pré-tratamento, seguiu uma nomenclatura específica, de acordo com a tipologia de cada ensaio. A nomenclatura adotada foi a seguinte: P_XX_TT_II_VV.

Onde:

- P = C ou D, consoante o respetivo processo de carregamento ou descarga;
- XX = 02, 04 ou 07, consoante o respetivo caudal de 2 l/min, 4,5 l/min ou 7 l/min utilizado no ensaio;
- TT = 15, 40, 50 ou 60, consoante a temperatura de entrada da água para esse ensaio correspondesse a 15°C, 40°C, 50°C ou 60°C, respetivamente;
- II = 15, 40, 50 ou 60, consoante a temperatura inicial da água no sistema TES para esse ensaio correspondesse a 15°C, 40°C, 50°C ou 60°C, respetivamente;
- VV = 01, 02, ..., consoante a versão do ensaio destes parâmetros.

5 Análise de Resultados

Neste capítulo, será feita a análise dos dados obtidos nos ensaios delineados. O objetivo é identificar padrões e tendências relevantes para interpretar os resultados, avaliar a eficácia da metodologia empregue e investigar o desempenho da plataforma experimental e do sistema TES em estudo.

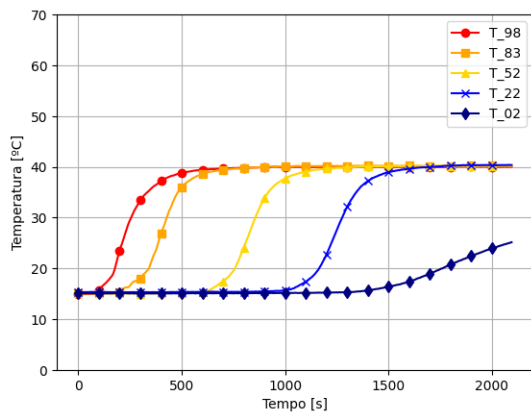
No Anexo E, os resultados são apresentados de forma distribuída, de acordo com as variações dos parâmetros operacionais.

5.1 Análise da distribuição de temperatura

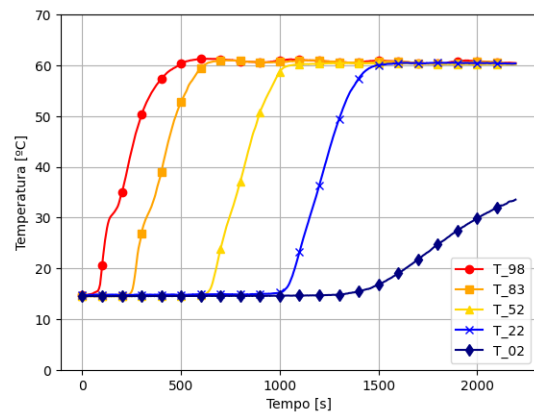
A análise da distribuição de temperatura no interior do sistema TES, permite observar efeitos significativos resultantes das variações nos parâmetros operacionais durante os processos de carregamento e descarga.

5.1.1 Processo de carregamento

Como é possível observar na Figura 5.1, o aumento da temperatura de carregamento revelou ser um fator limitante para a capacidade do sensor T_02 atingir a temperatura final desejada. Este comportamento remete para a presença do fenômeno "dead zone", que cria uma área estagnada na região onde o sensor realiza as medições, dificultando, assim, a acomodação da energia térmica fornecida nesta zona do sistema TES.



(a) Caudal = 2 l/min
Temperatura de carregamento = 40°C

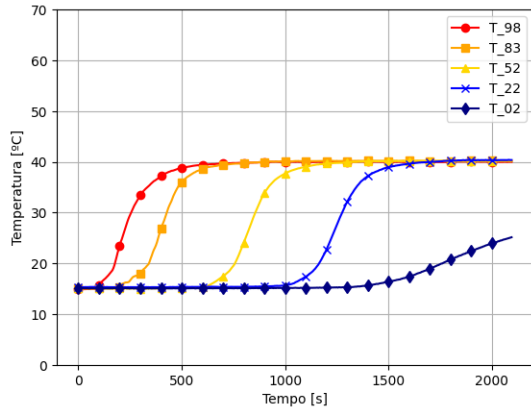


(b) Caudal = 2 l/min
Temperatura de carregamento = 60°C

Figura 5.1: Efeito da temperatura de carregamento na distribuição de temperatura do sistema TES

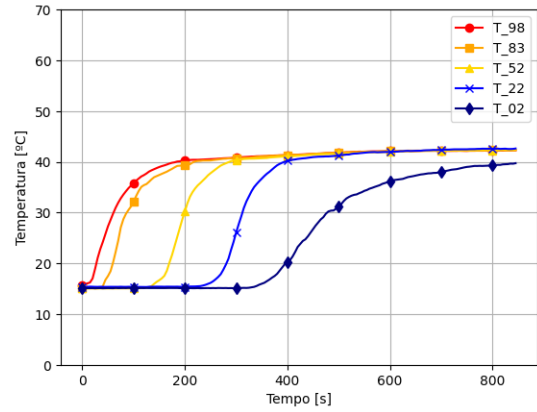
No entanto, como é possível observar na Figura 5.2, o aumento do caudal, fez com que o sensor T_02 atingisse temperaturas mais próximas da temperatura de

carregamento desejada. Este efeito deve-se ao facto de um caudal mais elevado promover uma transferência de calor mais eficiente, resultando na redução do tempo de ensaio e na diminuição da formação de zonas de baixa circulação ou estagnação térmica, mitigando assim o fenómeno "dead zone".



(a) Caudal = 2 l/min

Temperatura de carregamento = 40°C



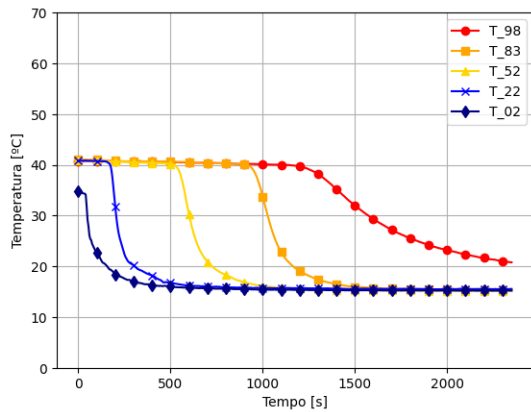
(b) Caudal = 7 l/min

Temperatura de carregamento = 40°C

Figura 5.2: Efeito do caudal de carregamento na distribuição de temperatura do sistema TES

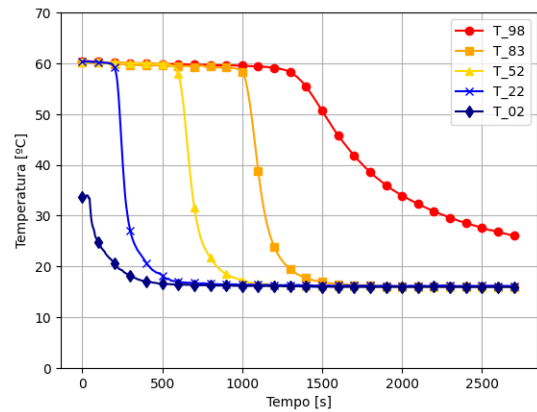
5.1.2 Processo de descarga

Como se pode observar na Figura 5.3, o sensor T_02 iniciou a medição a partir de uma temperatura distinta em relação aos outros sensores, devido ao fenómeno "dead zone", anteriormente verificado durante o processo de carregamento. Este fenómeno, revelou-se também um fator limitante para a capacidade do sensor T_98 atingir a temperatura final pretendida.



(a) Caudal = 2 l/min

Temperatura de carregamento = 40°C



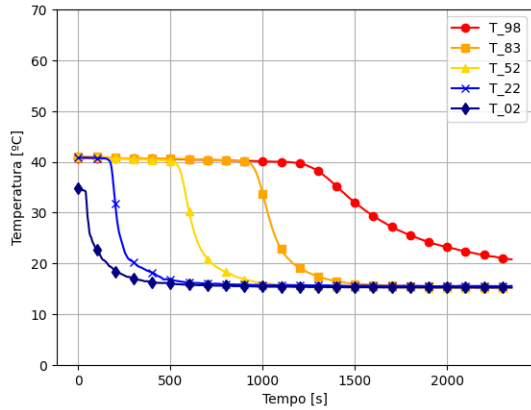
(b) Caudal = 2 l/min

Temperatura de carregamento = 60°C

Figura 5.3: Efeito da temperatura inicial de descarga na distribuição de temperatura do sistema TES

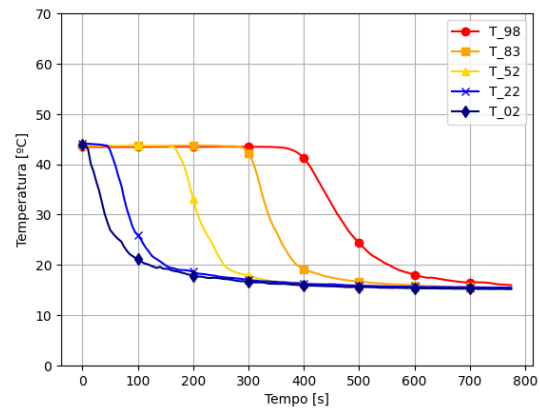
No entanto, como é evidenciado na Figura 5.4, o aumento do caudal resultou na aproximação das temperaturas registadas pelo sensor T_98 às temperaturas finais

de descarga. Assim como foi observado durante o processo de carregamento, o aumento do caudal atenuou o impacto do fenómeno "dead zone". Além disso, o processo de descarga foi realizado num tempo consideravelmente mais curto.



(a) Caudal = 2 l/min

Temperatura de carregamento = 40°C



(b) Caudal = 7 l/min

Temperatura de carregamento = 40°C

Figura 5.4: Efeito do caudal de descarga na distribuição de temperatura do sistema TES

5.2 Análise dos indicadores de performance

O estudo do desempenho do sistema TES, foi baseado na análise dos indicadores de performance identificados na Secção 2.2 da revisão bibliográfica, com o objetivo de selecionar os mais relevantes para o estudo. Entre os diversos indicadores apresentados, dois foram considerados irrelevantes para este estudo específico: o número de estratificação (Str) e o número de Froude (Fr).

O número de estratificação poderia ser relevante, mas o sistema TES utilizado é um termoacumulador comercial pré-fabricado, o que limitou a distribuição dos sensores de temperatura. A dificuldade em posicionar os sensores de forma uniforme compromete o cálculo deste indicador, resultando em dificuldades na obtenção de um valor representativo e fiável.

O número de Froude foi excluído porque é utilizado para avaliar a geometria de entrada do FT nos sistemas TES. Dado que a geometria de entrada deste depósito é simples e direta, não se considerou necessário ter em conta os efeitos deste indicador neste contexto.

Assim, os indicadores de performance escolhidos para avaliar o desempenho do sistema TES foram os seguintes:

- Energia térmica (Secção 2.2.1.1);
- Eficiência dos processos de carregamento e descarga (Secção 2.2.1.2);
- *Capacity ratio* (Secção 2.2.1.3);
- Análise exergética e entrópica (Secção 2.2.2.1);
- Espessura da termoclina (Secção 2.2.3.1);

- MIX (Secção 2.2.3.2);
- Ri , Pe , Re_{in} e Re_{TES} (Secções 2.2.4.1, 2.2.4.2 e 2.2.4.3)

É importante salientar que a influência das operações cíclicas de carregamento e descarga não foi considerada relevante para este estudo, dado que os ensaios foram realizados de forma isolada, pelo que os processos serão analisados de forma independente.

Os indicadores de performance foram inicialmente avaliados de uma perspectiva geral, observando-se a sua evolução ao longo dos ensaios e o comportamento das curvas. Posteriormente, foi analisada a influência que os parâmetros operacionais exerceram sobre o indicador de performance em questão. Cada ensaio foi identificado de acordo com a nomenclatura adotada na Secção 4.5.

5.2.1 Energia térmica

Para avaliar a quantidade de energia térmica armazenada no interior do sistema TES em cada instante de cada processo, recorreu-se à Equação 5.1.

$$E_{TES} = \sum_{j=1}^N \rho_j \cdot c_{p_j} \cdot (T_j - T_{ini}) \cdot V_j \quad (5.1)$$

Em que:

- N : Número total de camada térmicas do sistema TES
- ρ_j : Massa volúmica da camada térmica j ;
- c_{p_j} : Calor específico da camada térmica j ;
- T_j : Temperatura da camada térmica j ;
- T_{ini} : Temperatura inicial no interior do sistema TES. Para o processo de carregamento e descarga, a temperatura inicial foi assumida conforme a leitura do sensor T_02 e T_98, respetivamente, no instante inicial;
- V_j : Volume da camada térmica j .

Deste modo, conforme consta na Figura 5.5, foi possível representar graficamente a evolução da energia armazenada no interior do sistema TES ao longo de cada processo.

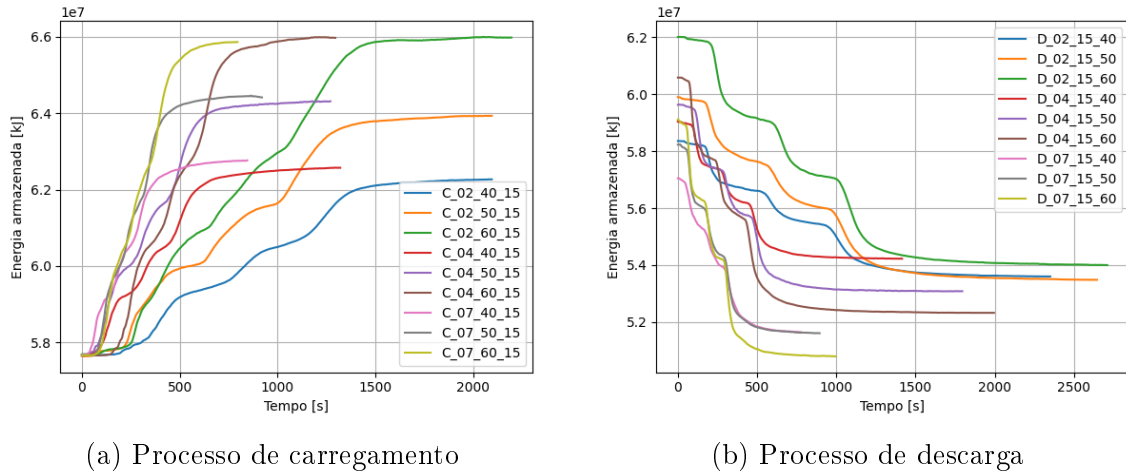


Figura 5.5: Evolução da energia térmica armazenada no interior do sistema TES

Com isto, foi possível obter a quantidade de energia térmica que foi armazenada durante o processo de carregamento, e a quantidade de energia térmica disponibilizada durante o processo de descarga. Para isso, recorreu-se às Equações 5.2 e 5.3.

$$E_{armazenada} = E_{fin} - E_{ini} \quad (5.2)$$

$$E_{disponibilizada} = E_{ini} - E_{fin} \quad (5.3)$$

Em que:

- E_{fin} : E_{TES} no instante final;
- E_{ini} : E_{TES} no instante inicial.

As tabelas 5.1 e 5.2, contêm os valores finais de energia térmica armazenada e disponibilizada, respetivamente, em cada um dos ensaios realizados.

Tabela 5.1: Energia térmica armazenada

Ensaio	Energia térmica [kJ]
C_02_40_15	4607
C_02_50_15	6289
C_02_60_15	8293
C_04_40_15	4902
C_04_50_15	6633
C_04_60_15	8321
C_07_40_15	5103
C_07_50_15	6757
C_07_60_15	8200

Tabela 5.2: Energia térmica consumida

Ensaio	Energia térmica [kJ]
D_02_15_40	4207
D_02_15_50	5677
D_02_15_60	7085
D_04_15_40	4256
D_04_15_50	5790
D_04_15_60	7307
D_07_15_40	4777
D_07_15_50	5856
D_07_15_60	7356

A energia térmica armazenada num sistema TES, está diretamente relacionada com a temperatura de carregamento, sendo que um aumento desta, resulta geralmente numa maior quantidade de energia armazenada. Isto, deve-se ao facto de

que o calor específico da água, aumenta com a temperatura, permitindo ao sistema armazenar uma quantidade superior de energia térmica.

Por outro lado, a energia térmica que um sistema TES é capaz de disponibilizar, está diretamente relacionada com a temperatura inicial do processo de descarga, sendo que um aumento desta, resulta geralmente numa maior quantidade de energia fornecida para consumo.

Os ensaios realizados a uma temperatura de 60°C revelaram, de forma consistente, uma maior quantidade de energia armazenada e disponibilizada.

Por outro lado, o aumento do caudal durante o processo de carregamento mostrou-se vantajoso nos ensaios efetuados a 40°C e 50°C, resultando num ligeiro aumento da quantidade de energia térmica armazenada. Contudo, a 60°C, embora o aumento do caudal tenha tido um efeito semelhante, este não foi tão acentuado como nas restantes temperaturas.

No processo de descarga, o aumento do caudal não exerceu um impacto tão expressivo como no processo de carregamento. Verificou-se apenas uma subida considerável da quantidade de energia fornecida entre os ensaios realizados a 40°C, para caudais de 4,5 l/min e 7 l/min.

5.2.2 Eficiência dos processos de carregamento e descarga

A avaliação da eficiência do processo de carregamento e descarga do sistema TES foi realizada com base na evolução do balanço energético no interior do sistema TES, em relação à quantidade de energia introduzida no sistema e à energia armazenada no início do processo, respetivamente. Para tal, recorreu-se às Equações 5.4 e 5.5.

$$\epsilon_{ch} = \frac{\dot{m}_{med} \int_0^i (c_p(i)T_{in}(i) - c_p(i)T_{out}(i)) di}{\dot{m}_{med} \int_0^i (c_p(i)T_{in}(i) - c_p T_{ini}) di} \quad (5.4)$$

$$\epsilon_{dis} = \frac{\dot{m}_{med} \int_0^i (c_p(i)T_{out}(i) - c_p(i)T_{in}(i)) di}{\dot{m}_{med} \cdot c_p \cdot T_{ini}} \quad (5.5)$$

Em que:

- $\dot{m}_{med}$: Caudal mássico médio ao longo do ensaio;
- $c_p(i)$: Calor específico no instante i ;
- $T_{in}(i)$: Temperatura à entrada do sistema TES. Registada pelos sensores Tp_i e Ts_i, para os processos de carregamento e descarga, respetivamente;
- $T_{out}(i)$: Temperatura à saída do sistema TES. Registada pelos sensores Tp_o e Ts_o, para os processos de carregamento e descarga, respetivamente;
- T_{ini} : Temperatura inicial no interior do sistema TES. Assumido o valor registado pelos sensores T_02 e T_98, no início de cada processo de carregamento e descarga, respetivamente.

Deste modo, tornou-se possível, representar graficamente a evolução da eficiência dos processos de carregamento e descarga, conforme ilustrado na Figura 5.6.

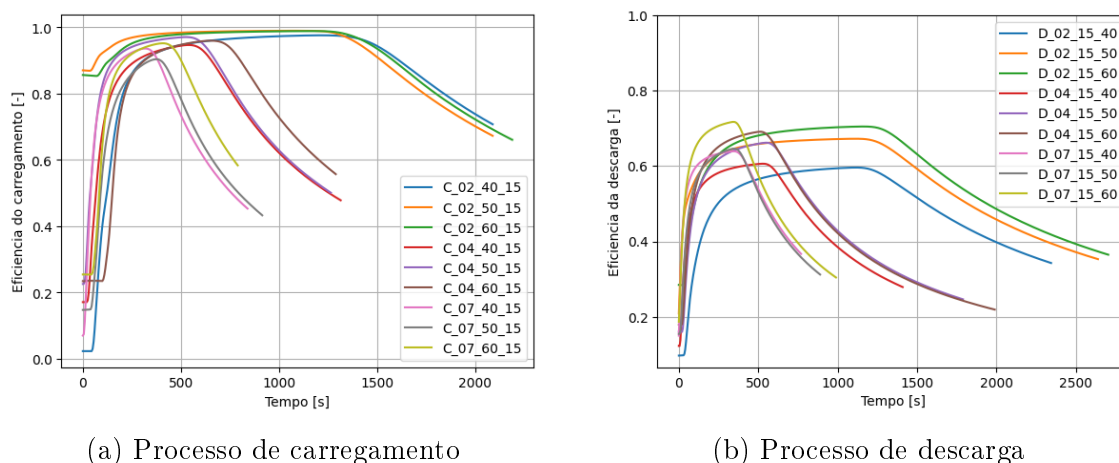


Figura 5.6: Evolução da eficiência dos processo de carregamento e descarga

As tabelas 5.3 e 5.4, contém os valores dos picos de eficiência do processo de carregamento e descarga, respetivamente, para cada um dos ensaios realizados.

Tabela 5.3: Picos de eficiência do processo de carregamento

Ensaio	Eficiência
C_02_40_15	0.98
C_02_50_15	0.99
C_02_60_15	0.99
C_04_40_15	0.95
C_04_50_15	0.97
C_04_60_15	0.96
C_07_40_15	0.94
C_07_50_15	0.90
C_07_60_15	0.95

Tabela 5.4: Picos de eficiência do processo de descarga

Ensaio	Eficiência
D_02_15_40	0.60
D_02_15_50	0.67
D_02_15_60	0.71
D_04_15_40	0.61
D_04_15_50	0.66
D_04_15_60	0.69
D_07_15_40	0.64
D_07_15_50	0.65
D_07_15_60	0.72

De um modo geral, observa-se que os processos de carregamento apresentaram uma eficiência substancialmente superior em comparação com os processos de descarga.

Em ambos os casos, a curva de eficiência assemelha-se a uma parábola invertida, indicando que, nos momentos iniciais de cada processo, a eficiência tende a aumentar até atingir o seu ponto máximo, ligeiramente após ter decorrido metade do ensaio. A partir deste ponto, inicia-se o decréscimo da curva.

Observa-se também que, quanto menor for o caudal utilizado, mais tempo a curva de eficiência se mantém próxima do seu pico. Por exemplo, com um caudal de 7 l/min, a curva permanece perto do seu pico por um período consideravelmente mais curto em comparação com os ensaios realizados com 2 l/min.

No processo de carregamento, o caudal de 2 l/min demonstrou, de forma consistente, um pico de eficiência mais elevado. À medida que o caudal aumenta para 4,5 l/min e 7 l/min, verifica-se uma ligeira diminuição no valor máximo da eficiência.

Por outro lado, a temperatura não exerceu um efeito relevante sobre este indicador de performance. No entanto, regista-se uma diminuição acentuada no pico de

eficiência nos ensaios realizados a 50°C, especialmente entre os caudais de 4,5 l/min e 7 l/min.

Relativamente ao processo de descarga, o aumento do caudal não causou variações significativas no pico de eficiência. Contudo, o aumento da temperatura, para um determinado caudal, teve um efeito mais significativo, sendo que os ensaios realizados a 60°C demonstraram, de forma consistente, picos de eficiência superiores aos obtidos a 40°C e 50°C.

5.2.3 *Capacity ratio*

O *Capacity ratio*, mede a relação entre a quantidade de energia armazenada no interior do sistema TES num dado instante, em função da sua capacidade máxima de armazenamento.

Desta forma, para se obter a evolução deste indicador de performance, ao longo dos processos de carregamento e descarga, recorreu-se às Equações 5.6 e 5.7.

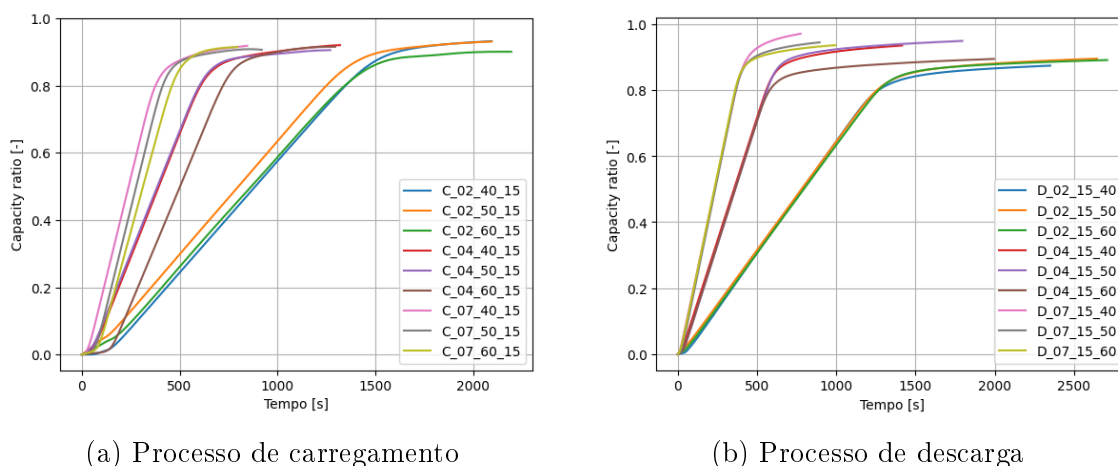
$$\sigma_{ch} = \frac{\dot{m}_{med} \int_0^i ((\rho(i)c_p(i)T_{in}(i)) - (\rho(i)c_p(i)T_{out}(i))) di}{V_{TES} \cdot ((\rho c_p T_{max}) - (\rho c_p T_{min}))} \quad (5.6)$$

$$\sigma_{dis} = \frac{\dot{m}_{med} \int_0^i ((\rho(i)c_p(i)T_{in}(i)) - (\rho(i)c_p(i)T_{out}(i))) di}{V_{TES} \cdot ((\rho c_p T_{max}) - (\rho c_p T_{min}))} \quad (5.7)$$

Em que:

- $\dot{m}_{med}$: Caudal mássico médio;
- $\rho(i)$: Massa volúmica no instante i ;
- $c_p(i)$: Calor específico no instante i ;
- $T_{in}(i)$: Temperatura à entrada do sistema TES. Registada pelos sensores Tp_i e Ts_i, para os processos de carregamento e descarga, respetivamente;
- $T_{out}(i)$: Temperatura à saída do sistema TES. Registada pelos sensores Tp_o e Ts_o, para os processos de carregamento e descarga, respetivamente;
- V_{TES} : Volume do sistema TES;
- T_{max} : Temperatura máxima. Assumida como o valor máximo registado pelo sensor Tp_i e Ts_o, para os processos de carregamento e descarga, respetivamente.
- T_{min} : Temperatura mínima. Assumida como o valor mínimo registado pelo sensor Tp_o e Ts_i, para os processos de carregamento e descarga, respetivamente.

Com isto, foi possível traçar os gráficos ilustrados na Figura 5.7, que representam a evolução do *Capacity ratio* ao longo dos processos de carregamento e descarga.

Figura 5.7: Evolução do *Capacity ratio*

As tabelas 5.5 e 5.6, representam o valor final do *Capacity ratio* dos processos de carregamento e descarga, respetivamente, para cada um dos ensaios realizados.

Tabela 5.5: Valor final do *Capacity ratio* no processo de carregamento

Ensaio	<i>Capacity ratio</i>
C_02_40_15	0.93
C_02_50_15	0.93
C_02_60_15	0.90
C_04_40_15	0.92
C_04_50_15	0.91
C_04_60_15	0.92
C_07_40_15	0.92
C_07_50_15	0.91
C_07_60_15	0.91

Tabela 5.6: Valor final do *Capacity ratio* no processo de descarga

Ensaio	<i>Capacity ratio</i>
D_02_15_40	0.87
D_02_15_50	0.89
D_02_15_60	0.89
D_04_15_40	0.93
D_04_15_50	0.95
D_04_15_60	0.89
D_07_15_40	0.97
D_07_15_50	0.94
D_07_15_60	0.94

De uma forma geral, pode-se observar que em nenhum dos ensaios realizados, tanto no processo de carregamento como no de descarga, o *Capacity ratio* atingiu o valor de 1. Assim, conclui-se que em nenhum dos ensaios foi armazenada ou libertada a quantidade máxima de energia que o sistema TES é capaz de armazenar.

Observa-se também que, em ambos os processos, para os ensaios com um caudal de 2 l/min, a curva do *Capacity ratio* atinge um valor muito próximo do seu valor final muito antes do final do ensaio. Já nos ensaios com caudais de 4,5 l/min e 7 l/min, valores próximos do valor final são alcançados mais perto do final do ensaio.

No processo de carregamento, o efeito da variação da temperatura e do caudal foi praticamente irrelevante, uma vez que os valores finais do *Capacity ratio* se mantiveram sempre dentro do intervalo de 0,9 a 0,93. No entanto, é importante sublinhar que, com um caudal de 7 l/min, o ensaio decorreu num tempo significativamente mais curto em relação aos ensaios com caudais de 4,5 l/min e 2 l/min, obtendo-se um valor final do *Capacity ratio* semelhante.

No processo de descarga, o efeito da variação das condições operacionais foi mais evidente em comparação com o processo de carregamento. Os ensaios realizados com

um caudal de 7 l/min alcançaram um valor final do *Capacity ratio* ligeiramente superior quando comparados com os ensaios a 2 l/min. Em comparação com os ensaios realizados a 4,5 l/min, os ensaios com um caudal de 7 l/min só apresentam valores inferiores para uma temperatura de 50°C, sendo que, nas restantes temperaturas, os valores finais foram superiores.

Adicionalmente, destaca-se que, para uma temperatura de 40°C, o aumento do caudal se revelou bastante benéfico para o valor final do *Capacity ratio*, fazendo-o passar de 0,87 para 0,97.

5.2.4 Análise exergética e entrópica

Rendimento exergético

O rendimento exergético é um indicador de desempenho que relaciona a evolução experimental com a evolução ideal da exergia durante os processos de carregamento e descarga. A exergia define o potencial máximo de trabalho útil que pode ser realizado em comparação com um estado de referência. No caso dos processos de carregamento e descarga, o estado de referência corresponde à condição inicial do sistema. O potencial de trabalho é calculado à medida que a energia é adicionada ou retirada do sistema TES, permitindo uma avaliação do desempenho qualitativo do processo em comparação com o cenário ideal, onde toda a energia seria aproveitada para realizar trabalho útil.

Deste modo, através das Equações 5.8 e 5.9, obteu-se a evolução experimental e ideal da exergia, respetivamente, para o processo de carregamento.

$$\zeta_{experimental} = c_{p_j} \cdot \sum_{j=1}^N \left[m_j \cdot (T_{i,j} - T_0) + m_j \cdot T_0 \cdot \ln \frac{T_0}{T_{i,j}} \right] \quad (5.8)$$

$$\zeta_{ideal} = c_{p_{med}} \cdot m_{TES} \cdot (T_{max} - T_{min}) + m_{TES} \cdot T_{min} \cdot \ln \frac{T_{min}}{T_{max}} \quad (5.9)$$

Em que:

- c_{p_j} : Calor específico da camada térmica j ;
- N : Número total de camadas térmicas do sistema TES;
- m_j : Massa da camada térmica j ;
- $T_{i,j}$: Temperatura da camada térmica j no instante i ;
- T_0 : Temperatura inicial do sistema TES. Assumida a temperatura registada pelo sensor T_02 e T_98 no instante inicial do processo de carregamento e descarga, respetivamente;
- $c_{p_{med}}$: Calor específico médio entre a temperatura máxima e mínima registada no interior do sistema TES;
- m_{TES} : Massa do sistema TES;
- T_{max} : Temperatura máxima registada no interior do sistema TES;
- T_{min} : Temperatura mínima registada no interior do sistema TES;

Assim, foi possível representar graficamente a evolução do rendimento exergético ao longo dos processos de carregamento e descarga, conforme consta na Figura 5.8.

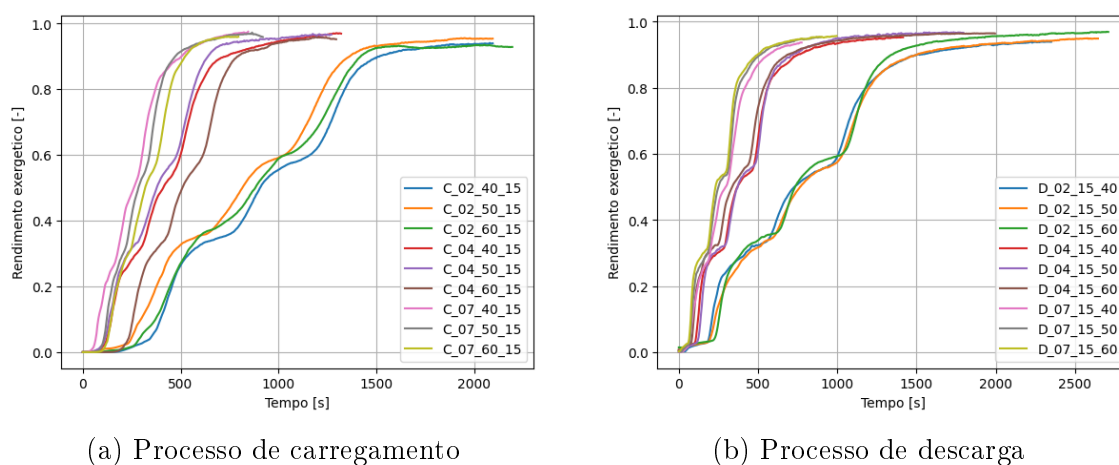


Figura 5.8: Evolução do rendimento exergético

Nas Tabelas 5.7 e 5.8, estão representados os valores do pico de rendimento exergético, para os processos de carregamento e descarga, respetivamente.

Tabela 5.7: Picos de rendimento exergético para o processo de carregamento

Ensaio	Rendimento Exergético
C_02_40_15	0.94
C_02_50_15	0.96
C_02_60_15	0.93
C_04_40_15	0.97
C_04_50_15	0.97
C_04_60_15	0.96
C_07_40_15	0.97
C_07_50_15	0.97
C_07_60_15	0.96

Tabela 5.8: Picos de rendimento exergético para o processo de descarga

Ensaio	Rendimento exergético
D_02_15_40	0.94
D_02_15_50	0.95
D_02_15_60	0.97
D_04_15_40	0.95
D_04_15_50	0.97
D_04_15_60	0.96
D_07_15_40	0.94
D_07_15_50	0.95
D_07_15_60	0.96

Globalmente, em nenhum dos ensaios, tanto nos processos de carregamento como nos de descarga, se verificou um rendimento igual a 1. Como seria expectável, registaram-se perdas de energia em ambos os processos, o que limitou a capacidade de aproveitar toda a energia disponível.

O comportamento da curva de rendimento exergético manteve-se bastante consistente em todos os ensaios. À medida que os ensaios avançam, o sistema aproxima-se progressivamente do estado final utilizado para o cálculo da exergia ideal, o que leva a um aumento do rendimento exergético, sendo o seu pico atingido no instante final de cada ensaio.

Os valores de rendimento obtidos nos ensaios de carregamento variaram entre 0,93 e 0,97, enquanto nos ensaios de descarga situaram-se entre 0,94 e 0,97. Estes resultados revelam que a influência dos parâmetros operacionais neste aspeto é praticamente insignificante, e que os valores alcançados são excelentes, comprovando um desempenho bastante satisfatório.

Nos ensaios realizados com um caudal de 7 l/min, observou-se que a duração do ensaio foi mais curta, com a curva de rendimento a aumentar de forma constante até atingir o seu valor máximo perto do final do ensaio. Já para os caudais de 2 l/min e 4,5 l/min, o pico de rendimento foi alcançado significativamente antes do final do ensaio, sendo visível uma extensa zona onde o potencial de aumento do rendimento exergético é praticamente inexistente.

Rendimento entrópico

O rendimento entrópico relaciona a evolução da entropia entre os estados de um sistema TES totalmente misturado (s_0), perfeitamente estratificado (s_{strat}) e experimental (s_{exp}). Assim, a evolução da entropia para cada um desses estados durante os processos de carregamento e descarga foi obtida através das Equações 5.10, 5.11 e 5.12, respetivamente.

$$s_0 = c_{p_{med}} \cdot \ln \frac{T_{min}}{T_{med}} \quad (5.10)$$

$$s_{strat} = c_{p_{min}} \cdot \ln \frac{T_{min}}{T_{min}} \quad (5.11)$$

$$s_{exp} = \sum_{j=1}^N c_{p_j} \cdot \ln \frac{T_{0,j}}{T_{i,j}} \quad (5.12)$$

Em que:

- $c_{p_{med}}$: Calor específico médio, em função de todas as temperaturas medidas naquele instante no interior do sistema TES;
- T_{min} : Temperatura mínima no interior do sistema TES;
- T_{med} : Temperatura média, em função de todas as temperaturas medidas naquele instante no interior do sistema TES;
- $c_{p_{min}}$: Calor específico à temperatura mínima medida no interior do sistema TES;
- N : Número total de camadas térmicas do sistema TES;
- c_{p_j} : Calor específico da camada térmica j ;
- $T_{0,j}$: Temperatura inicial da camada térmica j ;
- $T_{i,j}$: Temperatura da camada térmica j no instante i .

Com isto, foi possível calcular o rendimento entrópico, através da Equação 5.13. Com base nesta equação, um valor de rendimento mais próximo de 1 reflete um comportamento mais próximo de um sistema perfeitamente estratificado, enquanto valores mais próximos de 0 indicam um comportamento mais semelhante ao de um sistema completamente misturado.

$$\eta_s = \frac{s_0 - s_{exp}}{s_0 - s_{strat}} \quad (5.13)$$

Assim, traçou-se os graficos ilustrados na Figura 5.9, que representam a evolução do rendimento entrópico ao longo dos processos de carregamento e descarga.

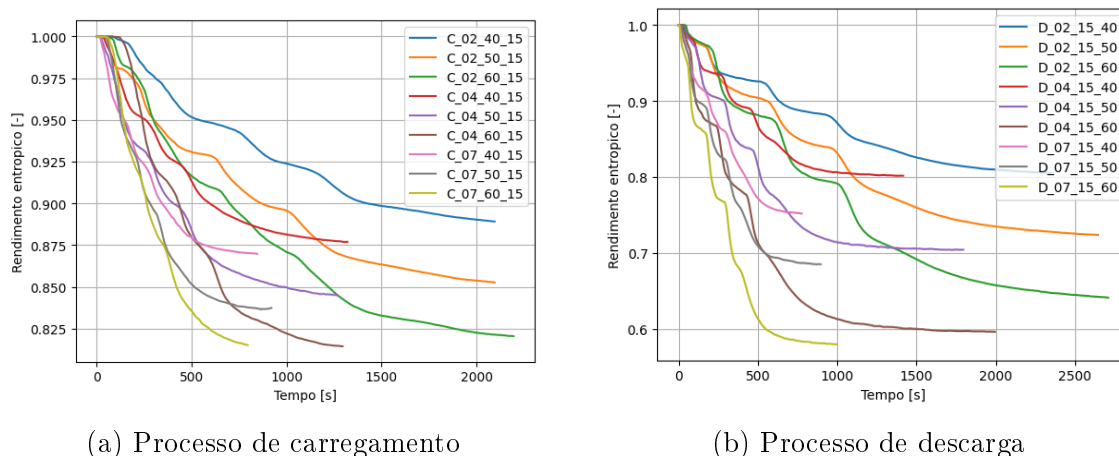


Figura 5.9: Evolução do rendimento entrópico

Nas tabelas 5.9 e 5.10, constam os valores mínimos do rendimento entrópico para cada ensaio, durante os processos de carregamento e descarga.

Tabela 5.9: Valor mínimo de rendimento entrópico para o processo de carregamento

Ensaio	Rendimento Entrópico
C_02_40_15	0.89
C_02_50_15	0.85
C_02_60_15	0.82
C_04_40_15	0.88
C_04_50_15	0.84
C_04_60_15	0.81
C_07_40_15	0.87
C_07_50_15	0.84
C_07_60_15	0.82

Tabela 5.10: Valor mínimo de rendimento entrópico para o processo de descarga

Ensaio	Rendimento entrópico
D_02_15_40	0.81
D_02_15_50	0.72
D_02_15_60	0.64
D_04_15_40	0.80
D_04_15_50	0.70
D_04_15_60	0.60
D_07_15_40	0.75
D_07_15_50	0.68
D_07_15_60	0.58

De um modo geral, observa-se que o rendimento entrópico é superior durante os processos de carregamento em comparação com os de descarga.

Verifica-se que a tendência da curva de rendimento é de descida constante até ao final dos ensaios de carregamento e dos ensaios de descarga realizados com um caudal de 2 l/min, atingindo o seu valor mínimo nesse instante.

Nos ensaios de descarga com caudais de 4,5 l/min e 7 l/min, a descida torna-se mais acentuada até atingir um valor próximo do mínimo, após mais de metade do tempo de ensaio ter decorrido. Esse momento coincide com o valor final registado em cada ensaio, o que resulta numa zona extensa onde o rendimento entrópico se mantém praticamente inalterado.

Relativamente aos parâmetros operacionais, conclui-se que o caudal tem um efeito negligenciável no rendimento entrópico durante o processo de carregamento.

Contudo, o aumento da temperatura, em ensaios realizados com o mesmo caudal, resulta numa ligeira diminuição do valor mínimo e final registado.

Durante o processo de descarga, verifica-se que o aumento simultâneo da temperatura e do caudal conduz a uma diminuição progressiva do valor mínimo e final registado ao longo do processo.

5.2.5 Espessura da termoclina

A evolução da espessura da termoclina durante os processos de carregamento e descarga foi determinada através de um ajuste de curva. Para tal, foi necessário, primeiramente, adimensionalizar as temperaturas registadas pelos sensores ($\theta_{i,j}$), bem como as alturas às quais estes estavam posicionados ao longo do eixo vertical do sistema TES (Z_j).

Dividiram-se todos os ensaios em cinquenta intervalos, calculando-se as referidas variáveis para cada um dos instantes resultantes dessa divisão, utilizando as Equações 5.14 e 5.15, respetivamente.

$$\theta_{i,j} = \frac{T_{i,j} - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \quad (5.14)$$

$$Z_j = \frac{y_j}{H} \quad (5.15)$$

Em que:

- $T_{i,j}$: Temperatura da camada térmica j no instante i ;
- T_{min} : Temperatura mínima registada no interior do sistema TES;
- T_{max} : Temperatura máxima registada no interior do sistema TES;
- y_j : Altura do sensor de medição de temperatura da camada térmica j ;
- H : Altura do sistema TES.

O ajuste de curva foi realizado com recurso ao *software OriginLab*, onde foram introduzidas as listas de valores obtidos para cada instante. De seguida, aplicou-se o ajuste de curva sigmoidal, descrito na Equação 5.16.

$$\theta(Z_j, Z_c, S) = \theta_{min} + \frac{\theta_{max} - \theta_{min}}{1 + \exp(-S \cdot (Z_j - Z_c))} \quad (5.16)$$

Em que:

- θ_{min} e θ_{max} : Temperatura adimensional mínima e máxima, respetivamente;
- S : Variância da curva de temperatura da função sigmoidal;
- Z_j : Posição adimensional do ponto de medição de temperatura;
- Z_c : Posição adimensional do centro da termoclina;

Para cada instante, obteve-se uma nova lista com os valores ótimos da distribuição sigmoidal da temperatura adimensional no interior do sistema TES, em função da altura adimensional do sistema TES.

A espessura da termoclina, foi então calculada com base nesta distribuição, através da Equação 5.17. Assumiu-se, conforme referido na Secção 2.2.3.1 da revisão bibliográfica, que a termoclina se situa entre 15% abaixo do valor máximo e 15% acima do valor mínimo da temperatura adimensional num dado instante.

$$e_{termoclina} = y_{T_{85}} - y_{T_{15}} \quad (5.17)$$

Em que:

- $y_{T_{85}}$: Coordenada vertical onde a temperatura adimensional é 85% superior a θ_{min} ;
- $y_{T_{15}}$: Coordenada vertical onde a temperatura adimensional é 15% superior a θ_{min} .

Desta forma, obteve-se a espessura da termoclina para cinquenta instantes de cada um dos processos, e representou-se graficamente a sua evolução. Optou-se por representar os ensaios em função de um determinado caudal e de uma determinada temperatura, conforme ilustrado nas Figuras 5.12 e 5.10, para o processo de carregamento, respetivamente, e nas Figuras 5.13 e 5.11, para o processo de descarga, respetivamente. Assim, facilita-se a análise da evolução da espessura da termoclina face à variação dos parâmetros operacionais.

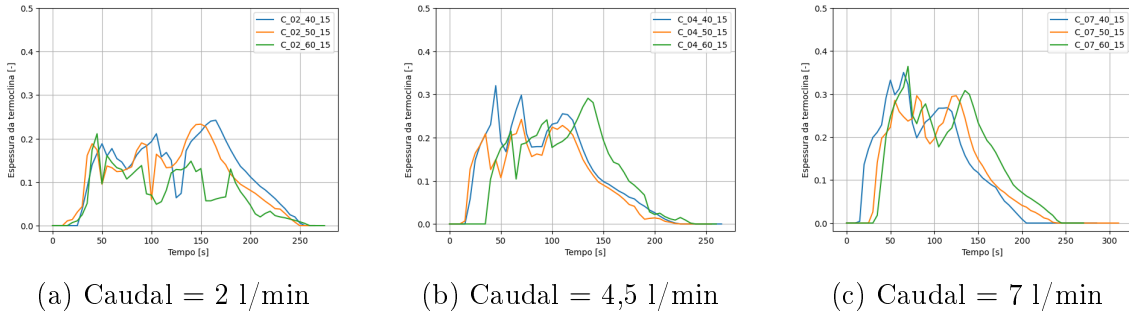


Figura 5.10: Influência da temperatura na espessura da termoclina durante o processo de carregamento

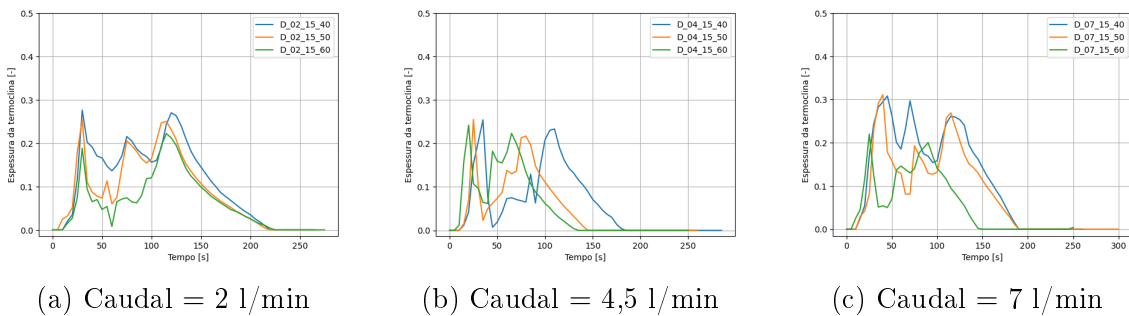


Figura 5.11: Influência da temperatura na espessura da termoclina durante o processo de descarga

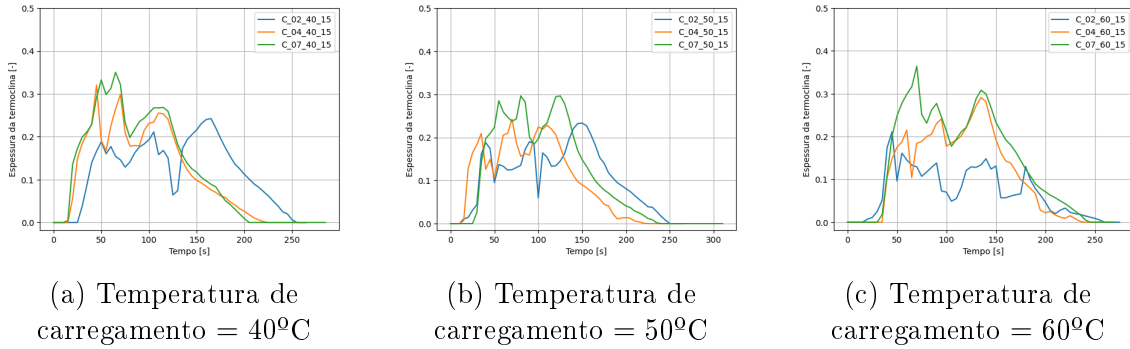


Figura 5.12: Influência do caudal na espessura da termoclina durante o processo de carregamento

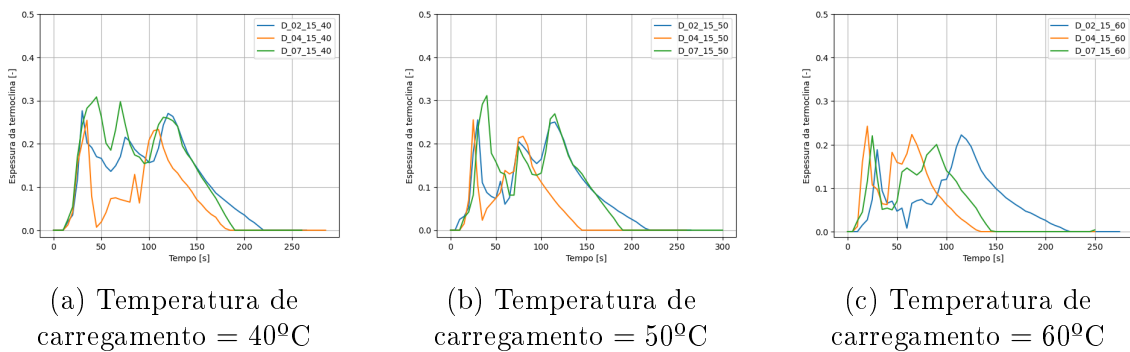


Figura 5.13: Influência do caudal na espessura da termoclina durante o processo de descarga

No geral, verificou-se uma variação expressiva da evolução da espessura da termoclina ao longo dos processos de carregamento e descarga. Esta variação deve-se, em parte, à quantidade de pontos considerados na análise, já que o *software* utilizado não permite um ajuste de curva com um número superior de pontos. Além disso, o tamanho dos volumes de controlo exerce uma influência negativa, pois, quanto maiores forem, mais difícil se torna capturar a localização exata da termoclina num dado instante. Isso pode resultar em omissões momentâneas da termoclina, que reaparece à medida que o tempo avança, originando as variações observadas.

Observou-se que o aumento do caudal, durante o processo de carregamento, provoca um ligeiro aumento na espessura da termoclina. Em contrapartida, a influência da variação da temperatura de carregamento mostrou-se praticamente desprezável no contexto em que foi avaliada a sua evolução.

O mesmo comportamento foi constatado no processo de descarga, onde se verificou que tanto a variação do caudal quanto da temperatura não resultaram em alterações significativas na espessura da termoclina.

5.2.6 Número MIX

O número MIX relaciona a evolução do momento de energia entre os estados de um sistema TES totalmente misturado (M_{mixed}), perfeitamente estratificado (M_{strat}) e experimental (M_{exp}). Assim a evolução do momento de energia para cada um destes estados do sistema TES, durante o processo de carregamento e descarga, foi obtida através das Equações 5.18, 5.19 e 5.20.

$$M_{mixed} = \frac{H}{2} \cdot T_{med} \cdot \rho_{med} \cdot c_{p_{med}} \cdot V_{TES} \quad (5.18)$$

$$M_{strat} = \left(\frac{y_{cold}}{2} \cdot T_{cold} \cdot \rho_{cold} \cdot c_{p_{cold}} \cdot V_{cold} \right) + \left(\frac{y_{hot}}{2} \cdot T_{hot} \cdot \rho_{hot} \cdot c_{p_{hot}} \cdot V_{hot} \right) \cdot \frac{1}{2} \quad (5.19)$$

$$M_{exp} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j \cdot \rho_j \cdot c_{p_j} \cdot T_j \cdot V_j \quad (5.20)$$

Em que:

- H : Altura do sistema TES;
- T_{med} : Temperatura média, em função de todas as temperaturas medidas naquele instante no interior do sistema TES;
- ρ_{med} : Massa volúmica média, em função de todas as temperaturas medidas naquele instante no interior do sistema TES;
- $c_{p_{med}}$: Calor específico médio, em função de todas as temperaturas medidas naquele instante no interior do sistema TES;
- $y_{cold/hot}$: Centro de massa da camada térmica fria/quente;
- $T_{cold/hot}$: Temperatura da camada térmica fria/quente;
- $\rho_{cold/hot}$: Massa volúmica da camada térmica fria/quente;
- $c_{p_{cold/hot}}$: Calor específico da camada térmica fria/quente;
- $V_{cold/hot}$: Volume da camada térmica fria/quente;
- N : Número total de camada térmicas do sistema TES;
- y_j : Centro de massa da camada térmica j ;
- ρ : Massa volúmica da camada térmica j ;
- c_{p_j} : Calor específico da camada térmica j ;
- T_j : Temperatura da camada térmica j ;
- V_j : Volume da camada térmica j .

Com isto, foi possível calcular o número MIX, através da Equação 5.21. Com base nesta equação, um valor do número MIX mais próximo de 0 reflete um comportamento que se assemelha mais a um sistema perfeitamente estratificado, enquanto valores mais próximos de 1 indicam um comportamento mais parecido ao de um sistema completamente misturado.

$$MIX = \frac{M_{strat} - M_{exp}}{M_{strat} - M_{mixed}} \quad (5.21)$$

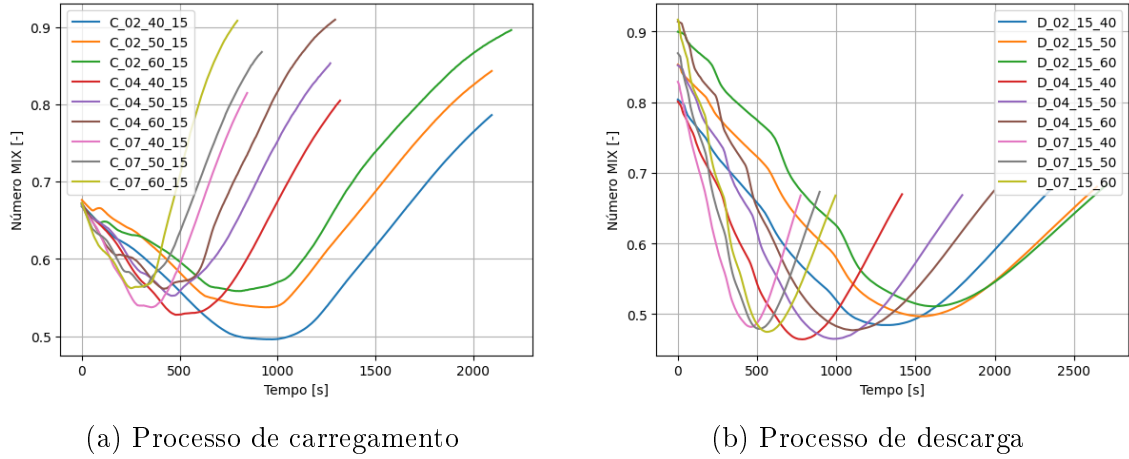


Figura 5.14: Evolução do número MIX

Assim, obteve-se a representação gráfica da evolução do número MIX, representada na Figura 5.14, durante os processos de carregamento e descarga.

Globalmente, verifica-se que o comportamento da curva do número MIX é semelhante tanto nos processos de carregamento como de descarga, assemelhando-se a uma parábola. Em todos os ensaios, a curva diminui até atingir um ponto mínimo, momento a partir do qual rapidamente inverte a tendência, iniciando uma subida até ao final do ensaio.

Este fenómeno pode indicar que o comportamento inicial do sistema TES durante este processo tende a mitigar a mistura, mas, perto do decorrer de metade do ensaio, começa a haver mistura das camadas térmicas no interior do sistema TES.

As variáveis operacionais também influenciam o comportamento do número MIX ao longo dos ensaios. Nos processos de carregamento e descarga, verificou-se que, para um determinado caudal, a temperatura de 40°C apresentou consistentemente um melhor desempenho, evidenciado por um valor mínimo e um valor final do número MIX inferiores aos observados nas restantes temperaturas.

De forma semelhante, durante o processo de carregamento, para uma determinada temperatura, o caudal de 2 l/min demonstrou consistentemente um desempenho superior em comparação com os ensaios realizados com caudais de 4,5 l/min e 7 l/min. No processo de descarga, observou-se que, para uma determinada temperatura, o caudal de 4,5 l/min apresentou consistentemente um desempenho superior face aos ensaios realizados com caudais de 2 l/min e 7 l/min.

5.2.7 Número de Richardson

A evolução do número de Richardson (Ri), ao longo dos processos de carregamento e descarga, é obtida através da Equação 5.22.

$$Ri = \frac{g \cdot (T_{98} - T_{02}) \cdot \beta_{med} \cdot H}{v_s^2}, \quad v_s = \frac{\dot{v}_{med}}{A_{inlet}} \quad (5.22)$$

Em que:

- g : Aceleração da gravidade;
- T_{98} : Temperatura registada pelo sensor T_98;

- T_{02} : Temperatura registada pelo sensor T_02;
- β_{med} : Coeficiente de expansão volumétrico médio, em função de T_{98} e T_{02} ;
- H : Altura do sistema TES;
- v_s : Velocidade característica de entrada da água no sistema TES;
- $\dot{v}_{med}$: Caudal volúmico médio ao longo do ensaio;
- A_{inlet} : Área da entrada de água no sistema TES.

Deste modo, tornou-se possível a representação gráfica da evolução do Ri durante os processos de carregamento e descarga, conforme apresentado na Figura 5.15

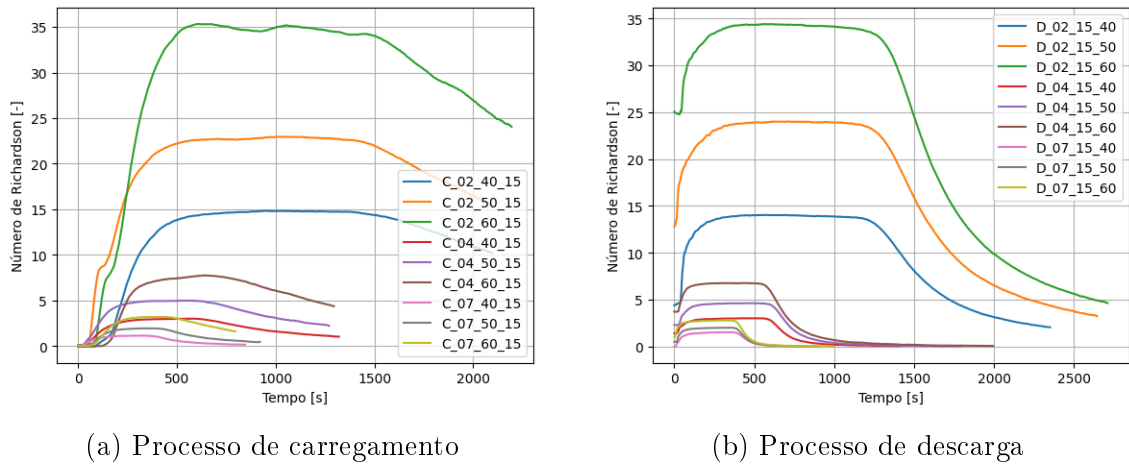


Figura 5.15: Evolução do número de Richardson

No geral, o comportamento da curva do Ri apresenta semelhanças em ambos os processos. Como se pode observar, no início de cada processo, a tendência da curva do Ri é de aumento progressivo até atingir um valor máximo, onde se mantém por algum tempo, diminuindo gradualmente perto do final do ensaio.

Sendo o Ri a razão entre a energia potencial necessária para misturar o fluido e a energia cinética turbulenta disponível para essa mistura, conclui-se que, nos momentos finais dos ensaios, a energia potencial diminui consideravelmente em relação à energia cinética turbulenta, favorecendo assim uma maior mistura das camadas térmicas e promovendo a destruição da estratificação térmica.

Adicionalmente, os parâmetros operacionais têm uma influência significativa na evolução do Ri ao longo dos processos de carregamento e descarga.

Em ambos os processos, verifica-se que um caudal de 2 l/min apresentou consistentemente um desempenho superior face aos restantes caudais. O mesmo se verifica para uma temperatura de 60°C, que favoreceu o aumento do Ri , atingindo valores de pico e finais maiores em comparação com os restantes ensaios. Por outro lado, a diminuição da temperatura e o aumento do caudal tiveram um impacto negativo na evolução do Ri durante os processos de carregamento e descarga.

A análise da evolução da espessura da termoclina em função do Ri , durante os processos de carregamento e descarga, fornece também informações cruciais sobre a dinâmica interna do sistema TES.

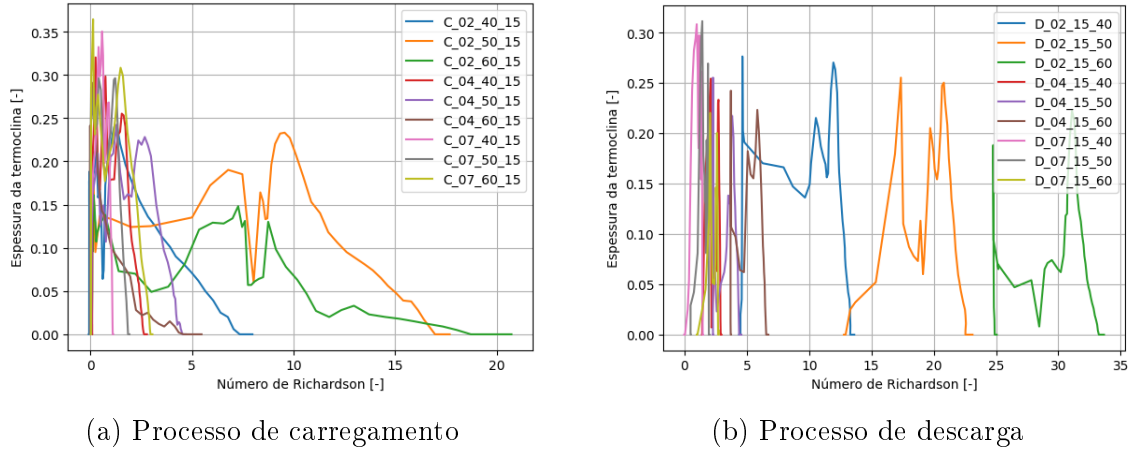


Figura 5.16: Relação entre o Ri e a espessura da termoclina

A análise da Figura 5.16a, demonstra que o aumento do Ri está associado a uma diminuição na espessura da termoclina, uma vez que um valor mais alto de Ri indica uma estratificação térmica mais estável, o que resulta numa maior resistência à mistura. Como consequência, a espessura da termoclina diminui, uma vez que a turbulência, responsável por essa mistura, é inibida devido à maior estabilidade térmica.

Na Figura 5.16b, verifica-se que, durante o processo de descarga, tal como foi observado no processo de carregamento, o aumento do Ri provoca uma ligeira redução na espessura da termoclina.

Contudo, é importante destacar que os ensaios realizados com um caudal de 2 l/min a temperaturas iniciais de descarga de 40°C e 50°C, constituem exceções a esta tendência, apresentando valores ligeiramente superiores aos observados em ensaios com um Ri menor. Contudo esta diferença foi considerada desprezável, uma vez que a sua magnitude é bastante reduzida.

5.2.8 Número de Péclet

A análise da evolução do Pe durante os processos de carregamento e descarga do sistema TES, foi calculada com base na Equação 5.23.

$$Pe = \frac{v_t \cdot H}{\alpha_{med}}, \quad \alpha_{med} = \frac{k_{med}}{\rho_{med} \cdot c_{p_{med}}}, \quad v_t = \frac{\dot{v}_{med}}{A_{TES}} \quad (5.23)$$

Em que:

- H : Altura do sistema TES;
- v_t : Velocidade característica da água no interior do sistema TES;
- α_{med} : Difusividade térmica média, em função de T_{98} e T_{02} ;
- k_{med} : Condutibilidade térmica média, em função de T_{98} e T_{02} ;
- ρ_{med} : Massa volúmica média, em função de T_{98} e T_{02} ;
- $c_{p_{med}}$: Calor específico médio, em função de T_{98} e T_{02} ;

- $\dot{v}_{med}$: Caudal volúmico médio ao longo do ensaio;
- A_{TES} : Área da base do sistema TES.

Com isto, procedeu-se à representação gráfica da evolução do Pe durante os processos de carregamento e descarga, conforme ilustrado na Figura 5.17,

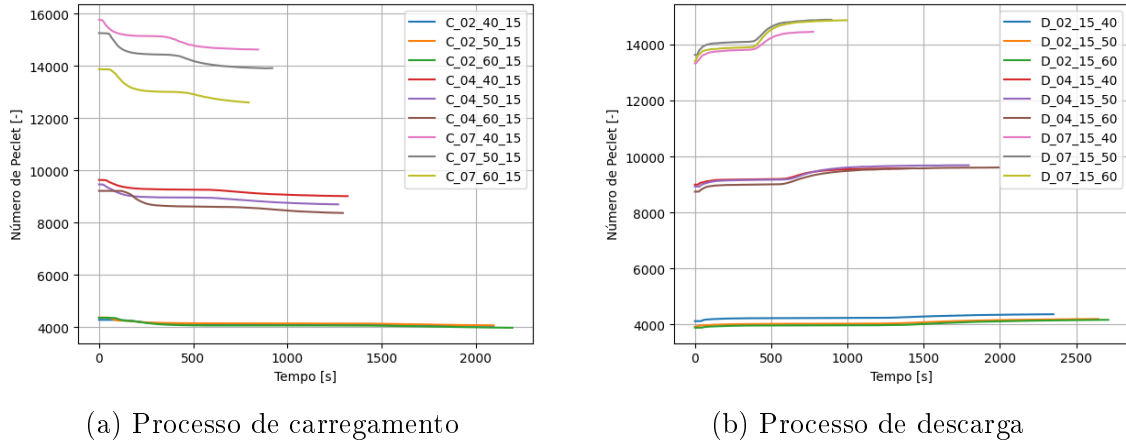


Figura 5.17: Evolução do número de Péclet

De um modo geral, verifica-se que o Pe se manteve praticamente constante ao longo de todos os ensaios, tanto no processo de carregamento como no de descarga.

A influência dos parâmetros operacionais manifesta-se principalmente no aumento do caudal. Com este aumento, em ambos os processos, a magnitude do Pe cresce de forma significativa, uma vez que o aumento da velocidade no interior do sistema TES favorece uma transferência de calor por convecção forçada, em detrimento da difusão.

Por outro lado, a magnitude do Pe , afeta também a magnitude do Ri , conforme demonstrado na Figura 5.18. Verifica-se que o aumento do Pe está associado a uma redução significativa do Ri . Esta relação pode ser interpretada como uma diminuição da importância da estratificação e da estabilidade térmica no interior do sistema TES, refletindo uma maior dominância do transporte convectivo.

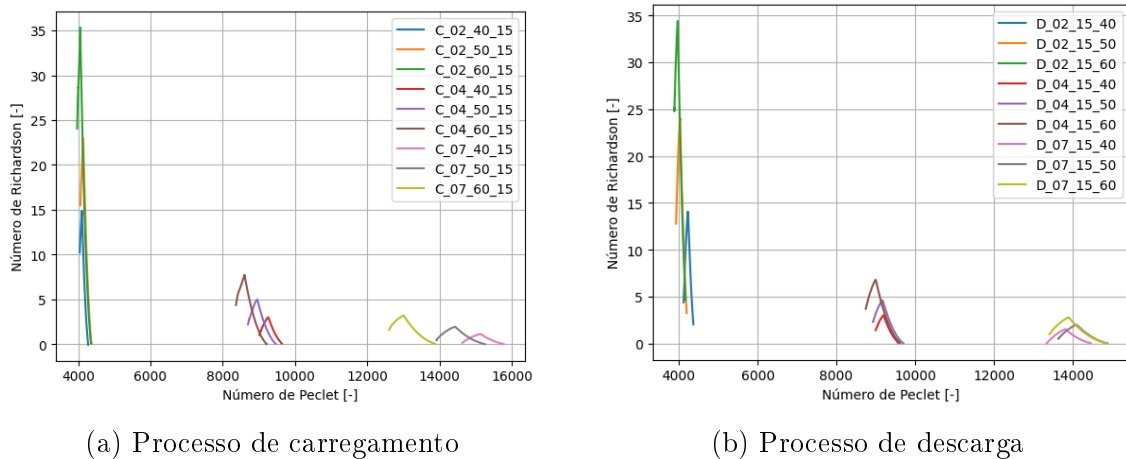


Figura 5.18: Relação entre o Ri e o Pe

Adicionalmente, a magnitude do Pe também influencia a espessura da termoclina, conforme mostrado na Figura 5.19. A análise da relação entre estes dois parâmetros demonstra que um aumento do Pe tende a resultar num aumento da espessura da termoclina. Contudo, durante o processo de descarga, foi observada uma ligeira redução na espessura da termoclina entre os ensaios realizados com caudais de 2 l/min e 4,5 l/min. Esta diminuição foi pouco expressiva, sendo, por isso, considerada como desprezável.

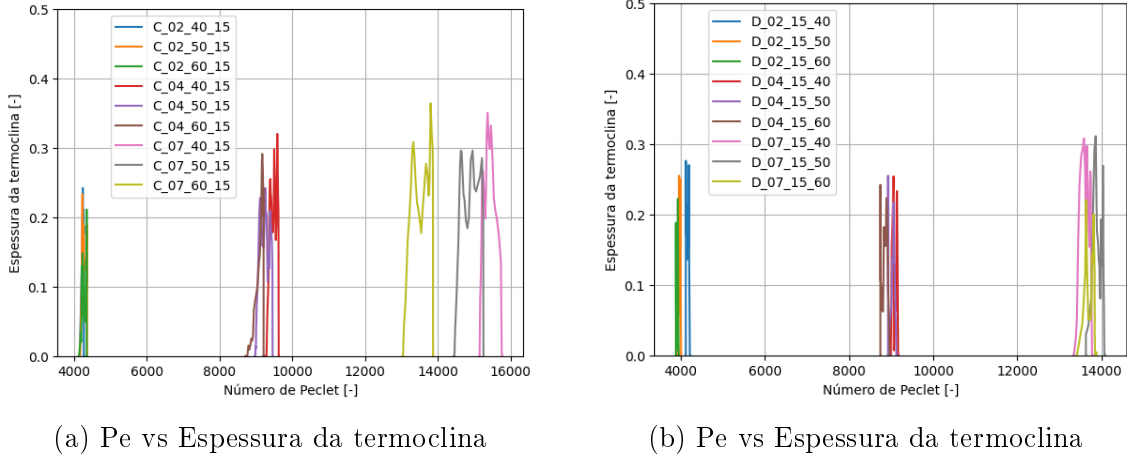


Figura 5.19: Relação entre o Pe e a Espessura da termoclina

Assim, a relação entre o Pe e a espessura da termoclina confirma as conclusões previamente estabelecidas sobre a correlação entre o Ri e o Pe . Constatou-se que, com o aumento do Pe , a espessura da termoclina também aumenta. De forma semelhante, observa-se um aumento na espessura da termoclina à medida que o Ri diminui, confirmando a relação inversa entre o Ri e o Pe , bem como a coerência da ligação entre estes três parâmetros.

5.2.9 Número de Reynolds

A análise da evolução do Re_{in} e do Re_{TES} durante os processos de carregamento e descarga do sistema TES, foi feita através da Equação 5.24.

$$Re_{in} = \frac{\rho_{in} \cdot v_s \cdot D_{inlet}}{\mu_{in}}, \quad Re_{TES} = \frac{\rho_{med} \cdot v_t \cdot D_{TES}}{\mu_{med}} \quad (5.24)$$

Em que:

- ρ_{in} : Massa volúmica da água que entra no sistema TES;
- v_s : Velocidade característica de entrada da água no sistema TES;
- D_{inlet} : Diâmetro do canal de entrada da água no sistema TES;
- μ_{in} : Viscosidade dinâmica da água que entra no sistema TES;
- ρ_{med} : Massa volúmica média, em função de todas as temperaturas medidas naquele instante no interior do sistema TES;
- v_t : Velocidade característica da água no interior do sistema TES;

- D_{inlet} : Diâmetro da base do sistema TES;
- μ_{med} : Viscosidade dinâmica média, em função de todas as temperaturas medidas naquele instante no interior do sistema TES;

Assim, foi obtida a representação gráfica da evolução do Re_{in} e do Re_{TES} , durante os processos de carregamento e descarga, conforme ilustrado nas Figuras 5.20 e 5.21, respetivamente.

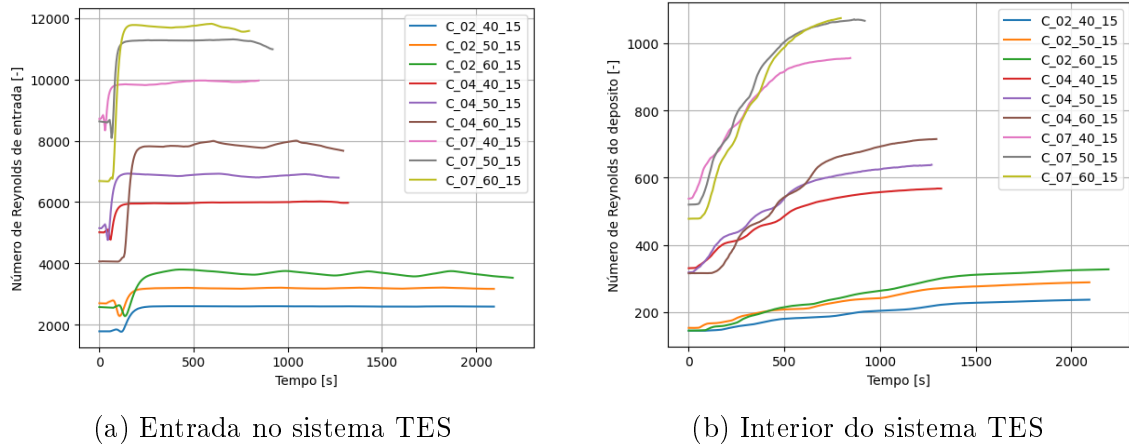


Figura 5.20: Evolução do número de Reynolds durante o processo de carregamento

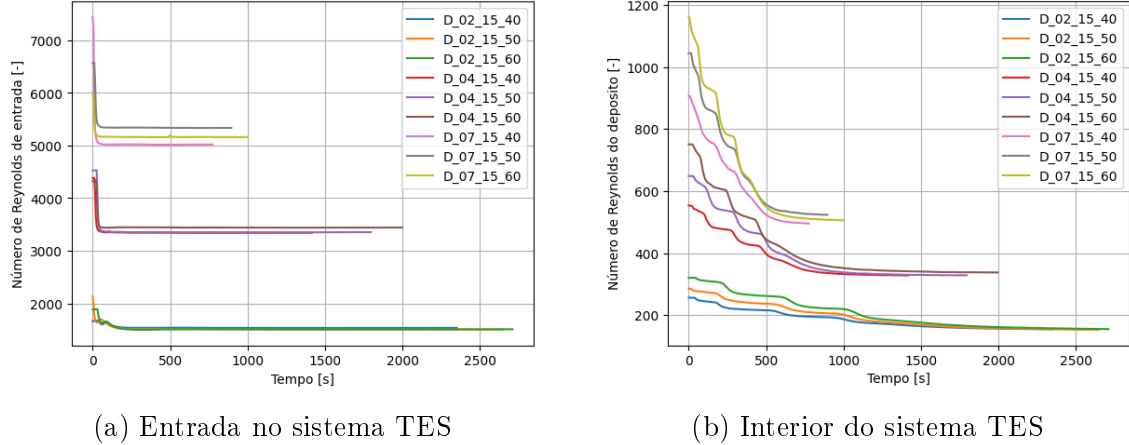


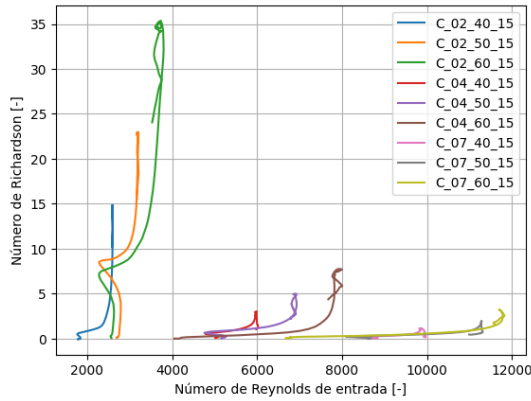
Figura 5.21: Evolução do número de Reynolds durante o processo de descarga

De forma geral, pode-se observar que o Re_{in} se mantém praticamente constante ao longo de todos os ensaios, após o aumento acentuado verificado nos instantes iniciais. Por outro lado, durante o processo de carregamento, o Re_{TES} tende a aumentar progressivamente devido à subida da temperatura, que reduz as forças viscosas. Pelo contrário, durante o processo de descarga, o Re_{TES} diminui, refletindo a queda de temperatura.

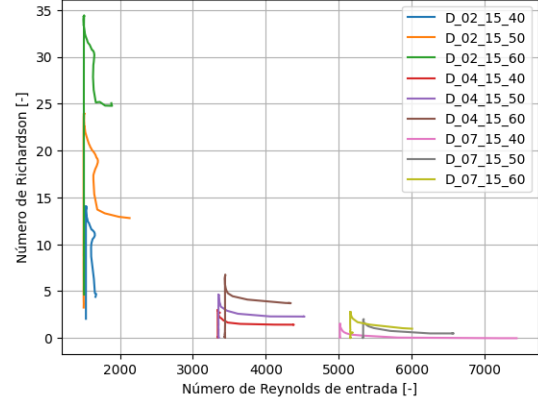
Relativamente aos parâmetros operacionais, constata-se que o caudal é o fator mais influente tanto para o Re_{in} como para o Re_{TES} . Em ambos os casos, o aumento do caudal provoca o aumento das forças de inércia, tanto à entrada como no interior do sistema TES, resultando no aumento dos dois parâmetros.

Análise de Resultados

Em ambos os processos, a variação da temperatura mostrou ter pouca influência sobre o Re_{in} e o Re_{TES} .



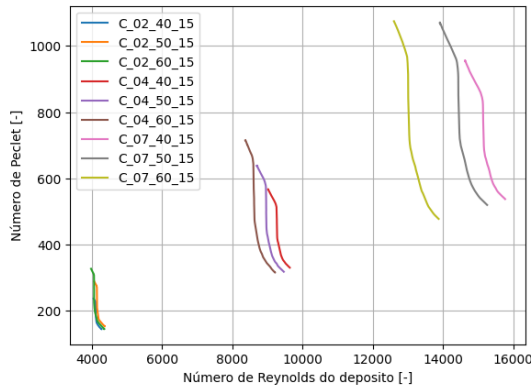
(a) Processo de carregamento



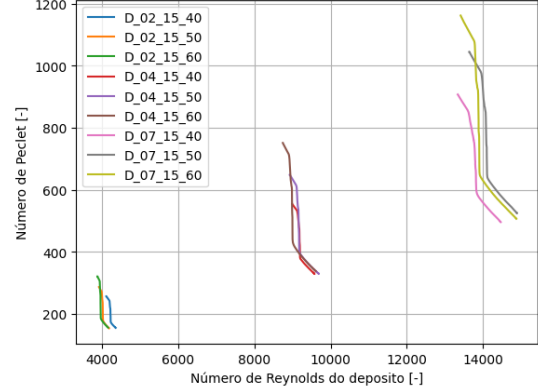
(b) Processo de descarga

Figura 5.22: Relação entre o Ri e o Re_{in}

Adicionalmente foi avaliada a influência do Re_{in} no Ri . Através da Figura 5.22, verifica-se que o aumento de Re_{in} provoca uma redução na magnitude do Ri em ambos os processos. O aumento de Re_{in} , associado a um escoamento mais turbulento, promove uma mistura mais eficaz e uma maior circulação da água no sistema TES. Como o Ri reflete a qualidade da estratificação térmica no sistema, esta relação inversa confirma a coerência entre a turbulência e a degradação da estratificação térmica.



(a) Processo de carregamento



(b) Processo de descarga

Figura 5.23: Relação entre o Pe e o Re_{TES}

Por fim, foi avaliada a correlação entre o Pe e o Re_{TES} . Como ilustrado na Figura 5.23, o aumento do Re_{TES} resultou num aumento significativo do valor do Pe em ambos os processos analisados. Este fenómeno deve-se ao aumento da turbulência, resultante de valores mais elevados do Re_{TES} , o que favorece uma transferência de calor por convecção em detrimento da difusão. Assim, o crescimento do Pe demonstra uma dominância crescente do transporte convectivo, confirmando a relação direta entre estes dois parâmetros.

5.2.10 Cenário global

A análise da influência dos indicadores de performance, num cenário global, permite perceber o impacto destes no desempenho geral do sistema TES. Para analisar essa influência, decidiu-se elaborar as Tabelas 5.11 e 5.12. Nestas, através de uma pontuação de 9 a 1, avaliou-se o desempenho dos indicadores de performance em cada ensaio realizado. Ao somar os pontos obtidos por cada ensaio, é possível obter uma avaliação global que permite identificar quais os parâmetros operacionais que proporcionaram um melhor desempenho do sistema TES, tendo em consideração os indicadores de performance avaliados.

Os critérios de atribuição de pontuação foram os seguintes:

- Energia térmica: Os ensaios com maior quantidade de energia armazenada e menor tempo de ensaio recebem maior pontuação;
- Eficiência do processo de carregamento: Os ensaios com maior pico de eficiência e que mantiveram valores mais próximos deste pico durante mais tempo recebem maior pontuação;
- *Capacity ratio*: Ensaios cujo valor final do *Capacity ratio* foi superior recebem maior pontuação;
- Rendimento exerético: Os ensaios realizados num tempo mais curto, recebem maior pontuação, dada a semelhança entre os valores de pico finais obtidos;
- Rendimento entrópico: Ensaios cujo valor final do rendimento entrópico foi superior recebem maior pontuação;
- Espessura da termoclina: A influência deste parâmetro foi minimizada, sendo atribuída a pontuação de 1 a todos os ensaios, devido aos resultados inconclusivos obtidos;
- Número MIX: Ensaios cujo valor final e o valor mínimo do número MIX foi mais baixo recebem maior pontuação;
- Ri : Ensaios com valores de Ri mais elevados ao longo de todo o processo recebem maior pontuação;
- Pe : Ensaios com valores de Pe mais baixos ao longo de todo o processo recebem maior pontuação;
- Re_{in} e Re_{TES} : Ensaios cujos valores de Re_{in} e Re_{TES} foram mais baixos ao longo de todo o processo recebem maior pontuação.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 5.11, verifica-se que, durante o processo de carregamento, o aumento do caudal e da temperatura revelou-se prejudicial para o desempenho do sistema TES. À medida que estes parâmetros aumentaram, observou-se uma diminuição geral nos indicadores de performance. Em contrapartida, caudais mais baixos apresentaram, de forma consistente, melhores resultados no desempenho dos indicadores de performance, especialmente quando associados a temperaturas de carregamento mais reduzidas.

Esta tendência ocorre principalmente porque, embora caudais mais elevados tenham apresentado um melhor desempenho nos indicadores que quantificam a energia térmica armazenada no sistema TES, os indicadores que avaliam qualitativamente o processo demonstraram ser claramente afetados negativamente pelo aumento do caudal. Além disso, o aumento da temperatura de carregamento intensificou ainda mais este efeito.

Por outro lado, de acordo com os resultados apresentados obtidos na Tabela 5.12, verifica-se que, durante o processo de descarga, a diminuição da temperatura e o aumento do caudal se revelaram condicionantes para o desempenho do sistema TES, uma vez que o desempenho global dos indicadores de performance foi inferior nestes casos. Assim, temperaturas mais elevadas e caudais mais baixos apresentaram, de forma consistente, melhores resultados em termos de desempenho dos indicadores de performance.

Em concordância com o que ocorreu durante o processo de carregamento, verifica-se que caudais mais elevados apresentam melhor desempenho nos indicadores de performance que quantificam a energia térmica fornecida para consumo durante o processo de descarga. No entanto, os indicadores que avaliam o processo qualitativamente evidenciam um desempenho inferior com o aumento do caudal. Contudo, ao contrário do que foi observado no processo de carregamento, durante o processo de descarga, o aumento da temperatura demonstrou um melhor desempenho, especialmente nos ensaios realizados com caudais mais baixos.

Tabela 5.11: Avaliação dos indicadores de performance em função dos parâmetros operacionais durante o processo de carregamento

Ensaio	E_{TES}	ϵ	σ	η_{ζ}	η_s	$e_{termoclima}$	MIX	Ri	Pe	Re_{in}	Re_{TES}	Soma
C_02_40_15	1	7	9	1	9	1	9	7	7	9	9	69
C_02_50_15	4	9	9	1	6	1	6	8	8	8	8	68
C_02_60_15	7	9	1	1	3	1	3	9	9	7	7	57
C_04_40_15	2	4	7	5	8	1	8	6	4	6	6	57
C_04_50_15	5	6	4	5	5	1	5	5	5	5	5	51
C_04_60_15	8	5	7	5	2	1	2	3	6	4	4	47
C_07_40_15	3	2	7	9	7	1	7	1	1	3	3	44
C_07_50_15	6	1	4	9	4	1	4	2	2	2	2	37
C_07_60_15	9	3	4	9	1	1	1	4	3	1	1	37

Tabela 5.12: Avaliação dos indicadores de performance em função dos parâmetros operacionais durante o processo de descarga

Ensaio	E_{TES}	ϵ	σ	η_{ζ}	η_s	$e_{termoclinia}$	MIX	R_i	Pe	Re_{in}	Re_{TES}	Soma
D_02_15_40	1	1	1	1	9	1	7	7	7	9	9	53
D_02_15_50	4	6	4	1	6	1	8	8	8	8	8	62
D_02_15_60	7	8	3	1	3	1	9	9	9	7	7	64
D_04_15_40	2	2	5	5	8	1	1	3	4	6	6	43
D_04_15_50	5	5	8	5	5	1	3	5	5	5	5	52
D_04_15_60	8	7	2	5	2	1	6	6	6	4	4	51
D_07_15_40	3	3	9	9	7	1	5	1	3	3	3	47
D_07_15_50	6	4	7	9	4	1	4	2	1	2	2	42
D_07_15_60	9	9	6	9	1	1	2	4	2	1	1	45

6 Conclusão

Neste capítulo, serão apresentadas as conclusões do estudo, começando com a avaliação do desempenho da plataforma experimental, seguida, da análise da performance do sistema TES, e culminando, nas sugestões de possíveis trabalhos futuros que poderão aprofundar e expandir os resultados obtidos.

6.1 Desempenho da plataforma experimental

O desempenho da plataforma experimental, de forma geral, revelou-se bastante satisfatório. No entanto, algumas alterações poderiam potencializar ainda mais o seu desempenho e garantir uma maior fiabilidade para ensaios mais exigentes.

6.1.1 Controlo da temperatura

O controlo da temperatura no circuito primário representou, sem dúvida, o maior desafio enfrentado ao longo deste estudo. Contudo, após várias modificações na plataforma experimental, foi possível alcançar o desempenho desejado.

Contudo, é importante sublinhar que este desempenho poderá ser comprometido em ensaios que exijam mais da plataforma experimental. Esta previsão é sustentada pelo desempenho do *chiller* presente na central energética do LAVAC, particularmente quando o objetivo é fornecer temperaturas mais baixas ao sistema TES. Nessas circunstâncias, torna-se necessário fornecer à VMT uma quantidade maior de água a uma temperatura significativamente inferior à que é fornecida pela caldeira, de forma a que a mistura resultante alcance as temperaturas desejadas. Foi durante estes ensaios, especialmente em condições de caudais mais elevados, que se verificou uma maior dificuldade por parte do *chiller* em manter um fornecimento constante de água à temperatura pretendida.

É igualmente crucial destacar que, apesar do DIP ter demonstrado uma inércia suficiente para controlar as variações de temperatura nos ensaios realizados, o seu desempenho poderá não ser equivalente em estudos futuros que envolvam sistemas TES com uma capacidade superior à do sistema TES analisado neste estudo. Assim, quando se avançar para essa etapa, será essencial avaliar se a inércia do DIP será adequada para assegurar o desempenho desejado.

Relativamente ao controlo no circuito secundário, tanto a BCR como o DIS demonstraram consistentemente um desempenho bastante satisfatório ao longo dos ensaios realizados.

6.1.2 Controlo do caudal

No caso do circuito primário, a utilização da VEHE por vezes não foi suficiente para assegurar o controlo preciso do caudal. Durante a realização dos ensaios, especialmente aqueles em que se utilizou um caudal reduzido, verificou-se que a VEHE não

conseguia, por si só, atingir o caudal pretendido. Para se alcançar o caudal desejado, foi necessário implementar uma estratégia adicional que envolveu o estrangulamento de algumas válvulas de seccionamento no circuito.

Esta necessidade de intervenção manual foi observada principalmente no circuito primário, indicando uma limitação na capacidade de regulação da VEHE neste contexto. Em contraste, no circuito secundário, a VEHE mostrou-se mais eficaz e suficiente para ajustar e manter os caudais necessários sem a necessidade de medidas adicionais.

6.2 Desempenho do sistema TES

O desempenho do sistema TES observado durante os ensaios realizados, apesar de bastante satisfatório, demonstrou que ainda existe algum potencial para melhorias. Assim, é imperativo prosseguir com o desenvolvimento e a melhoria contínua, com o objetivo de alcançar um desempenho superior próximos ensaios.

6.2.1 Indicadores de performance

Entre os diversos indicadores analisados, os baseados na primeira e na segunda lei da termodinâmica destacaram-se como os mais representativos do desempenho do sistema TES.

Adicionalmente, os indicadores relacionados com a estratificação térmica proporcionaram informações valiosas acerca da dinâmica interna do sistema TES. No entanto, a distribuição e o número de sensores de temperatura instalados ao longo do sistema resultaram em volumes de controlo excessivamente grandes para a análise pretendida, o que pode ocultar fenómenos e dinâmicas cruciais para a avaliação precisa do desempenho do sistema TES.

Neste contexto, o número de estratificação emergiu como um dos indicadores mais comprometidos, uma vez que a sua análise ficou condicionada pela disposição dos sensores de medição de temperatura instalados no sistema TES. A espessura da termoclina foi determinada através de um ajuste de curva, o que implica que, quanto maior o número de pontos utilizados nesse ajuste e menores forem os volumes de controlo, mais fiel será a aproximação à realidade observada. Consequentemente, o ajuste obtido pode não capturar de forma abrangente todos os fenómenos ocorridos ao longo dos processos. O mesmo raciocínio aplica-se ao MIX, que com volumes de controlo mais reduzidos e em maior número, poderia certamente fornecer uma descrição mais detalhada da estratificação térmica no interior do sistema TES.

Os indicadores baseados em parâmetros adimensionais são fundamentais para realizar uma análise teórica e qualitativa do desempenho do sistema TES. No entanto, sem dados representativos da estratificação térmica dentro do sistema, que sejam fiáveis, torna-se complexo avaliar a sua influência direta no desempenho do sistema TES. Por este motivo, esses indicadores foram analisados principalmente com base no seu fundamento teórico e comparados com o que foi observado em ensaios realizados por outros investigadores.

Desta forma, a análise realizada evidencia a necessidade de uma revisão aprofundada na metodologia adotada, com o intuito de melhorar a precisão de alguns indicadores de performance, em particular aqueles que estão relacionados com a estratificação térmica. A estratificação térmica, é um fator chave nos processos analisados, e por isso requer uma abordagem mais rigorosa e ajustada às variações

contextuais observadas ao longo do estudo. Assim, uma modificação metodológica que tenha isto em conta, contribuirá para um entendimento mais profundo das dinâmicas envolvidas.

6.2.2 Parâmetros operacionais

No geral, os indicadores de performance que avaliam qualitativamente os processos de carregamento e descarga apresentaram um desempenho inferior em ensaios com caudal e temperatura mais elevados, uma vez que estes promovem uma maior mistura no interior do sistema TES. Isto, por sua vez, resultou em maiores perdas de energia, algo que não se verificou nos ensaios onde a estratificação térmica se manteve mais estável. Assim, para estes ensaios, é essencial minimizar a mistura a fim de reduzir as perdas energéticas e maximizar o aproveitamento da energia térmica armazenada no sistema TES.

Processo de carregamento

A análise dos resultados permitiu compreender o impacto dos parâmetros operacionais sobre os indicadores de performance de forma individual, durante o processo de carregamento, validando em grande parte o conhecimento adquirido na revisão bibliográfica:

- *Chandra and Matuska* [43] concluíram que caudais mais baixos proporcionam um melhor desempenho do sistema TES durante o processo de carregamento, o que foi confirmado pelos ensaios realizados;
- *Wang et al.* [55] constataram que, com o aumento do caudal, o valor do MIX tende a aumentar e o Ri a diminuir, o que também foi confirmado nos ensaios realizados;
- *Majumdar et al.* [61] observaram que o aumento da temperatura de carregamento aumenta a eficiência do processo, o que não se verificou nos ensaios realizados, onde temperaturas mais baixas resultaram numa maior eficiência;
- *Sun et al.* [58] observaram que, com o aumento da temperatura de carregamento, ocorreu maior mistura das camadas térmicas no interior do sistema TES, o que também foi confirmado nos ensaios realizados, uma vez que temperaturas mais elevadas resultaram em pior desempenho do MIX e do Ri;

Desta forma, conforme verificado na Secção 5.2.10, conclui-se que os ensaios que apresentaram o melhor desempenho geral no processo de carregamento foram os realizados com um caudal de 2 l/min e temperaturas de carregamento de 40°C e 50°C.

Processo de descarga

A análise individual do impacto dos indicadores de performance durante o processo de descarga permitiu identificar os parâmetros operacionais que apresentaram um melhor desempenho, além de validar na totalidade o conhecimento adquirido na revisão bibliográfica:

- *Castell et al.* [28] observaram que um caudal mais elevado resulta num pico de eficiência semelhante ao dos caudais mais baixos, mas atingido mais rapidamente. Nos ensaios realizados, este fenómeno foi superado, pois o pico de eficiência foi alcançado não só mais cedo, como também com um valor superior ao dos caudais mais baixos.
- *Majumdar et al.* [61] verificaram que uma temperatura inicial de descarga mais elevada proporciona uma eficiência superior, algo também observado nos ensaios realizados.
- *Elatar et al.* [50] constataram que, o aumento do caudal intensificou a mistura das camadas térmicas no interior do sistema TES. Esta conclusão foi confirmada nos ensaios realizados, uma vez que, com o aumento do caudal, o desempenho de parâmetros como o número MIX e o Ri , ambos ligados à estratificação térmica, foi prejudicado.

Assim, de forma geral, conforme descrito na Secção 5.2.10, os ensaios que demonstraram o melhor desempenho global durante o processo de descarga foram os realizados com um caudal de 2 l/min e temperaturas de 50°C e 60°C.

6.2.3 Parâmetros geométricos

O estudo realizado, identificou algumas condicionantes relacionadas com construção do sistema TES, destacando-se particularmente o posicionamento das tomadas de energia térmica como um dos principais aspetos a necessitar de melhorias. A configuração atual, resulta na ocorrência do fenómeno "*dead zone*", que se revelou um fator limitante nos resultados obtidos ao longo deste estudo.

Idealmente, o posicionamento das tomadas deveria ser na base e no topo do sistema TES. No entanto, caso não seja possível realizar essa alteração, uma solução potencialmente viável, que não implicaria a necessidade de alterar o posicionamento das tomadas do sistema TES, consiste na modificação do canal de entrada e saída da água no sistema TES. Esta alteração permitiria direcionar a entrada da água para a base do sistema TES, enquanto a extração seria realizada diretamente a partir do topo.

Diversas configurações geométricas poderiam ser exploradas para implementar esta modificação, com o objetivo de aumentar a área útil de armazenamento de energia e mitigar os processos de mistura observados, principalmente, no final de cada processo.

Observa-se que um aumento do Pe e do Re_{in} está associado a uma diminuição do Ri , o que tem implicações diretas no comportamento dinâmico do sistema. A análise da relação entre estes parâmetros adimensionais pode ser extremamente útil para melhorar o dimensionamento do sistema TES.

Neste contexto, e com base nas considerações anteriores sobre os canais de entrada e saída do sistema TES, torna-se evidente que a manipulação do direcionamento do escoamento, juntamente com uma redução controlada do Re_{in} , pode ter um impacto muito positivo no desempenho global do sistema. Especificamente, a diminuição do Re_{in} resulta numa redução da energia cinética turbulenta, que é a principal força motriz da mistura interna no sistema TES. De acordo com *Dehghan e Barzegar* [49], o aumento do Re promove uma maior mistura, o que pode ser contraproducente.

Esta diminuição do Re_{in} promove o aumento do Ri , cujos benefícios são igualmente sustentados pelos estudos de *Yee e Lai* [42], *Chandra e Matuska* [43] e *van Berkel et al.* [44], nos quais se verificou que o aumento deste parâmetro está associado a uma estratificação térmica mais estável.

Atualmente, verifica-se que a elevada magnitude do Pe indica uma dominância significativa do transporte convectivo sobre o transporte difusivo. Embora o transporte convectivo seja geralmente mais vantajoso em relação ao transporte difusivo, a sua dominância excessiva acabou por comprometer a estratificação térmica desejada no interior do sistema TES. Além disso, aumentar ainda mais o Pe , resultou sucessivamente na diminuição da magnitude do Ri .

Adicionalmente, a relação H/D do sistema TES pode ser um parâmetro de grande relevância para otimizar o desempenho global do sistema. Ajustar esta relação para reduzir o valor do Pe e aumentar o Ri , permite uma redução controlada do transporte convectivo e favorece a manutenção da estratificação térmica. Desta forma, encontrar um equilíbrio adequado entre ambos, com uma otimização da relação H/D, pode melhorar significativamente o desempenho do sistema TES.

6.3 Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, propõe-se expandir este estudo abordando lacunas identificadas e explorando novas metodologias. Pretende-se melhorar as soluções propostas e aplicá-las a diferentes contextos, contribuindo assim para o avanço da área e abrindo novas perspetivas de investigação.

Propõe-se, em primeiro lugar, uma revisão detalhada da metodologia utilizada neste estudo, focando-se nos seguintes aspetos:

- Alterar a distribuição dos sensores de medição de temperatura ao longo do sistema TES. No Anexo C, é apresentada uma proposta de melhoria para o sistema TES em análise;
- A instalação de sensores nas entradas e saídas do sistema TES, em contacto direto com o seu interior e posicionados a jusante das válvulas de seccionamento que isolam o sistema, pode melhorar o estado inicial de certos indicadores de performance;
- Recorrer a uma ferramenta de ajuste de curva, que possibilite a obtenção de valores num maior número de instantes;
- Promover uma melhoria contínua no código desenvolvido para a análise de dados.

Após a implementação destas melhorias, recomenda-se a repetição dos ensaios realizados, com o objetivo de validar os resultados do estudo inicial e verificar a ocorrência de novos fenómenos decorrentes das modificações efetuadas.

Posteriormente, sugere-se avançar com o estudo, efetuando novos ensaios com as seguintes alterações nas condições operacionais e no sistema TES:

- Analisar processos cíclicos de carregamento e descarga consecutivos;
- Investigar processos de carregamento e descarga simultâneos;

Conclusão

- Avaliar o comportamento do sistema TES com energia armazenada durante longos períodos de tempo;
- Estudar diferentes localizações de entrada/saída da água no sistema TES;
- Analisar novas configurações dos canais de entrada/saída da água no sistema TES, incluindo a influência do número de Froude nessas configurações;
- Avaliar uma relação H/D diferente, mantendo o mesmo volume de armazenamento.

Estes estudos poderão ser complementados pelo desenvolvimento de um modelo numérico, que, aliado à análise experimental, se revelará útil para prever o comportamento do sistema TES perante possíveis alterações geométricas e operacionais.

Após esta fase, sugere-se expandir o estudo para sistemas TES com diferentes capacidades. Para tal, recomenda-se uma análise prévia do desempenho da plataforma experimental, a fim de verificar se são necessárias novas melhorias ou a adição de componentes que suportem os ensaios com os novos sistemas TES.

Numa fase em que o conhecimento sobre a dinâmica da plataforma experimental e dos sistemas TES analisados esteja suficientemente consolidado, recomenda-se ainda a utilização de novos meios de armazenamento, com especial destaque para os PCM, os quais, conforme discutido na revisão bibliográfica, têm demonstrado resultados promissores.

Referências

- [1] B. Cárdenas and N. León, “High temperature latent heat thermal energy storage: Phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 27, pp. 724–737, 2013.
- [2] S. Mondal, “Phase change materials for smart textiles - an overview,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 28, pp. 1536–1550, 8 2008.
- [3] H. O. Njoku, O. V. Ekechukwu, and S. O. Onyegegbu, “Comparison of energy, exergy and entropy generation-based criteria for evaluating stratified thermal store performances,” *Energy and Buildings*, vol. 124, pp. 141–152, 7 2016.
- [4] L. J. Shah and S. Furbo, “Entrance effects in solar storage tanks,” *Solar Energy*, vol. 75, pp. 337–348, 2003.
- [5] W. Lou, L. Luo, Y. Hua, Y. Fan, and Z. Du, “A review on the performance indicators and influencing factors for the thermocline thermal energy storage systems,” *Energies*, vol. 14, 12 2021.
- [6] Z. Wang, H. Zhang, B. Dou, G. Zhang, W. Wu, and L. Zhou, “An experimental study for the enhancement of stratification in heat-storage tank by equalizer and pcm module,” *Journal of Energy Storage*, vol. 27, 2 2020.
- [7] Y. P. Chandra and T. Matuska, “Stratification analysis of domestic hot water storage tanks: A comprehensive review,” *Energy and Buildings*, vol. 187, pp. 110–131, 3 2019.
- [8] International Energy Agency (IEA), “Tracking clean energy progress 2023,” 2023, license: CC BY 4.0.
- [9] International Energy Agency (IEA) and IRENA and UNSD and World Bank and WHO, “Tracking SDG7: The Energy Progress Report,” 2023, © World Bank. License: CC BY NC 4.0.
- [10] International Energy Agency (IEA), “Energy Efficiency 2023,” 2023, License: CC BY 4.0.
- [11] H. Chen, T. N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, and Y. Ding, “Progress in electrical energy storage system: A critical review,” *Progress in Natural Science*, vol. 19, pp. 291–312, 2009.
- [12] G. Alva, L. Liu, X. Huang, and G. Fang, “Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 68, pp. 693–706, 2 2017.

- [13] G. Alva, Y. Lin, and G. Fang, “An overview of thermal energy storage systems,” *Energy*, vol. 144, pp. 341–378, 2 2018.
- [14] A. Gil, M. Medrano, I. Martorell, A. Lázaro, P. Dolado, B. Zalba, and L. F. Cabeza, “State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. part 1-concepts, materials and modellization,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 31–55, 1 2010.
- [15] H. Benoit, L. Spreafico, D. Gauthier, and G. Flamant, “Review of heat transfer fluids in tube-receivers used in concentrating solar thermal systems: Properties and heat transfer coefficients,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, pp. 298–315, 3 2016.
- [16] M. C. Alonso, J. Vera-Agullo, L. Guerreiro, V. Flor-Laguna, M. Sanchez, and M. Collares-Pereira, “Calcium aluminate based cement for concrete to be used as thermal energy storage in solar thermal electricity plants,” *Cement and Concrete Research*, vol. 82, pp. 74–86, 4 2016.
- [17] J. Heier, C. Bales, and V. Martin, “Combining thermal energy storage with buildings - a review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, pp. 1305–1325, 2015.
- [18] H. Singh, R. P. Saini, and J. S. Saini, “A review on packed bed solar energy storage systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 1059–1069, 4 2010.
- [19] F. Gomez-Garcia, D. Gauthier, and G. Flamant, “Design and performance of a multistage fluidised bed heat exchanger for particle-receiver solar power plants with storage,” *Applied Energy*, vol. 190, pp. 510–523, 2017.
- [20] T. Schmidt, D. Mangold, and H. Müller-Steinhagen, “Central solar heating plants with seasonal storage in germany,” *Solar Energy*, vol. 76, pp. 165–174, 2004.
- [21] L. Newman and Y. Herbert, “The use of deep water cooling systems: Two canadian examples,” *Renewable Energy*, vol. 34, pp. 727–730, 3 2009.
- [22] J. Xu, R. Z. Wang, and Y. Li, “A review of available technologies for seasonal thermal energy storage,” *Solar Energy*, vol. 103, pp. 610–638, 2014.
- [23] A. Krönauer, E. Lävemann, S. Brückner, and A. Hauer, “Mobile sorption heat storage in industrial waste heat recovery,” *Energy Procedia*, vol. 73, pp. 272–280, 2015.
- [24] Y. Kozak, M. Farid, and G. Ziskind, “Experimental and comprehensive theoretical study of cold storage packages containing pcm,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 115, pp. 899–912, 2017.
- [25] S. Advait, D. R. Parida, K. T. Aswathi, N. Dani, U. K. Chetia, K. Chattopadhyay, and S. Basu, “Experimental investigation on single-medium stratified thermal energy storage system,” *Renewable Energy*, vol. 164, pp. 146–155, 2 2021.

- [26] B. Thomas, P. D. van Schalkwyk, J. A. Engelbrecht, P. Haase, A. Maier, C. Widmann, and M. J. Booysen, “Thermodynamic analysis of stratification in thermal energy storages implemented in cogeneration systems,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 232, 9 2023.
- [27] M. A. Karim, “Experimental investigation of a stratified chilled-water thermal storage system,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, pp. 1853–1860, 8 2011.
- [28] A. Castell, M. Medrano, C. Solé, and L. F. Cabeza, “Dimensionless numbers used to characterize stratification in water tanks for discharging at low flow rates,” *Renewable Energy*, vol. 35, pp. 2192–2199, 10 2010.
- [29] M. E. Afshan, A. S. Selvakumar, R. Velraj, and R. Rajaraman, “Effect of aspect ratio and dispersed pcm balls on the charging performance of a latent heat thermal storage unit for solar thermal applications,” *Renewable Energy*, vol. 148, pp. 876–888, 4 2020.
- [30] C. Solé, M. Medrano, A. Castell, M. Nogués, H. Mehling, and L. F. Cabeza, “Energetic and exergetic analysis of a domestic water tank with phase change material,” *International Journal of Energy Research*, vol. 32, pp. 204–214, 2008.
- [31] G. Li, “Sensible heat thermal storage energy and exergy performance evaluations,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53, pp. 897–923, 1 2016.
- [32] M. Y. Haller, C. A. Cruickshank, W. Streicher, S. J. Harrison, E. Andersen, and S. Furbo, “Methods to determine stratification efficiency of thermal energy storage processes - review and theoretical comparison,” *Solar Energy*, vol. 83, pp. 1847–1860, 10 2009.
- [33] W. Bahnfleth and A. Musser, “Parametric study of charging inlet diffuser performance in stratified chilled water storage tanks with radial diffusers,” no. Final Report, 1999.
- [34] J. Yoo, M. W. Wildin, and C. R. Truman, “Initial formation of a thermocline in stratified thermal storage tanks,” vol. 92:2A, 1986.
- [35] A. Musser and W. P. Bahnfleth, “Evolution of temperature distributions in a full-scale stratified chilled-water storage tank with radial diffusers,” *ASHRAE Transactions*, vol. 104, p. 55, 1998.
- [36] R. Bayon and E. Rojas, “Analytical function describing the behaviour of a thermocline storage tank: A requirement for annual simulations of solar thermal power plants,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 68, pp. 641–648, 2014.
- [37] Y. M. Han, R. Z. Wang, and Y. J. Dai, “Thermal stratification within the water tank,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp. 1014–1026, 6 2009.
- [38] J. H. Davidson, D. A. Adams, and J. A. Miller, “A coefficient to characterize mixing in solar water storage tanks,” 1994.

- [39] E. Andersen, S. Furbo, and J. Fan, “Multilayer fabric stratification pipes for solar tanks,” *Solar Energy*, vol. 81, pp. 1219–1226, 10 2007.
- [40] J. Fernández-Seara, F. J. Uhía, and J. Sieres, “Experimental analysis of a domestic electric hot water storage tank. part i: Static mode of operation,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 27, pp. 129–136, 1 2007.
- [41] —, “Experimental analysis of a domestic electric hot water storage tank. part ii: dynamic mode of operation,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 27, pp. 137–144, 1 2007.
- [42] C. K. Yee and F. C. Lai, “Effects of a porous manifold on thermal stratification in a liquid storage tank,” vol. 71, pp. 241–254, 2001.
- [43] Y. P. Chandra and T. Matuska, “Numerical prediction of the stratification performance in domestic hot water storage tanks,” *Renewable Energy*, vol. 154, pp. 1165–1179, 7 2020.
- [44] J. V. Berkel, C. C. M. Rindt, and A. A. V. Steenhoven, “Modelling of two-layer stratified stores,” vol. 67, pp. 65–78, 1999.
- [45] Y. H. Zurigat, P. R. Liche, and A. J. Ghajar, “Influence of inlet geometry on mixing in thermocline thermal energy storage,” *Mass Truer*, vol. 34.
- [46] A. J. Ghajar and Y. H. Zurigat, “Numerical study of the effect of inlet geometry on stratification in thermal energy storage,” *Numerical Heat Transfer; Part A: Applications*, vol. 19, pp. 65–83, 1991.
- [47] A. Kere, V. Goetz, X. Py, R. Olives, N. Sadiki, and E. Mercier, “Dynamic behavior of a sensible-heat based thermal energy storage,” *Energy Procedia*, vol. 49, pp. 830–839, 2014.
- [48] J. D. Chung, S. H. Cho, C. S. Tae, and H. Yoo, “The effect of diffuser configuration on thermal stratification in a rectangular storage tank,” *Renewable Energy*, vol. 33, pp. 2236–2245, 10 2008.
- [49] A. A. Dehghan and A. Barzegar, “Thermal performance behavior of a domestic hot water solar storage tank during consumption operation,” *Energy Conversion and Management*, vol. 52, pp. 468–476, 2011.
- [50] A. Elatar, K. Nawaz, B. Shen, and V. Baxter, “Hydrodynamic behavior of wrapped coil water heater tank,” *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 20, 12 2020.
- [51] M. W. Wildin, “Performance of stratified vertical cylindrical thermal storage tanks. ii: Prototype tank,” *Ashrae Transactions*, vol. 95, pp. 1096–1105, 1989.
- [52] C. E. Dorgan, J. S. Elleson, R. of Heating, and A.-C. Engineers, *Design Guide for Cool Thermal Storage*. ASHRAE, 1993.
- [53] E. Kaloudis, D. G. Grigoriadis, and E. Papanicolaou, “Numerical simulations of constant-influx gravity currents in confined spaces: Application to thermal storage tanks,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 108, pp. 1–16, 10 2016.

- [54] Z. He, X. Wang, X. Du, M. Amjad, L. Yang, and C. Xu, “Experiments on comparative performance of water thermocline storage tank with and without encapsulated paraffin wax packed bed,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 147, pp. 188–197, 1 2019.
- [55] Z. Wang, H. Zhang, B. Dou, H. Huang, and G. Zhang, “The thermal stratification characteristics affected by a novel equalizer in a dynamic hot water storage tank,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 126, pp. 1006–1016, 11 2017.
- [56] M. Wu, M. Li, C. Xu, Y. He, and W. Tao, “The impact of concrete structure on the thermal performance of the dual-media thermocline thermal storage tank using concrete as the solid medium,” *Applied Energy*, vol. 113, pp. 1363–1371, 2014.
- [57] A. Al-Habaibeh, B. Shakmak, and S. Fanshawe, “Assessment of a novel technology for a stratified hot water energy storage – the water snake,” *Applied Energy*, vol. 222, pp. 189–198, 7 2018.
- [58] J. Sun, J. Hua, L. Fu, and S. Zhang, “Experimental study of a large temperature difference thermal energy storage tank for centralized heating systems,” 2018.
- [59] W. Lou, N. Baudin, S. Roux, Y. Fan, and L. Luo, “Impact of buoyant jet entrainment on the thermocline behavior in a single-medium thermal energy storage tank,” *Journal of Energy Storage*, vol. 71, 11 2023.
- [60] W. Yaïci, M. Ghorab, E. Entchev, and S. Hayden, “Three-dimensional unsteady cfd simulations of a thermal storage tank performance for optimum design,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 60, pp. 152–163, 2013.
- [61] R. Majumdar and S. K. Saha, “Effect of varying extent of pcm capsule filling on thermal stratification performance of a storage tank,” *Energy*, vol. 178, pp. 1–20, 7 2019.
- [62] W. Lou, Y. Fan, and L. Luo, “Single-tank thermal energy storage systems for concentrated solar power: Flow distribution optimization for thermocline evolution management,” *Journal of Energy Storage*, vol. 32, 12 2020.
- [63] A. Modi and C. D. Pérez-Segarra, “Thermocline thermal storage systems for concentrated solar power plants: One-dimensional numerical model and comparative analysis,” *Solar Energy*, vol. 100, pp. 84–93, 2014.
- [64] D. Tarlet, Y. Fan, S. Roux, and L. Luo, “Entropy generation analysis of a mini heat exchanger for heat transfer intensification,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 53, pp. 119–126, 2 2014.
- [65] S. Afrin, V. Kumar, D. Bharathan, G. C. Glatzmaier, and Z. Ma, “Computational analysis of a pipe flow distributor for a thermocline based thermal energy storage system,” *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 136, 2014.
- [66] M. Carmona, A. Rincón, and L. Gulfo, “Energy and exergy model with parametric study of a hot water storage tank with pcm for domestic applications and

- experimental validation for multiple operational scenarios,” *Energy Conversion and Management*, vol. 222, 10 2020.
- [67] N. Mertens, F. Alobaid, L. Frigge, and B. Epple, “Dynamic simulation of integrated rock-bed thermocline storage for concentrated solar power,” *Solar Energy*, vol. 110, pp. 830–842, 12 2014.
- [68] M. Farmahini-Farahani, “Investigation of four geometrical parameters on thermal stratification of cold water tanks by exergy analysis,” *International Journal of Exergy*, vol. 10, pp. 332–345, 2012.
- [69] M. R. Assari, H. B. Tabrizi, and M. Savadkoheny, “Numerical and experimental study of inlet-outlet locations effect in horizontal storage tank of solar water heater,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 25, pp. 181–190, 2 2018.

Declaração de Integridade

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração. Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim. Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO ISEP,

Xavier Oliveira Ferreira

Porto, 14 de Setembro de 2024

Declaração de Integridade

Apêndice A - Complemento da Implementação e Execução do Estudo

A.1 Componentes da plataforma experimental

Neste capítulo, serão detalhados os componentes essenciais da plataforma experimental, destacando-se a sua finalidade. Entre estes, os mais simples, são os filtros de impurezas, que possuem uma rede para a filtração de partículas, e as válvulas de seccionamento, equipadas com uma borboleta que impede a passagem da água quando estão em posição totalmente fechada. Além destes, outros componentes críticos serão descritos em detalhe, com ênfase nas suas funções e importância na operação global da plataforma experimental.

A.1.1 VMT

Um dos principais componentes da plataforma experimental é a VMT Caleffi 521500, presente no circuito primário e secundário, ilustrada em corte na Figura A.1. O componente regulador desta válvula, consiste num sensor de temperatura completamente imerso na conduta de saída da água misturada. Este sensor, mediante a sua dilatação ou contração, ajusta continuamente a proporção adequada entre as quantidades de água quente e fria fornecidas nas entradas. A regulação destes caudais é assegurada por um pistão que desliza num cilindro entre as entradas de água quente e fria. As condições de referência para a água às entradas desta válvula são: 68°C para a água quente e 13°C para a água fria. Contudo, mesmo em situações de queda de pressão causadas pelo consumo, ou variações nas temperaturas de entrada, esta válvula ajusta, automaticamente, os caudais de água para manter a temperatura constante.

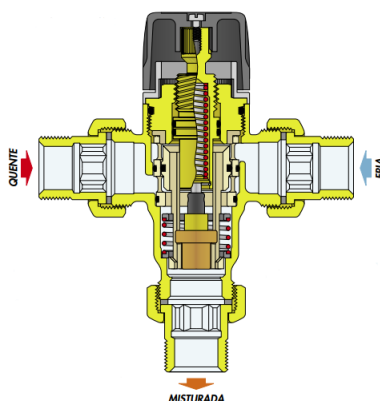


Figura A.1: Corte da válvula misturadora termostática

Desta forma, é possível ajustando os diversos níveis de regulação da mesma, presentes na Tabela A.1, produzir água a várias temperaturas, simulando assim

diversos cenários possíveis, tais como, AQS ou até mesmo aquecimento de espaços. Para além disso, esta produz uma mistura a uma temperatura constante que é essencial para garantir a fiabilidade e a repetibilidade dos resultados obtidos durante os ensaios do sistema TES.

Tabela A.1: Níveis de regulação da válvula misturadora termostática

Posição	Min.	1	2	3	4	5	6	7	Máx.
T [°C]	27	32	38	44	49	53	58	63	67

A.1.2 Vaso de expansão

O vaso de expansão Caleffi 568012 de 12 litros, demonstrado na Figura A.2, consiste num recipiente hermético dividido em duas câmaras por uma membrana. Esta membrana separa a água da fase gasosa, geralmente, preenchida com azoto. Quando há um incremento na temperatura da água, a pressão interna do vaso aumenta em relação ao valor de pré-carga a frio (1), até atingir o valor correspondente à dilatação máxima (2), mitigando assim o aumento da pressão da instalação.

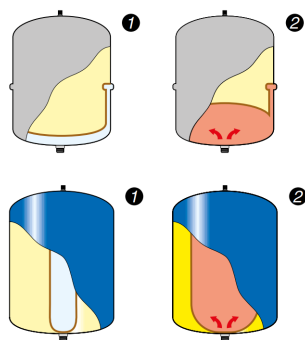


Figura A.2: Corte do vaso de expansão

A.1.3 Válvula de segurança

A válvula de segurança Caleffi 312, representada em corte na Figura A.3, possui um obturador (1), contrariado por uma mola regulada (2), que é elevado quando a pressão de regulação é alcançada, abrindo completamente a passagem de descarga. A escolha da pressão de regulação é determinada com base na pressão máxima permitida na instalação. Quando a pressão diminui, ocorre o inverso, com a consequente obstrução da válvula.

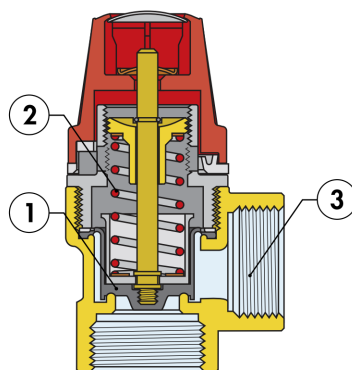


Figura A.3: Corte da válvula de segurança

A.1.4 Grupo de enchimento

O grupo de enchimento Caleffi 553640, representado em corte na Figura A.4, possui um indicador de regulação da pressão que facilita os ajustes antes do enchimento da instalação. As partes móveis e o pistão de compensação são fabricados em material plástico com baixo coeficiente de aderência, minimizando depósitos de calcários. A membrana tem uma grande superfície útil, proporcionando precisão e sensibilidade nas intervenções com mínimas variações de pressão. A sede do grupo de enchimento é dimensionada para baixos caudais, mantendo a eficiência ao longo do tempo. A guia do obturador é otimizada para reduzir atritos e o cartucho do filtro é extraível, facilitando inspeção, limpeza e substituição.

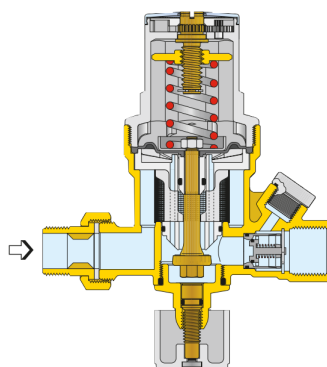


Figura A.4: Corte do grupo de enchimento

A.1.5 Separador de microbolhas

O separador de microbolhas Caleffi 551006, representado em corte na Figura A.5, utiliza a ação combinada de vários princípios físicos. A parte ativa é composta por um conjunto de superfícies metálicas reticulares, dispostas em forma de leque (1). Estes elementos criam movimentos em vórtice que promovem a libertação das microbolhas e a sua adesão às superfícies. As bolhas, ao se fundirem, aumentam de volume até serem empurradas pela força hidrostática, que é superior à sua força de adesão à estrutura. Assim, sobem em direção à parte superior do dispositivo, onde são evacuadas através de um purgador de ar automático com boia (2).

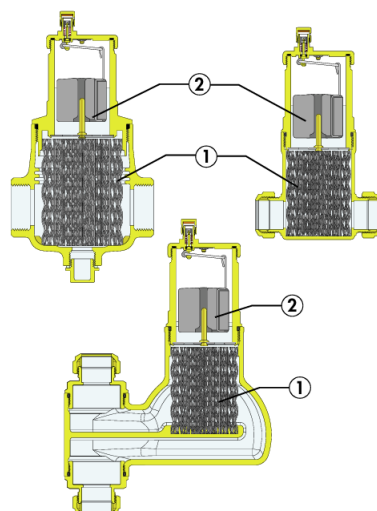


Figura A.5: Corte do separador de microbolhas

A.1.6 Válvula de retenção

A válvula de retenção Caleffi 323050, representada em corte na Figura A.6, é composta por uma esfera (1), que contém um obturador de retenção (2). Durante a circulação normal da água na instalação, o obturador é empurrado contra a mola de retenção (3) contida no seu interior, de modo a abrir a passagem. Quando a pressão a jusante da válvula é superior à montante, o obturador é empurrado na direção oposta, contra a sede de vedação da esfera (4), com o objetivo de prevenir a inversão do sentido do escoamento. Na ausência de escoamento, o obturador fecha completamente a passagem de água graças ao impulso exercido pela mola de retenção (3) e pela pressão a jusante, através da guarnição moldada (5), posicionada na sede de vedação da esfera. A esfera, com um manípulo de borboleta (6), atua como um dispositivo normal de seccionamento.

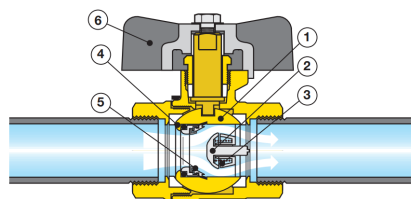


Figura A.6: Corte da válvula de retenção

A.2 Validação do funcionamento da plataforma experimental

Durante a validação da plataforma experimental, foram efetuadas várias alterações na sua configuração. A documentação detalhada deste processo, desde a configuração inicial, até à configuração final da plataforma experimental, facilita a identificação de lacunas e oportunidades de melhoria.

A.2.1 Circuito primário

Para a avaliação do circuito primário na configuração inicial da plataforma experimental, a instalação foi seccionada conforme demonstrado na Figura A.7. Os três

testes foram realizados, de acordo com os seguintes parâmetros:

- Potência da caldeira: Duas resistências ativas;
- Setpoint da caldeira: 50°C, 60°C e 70°C, para o primeiro, segundo e terceiro testes, respetivamente;
- Controlo do caudal: Todas as válvulas de seccionamento do percurso permaneceram em posição totalmente aberta;
- Bombas de circulação ativas: A bomba de circulação B1, operando continuamente na sua velocidade máxima;
- Bombas de circulação inativas: Bomba de circulação B4 .

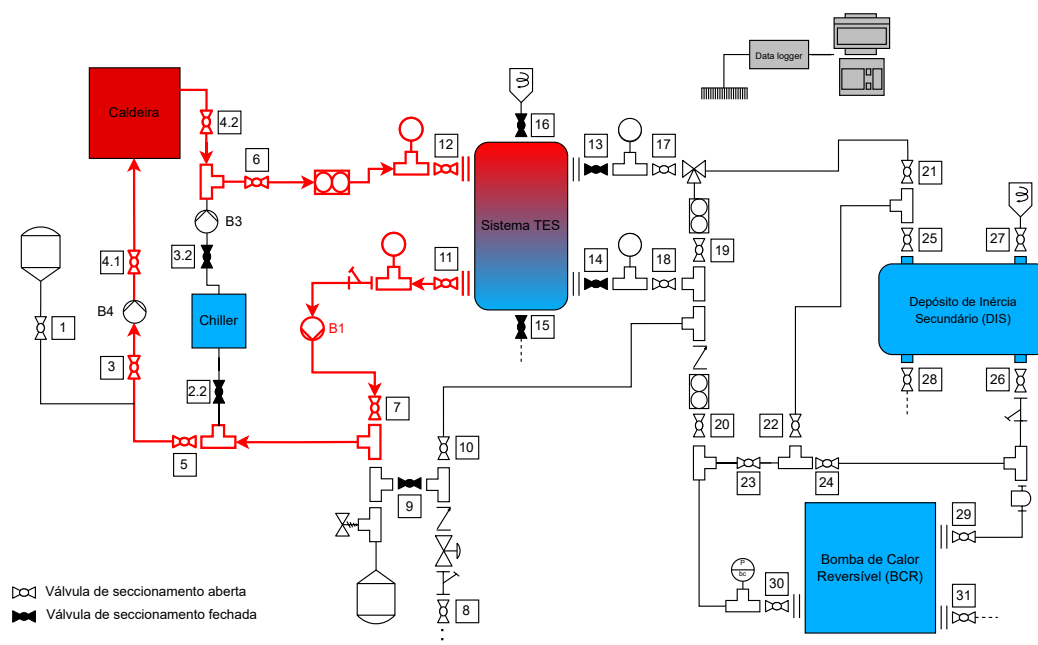


Figura A.7: Percurso inicial do circuito primário

Caldeira elétrica

As modificações efetuadas na plataforma experimental, em relação à configuração inicial, estão ilustradas na Figura A.8. Para controlar a temperatura de retorno, uma vez que esta agora tem um trajeto diferente, foi colocado um termopar do tipo K a montante da caldeira. Os dois testes realizados para avaliar o comportamento dinâmico da caldeira, decorreram de acordo com os seguintes parâmetros:

- Potência da caldeira: Apenas uma resistência ativada;
- Setpoint da caldeira: 30°C;
- Temperatura do DIS: 32°C no primeiro teste e 28°C no segundo teste;

- Controlo do caudal: Todas as válvulas de seccionamento do percurso permaneceram em posição totalmente aberta;
- Bomba de circulação ativa: Bomba de circulação B1, operando continuamente na sua velocidade máxima;
- Bombas de circulação inativas: Bomba de circulação B4 e bomba integrada da BCR.

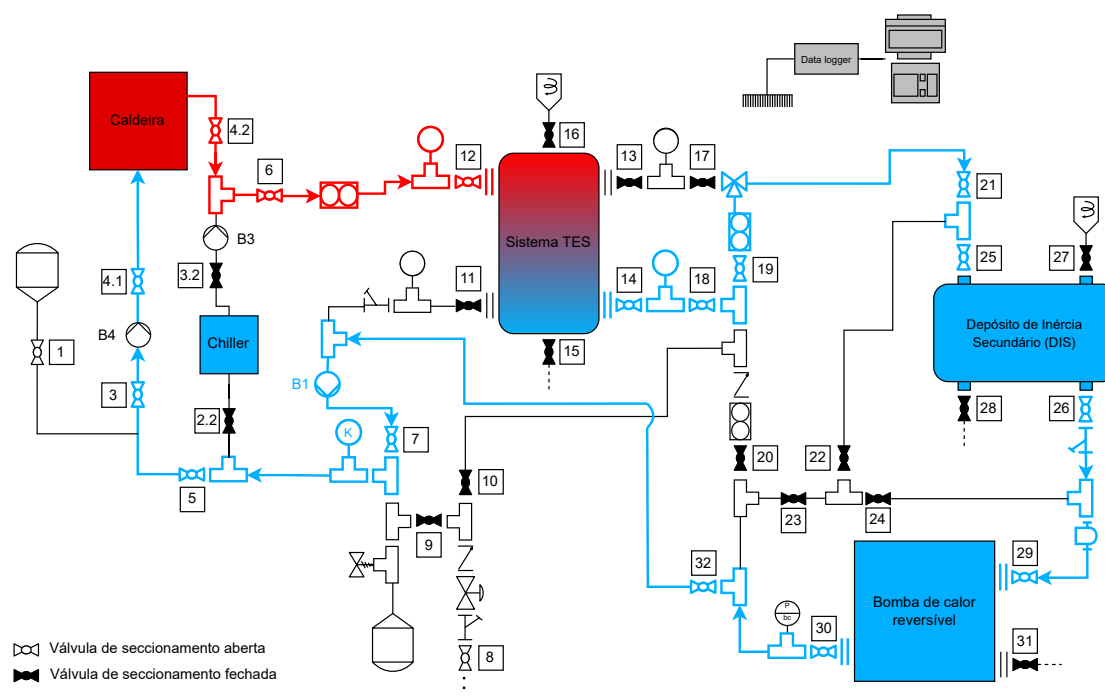


Figura A.8: Alteração da configuração e do percurso do circuito primário

VMT

Durante esta alteração, procedeu-se à montagem da VMT no circuito primário da instalação, e efetuaram-se as mudanças necessárias na configuração da plataforma experimental, conforme ilustrado na Figura A.9. Os dois testes realizados para avaliar o comportamento da VMT, decorreram de acordo com os seguintes parâmetros:

- Potência da caldeira: Duas resistências ativas;
- Setpoint da caldeira: 60°C;
- Setpoint do *chiller*: 9°C;
- Regulação da VMT: não foi um dos parâmetros considerados, tendo esta sido manipulada para uma posição aleatória;
- Temperatura do DIS: 20°C;
- Controlo do caudal: Todas as válvulas de seccionamento do percurso permaneceram em posição totalmente aberta;

- Bomba de circulação ativa: Bomba de circulação B1, operando continuamente na sua velocidade máxima;
- Bombas de circulação inativas: Bombas de circulação B3 e B4 e bomba integrada da BCR.

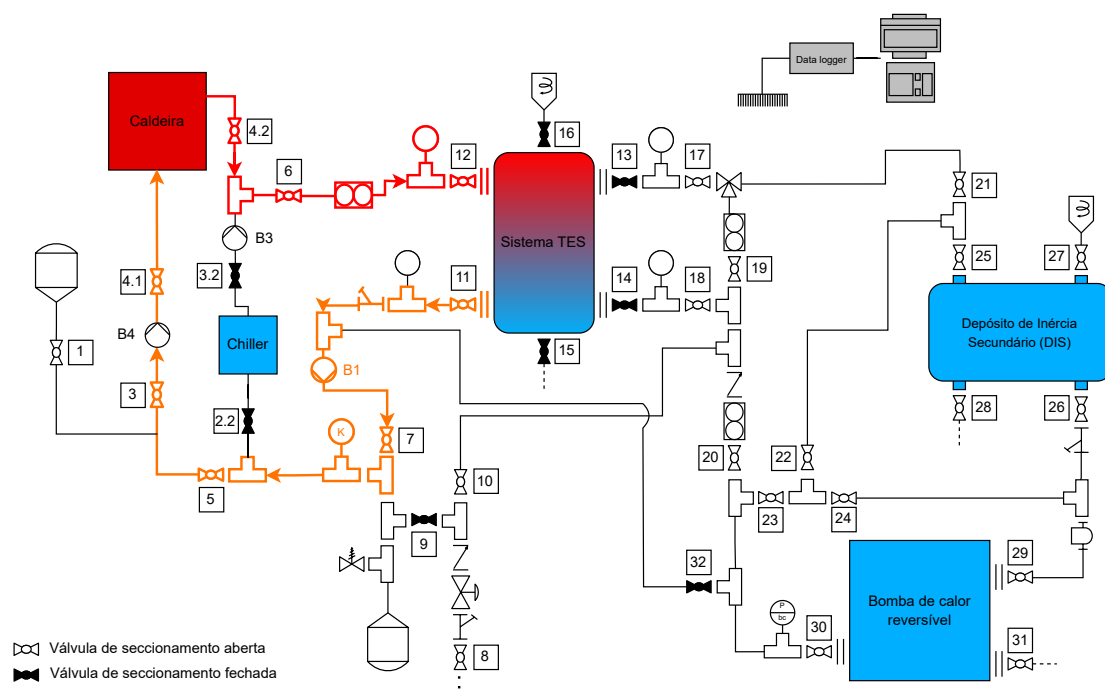


Figura A.9: Adição da VMT ao circuito primário

DIP

A incorporação do DIP no seu respetivo local na plataforma experimental, exigiu a alteração do percurso do circuito primário, conforme ilustrado na Figura A.10. Os dois testes realizados para avaliar o comportamento do DIP, decorreram de acordo com os seguintes parâmetros:

- Setpoint do *chiller*: 9°C;
- Regulação da VMT: não foi um dos parâmetros considerados, tendo esta sido manipulada para uma posição aleatória;
- Controlo do caudal: Todas as válvulas de seccionamento do percurso permaneceram em posição totalmente aberta;
- Bombas de circulação ativas: Bombas de circulação B1 e B3 operaram continuamente na sua velocidade máxima.

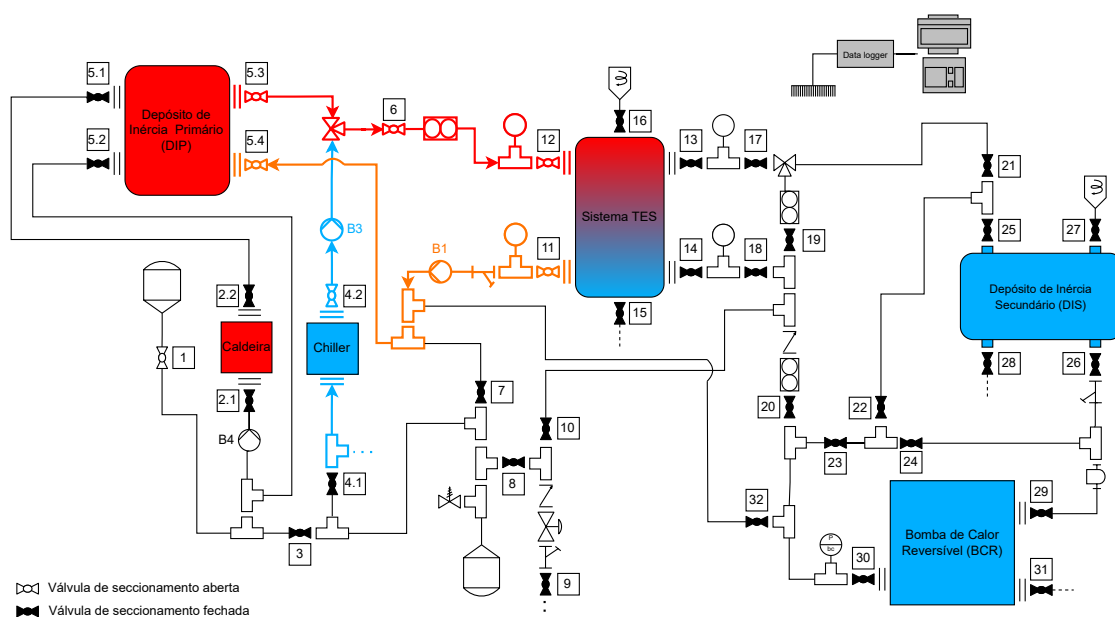


Figura A.10: Adição do DIP ao circuito primário

Para colocar previamente o DIP à temperatura pretendida através da BCR, a instalação foi seccionada conforme consta na Figura A.13. Este processo, pode durar aproximadamente entre meia hora a quarenta e cinco minutos, dependendo da temperatura a que este se encontra no início deste processo. Os parâmetros sobre os quais decorre esta operação são os seguintes:

- Potência da caldeira: Potência da caldeira: Duas resistências ativas;
- Setpoint da caldeira: 60°C;
- Controlo do caudal: Todas as válvulas de seccionamento do percurso permaneceram em posição totalmente aberta;
- Bomba de circulação ativa: Bomba de circulação B4, operou continuamente na sua velocidade máxima.

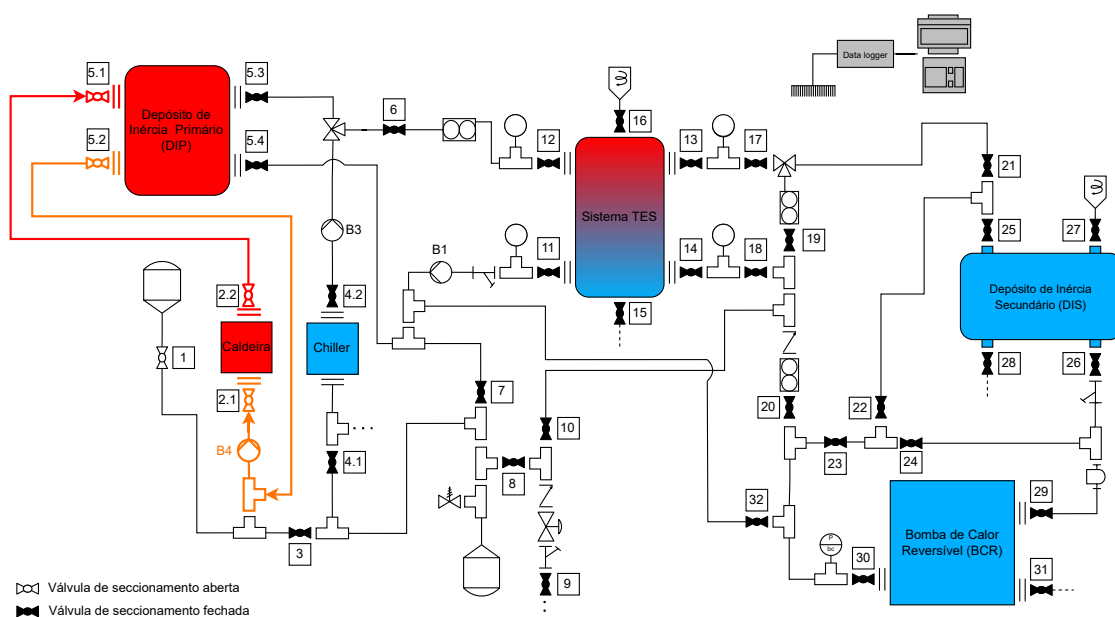


Figura A.11: Percurso do pré-aquecimento do DIP

A.2.2 Circuito secundário

Para fazer circular a água desde o DIS até ao sistema TES, a instalação foi seccionada como esquematizado na Figura A.12. Os três testes foram realizados, de acordo com os seguintes parâmetros:

- Controlo do caudal: Todas as válvulas de seccionamento do percurso permaneceram em posição totalmente aberta;
- Bomba de circulação ativa: Bomba de circulação integrada da BCR, operando continuamente na sua velocidade máxima.

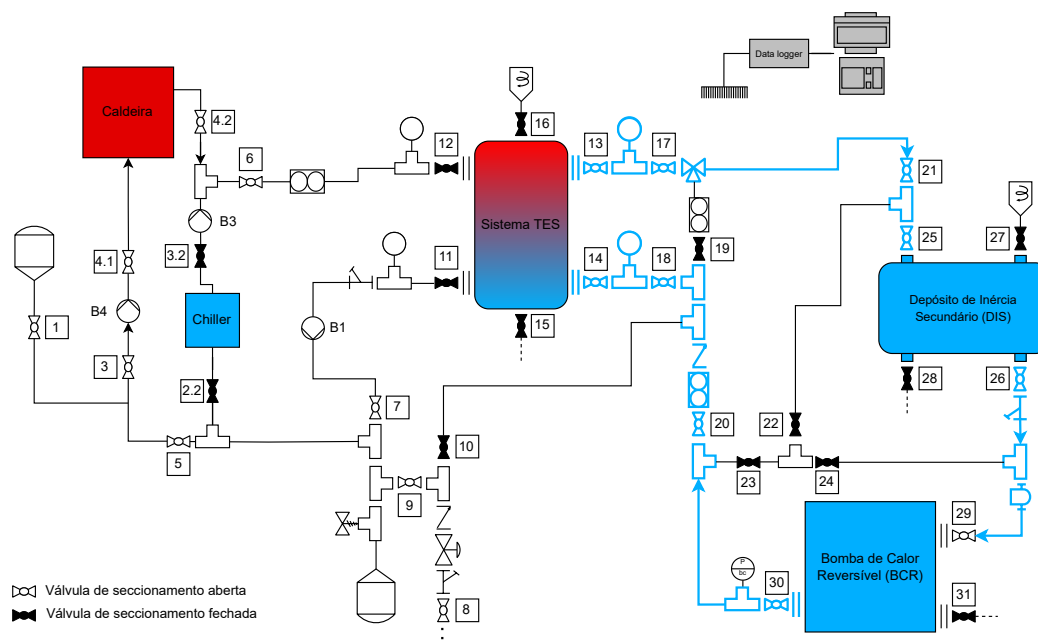


Figura A.12: Percurso do circuito secundário

Para pré-estabelecer o DIS à temperatura pretendida através da BCR, a instalação foi seccionada conforme consta na Figura A.13. Este processo, pode durar aproximadamente entre uma a duas horas, dependendo da temperatura a que este se encontra no início deste processo. Os parâmetros sobre os quais decorre esta operação são os seguintes:

- Setpoint da BCR: 15°C;
- Controlo do caudal: Todas as válvulas de seccionamento do percurso permaneceram em posição totalmente aberta;
- Bomba de circulação ativa: Bomba de circulação integrada da BCR, operando continuamente na sua velocidade máxima.

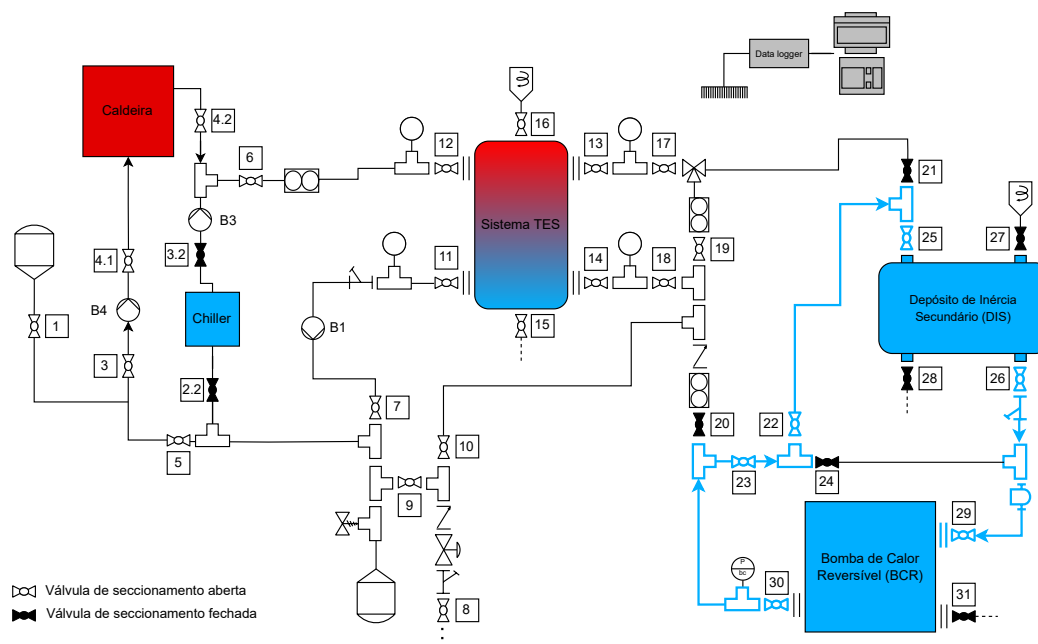


Figura A.13: Percurso de pré-estabelecimento da temperatura do DIS

Bomba de circulação B2

Devido às condicionantes demonstradas pela BCR, foi necessário adicionar uma nova bomba de circulação ao circuito secundário, conforme ilustrado na Figura A.14. Os quatro testes realizados, para avaliar o comportamento do caudal com esta nova configuração do circuito secundário, decorreram de acordo com os seguintes parâmetros:

- Temperatura do DIS: 15°C
- Controlo do caudal: Todas as válvulas de seccionamento do percurso permaneceram em posição totalmente aberta;
- Bomba de circulação ativa: Bomba de circulação B2 e bomba de circulação integrada da BCR, operaram continuamente na sua velocidade máxima nos dois primeiros testes e nos restantes apenas se acionou a bomba de circulação B2 na sua velocidade máxima.

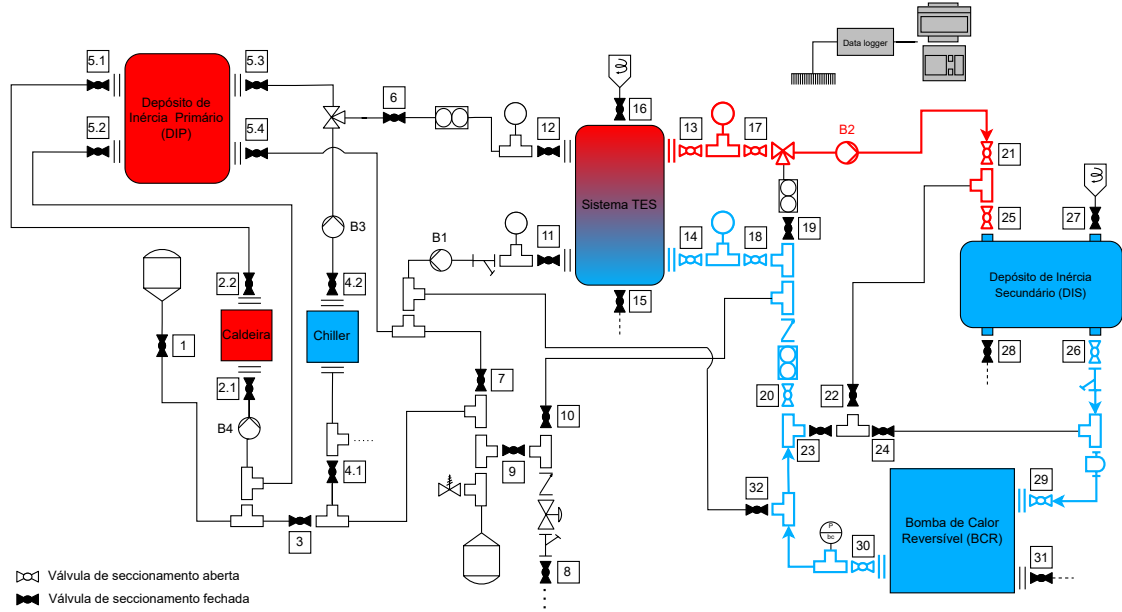


Figura A.14: Instalação da bomba de circulação B2 no circuito secundário

A.3 Montagem da instrumentação

A montagem da instrumentação na plataforma experimental, assim como a documentação do seu processo, é essencial para garantir a fiabilidade dos resultados obtidos. É fundamental registrar detalhadamente cada etapa, incluindo ajustes ao *hardware*, procedimentos de calibração e quaisquer alterações realizadas. Esta documentação não só facilita a replicação dos ensaios e a manutenção dos equipamentos, como também proporciona um controlo de qualidade que assegura a consistência e a precisão das medições, permitindo uma análise fiável dos dados obtidos.

A.3.1 Calibração das sondas de medição de temperatura

Os RTD PT-100 e PT-1000 diferem na sua resistência nominal a 0°C. Os PT-100 têm uma resistência nominal de 100 ohms a 0°C, enquanto os PT-1000 têm uma resistência nominal de 1000 ohms a 0°C. A conexão dos RTD utilizados variou entre dois ou três fios, sendo os últimos mais precisos, pois compensam os efeitos da resistência do cabo. Todos os sensores foram calibrados com um banho térmico, para averiguar se as medições efetuadas por estes coincidiam com a realidade.

Banho térmico

O banho térmico, permite criar um ambiente controlado de temperatura estável, utilizando fluidos termicamente condutores, como óleo mineral ou água, que possibilita a calibração dos sensores de medição de temperatura.

Durante o processo de calibração, o sensor é submerso no fluido e exposto a diferentes temperaturas ajustadas de acordo com os pontos de calibração desejados. Diversos sensores monitorizam continuamente a temperatura do banho térmico para garantir a sua precisão e estabilidade.

As leituras do sensor são, posteriormente, comparadas com os valores de referência conhecidos, permitindo identificar a precisão dos mesmos em condições reais de operação. O procedimento que permitiu a calibração dos sensores foi o seguinte:

1. No menu inicial, na opção "IN", foi selecionado o tipo de sensor a calibrar, seguido da sua respetiva ligação;
2. Retornando ao menu inicial, na opção "COM", seguida da opção "TAGMAN", foram definidos os parâmetros necessários para a calibração automática;
3. Na opção "SP", foram atribuídos os valores de referência da temperatura do banho térmico para a calibração, tendo sido estabelecidos os limites mínimo e máximo de 0°C e 80°C, respetivamente;
4. Na opção "TOL", foi definida a tolerância máxima para a calibração, mantendo-se o valor predefinido;
5. Na opção "STB", foi atribuído o tempo de estabilização do sensor a partir do momento em que o banho térmico atinge a temperatura alvo, tendo sido configurado para 240 segundos, uma vez que os sensores a calibrar apresentam um tempo de resposta lento;
6. Na opção "STR", foi selecionada a estratégia de calibração, sendo escolhida a opção "Cima e baixo", para que o sensor fosse calibrado corretamente tanto no aumento quanto na diminuição da temperatura;
7. Na opção "RP", foi escolhido o número de repetições da operação, tendo sido estabelecida apenas uma repetição;
8. No menu "RGO", foi definida a faixa de temperatura em que o sensor seria calibrado, compreendida entre os 0°C e os 80°C;
9. Por fim, retornando ao menu "COM", foi selecionada a opção "EXEC", que deu início ao processo de calibração automática.

Esta calibração durou em média 2 horas e meia. Para visualizar os resultados, acedeu-se, novamente, ao menu "COM", na opção "VERIF" e utilizou-se as setas do equipamento para andar para cima e para baixo, para obter os valores de todos os pontos de calibração.

Para finalizar, foi criada uma tabela no Excel com todos estes pontos, e de seguida, foi construído um gráfico com os mesmos, para obter a equação da regressão linear correspondente.

A.3.2 Configuração do caudalímetro ultrassónico

O caudalímetro ultrassónico, embora não tenha sido utilizado devido à instabilidade nas suas medições, foi montado na plataforma experimental para quando estiver disponível, poder ser utilizado. Este, funciona emitindo pulsos ultrassónicos através da água, direcionados em diferentes ângulos. Com base no tempo que os pulsos demoram a atravessar a água, o caudalímetro calcula a velocidade da mesma e, conseqüentemente, o caudal volumétrico na tubagem. O caudalímetro ultrassónico, necessitou, primeiramente, da configuração do tipo de aplicação, no seu menu

integrado. Os passos mais importantes para a calibração das sondas em função da tubagem onde se efetua a medição, são os seguintes:

1. M11 - Inserir o diâmetro externo da tubagem
2. M12 - Inserir a espessura da tubagem
3. M14 - Escolher o material da tubagem
4. M20 - Escolher o tipo de fluido que circula no tubo (Water)
5. M23 - Escolher o tipo de sonda (Clamp-on TS-2)
6. M24 - Escolher o método de montagem das sondas (V-method)
7. M25 - Verificar o espaçamento necessário entre as sondas
8. M31 - Escolher o sistema de unidades para o caudal (l/min)
9. M41 - Definir o valor de corte (0.01 l/min)
10. M42 e M43 - Definição do ponto zero
11. M55 - Escolher a saída analógica (20-0-20 mA)
12. M56 - Definir o valor que corresponde 0 mA (0 l/min)
13. M57 - Definir o valor que corresponde 20 mA (15 l/min)
14. M90 - Visualizar a força do sinal (Deve ser superior a 50)
15. M91 - Visualizar a relação de tempo (Deve ser de 100 ± 3)

Após a colocação das sondas, e sem a passagem de água no tubo, em M25 deve-se verificar qual o espaçamento necessário entre as sondas, e após isso, em M90 e M91, analisar se os valores estão dentro do intervalo pretendido, de forma a que, os valores lidos respeitem o erro de medição enunciado pelo fabricante, $\pm 1 \%$. Posto isto, em M43, deve-se apagar a definição do ponto zero, e em M42, voltar a definir o mesmo.

A.3.3 Programação do data logger

O data logger, possui a capacidade de ser configurado para registar uma variedade de parâmetros e realizar medições em intervalos de tempo específicos. Devido à limitação do número de canais do data logger em questão, foi implementado um módulo de expansão CEM20, que possibilita a adição de mais canais de medição à interface deste dispositivo. Durante o seu funcionamento, os instrumentos de medição foram ativados nos momentos programados, recolhendo as leituras e armazenando-as internamente na sua memória. Após o período de execução, os dados armazenados foram transferidos para um computador, ao qual o data logger estava ligado, utilizando o software "dEX 2.0". Os instrumentos de medição foram conectados aos canais do data logger, tal como consta na Tabela A.2.

Tabela A.2: Conexão da instrumentação ao data logger

Instrumento	Nomenclatura	Canal
Contador volumétrico de pistão rotativo PR15	Cp	1D
Contador volumétrico de pistão rotativo PR15	Cs	2D
Contador volumétrico de pistão rotativo PR15	Cb	3D
PT-100 3 fios Classe B	Tp_i	3
PT-100 3 fios Classe B	Tp_o	2
PT-100 3 fios Classe B	Ts_i	4
PT-100 3 fios Classe B	Ts_o	5
Caudalímetro ultrassônico	C_ultra_sinal	CEM 1 - 1
PT-100 3 fios Classe B	T_98	CEM 1 - 2
PT-1000 2 fios Classe B	T_83	CEM 1 - 3
PT-1000 2 fios Classe B	T_52	CEM 1 - 4
PT-1000 2 fios Classe B	T_22	CEM 1 - 5
PT-1000 2 fios Classe B	T_02	CEM 1 - 6
PT-100 3 fios Classe B	T_99	CEM 1 - 7
PT-100 3 fios Classe B	T_08	CEM 1 - 8

Para obter os dados através do software "dEX 2.0", é necessário inicialmente criar um schedule onde os parâmetros principais da sequência de medições a serem realizadas são definidos. Para tal, deve-se aceder ao ícone "+" localizado ao lado de "*SCHEDULES*" e atribuir o nome desejado, bem como o intervalo de tempo entre as medições. Em "*Advanced*", na seção "*Data*", é estabelecido o período durante o qual o *data logger* irá registrar os dados, selecionando a opção "*Minutes worth*" em "*Unit*" e, em seguida, inserindo o número de minutos pretendido em "*Storage size*". Assim, o *schedule* é criado e está pronto para ser programado com os canais de medição necessários.

Conexão das sondas de medição de temperatura

Os sensores de temperatura foram todos conectados ao data logger utilizando uma ligação de três fios, incluindo aqueles que originalmente requeriam uma ligação de dois fios. A conversão da ligação de dois fios para três foi necessária, dado que este data logger apenas consegue medir este tipo de equipamentos com ligações de três e quatro fios. Esta transformação foi feita ligando-se dois fios a um conector da resistência, os quais funcionam como fio comum, enquanto um terceiro fio foi ligado separadamente ao outro terminal da resistência.

Para programar cada um dos sensores de medição de temperatura no software "dEX 2.0", foi criado um novo canal de medição para cada um destes, onde foi selecionada a opção "Temperature". De seguida, escolheu-se o tipo de sensor, neste

caso, um "RTD", e especificou-se o material condutor no seu interior, sendo este "Platinum 385". Para além disso, foi selecionado ainda o tipo de ligação, neste caso "3 fios". De acordo com a tipologia dos sensores, definiu-se em "Advanced", na opção "Resistance Value at 0 degC", o valor em ohms da resistência incorporada nos mesmos à temperatura de 0°C, sendo 100 e 1000 para os sensores PT-100 e PT-1000, respetivamente. Por fim, atribuiu-se a respetiva nomenclatura a cada um dos sensores e, em conformidade com a Tabela A.2, designou-se o canal ao qual os mesmos estavam conectados.

Conexão do módulo emissor de impulsos do contador

A ligação dos módulos emissores de impulsos dos contadores volumétricos de pistão rotativo, foi efetuada nos canais digitais. No software "dEX 2.0", foi criado o canal referente a estes equipamentos. Para isso, acedeu-se ao "+" ao lado do *schedule* criado, anteriormente, e escolheu-se a opção "Pulse Counter". De seguida, foi selecionado o canal digital a que cada um dos módulos foram conectados, conforme consta na Tabela A.2, e atribuiu-se a nomenclatura correspondente a cada um dos contadores.

Conexão do caudalímetro ultrassónico

O caudalímetro ultrassónico, apesar de estar inoperacional, foi na mesma ligado ao data logger através de um canal analógico. Para efetuar esta ligação, foi necessário criar um shunt a esta ligação, uma vez que o caudalímetro não possuía qualquer resistência interna, o que impossibilitava o data logger de calcular o valor da corrente elétrica, através da lei de Ohm. Para associar este canal ao software "dEX 2.0", foi criado um novo canal de medição de corrente elétrica, selecionando a opção "Current". De seguida, escolheu-se o tipo de ligação, ilustrado na Figura 3.17. Na secção "Advanced", em "External Shunt Resistor (Rs)", definiu-se o valor do shunt efetuado, que foi de 100 ohms. Além disso, foi atribuída a devida nomenclatura e designado o canal ao qual estava ligado, em consonância com a Tabela A.2. Importa ressaltar que a saída analógica no data logger é recebida em percentagem e por isso, é necessário, posteriormente, fazer a conversão, através de um fator de escala. Para isso, foi criado um novo canal de cálculo no software, selecionando "Calculation" e, em "Result", adicionou-se essa conversão. Esta, foi realizada com base no valor do sinal emitido pelo caudalímetro ultrassónico, expresso em percentagem em relação aos valores máximos e mínimos definidos no menu integrado do equipamento, e pelo fator de escala correspondente. Para finalizar, atribuiu-se a respetiva nomenclatura a este canal

A.4 Etapas do procedimento experimental

Os ensaios experimentais foram realizados maioritariamente em condições cíclicas. Nestas, onde a descarga e o carregamento são efetuadas logo após o processo inverso estar completo, o primeiro momento do carregamento ou da descarga seguinte não são necessários uma vez que no final de ambos o sistema TES encontra-se à temperatura inicial pretendida. Caso isso não se verifique, realizam-se os primeiros momentos de ambos os processos para colocar o sistema TES nas condições pretendidas.

A.4.1 Processo de carregamento

De acordo com os parâmetros delineados para efetuar o carregamento do sistema TES, foram realizados nove ensaios de carregamento do mesmo. Para estes foi necessário regular os diferentes equipamentos de forma diferente e por isso na Tabela A.3, estão delineadas as configurações de cada um dos componentes que controlam a temperatura e o caudal da circuito primário.

Tabela A.3: Configuração dos componentes para os ensaios de carregamento

Temperatura	Caudal	Bomba de circulação B1	VEHE	VMT
60	7	Máximo	13	7
60	4,5	Mínimo	13	7
60	2	Mínimo	0	7
50	7	Máximo	13	5
50	4,5	Mínimo	13	5
50	2	Mínimo	0	5
40	7	Máximo	13	3
40	4,5	Mínimo	13	3
40	2	Mínimo	0	3

Importa ainda ressaltar que, para atingir um caudal de 2 l/min, foi necessário estrangular uma das válvulas de seccionamento que antecede a entrada do circuito primário no sistema TES.

Primeiro momento

O primeiro momento do processo de carregamento, consiste em colocar o sistema TES à temperatura inicial pretendida. Na Figura A.15, está ilustrada a segmentação da plataforma experimental para esse propósito. As etapas de preparação para a realização deste processo, são as seguintes:

1. Certificar-se que as válvulas de seccionamento 10, 11, 12, 15, 16, 19, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 31 e 32 estão em posição totalmente fechada;
2. Certificar-se que as válvulas de seccionamento 17, 18, 20, 21, 22, 24, 29 e 30 estão em posição totalmente aberta;
3. Certificar-se que a VMT está na posição "MAX";
4. Certificar-se que a VEHE está na posição "99";
5. Colocar o setpoint da BCR em 15°C e colocá-la em modo "*cooling*";
6. Abrir as válvulas 13 e 14;

7. Ativar a BCR.

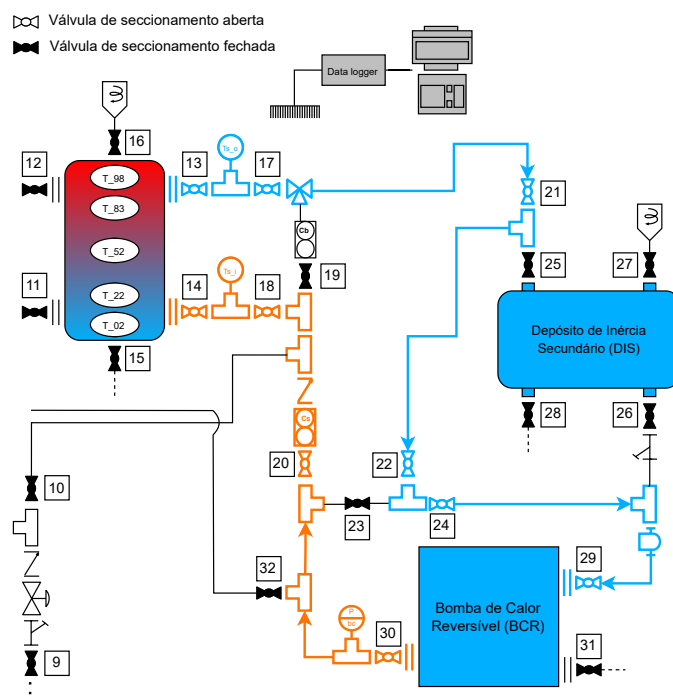


Figura A.15: Percurso do primeiro momento do processo de carregamento

Segundo momento

O segundo momento do processo de carregamento, pode ser realizado em simultâneo com o primeiro momento. Este, consiste no pré-aquecimento do DIP e a plataforma experimental para este propósito é seccionada conforme a Figura A.16. As etapas de preparação para a realização deste processo, são as seguintes:

1. Certificar-se que as válvulas de seccionamento 3, 5.3 e 5.4 estão em posição totalmente fechada;
2. Certificar-se que as válvulas de seccionamento 2.1 e 2.2 estão em posição totalmente aberta;
3. Colocar o setpoint da caldeira em 60°C e ativar as duas resistências;
4. Abrir as válvulas 5.1 e 5.2;
5. Ativar a bomba de circulação B4.

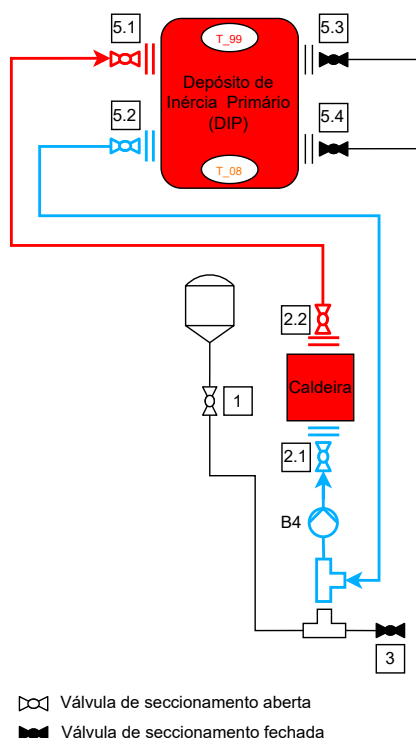


Figura A.16: Percurso do segundo momento do processo de carregamento

Terceiro momento

O terceiro e ultimo momento do processo de carregamento consiste na transferência de energia térmica para o sistema TES. Para isso a plataforma experimental é seccionada conforme consta na Figura A.17. As etapas de preparação para a realização deste processo, são as seguintes:

1. Certificar-se que as válvulas de seccionamento 5.1, 5.2, 4.1, 7, 13, 14, 15, 16 e 32 estão em posição totalmente fechada;
2. Certificar-se que as válvulas de seccionamento 4.2, 5.3, 5.4 e 6 estão em posição totalmente aberta;
3. Colocar o setpoint do chiller em 9°C;
4. Ativar a bomba de circulação B3;
5. Regular a VMT para a posição necessária de acordo com o ensaio a realizar;
6. Regular a VEHE para a posição necessária de acordo com o ensaio a realizar;
7. Regular a bomba de circulação B1 para a velocidade necessária de acordo com o ensaio a realizar;
8. Abrir as válvulas 11 e 12;
9. Ativar a bomba de circulação B1.

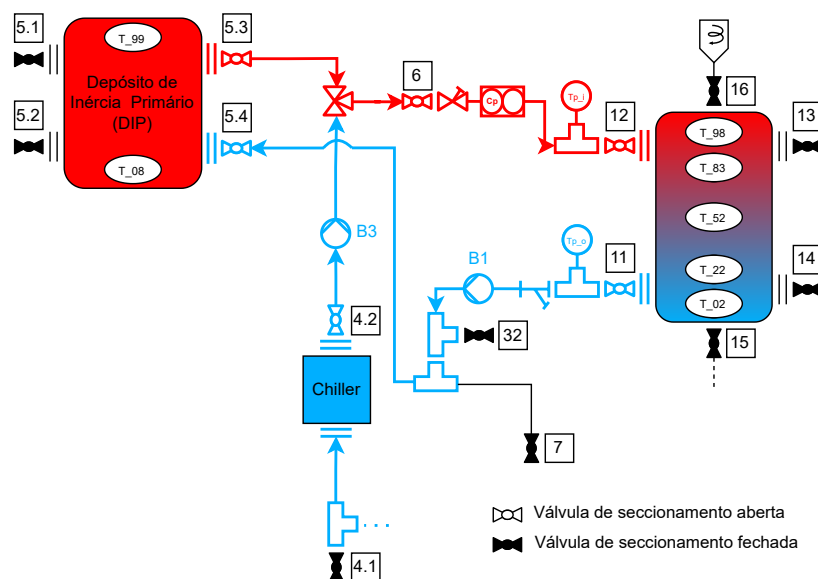


Figura A.17: Percurso do terceiro momento do processo de carregamento

A.4.2 Processo de descarga

De acordo com os parâmetros delineados para efetuar a descarga do sistema TES, foram realizados nove ensaios. Para estes foi necessário regular os diferentes componentes de forma diferente e por isso na Tabela A.3, estão delineadas as configurações de cada um dos que controlam a temperatura e o caudal do circuito secundário.

Tabela A.4: Configuração dos componentes para os ensaios de descarga

Temperatura inicial	Caudal	Bomba de circulação B2	VEHE	Setpoint BCR
60	7	Máximo	99	15
60	4,5	3ª Velocidade	99	15
60	2	Mínimo	5	15
50	7	Máximo	99	15
50	4,5	3ª Velocidade	99	15
50	2	Mínimo	5	15
40	7	Máximo	99	15
40	4,5	3ª Velocidade	99	15
40	2	Mínimo	5	15

Primeiro momento

O primeiro momento do processo de descarga consiste no carregamento do sistema TES, caso este não se encontre nas condições pretendidas. Desta forma para realizar este processo, segue-se as etapas enunciadas anteriormente para o processo de carregamento.

Segundo momento

O segundo momento, consiste em colocar a inércia do DIS à temperatura desejada para efetuar a descarga. Para isso, seccionou-se a plataforma experimental conforme consta na Figura A.18. As etapas de preparação para a realização deste processo, são as seguintes:

1. Certificar-se que as válvulas de seccionamento 10, 18, 22, 23, 24, 27, 28, 31 e 32 estão em posição totalmente fechada;
2. Certificar-se que as válvulas de seccionamento 19, 20, 21, 25, 26, 29 e 30 estão em posição totalmente aberta;
3. Certificar-se que a VMT está na posição "MIN";
4. Certificar-se que a VEHE está na posição "99";
5. Colocar o setpoint da BCR em 15°C e coloca-la em modo "*cooling*";
6. Ativar a BCR e a bomba de circulação B2.

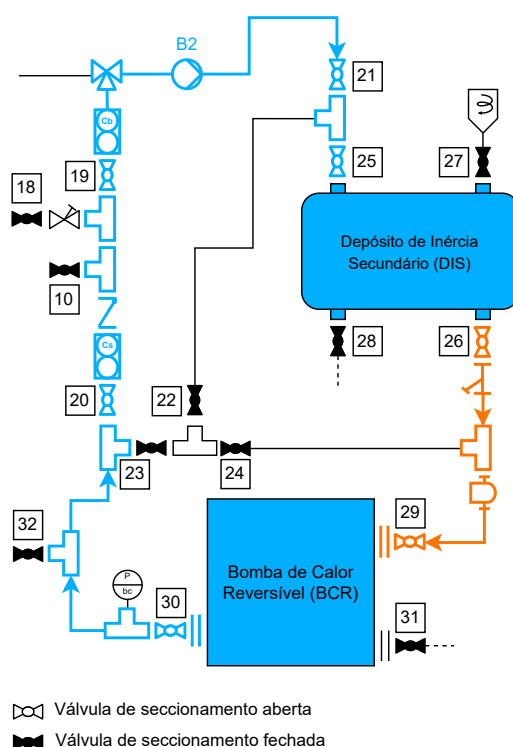


Figura A.18: Percurso do segundo momento do processo de descarga

Terceiro momento

O terceiro e ultimo momento do processo de descarga consiste em simular o consumo da energia térmica armazenada no sistema TES. Para isso, seccionou-se a plataforma experimental conforme consta na Figura A.19. As etapas de preparação para a realização deste processo, são as seguintes:

1. Certificar-se que as válvulas de seccionamento 10, 11, 12, 15, 16, 19, 22, 23, 24, 27, 28, 31 e 32 estão em posição totalmente fechada;
2. Certificar-se que as válvulas de seccionamento 17, 18, 20, 21, 25, 26, 29 e 30 estão em posição totalmente aberta;
3. Certificar-se que a VMT está na posição "MAX";
4. Regular a VEHE para a posição necessária de acordo com o ensaio a realizar;
5. Regular a bomba de circulação B2 para a velocidade necessária de acordo com o ensaio a realizar;
6. Abrir as válvulas 13 e 14;
7. Ativar a bomba de circulação B2.

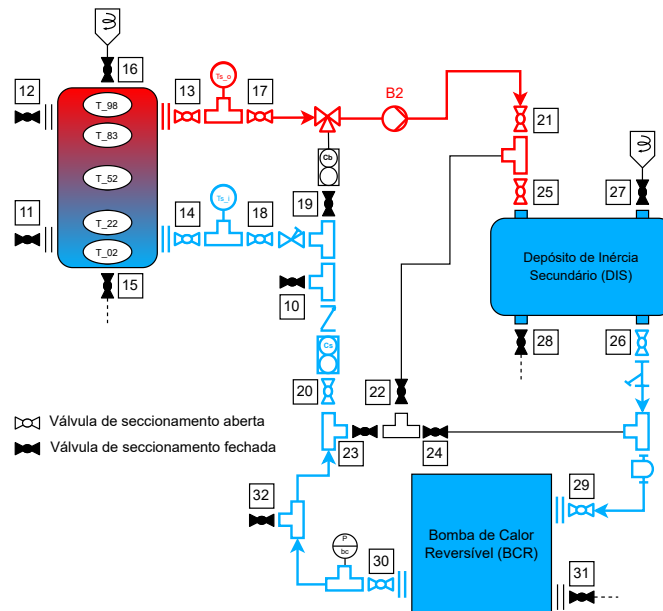


Figura A.19: Percurso do último momento do processo de descarga

A.5 Considerações e cuidados

A utilização da plataforma experimental, requer algumas considerações e cuidados, para garantir o bom funcionamento da mesma, sendo que, os principais aspetos a ter em conta são os seguintes:

- Após a conclusão dos ensaios, deve-se verificar que todos os equipamentos da central energética do LAVAC, assim como a BCR presente no circuito secundário, se encontram devidamente desligados;
- Após a finalização dos ensaios, o circuito de enchimento deve permanecer isolado da restante da plataforma experimental, de modo a prevenir o fornecimento contínuo de água em caso de eventuais fugas;

- Devem ser encerradas as válvulas do sistema TES e as que conectam o DIP à central energética do LAVAC, após o término dos ensaios;
- O *setpoint* da caldeira não deverá exceder os 70°C, uma vez que foram observados danos em outros locais do LAVAC quando este valor foi ultrapassado;
- A bomba B4 deverá permanecer desligada durante os processos de carregamento, para evitar interferências no desempenho do *chiller*;
- Ao utilizar a bomba integrada da BCR durante o processo de descarga, deve-se configura-la em modo de arrefecimento, com um *setpoint* significativamente superior à temperatura da água que irá circular no equipamento, a fim de evitar o seu acionamento durante o processo.

Apêndice B - Complemento da Análise de Dados

B.1 Repositório de análise de dados

O repositório de análise de dados, ilustrado na Figura B.1, foi criado com o propósito de armazenar os programas desenvolvidos para analisar os resultados obtidos durante os ensaios. Este repositório contém os ficheiros *.csv* extraídos do *data logger* após cada ensaio, os ficheiros *.csv* resultantes da análise individual de cada ensaio, os ficheiros *.csv* que documentam a análise da evolução da termoclina para cada ensaio, bem como os ficheiros *.csv* e os códigos elaborados para otimizar o desempenho da plataforma experimental.

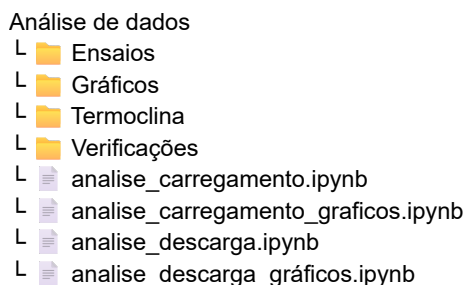


Figura B.1: Estrutura base do repositório de análise de dados

B.1.1 Pasta Ensaio

Na pasta intitulada "Ensaio" encontram-se disponíveis os ficheiros *.csv* de todos os ensaios de carregamento e descarga realizados, seguindo a nomenclatura adotada e descrita na Secção 4.5.1. Estes, foram separados em duas pastas distintas, conforme representado na Figura B.2, de acordo com o processo específico estudado em cada um deles.

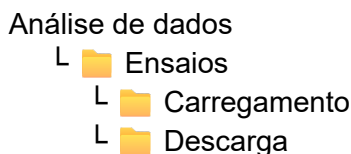


Figura B.2: Estrutura da pasta Ensaio

B.1.2 Pasta Gráficos

Na pasta intitulada "Gráficos" estão disponíveis os ficheiros em formato *.csv* que contêm os resultados das análises individuais dos ensaios de carregamento e descarga realizados. A nomenclatura adotada para esses ficheiros segue um padrão semelhante ao descrito na Secção 4.5.1. Estes ficheiros foram organizados em duas

pastas distintas, tal como representado na Figura B.3, de acordo com o processo específico estudado em cada um deles.

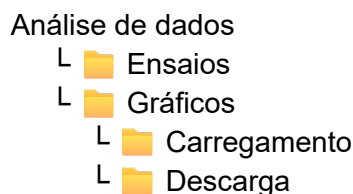


Figura B.3: Estrutura da pasta Gráficos

B.1.3 Pasta Termoclina

A pasta intitulada "Termoclina", representada na Figura B.4, contém os ficheiros em formato *.csv*, com os resultados da evolução da termoclina ao longo de cada ensaio realizado.

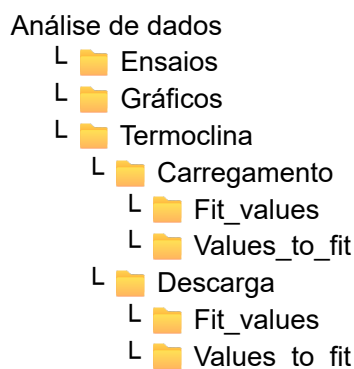


Figura B.4: Estrutura da pasta Termoclina

De acordo com o processo associado a cada ensaio, foram criadas duas pastas principais. Dentro de cada uma destas pastas, encontram-se mais duas subpastas onde os dados são organizados conforme a sua finalidade. O código de análise individual de cada ensaio foi programado para armazenar os resultados da análise da evolução da temperatura adimensional e da altura adimensional na pasta " *Values_to_fit*". Estes resultados são posteriormente processados no *software* " *Origin*", com o objetivo de obter o ajuste das curvas destes valores. Após esse processamento, os dados são guardados na pasta " *Fit_values*" e voltam a ser analisados pelo código de análise individual de cada ensaio.

A nomenclatura de todos os ficheiros guardados nesta pasta foi mantida conforme descrito na Secção 4.5.1, sendo que a criação das pastas mencionadas tem como objetivo distinguir o conteúdo dos dados.

B.1.4 Pasta Verificações

A pasta intitulada "Verificações", representada na Figura B.5, contém uma subpasta onde se encontram armazenados os ficheiros *.csv* referentes aos testes iniciais realizados para avaliar o desempenho da plataforma experimental. A nomenclatura de todos os ficheiros presentes nesta subpasta foi mantida conforme descrito na Secção 4.5.1. Os restantes ficheiros correspondem aos códigos implementados para a análise dos dados contidos nesses ficheiros *.csv*.

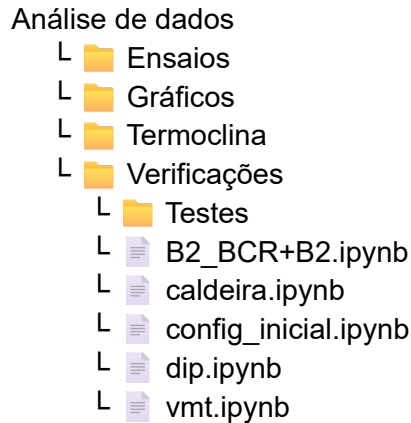


Figura B.5: Estrutura da pasta Verificações

B.1.5 Ficheiros de análise individual dos ensaios

Para a análise individual dos dados obtidos em cada ensaio, foram desenvolvidos dois programas distintos: um para a análise dos ensaios de carregamento (`analise_carregamento.ipynb`) e outro para a análise dos ensaios de descarga (`analise_descarga.ipynb`), ambos presentes no Anexo C.2. A criação destes programas separadamente deve-se principalmente às diferenças nos métodos de cálculo aplicáveis a cada um desses processos. Estes métodos, seguiram rigorosamente o que foi constatado durante a revisão bibliográfica, presente na Secção 2.

B.1.6 Ficheiros de análise conjunta dos ensaios

Para a análise conjunta dos resultados obtidos para cada ensaio, foram também desenvolvidos dois programas distintos: um para a análise dos ensaios de carregamento (`analise_carregamento_graficos.ipynb`) e outro para a análise dos ensaios de descarga (`analise_descarga_graficos.ipynb`), ambos presentes no Anexo C.2. Estes programas foram desenvolvidos de forma autónoma, dado que a análise realizada neste estudo foi conduzida independentemente para cada um dos processos. Esta abordagem facilitou assim a subsequente análise dos resultados finais.

B.2 Ajuste de curva no *Origin*

O *software* Origin foi selecionado para realizar o ajuste de curva da temperatura adimensional em função da altura adimensional do sistema TES.

Primeiramente, importa-se o ficheiro `.csv` a partir da pasta "`Values_to_fit`", localizada na pasta "Carregamento" ou "Descarga" da pasta "Termoclina", correspondente ao ensaio em que se pretende realizar o ajuste. Para tal, deve aceder-se à aba "`Data`" e escolher a opção "`Connect to File`".

Com os dados já importados para o *software*, procede-se à sua representação gráfica. Para isso, utiliza-se a aba "`Plot`" e seleciona-se a opção "`Scatter`". De seguida, atribui-se a coluna referente à altura adimensional do sistema TES ao eixo y , enquanto as colunas referentes às temperaturas adimensionais, registadas pelos cinco sensores de medição de temperatura em cada instante, são atribuídas ao eixo x .

Posteriormente, acede-se à aba "`Analysis`" e escolhe-se a opção "`Nonlinear Curve Fit`". Isto abrirá uma janela onde é possível programar o ajuste da curva conforme

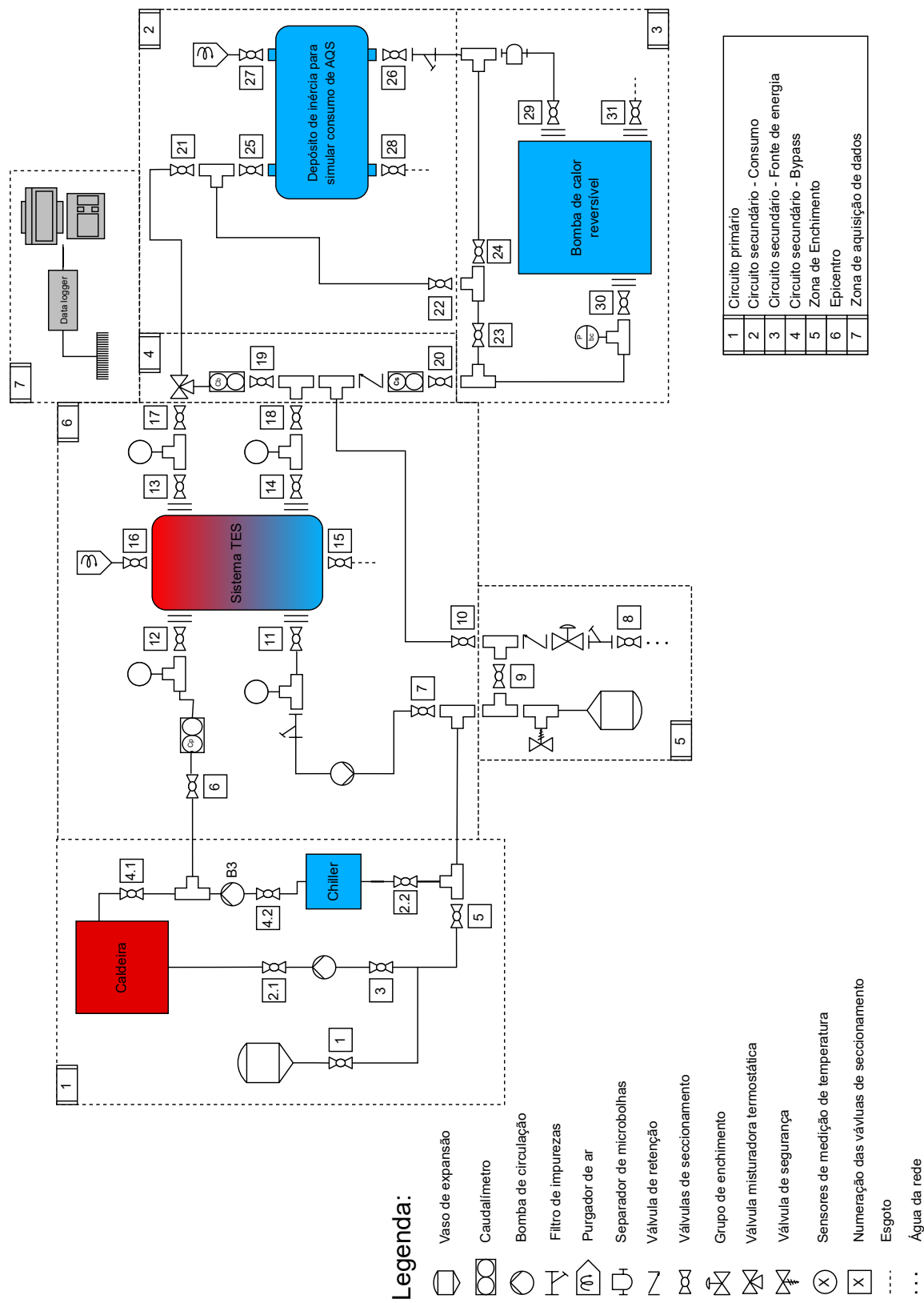
necessário. Neste caso, foi criada uma nova função utilizando a equação de ajuste presente na revisão bibliográfica (Equação 2.17).

Após a criação da função, o *software* retorna à janela inicial, onde se deve verificar que a função selecionada é a que foi recentemente criada. No menu "*Settings*" desta janela, seleciona-se "*Data Selection*" e, em "*Input Data*", escolhe-se a opção "*Add All Plots in Active Page*". De seguida, clica-se em "*Fit*" e aguarda-se que o *software* conclua o ajuste da curva.

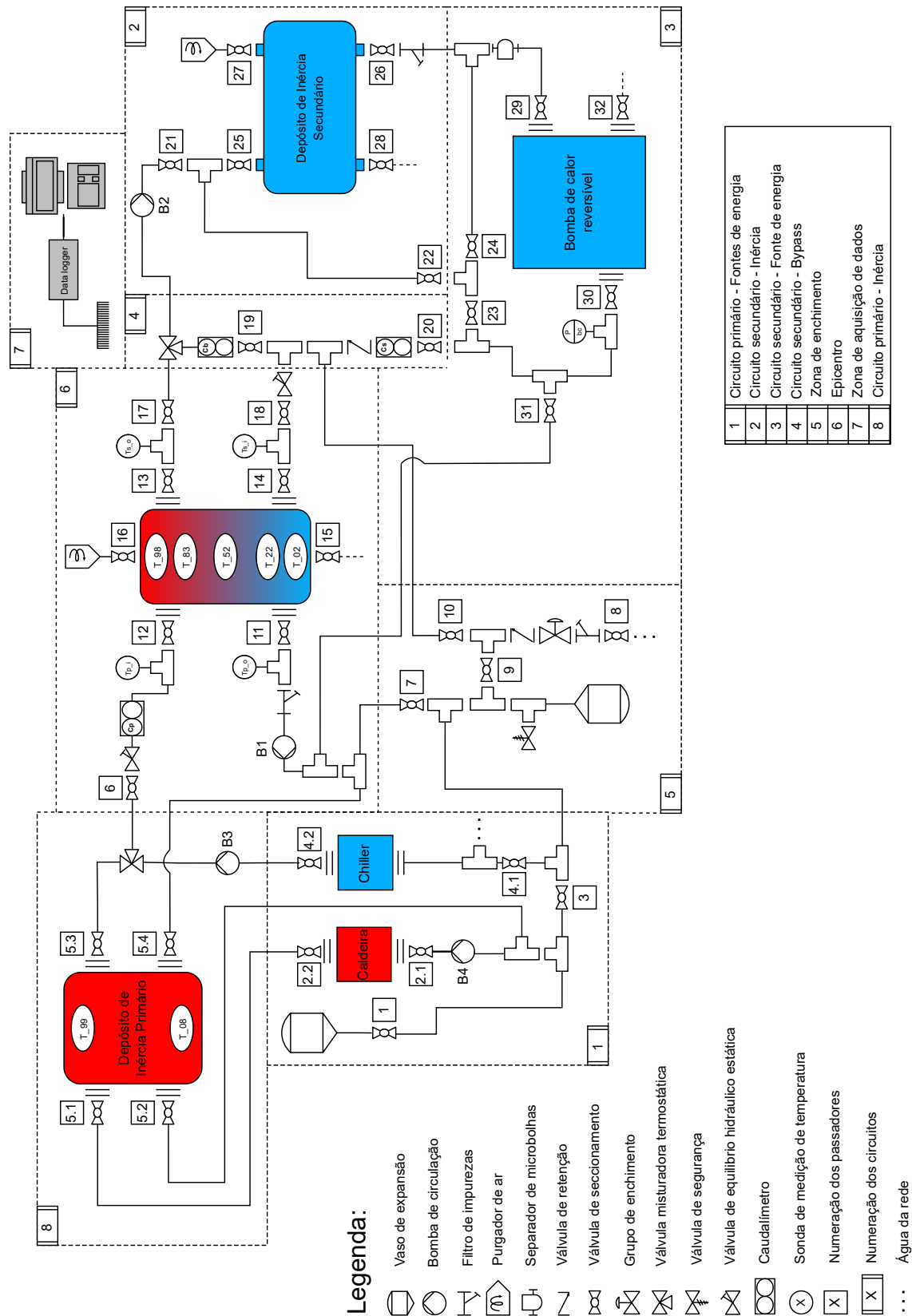
Uma vez terminado o ajuste, o *software* gera um ficheiro *.csv* denominado "*Fit-Function1*" ao lado do ficheiro importado da pasta "*Values_to_fit*". Este ficheiro deve ser posteriormente exportado para a pasta "*Fit_values*" na pasta do processo correspondente ao ensaio para o qual foi realizado o ajuste, para que possa ser analisado novamente no código de análise individual de cada ensaio.

Anexo A - Esquemas de Princípio da Plataforma Experimental

A.1 Esquema inicial



A.2 Esquema final



Anexo B - Fichas Técnicas

B.1 Caldeira elétrica *BAXI CML-15*

PT

Características principais

	CML-10	CML-15
Potência calorífica total	10 kW (8.600 kcal/h)	15 kW (12.900 kcal/h)
Número de escalões de potência	3	3
– Potência calorífica mínima	3,3 kW	5 kW
– Potência calorífica média	6,6 kW	10 kW
– Potência calorífica máxima	10 kW	15 kW
Temperatura máxima de trabalho	100 °C	100 °C
Pressão máxima de trabalho	3 bar	3 bar

Funcionamento

Verificações e operações a realizar no início de cada temporada de aquecimento central, assim como durante o funcionamento da caldeira.

Operações prévias

- Verificar, se as válvulas de ida e de retorno da instalação estão abertas.
- Verificar se a instalação está cheia de água e que a agulha móvel (9) do termohidrómetro (8) está ligeiramente acima da fixa (10). A posição desta última é posicionada pelo instalador (indica a altura manométrica da instalação).

1 bar = 10 m.c.a.

- Se a agulha móvel (9) está a baixo da agulha fixa (10) deverá encher-se a instalação de água.
- Purgar o ar dos emissores e voltar a encher a instalação de água, se necessário.
- Comprovar que o selector de potência (15) se encontra na posição 0.
- Colocar o ponteiro do termostato de regulação (4) do quadro de comando, a temperatura desejada, recomendamos como mínimo 60 °C.
- Caso de disponha de um termostato ambiente, colocar o ponteiro deste, à temperatura desejada.
- Accionar o interruptor de tensão da caldeira.
- Rodar o selector de potência (15) até alcançar a posição I. Com esta operação obtém-se a potência mínima.
- Se se desejar obter a potência média, Rodar o selector de potência (15) até alcançar a posição II.
- Se se desejar obter a potência máxima, rodar o selector de potência (15) até alcançar a posição III.
- Proceder, nos primeiros arranques da instalação, à purga de todos os emissores que a compoñham.
- Verificar que a agulha móvel (9) do termohidrómetro (8), em frio, não está a baixo da agulha fixa (10).
- No caso de se desejar programar os arranques e paragens da caldeira, ver o item “relógio programador”.
- Para poder realizar a paragem da caldeira, é necessário interromper a tensão eléctrica à caldeira, excepto nos casos em que funcione com relógio programador, e rodar o selector de potência (15) até alcançar a posição 0.

Relógio programador

Para que a caldeira funcione por intermédio do relógio programador, deverá ter-se em conta as seguintes operações:

- Ligar o interruptor de tensão da caldeira.
- Colocar o ponteiro do termostato de regulação (4) na temperatura desejada.
- Caso se disponha de termostato ambiente, regulá-lo para a temperatura desejada.
- Accionar o interruptor do relógio programador (6).
- Seleccionar a potência da caldeira, através do selector de potência (15), do modo anteriormente descrito.
- Escolher o ciclo de funcionamento arranque/paragem desejado, para isso, é necessário seguir as seguintes operações:
 - Retirar a protecção plástica do relógio programador (7).
 - Para colocar o relógio na hora desejada, girar o ponteiro (11) no sentido horário até que a hora desejada coincida com o ponto de referência (12).
 - Para escolher as horas de paragem os pinos devem estar colocados em direcção ao centro (13) (Fig. 3) e as de funcionamento em direcção ao exterior (14).

Os intervalos mínimos entre arranques e paragens da caldeira são de 15 minutos.

Limpeza

Devido às características desta caldeira, ter sempre a precaução de a desligar da tensão eléctrica.

Manutenção

Para qualquer manipulação na caldeira, ter sempre o cuidado de cortar a tensão eléctrica.

- Verifique pelo menos anualmente o funcionamento correto de todos os aparelhos de regulação, controle e segurança.
- A modificação ou substituição de cabos e conexões, o quarto termostato tem excepção, deve ser realizada por um serviço técnico para clientes (ATC Baxi Aquecimento)

Recomendações importantes

- No caso de paragens prolongadas da instalação não esvaziar a água da caldeira.
- Só se deve adicionar água quando necessário. Realizar esta operação com a caldeira fria.
- Se existir riscos de congelamento, adicionar à água de instalação um produto anticongelante. Como actuar perante uma série de possíveis anomalias que podem surgir e que o utente pode solucionar.

- O circuito de aquecimento central, não aquece apesar da temperatura da água na caldeira, ser a adequada.

Neste caso verificar que:

- O circulador gira correctamente.
- As torneiras estão abertas e o seu mecanismo interior não está bloqueado.
- Com o selector de potência em qualquer uma das posições I, II ou III, a água da caldeira não aumenta de temperatura.

Neste caso verificar que:

- Os fusíveis são os correctos e o interruptor geral está ligado.
- O interruptor do relógio programador (6) está activado e o relógio programador está fora do horário de aquecimento.
- Existe corrente eléctrica.
- O termostato de regulação (4) da caldeira e o de ambiente estão regulados para a temperatura desejada.
- O termostato de segurança (5) esteja actuando (Indicador luminoso de Anomalia (3) aceso).

- Pressão suficiente da água?: o presostato pode ter agido. Encha até 1,5bar.

Marcação CE

As caldeiras foram concebidas e fabricadas em conformidade com as seguintes diretivas:

- Diretiva de Compatibilidade Eletromagnética 2004/108/CEE
- Diretiva de Baixa Tensão 2006/95/CEE
- Diretiva de Aparelhos sob Pressão 97/23/CEE, artigo 3.3
- Diretiva de Ecodesign 2009/125/CE
- Diretiva de Rotulagem energética 2010/30/CE
- Regulamentos (UE) Nº 811/2013 e Nº813/2013

Desinstalação, Eliminação e Reciclagem

Apenas os técnicos qualificados são autorizados a intervir no aparelho e na instalação.

Antes de desinstalar o aparelho, certifique-se de ter desligado a alimentação elétrica e ter colocado em condições de segurança todas as conexões da caldeira e da instalação.

O aparelho deve ser eliminado corretamente, de acordo com as normativas, leis e regulamentos. O aparelho e os acessórios não devem ser eliminados com os resíduos domésticos. Mais de 90% dos materiais dos aparelhos são recicláveis.

Atenção:

Características e prestações suscetíveis de variação sem aviso prévio.

PARÁMETROS TÉCNICOS ErP
PARAMETROS TÉCNICOS ErP

BAXI - CML			CML-10	CML-15
Caldera de Condensación Caldeira de Condensação			No	Não
Caldera de Baja Temperatura (2) Caldeira de Baixa Temperatura (2)			No	Não
Caldera B1 Caldeira B1			No	Não
Aparato de calefacción de cogeneración Aquecedor de ambiente de cogeração			No	Não
Calefactor combinado Aquecedor combinado			No	Não
Potencia calorífica nominal Potência calorífica nominal	Prated	kW	10	15
Potencia útil al 100% de la potencia nominal y régimen de alta temperatura (1) Potência útil à 100% da potência nominal e em regime de alta temperatura (1)	P ₄	kW	9,9	15
Potencia útil al 30% de la potencia nominal y régimen de baja temperatura (2) Potência útil à 30% da potência nominal e em regime de baixa temperatura (2)	P ₁	kW	-	-
Rendimiento estacional de calefacción Eficiência energética do aquecimento ambiente sazonal	η _s	%	37	37
Rendimiento útil al 100% de la potencia nominal y régimen de alta temperatura (1) Rendimento útil à 100% da potência nominal e em regime de alta temperatura (1)	η ₄	%	39,9	39,9
Rendimiento útil al 30% de la potencia nominal y régimen de baja temperatura (2) Rendimento útil à 30% da potência nominal e em regime de baixa temperatura (2)	η ₁	%	-	-
Consumo de electricidad auxiliar Consumo de electricidade auxiliar				
A plena carga A plena carga	elmax	kW	0,014	0,014
A carga parcial A carga parcial	elmin	kW	-	-
En modo de espera Em modo de vigília	P _{ab}	kW	0,002	0,002
Otros elementos Outros elementos				
Pérdida de calor en modo espera Perdida de calor em modo de espera	P _{stdy}	kW	0,09	0,09
Consumo de electricidad del quemador de encendido Consumo de energia do queimador de ignição	P _{sp}	kW	-	-
Consumo de energía anual Consumo de energia anual	Q _{IE}	GJ	77,8	116,8
Nivel de potencia acústica, interiores (modelo atmosférico / estanco) Nível de potência sonora, interiores (modelo modelo atmosférico / estanque)	L _{WA}	dB	40	40
Emisiones de óxidos de Nitrógeno Emissões de óxidos de azoto	NO _x	mg/ kWh	-	-
Datos de contacto Elementos de contacto			Baxi Calefacción, S.L.U - Salvador Espriu, 9 Hospitalet de Llobregat	

(1) Régimen de alta temperatura significa una temperatura de retorno de 60°C y una temperatura de ida de 80°C
O regime de alta temperatura implica uma temperatura de retorno de 60°C à entrada do aquecedor e uma temperatura de alimentação de 80°C à saída do aquecedor.

(2) Baja temperatura se refiere a una temperatura de retorno de 30°C para las calderas de condensación, 37°C para las calderas de baja temperatura y 50°C para las restantes
O regime de baixa temperatura implica uma temperatura de retorno de 30°C para as caldeiras de condensação, de 37°C para as caldeiras de baixa temperatura e de 50°C para os outros aquecedores

B.2 Chiller RCAT EASY.A.P.M.5.Z1

R407C

EASY_R

COMPONENTS

- Housing and unit base made of RAL9002 epoxy painted galvanized steel sheet.
- Technical compartment, fully enclosed and separate from the air flow, housing compressors, evaporator, controls, electric and regulation devices, to assure working continuity during ordinary service and preventive maintenance operations and to reduce the noise emissions.
- Antifreeze electric heater for technical compartment.
- Scroll type fully-hermetic compressor with built-in electric protection.
- Rubber holders for compressor.
- Stainless steel AISI 316 welded plate evaporator, insulated with closed cells polyurethane.
- Condensing coil with copper tubes, continuous aluminium finning and frame in non-oxidable material.
- Axial fans directly coupled to electric motor and protected by special safety net.
- Condensing control system by stepless condenser fans speed, through electronic regulator directly driven by the proportional signal managed by microprocessor control.
- Differential pressure switch for water flow loss control.
- Rubber antivibration holders, not installed
- Cooling circuit components:
 - Thermostatic expansion valve with external equalizer.
 - Liquid and moisture indicator.
 - High pressure safety switch.
 - Low pressure safety switch.
 - Dryer and anti-acid gas filter.
 - Copper piping for cooling circuit.
 - Flexible piping for pressure switches connection.
 - R407C refrigerant gas and non-freezing oil charge.
- Microprocessor control system with contact for general alarm remotization.
- Temperature sensors on evaporator water inlet/outlet.
- Compressor hour-meter.
- Electric box built-in the unit housing, suitable for outdoor installation, including:
 - Quick opening external panel with protective function.
 - Safety internal panel equipped with microprocessor display and auxiliary controls.
 - Magnetothermal switches.
 - Contactor for compressor.
 - Auxiliary circuit and microprocessor feeding by transformer.

HEAT PUMP COMPONENTS

- Microprocessor controlled automatic defrosting system of the gas/air heat exchanger.
- Cycle inversion valve.
- Liquid receiver.

OPTIONAL ACCESSORIES

- "HYG" hydronic group equipped with water tank and one circulating water pump.
It is not possible to match the HYG hydronic group with the PU pumping group.
- "PU" pumping group equipped with one circulating water pump.
It is not possible to match the PU pumping group with the HYG hydronic group.
- Kit for gas/air heat exchanger protection net.
- LNO kit:
 - Set of the working parameters
 - Soundproof cap on compressor.
- Microprocessor accessories:
 - Remote control kit: remote panel for unit control and alarms signalling.
 - Kit for RS485 serial port.

WARNING

In case the unit is not equipped with "HYG Hydronic group" it is compulsory to install a water filter on evaporator water inlet.

It is not possible to match the "HYG Hydronic Group" and "Pumping Group" optional.

The optional named "Kit" are not factory installed. The installation is at Customer care.

RC GROUP reserves the right to accept the matching of the optional installed on the unit.

EASY_R

R407C

TECHNICAL DATA - EASY.A "R" – Liquid chiller

MODEL		M.5.Z1	M.6.Z1	M.8.Z1	T.8.Z1	M.9.Z1	T.9.Z1	T.11.Z1	T.14.Z1
SIZE		R1	R1	R1	R1	R1	R1	R2	R2
COOLING ONLY (1)									
COOLING CAPACITY	kW	5,2	6,4	7,5	7,5	8,8	8,7	10,9	12,9
Compressor power input	kW	1,5	2,0	2,6	2,5	3,0	2,9	3,5	4,5
Compressor absorbed current	A	7,4	9,5	11,9	4,7	14,0	5,3	6,3	8,3
Evaporator water flow rate	m³/h	0,9	1,1	1,3	1,3	1,5	1,5	1,9	2,2
Evaporator pressure drop	kPa	12	18	22	22	29	29	29	27
COMPRESSOR									
Quantity	n.	scroll	scroll	scroll	scroll	scroll	scroll	scroll	scroll
Max operating current FLA	A	1	1	1	1	1	1	1	1
Starting current LRA	A	10	12	14	5	16	6	7	9
Capacity steps	A	47	61	76	40	100	46	52	66
Capacity steps	n.	1	1	1	1	1	1	1	1
EVAPORATOR									
Water volume	l	n.	1	1	1	1	1	1	1
Max water flow rate	m³/h	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Max water flow rate	m³/h	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,9	3,5
AXIAL FANS									
Total air flow	m³/h	n.	1	1	1	1	1	1	1
Total power input	kW	3250	3250	3250	3250	2950	2950	3450	3450
Max operating current FLA	A	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Max operating current FLA	A	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
REFRIGERANT									
Total refrigerant charge (optional excluded)	kg	R407C	R407C	R407C	R407C	R407C	R407C	R407C	R407C
Gas circuits	n.	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,9	1,9
Gas circuits	n.	1	1	1	1	1	1	1	1
POWER SUPPLY									
Power supply	V/Ph/Hz	230/150	230/150	230/150	400/350+N	230/150	400/350+N	400/350+N	400/350+N
ENERGY EFFICIENCY INDEXES									
EER - Energy Efficiency Ratio	kW/kW	3,15	2,98	2,73	2,83	2,79	2,85	2,99	2,77
IPLV - ARI Standard 550/590		3,87	3,67	3,36	3,48	3,43	3,51	3,68	3,41
ESEER Eurovent Standard		4,38	4,14	3,79	3,93	3,88	3,96	4,16	3,85
SOUND LEVEL - ISO 3744 (2)									
Sound pressure level (Lp)	dB(A)	54,5	54,5	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	60,2
Sound power level (Lw)	dB(A)	68,9	68,9	69,4	69,4	69,4	69,4	69,9	75,1
HYG HYDRONIC GROUP									
With 1 pump - Model		70	70	70	70	70	70	131	131
Water tank volume	l	70	70	70	70	70	70	130	130
PU PUMPING GROUP									
Model		01/R1	01/R1	01/R1	01/R1	01/R1	01/R1	01/R2a	01/R2a
DIMENSIONS									
Length	mm	1048	1048	1048	1048	1048	1048	1305	1305
Width	mm	460	460	460	460	460	460	580	580
Height	mm	836	836	836	836	836	836	900	900
NET WEIGHT	kg	80	80	82	82	83	83	105	108
HYDRAULIC CONNECTIONS									
EVAPORATOR									
Inlet / Outlet – ISO228/1-G M	Ø	1"	1"	1"	1"	1"	1"	1"	1"

1. Referred to chiller water temperature 12/7°C; 35°C ambient temperature.
2. Sound level 1m far in free field conditions.

B.3 BCR *McQuay M5AC 020 CR*

General Data - R410A Heat pump

MODEL			M5AC020CR	M5AC025CR
NOMINAL COOLING CAPACITY		Btu/h	17000	21000
		W	4980	6150
NOMINAL HEATING CAPACITY		Btu/h	21500	25000
		W	6300	7330
NOMINAL TOTAL INPUT POWER	COOLING	W	2550	2760
	HEATING	W	2590	2790
NOMINAL RUNNING CURRENT	COOLING	A	11.9	12.7
	HEATING	A	12.1	12.9
POWER SOURCE		V/Ph/Hz	220-240 / 1 / 50	
REFRIGERANT TYPE			R410A	
CONTROL			CAPILLARY TUBE	
UNIT DIMENSION	HEIGHT	mm/in	800 / 31.5	
	WIDTH	mm/in	1160 / 45.7	
	DEPTH	mm/in	460 / 18.1	
PACKING DIMENSION	HEIGHT	mm/in	958 / 37.7	
	WIDTH	mm/in	1309 / 51.5	
	DEPTH	mm/in	574 / 22.6	
UNIT WEIGHT		kg/lb	125 / 276	165 / 364
SOUND PRESSURE LEVEL		dBA	57	57
EVAPORATOR				
NOMINAL WATER FLOW	COOLING	l/s / m³/hr	0.23 / 0.84	0.28 / 1.00
	HEATING	l/s / m³/hr	0.32 / 1.16	0.35 / 1.25
CONDENSER FAN				
TYPE/DRIVE			PROPELLER / DIRECT	
QUANTITY			1	1
HYDRAULIC KIT				
PUMP	TYPE		HIGH HEAD CIRCULATOR	
	MAX. WATER OPER. PRESSURE		kPa / psi	
	WATER FLOW RATE		1000 / 145	
PIPING	COOLING	l/s / m³/hr	0.23 / 0.84	0.28 / 1.00
	HEATING	l/s / m³/hr	0.32 / 1.16	0.35 / 1.25
	INSTALLATION PIPE CONNECITON		mm/in	
HEAD	COOLING	m	9.7	10.1
	HEATING	m	7.3	9.1
TANK	MATERIAL		MILD STEEL COATED WITH ZINC	
	CAPACITY/VOLUME		L / ft³	
22 / 0.78				
COMPRESSOR				
TYPE			ROTARY	ROTARY
STAGE OF CAPACITY CONTROL (Btu/h)			0 - 100%	0 - 100%
REFRIGERANT				
CHARGING MASS		kg/lb	1.2 / 2.7	1.7 / 3.8

1) ALL SPECIFICATIONS ARE SUBJECTED TO CHANGE BY THE MANUFACTURER WITHOUT PRIOR NOTICE.

2) ALL UNITS ARE BEING TESTED AND COMPLY TO ISO 5151 & ISO13253.

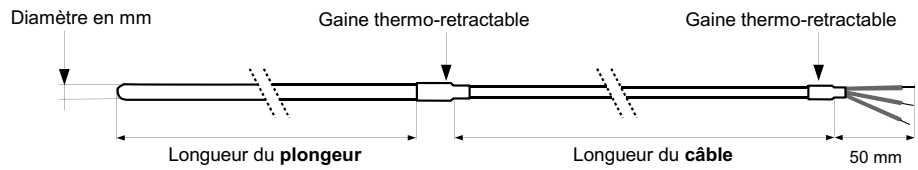
3) NOMINAL COOLING AND HEATING CAPACITY ARE BASED ON THE CONDITIONS BELOW :

a) COOLING - 12°C / 7°C ENTERING / LEAVING EVAPORATOR WATER TEMPERATURE, 35°C AIR AMBIENT TEMPERATURE.

b) HEATING - 40°C / 45°C ENTERING / LEAVING EVAPORATOR WATER TEMPERATURE, 7°C AIR AMBIENT TEMPERATURE.

4) SOUND PRESSURE LEVEL ARE ACCORDING TO JIS B 8615 STANDARD. POSITION OF THE MEASUREMENT POINT IS 1m IN FRONT AND 1m BELOW THE UNIT.

■ **Encombrement de la sonde**



■ **Tolérances* des sondes à résistance PT100 et PT1000.**

Normes IEC 751 (1993), BS 1904 (1984) et DIN 43760 (1980).

Temp °C	Tolérances									
	Classe B		Classe A		1/3 DIN		1/5 DIN		1/10 DIN	
	± °C	± Ohms	± °C	± Ohms	± °C	± Ohms	± °C	± Ohms	± °C	± Ohms
-100	0,8	0,32	0,35	0,14	0,27	0,11	0,16	0,06	0,08	0,03
-50	0,55	0,22	0,25	0,1	0,19	0,08	0,11	0,04	0,06	0,02
0	0,3	0,12	0,15	0,06	0,1	0,04	0,06	0,02	0,03	0,01
100	0,8	0,3	0,35	0,13	0,27	0,1	0,16	0,05	0,08	0,03
200	1,3	0,48	0,55	0,2	0,44	0,16	0,26	0,1	0,13	0,05
300	1,8	0,64	0,75	0,27	0,6	0,21	0,36	0,13	0,18	0,06
400	2,3	0,79	0,95	0,33	0,77	0,26	0,46	0,16	0,23	0,08

Les valeurs de la résistance PT1000 (Ω) sont x10 pour la valeur correspondante en température (°C). Ex. à 0°C pour PT1000 Classe B $\pm 0,3^{\circ}\text{C} \rightarrow \pm 1,2 \Omega$

■ **Tolérances* de la sonde à résistance CTN**

Gamme de température °C	Tolérances °C
De -20°C à 0°C	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$
De 0°C à +70°C	$\pm 0,2^{\circ}\text{C}$
De +70°C à +100°C	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$

*Établies dans des conditions de laboratoires, les exactitudes présentées dans ce document seront maintenues sous réserve d'appliquer les compensations d'étalonnage ou de se ramener à des conditions identiques.

■ **Accessoires (Voir FT associée)**

- Transmetteur sortie 4/20 mA ou 0/10V
- Bride de fixation murales
- Bride inox
- Ecrou 1/4, 1/2 au pas Gaz
- Raccord coulissant
- Olive Téflon ou inox pour raccord coulissant



- Raccord de fixation alimentaire (avec manchon 1/2" G femelle à souder)
- Raccord union inox
- Manchette fileté 1/2 au pas Gaz ou NPT
- Graisse silicone thermo-conductrice
- Certificat d'étalonnage
- Doigt de gant



www.kimo.fr

EXPORT DEPARTMENT
Tel : + 33. 1. 60. 06. 69. 25 - Fax : + 33. 1. 60. 06. 69. 29
e-mail : export@kimo.fr



Distributed by :

DICO FILTRO

Rua Dr. Afonso Cordeiro, 80
4450-001 MATOSINHOS
www.dicofiltro.com
Tel. +351. 229 385 139
Fax. +351. 229 385 140
geral@dicofiltro.com

Ref. FTexport - SF50 - 03/08 B – Sous réserve de modifications techniques des appareils.

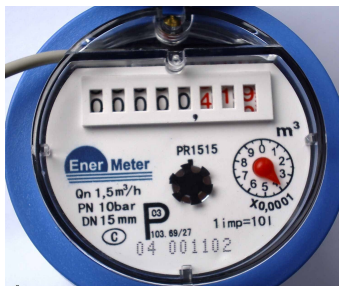
B.5 Contador *Enermeter* PR15



PR15

CONTADORES DE ÁGUA DO TIPO VOLUMÉTRICO

APROVAÇÃO I.P.Q. nº 103.69.03.3.27



CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS

Volumétrico de pistão rotativo
Classe de exactidão C, todas as posições
Transmissão do tipo magnético
Duplo filtro a montante da câmara de medida.

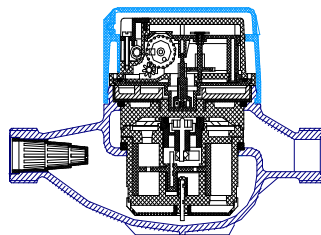
EXACTIDÃO

PR15, cumpre todos os requisitos da norma NP 2468 para contadores de água volumétricos de classe C. O design da câmara de medida permite a utilização numa gama alargada de caudais e um caudal de arranque muito baixo.

FACILIDADE DE LEITURA

O totalizador do tipo extra-seco, garante as seguintes funcionalidades:

- Orientável em 360°
- Excelente contraste e dimensão dos rolos permite uma leitura fácil.



CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS

Modelo		PR1515	PR1520
Calibre	mm	15	20
Características metrologicas	Caudal nominal Qn.	m³/h	1,5
	Caudal máximo Qmax.	m³/h	3
	Exactidão +/- 5%	l/h	15
	Exactidão +/- 2%	l/h	22,5
	Perda de carga a Qmax.	bar	< 1
	Pressão serviço	bar	10
	Caudal de arranque	l/h	5
	Capacidade do totalizador	m³	99 999,999
	Divisão de verificação	l	0,05
	Temperatura máx. serviço	°C	40

DIMENSÕES

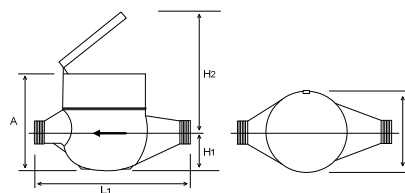
Modelo	PR1515	PR1520
Calibre	15	20
Qn do contador	1,5 m³/h	1,5 m³/h
Roscas	inch	G 3/4"
	mm	20 X 27
L1	mm	165
H1	mm	28
H2	mm	130
A	mm	96
B	mm	84
Peso	kg	1,3



OPÇÕES

Válvula de anti-retorno
Emissor de impulsos
Peças de ligação
Sistema de Telecontagem

EnerMeter – Sistemas de Medição, Lda
Praceta das Agradas, 26
4700-580 CELEIROS BRAGA
Telef. 253 287237 – Fax. 253 287238
www.enermeter.pt



EnerMeter poderá alterar as especificações sem aviso prévio.

Mod. 1100



PR1515 QN1,5 DN15
Contador de Água do tipo Volumétrico
Classe de exactidão "C"

FOLHA TÉCNICA

APLICAÇÃO

- Medição de volumes de água potável fria (temperatura $\leq 30^{\circ}\text{C}$)

TIPO

- Contador de água volumétrico de pistão rotativo.

FABRICANTE

- EnerMeter – Sistemas de Medição, Lda.

METROLOGIA

- Em conformidade com a norma Portuguesa NP 2468;
- De acordo com a recomendação da OIML R49;
- Aprovação de modelo, nº 103.69.03.3.27 realizada em Portugal pelo I.P.Q.;
- Primeira verificação de acordo com Regulamento do Controlo Metrológico dos contadores de água potável fria, aprovado pela Portaria nº 331/87;
- Classe C, todas as posições;
- Caudais de aprovação: Caudal mínimo de 15 l/h; Caudal de transição de 22,5 l/h e Caudal máximo de 3 m³/h;
- Caudais EnerMeter (*): Caudal mínimo inferior a 10 l/h; Caudal de transição inferior a 16 l/h;
- Excelente caudal de arranque, inferior a 5 l/h;
- Divisão de verificação de 0,05 dm³.

(*) Valores médios de produção.

CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS

- O PR1515 é um contador de exactidão de medição muito elevada. Classe C em todas as posições;
- Dinâmica de medição alargada;
- Excelente resistência mecânica para medição de caudais elevados;
- Elevada resistência à pressão: P_{max} = 10 bar, teste de pressão a 16 bar;



PR1515 QN1,5 DN15
Contador de Água do tipo Volumétrico
Classe de exactidão "C"

- Corpo de elevada resistência à corrosão: Latão;
- Baixa perda de carga a Q_{máx} (= 0,9 bar);
- Duplo filtro de partículas: (1) tubuladura de entrada, (2) interior, imediatamente a montante do conjunto de medida;
- Totalizador do tipo extra-seco constituído por 8 rolos (5 para m³ e 3 submúltiplos do m³) e 1 ponteiro. Capacidade de integração de 99.999 m³ c/ retorno a zero após 100.000 m³.
- Totalizador pré-equipado standard para emissor de impulsos;
- Totalizador orientável, rotação de 360°
- Totalizador munido de estrela para facilidades de leitura óptica na aferição. O sensor será posicionado na perpendicular ao eixo do contador;
- O PR1515 está preparado para trabalhar continuamente nas mais duras condições de serviço;
- A integridade do conjunto é garantida por uma selagem por clipagem mecânica, nos termos legais;
- Facilidade de abertura para reparação;
- Transmissão de movimento sistema de medição / totalizador do tipo magnética;
- Disponibilizados com os seguintes comprimentos totais: **165 mm**;
- Tubuladura de entrada e saída: DN15
- Ligações roscadas de entrada e saída: G $\frac{1}{2}$ ";
- Dimensões segundo NP2468: H1+H2= 158 mm; H2=130 mm.

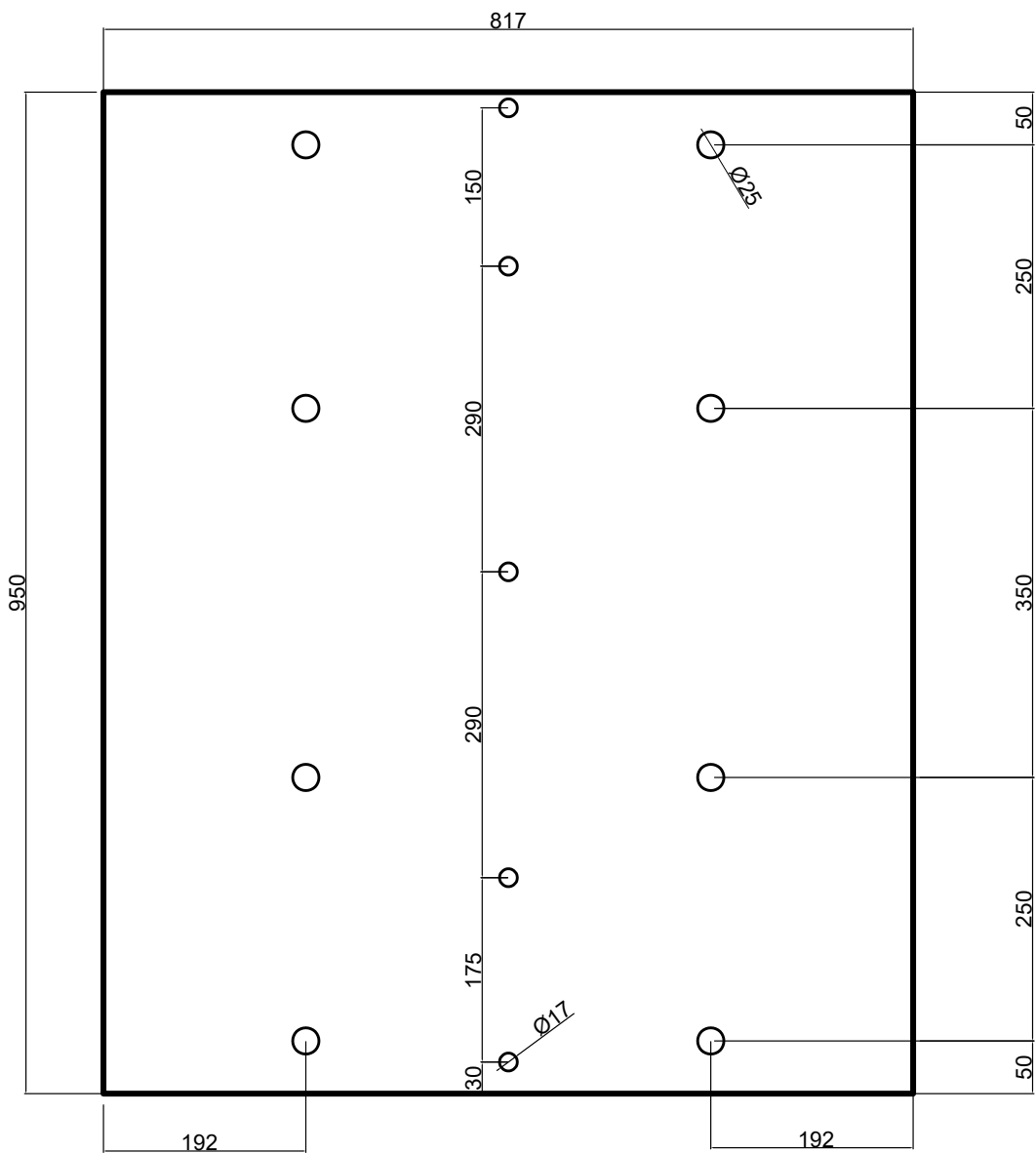
ACESSÓRIOS

- Os contadores PR1515 podem ser fornecidos com os seguintes acessórios:
 - Peças de ligação: par de porcas, par de casquilhos e par de juntas de vedação;
 - Emissores de impulsos;
 - Válvula de anti-retorno na saída;
 - **Sistemas de telecontagem do tipo MBus EN1434-3, Rádio, sistemas de doseamento, ... etc.**

Anexo C - Esquema de Projeto do Sistema TES

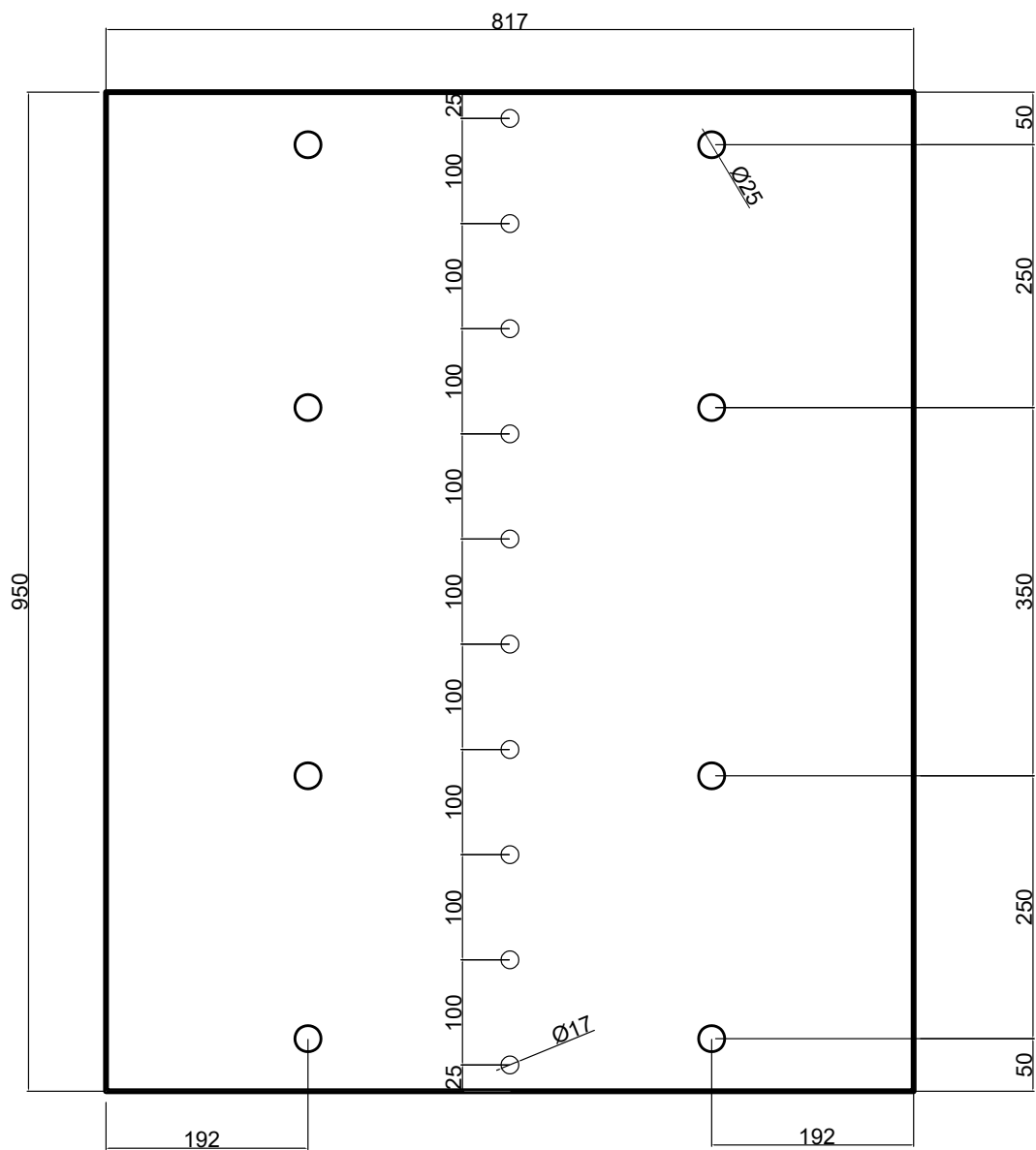
C.1 Esquema atual

TA50R8VM-IPAC (tampo com canal - V2)



C.2 Proposta de melhoria

TA50R8VM-IPAC (tampo com canal - V2)



Anexo D - Códigos de Análise de Dados

D.1 analyse_carregamento.ipynb

```
[1065]: #BIELOTICAS

import numpy as np
import os
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import CoolProp.CoolProp as CP
import tkinter as tk
from tkinter import messagebox
```

```
[ ]: #LER OS DADOS
```

```
#files = [
#    '#Bhasos/C_02_MX60_15_01.csv',
#    '#Bhasos/C_02_MX60_15_02.csv',
#    '#Bhasos/C_02_MX60_15_03.csv',
#    '#Bhasos/C_07_60_15_01.csv',
#    '#Bhasos/C_07_60_15_02.csv',
#    '#Bhasos/C_07_60_15_03.csv',
#    '#Bhasos/C_07_60_15_04.csv',
#    '#Bhasos/C_07_60_15_05.csv',
#    '#Bhasos/C_07_60_15_01.csv',
#    '#Bhasos/C_07_60_15_02.csv',
#    '#Bhasos/C_07_60_15_03.csv',
#    '#Bhasos/C_07_40_15_01.csv',
#    '#Bhasos/C_07_40_15_02.csv',
#    '#Bhasos/C_07_40_15_03.csv',
#    '#Bhasos/C_02_60_15_01.csv',
#    '#Bhasos/C_02_60_15_02.csv',
```

1

```
'Ensaioes/C_02_50_15_01.csv',
#'Ensaioes/C_02_50_15_02.csv',
#'Ensaioes/C_02_40_15_01.csv',
#'Ensaioes/C_02_40_15_02.csv',
```

```
selected_file = None
data = None
```

```
def on_select(event):
```

```
global root, selected_file, data
```

try:

```
selected_file = files[selected_index]
```

```
{selected_file}")
```

```
data = pd.read_csv(selected_file)
```

```
root.destroy()
```

except IndexError:

```
messagebox.showwarning("Aviso", "Nenhum ensaio selecionado.")
```

except Exception as e:

```
messagebox.showerror("Erro", f"Ocorreu um erro ao ler o ensaio: {e}")
```

```
def create_gui():
```

global listbox, root

$$\text{ot} = \text{tk}.\text{Tk}()$$

pot.title("Selezione um ensaio")

```
listbox = tk.Listbox(root, width=50, height=15)
```

```
listbox.pack(pady=10, padx=10, fill=tk.BOTH, expand=True)
```

```

r file in files:

```

```
listbox.insert(tk.END, file)
```

```
listbox.bind('<<ListBoxSelect>>', on_select)
```

```
root.mainloop()
```

```
create_gui()
```

```
if selected_file:
```

```
print(f"Ensayo seleccionado: {selected_file}")
```

• •

##

2

```
[ ]: #VARIABLES
#-----
#INSTANTES

data['Timestamp'] = pd.to_datetime(data['Timestamp'])

first_istant = data['Timestamp'].iloc[0]
data['Seconds'] = (data['Timestamp'] - first_istant).dt.total_seconds()
instant = data['Seconds']

#-----
#CONSTANTES

g = 9.81
H = 0.96
D = 0.26
W = 0.0254

#-----
#TEMPERATURAS

Tp_i = data['Tp_in (degC)'].values
Tp_i_K = [T + 273.15 for T in Tp_i]
Tp_i_max = max(Tp_i)
Tp_i_min = min(Tp_i)
Tp_i_adm = []

for i in range(len(instant)):
    Tp_i_adm_values = (Tp_i[i] - Tp_i_min) / (Tp_i_max - Tp_i_min)
    Tp_i_adm.append(Tp_i_adm_values)

cp_Tp_i = [CP.PropSI('C', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in Tp_i_K] #J/kg.K
rho_Tp_i = [CP.PropSI('D', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in Tp_i_K] #kg/m^3
k_Tp_i = [CP.PropSI('L', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in Tp_i_K] #W/m.K
alpha_Tp_i = [k_Tp_i / (rho_Tp_i * cp_Tp_i) for k_Tp_i, rho_Tp_i, cp_Tp_i in
               zip(k_Tp_i, rho_Tp_i, cp_Tp_i)] #m^2/s
beta_Tp_i = CP.PropSI('isobaric_expansion_coefficient', 'T', Tp_i_K, 'Q', 0,
                       'Water') #1/K

Tp_o = data['Tp_out (degC)'].values
Tp_o_K = [T + 273.15 for T in Tp_o]
Tp_o_max = max(Tp_o)
Tp_o_min = min(Tp_o)
Tp_o_adm = []

for i in range(len(instant)):
```

3

```
Tp_o_adm_values = (Tp_o[i] - Tp_o_min) / (Tp_o_max - Tp_o_min)
Tp_o_adm.append(Tp_o_adm_values)

cp_Tp_o = [CP.PropSI('C', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in Tp_o_K] #J/kg.K
rho_Tp_o = [CP.PropSI('D', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in Tp_o_K] #kg/m^3
k_Tp_o = [CP.PropSI('L', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in Tp_o_K] #W/m.K
alpha_Tp_o = [k_Tp_o / (rho_Tp_o * cp_Tp_o) for k_Tp_o, rho_Tp_o, cp_Tp_o in
               zip(k_Tp_o, rho_Tp_o, cp_Tp_o)] #m^2/s
beta_Tp_o = CP.PropSI('isobaric_expansion_coefficient', 'T', Tp_o_K, 'Q', 0,
                       'Water') #1/K

Ts_i = data['Ts_in (degC)'].values
Ts_i_K = [T + 273.15 for T in Ts_i]
Ts_i_max = max(Ts_i)
Ts_i_min = min(Ts_i)
Ts_i_adm = []

for i in range(len(instant)):
    Ts_i_adm_values = (Ts_i[i] - Ts_i_min) / (Ts_i_max - Ts_i_min)
    Ts_i_adm.append(Ts_i_adm_values)

cp_Ts_i = [CP.PropSI('C', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in Ts_i_K] #J/kg.K
rho_Ts_i = [CP.PropSI('D', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in Ts_i_K] #kg/m^3
k_Ts_i = [CP.PropSI('L', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in Ts_i_K] #W/m.K
alpha_Ts_i = [k_Ts_i / (rho_Ts_i * cp_Ts_i) for k_Ts_i, rho_Ts_i, cp_Ts_i in
               zip(k_Ts_i, rho_Ts_i, cp_Ts_i)] #m^2/s
beta_Ts_i = CP.PropSI('isobaric_expansion_coefficient', 'T', Ts_i_K, 'Q', 0,
                       'Water') #1/K

Ts_o = data['Ts_out (degC)'].values
Ts_o_K = [T + 273.15 for T in Ts_o]
Ts_o_max = max(Ts_o)
Ts_o_min = min(Ts_o)
Ts_o_adm = []

for i in range(len(instant)):
    Ts_o_adm_values = (Ts_o[i] - Ts_o_min) / (Ts_o_max - Ts_o_min)
    Ts_o_adm.append(Ts_o_adm_values)

cp_Ts_o = [CP.PropSI('C', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in Ts_o_K] #J/kg.K
rho_Ts_o = [CP.PropSI('D', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in Ts_o_K] #kg/m^3
k_Ts_o = [CP.PropSI('L', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in Ts_o_K] #W/m.K
alpha_Ts_o = [k_Ts_o / (rho_Ts_o * cp_Ts_o) for k_Ts_o, rho_Ts_o, cp_Ts_o in
               zip(k_Ts_o, rho_Ts_o, cp_Ts_o)] #m^2/s
beta_Ts_o = CP.PropSI('isobaric_expansion_coefficient', 'T', Ts_o_K, 'Q', 0,
                       'Water') #1/K

T_98 = data['T_top (degC)'].values
T_98_K = [T + 273.15 for T in T_98]
T_98_max = max(T_98)
T_98_min = min(T_98)
```

4

```

T_98_adm = []
for i in range(len(instant)):
    T_98_adm_values = (T_98[i] - T_98_min) / (T_98_max - T_98_min)
    T_98_adm.append(T_98_adm_values)
    cp.T_98 = [CP.PropSI('C', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in T_98_K] #J/kg.K
    rho.T_98 = [CP.PropSI('D', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in T_98_K] #kg/m^3
    k.T_98 = [CP.PropSI('L', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in T_98_K] #W/m.K
    alpha.T_98 = [k.T_98 / (rho.T_98 * cp.T_98) for k,T_98, rho,T_98, cp,T_98 in zip(k,T_98, rho,T_98, cp,T_98)] #m^2/s
    beta.T_98 = CP.PropSI('isobaric_expansion_coefficient', 'T', T_98_K, 'Q', 0,
        'Water') #1/K
    T_83 = data['T_midtop (degC)'].values
    T_83_K = [T + 273.15 for T in T_83]
    T_83_max = max(T_83)
    T_83_min = min(T_83)
    T_83_adm = []
    for i in range(len(instant)):
        T_83_adm_values = (T_83[i] - T_83_min) / (T_83_max - T_83_min)
        T_83_adm.append(T_83_adm_values)
        cp.T_83 = [CP.PropSI('C', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in T_83_K] #J/kg.K
        rho.T_83 = [CP.PropSI('D', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in T_83_K] #kg/m^3
        k.T_83 = [CP.PropSI('L', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in T_83_K] #W/m.K
        alpha.T_83 = [k.T_83 / (rho.T_83 * cp.T_83) for k,T_83, rho,T_83, cp,T_83 in zip(k,T_83, rho,T_83, cp,T_83)] #m^2/s
        beta.T_83 = CP.PropSI('isobaric_expansion_coefficient', 'T', T_83_K, 'Q', 0,
            'Water') #1/K
    T_52 = data['T_mid (degC)'].values
    T_52_K = [T + 273.15 for T in T_52]
    T_52_max = max(T_52)
    T_52_min = min(T_52)
    T_52_adm = []
    for i in range(len(instant)):
        T_52_adm_values = (T_52[i] - T_52_min) / (T_52_max - T_52_min)
        T_52_adm.append(T_52_adm_values)
        cp.T_52 = [CP.PropSI('C', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in T_52_K] #J/kg.K
        rho.T_52 = [CP.PropSI('D', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in T_52_K] #kg/m^3
        k.T_52 = [CP.PropSI('L', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in T_52_K] #W/m.K
        alpha.T_52 = [k.T_52 / (rho.T_52 * cp.T_52) for k,T_52, rho,T_52, cp,T_52 in zip(k,T_52, rho,T_52, cp,T_52)] #m^2/s
        beta.T_52 = CP.PropSI('isobaric_expansion_coefficient', 'T', T_52_K, 'Q', 0,
            'Water') #1/K
    T_22 = data['T_midbottom (degC)'].values
    T_22_K = [T + 273.15 for T in T_22]

```

5

```

T_22_max = max(T_22)
T_22_min = min(T_22)
T_22_adm = []
for i in range(len(instant)):
    T_22_adm_values = (T_22[i] - T_22_min) / (T_22_max - T_22_min)
    T_22_adm.append(T_22_adm_values)
    cp.T_22 = [CP.PropSI('C', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in T_22_K] #J/kg.K
    rho.T_22 = [CP.PropSI('D', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in T_22_K] #kg/m^3
    k.T_22 = [CP.PropSI('L', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in T_22_K] #W/m.K
    alpha.T_22 = [k.T_22 / (rho.T_22 * cp.T_22) for k,T_22, rho,T_22, cp,T_22 in zip(k,T_22, rho,T_22, cp,T_22)] #m^2/s
    beta.T_22 = CP.PropSI('isobaric_expansion_coefficient', 'T', T_22_K, 'Q', 0,
        'Water') #1/K
    T_02 = data['T_bottom (degC)'].values
    T_02_K = [T + 273.15 for T in T_02]
    T_02_max = max(T_02)
    T_02_min = min(T_02)
    T_02_adm = []
    for i in range(len(instant)):
        T_02_adm_values = (T_02[i] - T_02_min) / (T_02_max - T_02_min)
        T_02_adm.append(T_02_adm_values)
        cp.T_02 = [CP.PropSI('C', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in T_02_K] #J/kg.K
        rho.T_02 = [CP.PropSI('D', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in T_02_K] #kg/m^3
        k.T_02 = [CP.PropSI('L', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in T_02_K] #W/m.K
        alpha.T_02 = [k.T_02 / (rho.T_02 * cp.T_02) for k,T_02, rho,T_02, cp,T_02 in zip(k,T_02, rho,T_02, cp,T_02)] #m^2/s
        beta.T_02 = CP.PropSI('isobaric_expansion_coefficient', 'T', T_02_K, 'Q', 0,
            'Water') #1/K
    T_41 = data['T_retorno (degC)'].values
    T_08 = data['T_retorno_bottom (degC)'].values
    T_99 = data['T_caldeira (degC)'].values
    T_tes_K = [T_02_K, T_22_K, T_52_K, T_83_K, T_98_K]
    T_tes = [T_02, T_22, T_52, T_83, T_98]
    T_tes_adm = [T_02_adm, T_22_adm, T_52_adm, T_83_adm, T_98_adm]

#-----
#CAUDALS
Cp = data['C_prim'].values
Cs = data['C_sec'].values
Cb = data['C_bypass'].values
Cu = data['C_ultra'].values

```

6


```
#-----
#VOLUMES DE CONTROLO

y_98 = 0.936
y_camada_98 = 0.04
y_centro_98 = 0.93
v_98 = (np.pi * ((D**2)/4) * y_camada_98)
m_98 = np.mean(rho_T_98) * v_98

y_83 = 0.785
y_camada_83 = 0.32
y_centro_83 = 0.75
v_83 = (np.pi * ((D**2)/4) * y_camada_83)
m_83 = np.mean(rho_T_83) * v_83

y_52 = 0.495
y_camada_52 = 0.23
y_centro_52 = 0.475
v_52 = (np.pi * ((D**2)/4) * y_camada_52)
m_52 = np.mean(rho_T_83) * v_52

y_22 = 0.205
y_camada_22 = y_camada_83
y_centro_22 = 0.2
v_22 = v_83
m_22 = m_83

y_02 = 0.02
y_camada_02 = y_camada_98
y_centro_02 = 0.02
v_02 = v_98
m_02 = m_98

y_tes = [y_02, y_22, y_52, y_83, y_98]
y_camadas = [y_camada_02, y_camada_22, y_camada_52, y_camada_83, y_camada_98]
y_centro = [y_centro_02, y_centro_22, y_centro_52, y_centro_83, y_centro_98]
y_tes_adm = [round(y_02/H, 2), round(y_22/H, 2), round(y_52/H, 2), round(y_83/
    H, 2), round(y_98/H, 2)]

v_total = np.pi * ((D**2 / 4) * H
v_tes = [v_02, v_22, v_52, v_83, v_98]

m_total = m_98 + m_83 + m_52 + m_22 + m_02
m_tes = [m_02, m_22, m_52, m_83, m_98]

#-----
```

```
[ ]: #EVOLUÇÃO DAS TEMPERATURAS NO DEPÓSITO

plt.figure()
plt.plot(instant, T_98, color="red", linestyle='-', marker='o', markevery=20,
    label='T_98')
plt.plot(instant, T_83, color="orange", linestyle='-', marker='s',
    markevery=20, label='T_83')
plt.plot(instant, T_52, color="gold", linestyle='-', marker='^', markevery=20,
    label='T_52')
plt.plot(instant, T_22, color="blue", linestyle='-', marker='x', markevery=20,
    label='T_22')
plt.plot(instant, T_02, color="navy", linestyle='-', marker='d', markevery=20,
    label='T_02')
plt.xlabel('Tempo [s]')
plt.ylabel('Temperatura [°C]')
plt.ylim([0, 70])
plt.legend()
plt.grid()

plt.figure()
plt.plot(instant, Tp_i, color="red", linestyle='-', marker='o', markevery=20,
    label='Tp_i')
plt.plot(instant, Tp_o, color="orange", linestyle='-', marker='s',
    markevery=20, label='Tp_o')
plt.xlabel('Tempo [s]')
plt.ylabel('Temperatura [°C]')
plt.ylim([0, 70])
plt.legend()
plt.grid()

plt.figure()
plt.plot(instant, T_99, color="red", linestyle='-', marker='o', markevery=20,
    label='T_99')
plt.plot(instant, T_4i, color="orange", linestyle='-', marker='s',
    markevery=20, label='T_4i')
plt.plot(instant, T_08, color="gold", linestyle='-', marker='^', markevery=20,
    label='T_08')
plt.xlabel('Tempo [s]')
plt.ylabel('Temperatura [°C]')
plt.ylim([0, 80])
plt.legend()
plt.grid()

plt.show()
```

```
[1069]: #CAUDAL
#-----
#CIRCUITO PRIMARIO
Cp_values = []
momentos_Cp = []
for i in range(1, len(instant)):
    if Cp[i] != Cp[i-1]:
        momentos_Cp.append(instant[i])

diferenca_Cp = []
for i in range(1, len(momentos_Cp)):
    diff_Cp = momentos_Cp[i] - momentos_Cp[i-1]
    diferenca_Cp.append(diff_Cp)

for i in range(len(diferenca_Cp)):
    caudal_Cp = (10 * 60) / diferenca_Cp[i]
    Cp_values.append(caudal_Cp)
Cp_inst_values = [0] * len(instant)
current_index = 0

start_index = None
for i in range(1, len(instant)):
    if instant[i] in momentos_Cp:
        start_index = i
        break

if start_index is not None:
    for i in range(start_index, len(instant)):
        if current_index < len(momentos_Cp) and instant[i] >= L
            -momentos_Cp[current_index]:
            current_index += 1
        if current_index < len(Cp_values):
            Cp_inst_values[i] = Cp_values[current_index]
        else:
            Cp_inst_values[i] = Cp_values[-1]

valid_values = Cp_inst_values[start_index:] if start_index is not None else []
Cp_med = np.mean(Cp_values)
Cp_var = np.var(Cp_values)
#-----
```

9

```
[ ]: #EVOLUÇÃO DOS CAUDAIS
plt.figure()
plt.plot(instant, Cp_inst_values, color='red', label='Cp')
plt.plot(momentos_Cp, [Cp_inst_values[instant.to_list().index(momento)] for L
    -momento in momentos_Cp], color='red', linestyle='-', marker='.',)
plt.xlabel('Tempo [s]')
plt.ylabel('Caudal [l/min]')
plt.legend()
plt.title('Instrumentos de medição')
plt.ylim(-1, 20)
plt.grid()

plt.show()
print(f'Caudal médio = {round(Cp_med,3)} e Variância = {round(Cp_var,3)}')
```

```
[ ]: #ESPESSURA DA TERNOCULINA
#-----
T_instant = []
intervalos = int((len(instant) / 60))
numero_intervalos = int(len(instant)/intervalos)

for i in range(0, len(T_tes_adm[0]), intervalos):
    T_instant_values = []
    for T in T_tes_adm:
        if i < len(T):
            T_instant_values.append(T[i])
    T_instant.append(T_instant_values)
#-----
#GUIAR DADOS NO FICHEIRO PARA ORIGIN
df_T = pd.DataFrame(T_instant)
df_T = df_T.T
df_Y = pd.DataFrame(Y_tes)

df = pd.concat([df_Y, df_T], axis=1)

file_name = os.path.basename(selected_file)
new_path = 'Termoclinas/Catregamento/Values_to_fit'
curva_T = os.path.join(new_path, file_name)

df.to_csv(curva_T, header=False, index=False)
```

10

```
if os.path.exists(curva_T):
    print("Novo arquivo foi guardado com sucesso!")
else:
    print(f"0 arquivo {curva_T} não foi guardado.")

#-----

#LER OS DADOS DO ORIGIN
file_name = os.path.basename(selected_file)
new_path = 'Termoclina/Carregamento/fit_values/'
curva_T_fit = os.path.join(new_path, file_name)

if os.path.exists(curva_T_fit):
    print("Novo arquivo lido com sucesso!")
else:
    print(f"0 arquivo {curva_T_fit} não existe.")

T_fit_values = pd.read_csv(curva_T_fit)

colunas = [col for col in T_fit_values.columns if col.
            .startswith('Thermoclina_thickness')]
T_fit = T_fit_values[colunas]
y_fit = np.linspace(0, 1, len(T_fit))

#-----

T_fit_instant = [T_fit[col].tolist() for col in T_fit.columns]

def find_index_nearest(arr, value):
    arr = np.array(arr)
    idx = np.abs(arr - value).argmin()
    return idx

def func_espessura_termoclina(T_fit_instant):
    T_15 = 0.15
    T_85 = 0.85

    indice_T_15 = find_index_nearest(T_fit_instant, T_15)
    indice_T_85 = find_index_nearest(T_fit_instant, T_85)

    y_15 = y_fit[indice_T_15]
    y_85 = y_fit[indice_T_85]

    espessura_termoclina = abs(y_15 - y_85)

    if espessura_termoclina > 0.5:
```

```
    espessura_termoclina = 0

    return espessura_termoclina

espessura_termoclina = [0] + [func_espessura_termoclina(T_fit_instant[i]) for i in
                              range(len(T_fit_instant))]

step = (len(instant) - 1) * 5 / (len(espessura_termoclina) - 1)
intervalos_termoclina = [i * step for i in range(len(espessura_termoclina))]
intervalos_termoclina[-1] = (len(instant) - 1) * 5

#-----

[ ]: #REPRESENTAÇÃO DA ESPESSURA DA TERMOCCLINA

markers = ['o', 's', 't', 'v', '<', '>', 'p', '*', 'h', 'H', '+', 'x',
           'D', 'd', 'l', 'L', 'i', 'I', '1', '2', '3', '4']

plt.figure()
for i in range(numero_intervalos):
    marker_type = markers[i % len(markers)]
    plt.plot(T_fit_instant[i], y_res_adm, marker=marker_type, linestyle='-', u
            ,label=f'{{intervalos + 1*intervalos*5}} Segundos')
    plt.xlabel('Temperatura adimensional [-]')
    plt.ylabel('Altura adimensional [-]')
    plt.title('Evolução das camadas do sistema TES')
    plt.grid()

plt.figure()
for i in range(len(T_instant)):
    marker_type = markers[i % len(markers)]
    plt.plot(T_fit_loc[i], y_fit, linestyle='--', label=f'{{intervalos + 1*intervalos*5}} Segundos')
    plt.xlabel('Temperatura adimensional [-]')
    plt.ylabel('Altura adimensional [-]')
    plt.ylim([-0.1, 1.1])
    plt.grid()

plt.figure()
plt.plot(intervalos_termoclina, espessura_termoclina, color='red', u
        ,linestyle='--')
plt.xlabel('Instantes [s]')
plt.ylabel('Espessura da termoclina [-]')
plt.ylim([-0.1, 1.1])
plt.grid()
```

```
[1073]: #EFICIENCIAS
#-----
#EFICIENCIA DO PROCESSO DE CARGA (ENERGIA)

def func_rend_ch_energy(instant, Cp_med, rho_Tp_i, cp_Tp_i, Tp_i, rho_Tp_o,
    cp_Tp_o, Tp_o, rho_T_02, cp_T_02, T_02):

    def num_rend_ch(instant):
        return (Cp_med * 10**3) / 60) * ((rho_Tp_i[instant] *
    cp_Tp_i[instant] * Tp_i[instant]) - (rho_Tp_o[instant] * cp_Tp_o[instant] *
    Tp_o[instant]))

    def den_rend_ch(instant):
        return (Cp_med * 10**3) / 60) * ((rho_Tp_i[instant] *
    cp_Tp_i[instant] * Tp_i[instant]) - (rho_T_02[0] * cp_T_02[0] * T_02[0]))

    int_num_rend_ch = 0
    int_den_rend_ch = 0
    rend_ch = []

    for i in range(len(instant)-1):
        dt = instant[i+1] - instant[i]
        int_num_rend_ch += 0.5 * (num_rend_ch(i) + num_rend_ch(i+1)) * dt
        int_den_rend_ch += 0.5 * (den_rend_ch(i) + den_rend_ch(i+1)) * dt
        rend_ch.append(int_num_rend_ch / int_den_rend_ch)

    return rend_ch

rend_ch_energy = func_rend_ch_energy(instant, Cp_med, rho_Tp_i, cp_Tp_i, Tp_i,
    rho_Tp_o, cp_Tp_o, rho_T_02, cp_T_02, T_02)

#-----
#EFICIENCIA DO PROCESSO DE CARGA (TEMPERATURA)

def func_rend_ch_temp(instant, Tp_i, Tp_o, T_02):

    def num_rend_ch(instant):
        return Tp_i[instant] - Tp_o[instant]

    def den_rend_ch(instant):
        return Tp_i[instant] - T_02[0]

    int_num_rend_ch = 0
    int_den_rend_ch = 0
```

13

```
[ ]: rend_ch = []

    for i in range(len(instant)-1):
        dt = instant[i+1] - instant[i]
        int_num_rend_ch += 0.5 * (num_rend_ch(i) + num_rend_ch(i+1)) * dt
        int_den_rend_ch += 0.5 * (den_rend_ch(i) + den_rend_ch(i+1)) * dt
        rend_ch.append(int_num_rend_ch / int_den_rend_ch)

    return rend_ch

rend_ch_temp = func_rend_ch_temp(instant, Tp_i, Tp_o, T_02)

#-----
[ ]: #VOLUME DAS EFICIENCIAS

plt.figure()
plt.plot(instant[:-1], rend_ch_energy)
plt.xlabel('instant [s]')
plt.ylabel('$\eta_{\eta}$')
plt.ylim([-0.1, 1.1])
plt.title('Eficiências (Energia)')
plt.grid(False)

plt.figure()
plt.plot(instant[:-1], rend_ch_temp)
plt.xlabel('instant [s]')
plt.ylabel('$\eta_{\eta}$')
plt.ylim([-0.1, 1.1])
plt.title('Eficiências (Temperaturas)')
plt.grid(False)
plt.show()

[ ]: #CAPACITY FATIO
#-----
#PROCESSO DE CARGA

def func_cap_ratio_ch(Tp_i, Tp_o, cp_Tp_i, cp_Tp_o, rho_Tp_i, rho_Tp_o, Cp_med,
    instant):

    T_max = max(max(Tp_i), max(Tp_o))
    T_min = min(min(Tp_i), min(Tp_o))

    indice_T_max_i = np.argmax(Tp_i)
```

14

```

indice_T_max_o = np.argmax(Tp_o)
indice_T_min_i = np.argmax(Tp_i)
indice_T_min_o = np.argmax(Tp_o)

if Tp_i[indice_T_max_i] > Tp_o[indice_T_max_o]:
    cp_T_max = cp_Tp_i[indice_T_max_i]
    rho_T_max = rho_Tp_i[indice_T_max_i]
else:
    cp_T_max = cp_Tp_o[indice_T_max_o]
    rho_T_max = rho_Tp_o[indice_T_max_o]

if Tp_i[indice_T_min_i] < Tp_o[indice_T_min_o]:
    cp_T_min = cp_Tp_i[indice_T_min_i]
    rho_T_min = rho_Tp_i[indice_T_min_i]
else:
    cp_T_min = cp_Tp_o[indice_T_min_o]
    rho_T_min = rho_Tp_o[indice_T_min_o]

result_cap_ratio_ch = []
for i in range(len(instant)):
    if i == 0:
        dt = 0
    else:
        dt = instant[i] - instant[i-1]

    integral_value = 0
    for j in range(1 + 1):
        if j == 0:
            integral_value += 0
        else:
            dt_j = instant[j] - instant[j-1]
            term1 = (Cp_med * 10**3 / 60) * ((cp_Tp_i[j-1] * rho_Tp_i[j-1])
            + (cp_Tp_o[j-1] * rho_Tp_o[j-1]) * cp_Tp_o[j-1]))
            term2 = (Cp_med * 10**3 / 60) * ((cp_Tp_i[j] * rho_Tp_i[j])
            + (cp_Tp_o[j] * rho_Tp_o[j]) * cp_Tp_o[j]))
            integral_value += 0.5 * (term1 + term2) * dt_j

    den_cap_ratio_ch = ((cp_T_max * T_max * rho_T_max) - (cp_T_min * T_min
    + rho_T_min)) * v_total
    result_cap_ratio_ch.append(integral_value / den_cap_ratio_ch)

cap_ratio_ch = func_cap_ratio_ch(Tp_i, Tp_o, cp_Tp_i, cp_Tp_o, rho_Tp_i,
rho_Tp_o, Cp_med, instant)

for i in range(len(cap_ratio_ch)):
    if cap_ratio_ch[i] < 0:
        cap_ratio_ch[i] = 0

```

15

```

cap_ratio_ch_round = []
for i in range(len(cap_ratio_ch)):
    cap_ratio_ch_round.append(np.floor(cap_ratio_ch[i]))

index_cap_ratio = 0
for i in range(len(cap_ratio_ch_round)):
    if cap_ratio_ch_round[i] == 1:
        index_cap_ratio = i
        break

#-----
[ ]: #EVOLUÇÃO DO CAPACITY RATIO

plt.figure()
plt.plot(instant, cap_ratio_ch, color='red', linestyle='-', marker='o',
markerfacecolor='white', markersize=20)
plt.xlabel('Tempo [s]')
plt.ylabel(' ')
plt.ylim([-0.1, 1.1])
plt.title('Capacity ratio')
plt.grid()

[1077]: #ENERGIA ARMazenada

#-----
def func_energia_tes(instant, T_tes_K, v_tes):
    energia_tes = []
    for i in range(len(instant)):
        cp_tes = CP.PropSI('C', 'T', T_tes_K[i], v_tes_K[i])
        rho_tes = CP.PropSI('D', 'T', T_tes_K[i], v_tes_K[i]) #kg/m^3
        energia_tes_values = rho_tes * cp_tes * (T_tes_K[i] - T_02[0])
        energia_tes.append(energia_tes_values)

    return energia_tes

energia_tes_02 = func_energia_tes(instant, T_tes_K[0], v_tes[0])
energia_tes_22 = func_energia_tes(instant, T_tes_K[1], v_tes[1])
energia_tes_52 = func_energia_tes(instant, T_tes_K[2], v_tes[2])
energia_tes_83 = func_energia_tes(instant, T_tes_K[3], v_tes[3])
energia_tes_98 = func_energia_tes(instant, T_tes_K[4], v_tes[4])

energia = []
for i in range(len(instant)):

```

16

```

energia_values = energia_tes_02[i] + energia_tes_22[i] + energia_tes_52[i]
+ energia_tes_83[i] + energia_tes_98[i]
energia.append(energia_values)

#-----

[]: #EVOLUÇÃO DA ENERGIA ARMAZENADA

plt.figure()
plt.plot(instant, energia, color="red", linestyle='-', marker='o', markevery=20)
plt.xlabel('Tempo [s]')
plt.ylabel('Energia [J]')
plt.grid()
plt.show()

print(f'A quantidade máxima de energia armazenada é {(np.max(energia) -
-energia[0])} J')

#-----

[1079]: #EXERGIA

def func_exergia_camada(instant, m_tes, T_tes_K, T_02_K):
    exergia_camada = []
    for i in range(len(instant)):
        l_media = ((T_tes_K[0] + T_tes_K[i]) / 2)
        cp_camada = CP.PropsSI('C', 'T', T_media, 'Q', 0, 'Water')
        exergia_instante = m_tes * ((T_tes_K[i] - T_02_K[0]) + T_02_K[0] * np.
-1og(T_02_K[0] / T_tes_K[i]))
        return exergia_camada.append(cp_camada * exergia_instante)

    return exergia_camada

exergia_98 = func_exergia_camada(instant, m_tes[0], T_tes_K[0], T_02_K)
exergia_83 = func_exergia_camada(instant, m_tes[1], T_tes_K[1], T_02_K)
exergia_52 = func_exergia_camada(instant, m_tes[2], T_tes_K[2], T_02_K)
exergia_22 = func_exergia_camada(instant, m_tes[3], T_tes_K[3], T_02_K)
exergia_02 = func_exergia_camada(instant, m_tes[4], T_tes_K[4], T_02_K)

def func_exergia(exergia_98, exergia_83, exergia_52, exergia_22, exergia_02):
    exergia = []
    for i in range(len(exergia_98)):
        exergia_instante = exergia_98[i] + exergia_83[i] + exergia_52[i] +
-exergia_22[i] + exergia_02[i]
        exergia.append(exergia_instante)
    return exergia

```

17

```

exergia = func_exergia(exergia_98, exergia_83, exergia_52, exergia_22,
-exergia_02)

#-----

[]: #EVOLUÇÃO DA EXERGIA

T_tes_max = max([max(sublista) for sublista in T_tes]) + 273.15
T_tes_min = min([min(sublista) for sublista in T_tes]) + 273.15
rho_hot = CP.PropsSI('D', 'T', T_tes_max, 'Q', 0, 'Water')
cp_hot = CP.PropsSI('C', 'T', T_tes_max, 'Q', 0, 'Water')
v_hot = v_total
m_hot = v_hot * rho_hot

exergia_ideal = []
for i in range(len(instant)):
    exergia_ideal_values = cp_hot * m_hot * ((T_tes_max - T_tes_min) +
-T_tes_min * np.log(T_tes_min / T_tes_max))
    exergia_ideal.append(exergia_ideal_values)

#-----

rend_exergia = [exergia[i] / exergia_ideal[i]] for i in range(len(exergia))

#-----

[]: #EVOLUÇÃO DA EXERGIA

plt.figure()
plt.plot(instant, exergia_98, color="red", marker='o', markevery=20,
-1abel="T_98")
plt.plot(instant, exergia_83, color="orange", marker='s', markevery=20,
-1abel="T_83")
plt.plot(instant, exergia_52, color="gold", marker='^', markevery=20,
-1abel="T_52")
plt.plot(instant, exergia_22, color="blue", marker='x', markevery=20,
-1abel="T_22")
plt.plot(instant, exergia_02, color="navy", marker='d', markevery=20,
-1abel="T_02")
plt.plot(instant, exergia_ideal, color="darkgreen", marker='h', markevery=20,
-1abel="Ideal")
plt.xlabel('instant [s]')
plt.ylabel('$\zeta$')
plt.legend()
plt.title('Exergia das camadas do sistema TES')
plt.grid()

```

18

[1081]:

```
plt.figure()
plt.plot(instant, exergia, label='Experimental')
plt.plot(instant, exergia_ideal, label='Ideal')
plt.xlabel('instant [s]')
plt.ylabel('$\zeta$eta$')
plt.legend()
plt.title('Exergia')
plt.grid()

plt.figure()
plt.plot(instant, rend_exergia)
plt.xlabel('instant [s]')
plt.ylabel('$\eta$eta$')
plt.title('Rendimiento Exergético')
plt.ylim([-0.1, 1.1])
plt.grid()
plt.show()

#-----#ENTROPIA

#CASO REAL

def func_entropia_camada(instant, T_tes_K):

    entropia_camada = []

    for i in range(len(instant)):
        entropia_istante = 0
        entropia_istante = np.log(T_tes_K[0] / T_tes_K[i])
        T_media = (T_tes_K[i] + T_tes_K[0]) / 2
        cp_tes = CP.PropsSI('Cp', 'T', T_media, 'Q', 0, 'Water')
        entropia_camada.append(cp_tes * entropia_istante)

    return entropia_camada

entropia_T_98 = func_entropia_camada(instant, T_tes_K[0])
entropia_T_83 = func_entropia_camada(instant, T_tes_K[1])
entropia_T_52 = func_entropia_camada(instant, T_tes_K[2])
entropia_T_22 = func_entropia_camada(instant, T_tes_K[3])
entropia_T_02 = func_entropia_camada(instant, T_tes_K[4])

def func_entropia(entropia_T_98, entropia_T_83, entropia_T_52, entropia_T_22,
    entropia_T_02):
```

19

```
entropia_values = []

for i in range(len(entropia_T_98)):
    entropia_istante = entropia_T_98[i] + entropia_T_83[i] +
    entropia_T_52[i] + entropia_T_22[i] + entropia_T_02[i]
    entropia_values.append(entropia_istante)

return entropia_values

entropia = func_entropia(entropia_T_98, entropia_T_83, entropia_T_52,
    entropia_T_22, entropia_T_02)

#-----#CASO COMPLETAMENTE MISTURADO

T_tes_min = min([min(sublista) for sublista in T_tes]) + 273.15

entropia_fulmixed = []

for i in range(len(instant)):
    T_med = [sublista[0] for sublista in T_tes]
    T_fulmixed = np.mean(T_med)
    cp_fulmixed = CP.PropsSI('Cp', 'T', T_fulmixed + 273.15, 'Q', 0, 'Water')
    entropia_fulmixed_values = cp_fulmixed * (np.log(T_tes_min / T_fulmixed))
    entropia_fulmixed.append(entropia_fulmixed_values)

#-----#CASO COMPLETAMENTE ESTRATIFICADO

T_tes_min = min([min(sublista) for sublista in T_tes]) + 273.15

entropia_strat = []

for i in range(len(instant)):
    cp_T_min = CP.PropsSI('Cp', 'T', T_tes_min, 'Q', 0, 'Water')
    entropia_strat_values = cp_fulmixed * (np.log(T_tes_min / T_tes_min))
    entropia_strat.append(entropia_strat_values)

#-----rend_entropia=[]

for i in range(len(instant)):
    rend_entropia_values = (entropia_fulmixed[i] - entropia_strat[i]) /
    (entropia_fulmixed[i] - entropia[i])
    rend_entropia.append(rend_entropia_values)
```

20

```

#-----
[ ]: #EVOLUÇÃO DA ENTROPIA

plt.figure()
plt.plot(instant, entropia_T_98, color="red", marker='o', markevery=20,
<label='T_98')
plt.plot(instant, entropia_T_83, color="orange", marker='s', markevery=20,
<label='T_83')
plt.plot(instant, entropia_T_52, color="gold", marker='^', markevery=20,
<label='T_52')
plt.plot(instant, entropia_T_22, color="blue", marker='x', markevery=20,
<label='T_22')
plt.plot(instant, entropia_T_02, color="navy", marker='d', markevery=20,
<label='T_02')
plt.xlabel('instant [s]')
plt.ylabel('s')
plt.legend()
plt.title('Entropia das camadas do sistema TES')
plt.grid(False)

plt.figure()
plt.plot(instant, entropia, label='Experimental')
plt.plot(instant, entropia_strat, label='Completamente estratificado')
plt.plot(instant, entropia_fullmixed, label='Completamente misturado')
plt.xlabel('instant [s]')
plt.ylabel('s')
plt.legend()
plt.title('Entropia')
plt.grid(False)

plt.figure()
plt.plot(instant, rend_entropia)
plt.xlabel('instant [s]')
plt.ylabel('r$eta_{s}$')
plt.title('Rendimento Entrópico')
plt.ylim(-0.1, 1.1)
plt.grid(False)

plt.show()

#-----
[1083]: #MTX

#-----
#CASO REAL

```

21

```

def func_energia_camada(instant, T_tes_K, v_tes, y_centro):
    momento_istante_camada = []
    for i in range(len(instant)):
        rho_mix = CP.PropsSI('D', 'T', T_tes_K[i], 'Q', 0, 'Water')
        cp_mix = CP.PropsSI('C', 'T', T_tes_K[i], 'Q', 0, 'Water')
        momento_istante_value = rho_mix * cp_mix * v_tes * T_tes_K[i]
        momento_istante_camada.append(y_centro * energia_istante_value)
    return momento_istante_camada

energia_02 = func_energia_camada(instant, T_tes_K[0], v_tes[0], y_centro[0])
energia_22 = func_energia_camada(instant, T_tes_K[1], v_tes[1], y_centro[1])
energia_52 = func_energia_camada(instant, T_tes_K[2], v_tes[2], y_centro[2])
energia_83 = func_energia_camada(instant, T_tes_K[3], v_tes[3], y_centro[3])
energia_98 = func_energia_camada(instant, T_tes_K[4], v_tes[4], y_centro[4])
energia_tes = [energia_98, energia_83, energia_52, energia_22, energia_02]

momento_tes = []
for i in range(len(instant)):
    momento_tes_value = (energia_02[i] + energia_22[i] + energia_52[i] +
<energia_83[i] + energia_98[i]) / len(energia_tes)
    momento_tes.append(momento_tes_value)

#-----
#CASO COMPLETAMENTE MISTURADO

energia_fullmixed = []
for i in range(len(instant)):
    T_med = [sublista[i] for sublista in T_tes]
    T_fullmixed = np.mean(T_med)
    cp_fullmixed = CP.PropsSI('D', 'T', T_fullmixed + 273.15, 'Q', 0, 'Water')
    cp_fullmixed = CP.PropsSI('C', 'T', T_fullmixed + 273.15, 'Q', 0, 'Water')
    energia_fullmixed_values = T_fullmixed * rho_fullmixed * cp_fullmixed *
<v_total
    energia_fullmixed.append(energia_fullmixed_values)

momento_fullmixed = []
for i in range(len(instant)):
    momento_fullmixed_value = (H/2) * energia_fullmixed[i]
    momento_fullmixed.append(momento_fullmixed_value)

#-----
#CASO COMPLETAMENTE ESTRATIFICADO

```

22


```
[ ]:
#EVOLUÇÃO DO MIX

plt.figure()
plt.plot(instant, momento_tes, color="red", marker='o', markevery=20,
        label='Depósito Real')
plt.plot(instant, momento_strat, color="orange", marker='s', markevery=20,
        label='Depósito perfeitamente estratificado')
plt.plot(instant, momento_fulmixed, color="gold", marker='^', markevery=20,
        label='Depósito completamente misturado')
```

23

```
[ ]:
#PARAMETROS ADIMENSIONAIS

#-----
#NUMERO DE RICHARDSON

Ri_ch = []

for i in range(len(instant)):
    T_med_Ri_ch = ((T_98_K[i] + T_02_K[i]) / 2)
    beta_Ri = CP.PropSI('C', 'T', T_med_Pe_ch, 'q', 0, 'Water')
    vs_Ri = ((Cp_med * 10**3) / 60) / (tp_pi * (W/2)**2)
    Ri_value = (g * beta_Ri * (T_98_K[i] - T_02_K[i]) * H) / (vs_Ri**2)
    Ri_ch.append(Ri_value)

#-----
#NUMERO DE PECLET

Pe_ch = []

for i in range(len(instant)):
    T_med_Pe_ch = ((T_98_K[i] + T_02_K[i]) / 2)
    vt_Pe = ((Cp_med * 10**3) / 60) / (tp_pi * (D / 2)**2)
    cp_Pe = CP.PropSI('C', 'T', T_med_Pe_ch, 'q', 0, 'Water')
    rho_Pe = CP.PropSI('D', 'T', T_med_Pe_ch, 'q', 0, 'Water')
    k_Pe = CP.PropSI('L', 'T', T_med_Pe_ch, 'q', 0, 'Water')
    alpha_Pe = k_Pe / (rho_Pe * cp_Pe)

    Pe_values = (vt_Pe * H) / alpha_Pe
    Pe_ch.append(Pe_values)
```

24

```
#-----
#NUMERO DE REYNOLDS
Re_ch = []

for i in range(len(instant)):
    rho_Re = CP.PropsSI('D', 'T', Tp_i.K[i], 'Q', 0, 'Water')
    u_Re = CP.PropsSI('V', 'T', Tp_i.K[i], 'Q', 0, 'Water')
    vs_Re_ch = ((Cp_med * 10**-3) / 60) / (np.pi * (W/2)**2)
    Re_value = (rho_Re * vs_Re_ch * W) / u_Re
    Re_ch.append(Re_value)

Re_tank_ch = []

for i in range(len(instant)):
    T_tes_ch_med = (T_02[i] + T_22[i] + T_52[i] + T_83[i] + T_98[i]) / u
    -len(T_tes)
    rho_Re = CP.PropsSI('D', 'T', T_tes_ch_med + 273.15, 'Q', 0, 'Water')
    u_Re = CP.PropsSI('V', 'T', T_tes_ch_med + 273.15, 'Q', 0, 'Water')
    vt_Re_tank_ch = ((Cp_med * 10**-3) / 60) / (np.pi * (D/2)**2)
    Re_value = (rho_Re * vt_Re_tank_ch * D) / u_Re
    Re_tank_ch.append(Re_value)

#-----
[ ]: #EVOLUÇÃO DOS PARAMETROS ADMENSIONAIS
#-----
#EVOLUÇÃO DO NUMERO DE RICHARDSON

plt.figure()
plt.plot(instant, Ri_ch, label='Entrada')
plt.xlabel('instant [s]')
plt.ylabel('Ri')
plt.legend()
plt.title('Número de Richardson')
plt.grid()

#-----
#EVOLUÇÃO DO NUMERO DE PECLET

plt.figure()
plt.plot(instant, Pe_ch, label='Depósito')
plt.xlabel('instant [s]')
```

25

```
plt.ylabel('Pe')
plt.legend()
plt.title('Número de Peclet')
plt.grid()

#-----
#EVOLUÇÃO DO NUMERO DE REYNOLDS

plt.figure()
plt.plot(instant, Re_ch, label='Entrada')
plt.plot(instant, Re_tank_ch, label='Depósito')
plt.xlabel('instant [s]')
plt.ylabel('Re')
plt.legend()
plt.title('Número de Reynolds')
plt.grid()
print('Re_tank =', np.max(Re_tank_ch))

#-----
[ ]: #GUIARAR VALORES PARA ANALISE
resultados = {
    'Instantes': instant,
    'Espessura da termoclina': espessura_termoclina,
    'Intervalos da termoclina': intervalos_termoclina,
    'Eficiência do carregamento': rend_ch_energy,
    'Capacity ratio': cap_ratio_ch,
    'Energia armazenada': energia,
    'Rendimento exergetico': rend_exergia,
    'Rendimento entropico': rend_entropia,
    'MX': mix,
    'Richardson': Ri_ch,
    'Peclet': Pe_ch,
    'Reynolds de entrada': Re_ch,
    'Reynolds do deposito': Re_tank_ch,
}

max_length = max(len(ist) for ist in resultados.values())

for key, ist in resultados.items():
    if len(ist) < max_length:
        resultados[key] = ist + [np.nan] * (max_length - len(ist))

resultados_file = pd.DataFrame(resultados)
```

26

```
new_path = 'Gráficos/Carregamento/'
file = os.path.join(new_path, file_name)

resultados_file.to_csv(file, index=False)

print(f'Dados salvos em '{file}''')
display(resultados_file)
```



```

# INSTANTES
data['Timestamp'] = pd.to_datetime(data['Timestamp'])

first_istant = data['Timestamp'].iloc[0]
data['Seconds'] = (data['Timestamp'] - first_istant).dt.total_seconds()
instant = data['Seconds']

#-----
#CONSTANTES
g = 9.81
H = 0.95
D = 0.26
W = 0.0254

#-----
# TEMPERATURAS

Tp_i = data['Tp_in (degC)'].values
Tp_i_K = [T + 273.15 for T in Tp_i]
Tp_i_max = max(Tp_i)
Tp_i_min = min(Tp_i)
Tp_i_adm = []

for i in range(len(instant)):
    Tp_i_adm_values = (Tp_i[i] - Tp_i_min) / (Tp_i_max - Tp_i_min)
    Tp_i_adm.append(Tp_i_adm_values)

cp_Tp_i = [CP.PropSI('C', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in Tp_i_K] #J/kg.K
rho_Tp_i = [CP.PropSI('D', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in Tp_i_K] #kg/m^3
k_Tp_i = [CP.PropSI('L', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in Tp_i_K] #W/m.K
alpha_Tp_i = [k_Tp_i / (rho_Tp_i * cp_Tp_i) for k_Tp_i, rho_Tp_i, cp_Tp_i in
               zip(k_Tp_i, rho_Tp_i, cp_Tp_i)] #m^2/s
beta_Tp_i = CP.PropSI('isobaric_expansion_coefficient', 'T', Tp_i_K, 'Q', 0,
                       'Water') #1/K

Tp_o = data['Tp_out (degC)'].values
Tp_o_K = [T + 273.15 for T in Tp_o]
Tp_o_max = max(Tp_o)
Tp_o_min = min(Tp_o)
Tp_o_adm = []

for i in range(len(instant)):
    Tp_o_adm_values = (Tp_o[i] - Tp_o_min) / (Tp_o_max - Tp_o_min)
    Tp_o_adm.append(Tp_o_adm_values)

cp_Tp_o = [CP.PropSI('C', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in Tp_o_K] #J/kg.K
rho_Tp_o = [CP.PropSI('D', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in Tp_o_K] #kg/m^3

```

3

```

k_Tp_o = [CP.PropSI('L', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in Tp_o_K] #W/m.K
alpha_Tp_o = [k_Tp_o / (rho_Tp_o * cp_Tp_o) for k_Tp_o, rho_Tp_o, cp_Tp_o in
               zip(k_Tp_o, rho_Tp_o, cp_Tp_o)] #m^2/s
beta_Tp_o = CP.PropSI('isobaric_expansion_coefficient', 'T', Tp_o_K, 'Q', 0,
                       'Water') #1/K

Ts_i = data['Ts_in (degC)'].values
Ts_i_K = [T + 273.15 for T in Ts_i]
Ts_i_max = max(Ts_i)
Ts_i_min = min(Ts_i)
Ts_i_adm = []

for i in range(len(instant)):
    Ts_i_adm_values = (Ts_i[i] - Ts_i_min) / (Ts_i_max - Ts_i_min)
    Ts_i_adm.append(Ts_i_adm_values)

cp_Ts_i = [CP.PropSI('C', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in Ts_i_K] #J/kg.K
rho_Ts_i = [CP.PropSI('D', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in Ts_i_K] #kg/m^3
k_Ts_i = [CP.PropSI('L', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in Ts_i_K] #W/m.K
alpha_Ts_i = [k_Ts_i / (rho_Ts_i * cp_Ts_i) for k_Ts_i, rho_Ts_i, cp_Ts_i in
               zip(k_Ts_i, rho_Ts_i, cp_Ts_i)] #m^2/s
beta_Ts_i = CP.PropSI('isobaric_expansion_coefficient', 'T', Ts_i_K, 'Q', 0,
                       'Water') #1/K

Ts_o = data['Ts_out (degC)'].values
Ts_o_K = [T + 273.15 for T in Ts_o]
Ts_o_max = max(Ts_o)
Ts_o_min = min(Ts_o)
Ts_o_adm = []

for i in range(len(instant)):
    Ts_o_adm_values = (Ts_o[i] - Ts_o_min) / (Ts_o_max - Ts_o_min)
    Ts_o_adm.append(Ts_o_adm_values)

cp_Ts_o = [CP.PropSI('C', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in Ts_o_K] #J/kg.K
rho_Ts_o = [CP.PropSI('D', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in Ts_o_K] #kg/m^3
k_Ts_o = [CP.PropSI('L', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in Ts_o_K] #W/m.K
alpha_Ts_o = [k_Ts_o / (rho_Ts_o * cp_Ts_o) for k_Ts_o, rho_Ts_o, cp_Ts_o in
               zip(k_Ts_o, rho_Ts_o, cp_Ts_o)] #m^2/s
beta_Ts_o = CP.PropSI('isobaric_expansion_coefficient', 'T', Ts_o_K, 'Q', 0,
                       'Water') #1/K

T_98 = data['T_top (degC)'].values
T_98_K = [T + 273.15 for T in T_98]
T_98_max = max(T_98)
T_98_min = min(T_98)
T_98_adm = []

for i in range(len(instant)):
    T_98_adm_values = (T_98[i] - T_98_min) / (T_98_max - T_98_min)
    T_98_adm.append(T_98_adm_values)

```

4

5

```

cp.T_98 = [CP.PropSI('C', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in T_98_K] #J/kg.K
rho.T_98 = [CP.PropSI('D', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in T_98_K] #kg/m^3
k.T_98 = [CP.PropSI('L', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in T_98_K] #W/m.K
alpha.T_98 = [k.T_98 / (rho.T_98 * cp.T_98) for k, T_98, rho, T_98, cp, T_98 in
zip(k, T_98, rho, T_98, cp, T_98)] #m^2/s
beta.T_98 = CP.PropSI('isobaric_expansion_coefficient', 'T', T_98_K, 'Q', 0,
    'Water') #1/K

T_83 = data['T_midtop (degC)'].values
T_83_K = [T + 273.15 for T in T_83]
T_83_max = max(T_83)
T_83_min = min(T_83)
T_83_adm = []
for i in range(len(instant)):
    T_83_adm_values = (T_83[i] - T_83_min) / (T_83_max - T_83_min)
    T_83_adm.append(T_83_adm_values)
cp.T_83 = [CP.PropSI('C', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in T_83_K] #J/kg.K
rho.T_83 = [CP.PropSI('D', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in T_83_K] #kg/m^3
k.T_83 = [CP.PropSI('L', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in T_83_K] #W/m.K
alpha.T_83 = [k.T_83 / (rho.T_83 * cp.T_83) for k, T_83, rho, T_83, cp, T_83 in
zip(k, T_83, rho, T_83, cp, T_83)] #m^2/s
beta.T_83 = CP.PropSI('isobaric_expansion_coefficient', 'T', T_83_K, 'Q', 0,
    'Water') #1/K

T_52 = data['T_mid (degC)'].values
T_52_K = [T + 273.15 for T in T_52]
T_52_max = max(T_52)
T_52_min = min(T_52)
T_52_adm = []
for i in range(len(instant)):
    T_52_adm_values = (T_52[i] - T_52_min) / (T_52_max - T_52_min)
    T_52_adm.append(T_52_adm_values)
cp.T_52 = [CP.PropSI('C', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in T_52_K] #J/kg.K
rho.T_52 = [CP.PropSI('D', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in T_52_K] #kg/m^3
k.T_52 = [CP.PropSI('L', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in T_52_K] #W/m.K
alpha.T_52 = [k.T_52 / (rho.T_52 * cp.T_52) for k, T_52, rho, T_52, cp, T_52 in
zip(k, T_52, rho, T_52, cp, T_52)] #m^2/s
beta.T_52 = CP.PropSI('isobaric_expansion_coefficient', 'T', T_52_K, 'Q', 0,
    'Water') #1/K

T_22 = data['T_midbottom (degC)'].values
T_22_K = [T + 273.15 for T in T_22]
T_22_max = max(T_22)
T_22_min = min(T_22)
T_22_adm = []
for i in range(len(instant)):
```

6

```

    T_22_adm_values = (T_22[i] - T_22_min) / (T_22_max - T_22_min)
    T_22_adm.append(T_22_adm_values)
cp.T_22 = [CP.PropSI('C', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in T_22_K] #J/kg.K
rho.T_22 = [CP.PropSI('D', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in T_22_K] #kg/m^3
k.T_22 = [CP.PropSI('L', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in T_22_K] #W/m.K
alpha.T_22 = [k.T_22 / (rho.T_22 * cp.T_22) for k, T_22, rho, T_22, cp, T_22 in
zip(k, T_22, rho, T_22, cp, T_22)] #m^2/s
beta.T_22 = CP.PropSI('isobaric_expansion_coefficient', 'T', T_22_K, 'Q', 0,
    'Water') #1/K

T_02 = data['T_bottom (degC)'].values
T_02_K = [T + 273.15 for T in T_02]
T_02_max = max(T_02)
T_02_min = min(T_02)
T_02_adm = []
for i in range(len(instant)):
    T_02_adm_values = (T_02[i] - T_02_min) / (T_02_max - T_02_min)
    T_02_adm.append(T_02_adm_values)
cp.T_02 = [CP.PropSI('C', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in T_02_K] #J/kg.K
rho.T_02 = [CP.PropSI('D', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in T_02_K] #kg/m^3
k.T_02 = [CP.PropSI('L', 'T', T, 'Q', 0, 'Water') for T in T_02_K] #W/m.K
alpha.T_02 = [k.T_02 / (rho.T_02 * cp.T_02) for k, T_02, rho, T_02, cp, T_02 in
zip(k, T_02, rho, T_02, cp, T_02)] #m^2/s
beta.T_02 = CP.PropSI('isobaric_expansion_coefficient', 'T', T_02_K, 'Q', 0,
    'Water') #1/K

T_41 = data['T_retorno (degC)'].values
T_08 = data['T_retorno_bottom (degC)'].values
T_99 = data['T_caldreira (degC)'].values

T_tes_K = [T_98_K, T_83_K, T_52_K, T_22_K, T_02_K]
T_tes = [T_98, T_83, T_52, T_22, T_02]
T_tes_adm = [T_98_adm, T_83_adm, T_52_adm, T_22_adm, T_02_adm]

#-----
#CAUDALES
Cp = data['C_prim'].values
Cs = data['C_sec'].values
Cb = data['C_bypass'].values
Cu = data['C_ultra'].values

#-----
#VOLUMEN DE CONTROL
```

```
y_98 = 0.936
y_camada_98 = 0.04
y_centro_98 = 0.93
v_98 = (np.pi * ((D**2)/4) * y_camada_98)
m_98 = np.mean(rho_T_98) * v_98

y_83 = 0.785
y_camada_83 = 0.32
y_centro_83 = 0.76
v_83 = (np.pi * ((D**2)/4) * y_camada_83)
m_83 = np.mean(rho_T_83) * v_83

y_52 = 0.496
y_camada_52 = 0.23
y_centro_52 = 0.475
v_52 = (np.pi * ((D**2)/4) * y_camada_52)
m_52 = np.mean(rho_T_83) * v_52

y_22 = 0.205
y_camada_22 = y_camada_83
y_centro_22 = 0.2
v_22 = v_83
m_22 = m_83

y_02 = 0.02
y_camada_02 = y_camada_98
y_centro_02 = 0.02
v_02 = v_98
m_02 = m_98

y_tes = [y_02, y_22, y_52, y_83, y_98]
y_camadas = [y_camada_02, y_camada_22, y_camada_52, y_camada_83, y_camada_98]
y_centro = [y_centro_02, y_centro_22, y_centro_52, y_centro_83, y_centro_98]
y_tes_adm = [round(y_02/H, 2), round(y_22/H, 2), round(y_52/H, 2), round(y_83/
    H, 2), round(y_98/H, 2)]

v_total = np.pi * (D**2 / 4) * H
v_tes = [v_02, v_22, v_52, v_83, v_98]

m_total = m_98 + m_83 + m_52 + m_22 + m_02
m_tes = [m_98, m_83, m_52, m_22, m_02]

#-----
[ ]: #EVOLUÇÃO DAS TEMPERATURAS NO DEPÓSITO
plt.figure()
```

7

```
[768]:
plt.plot(instant, T_98, color="red", linestyle='-', marker='o', markevery=20,
    label=T_98)
plt.plot(instant, T_83, color="orange", linestyle='-', marker='s',
    markevery=20, label=T_83)
plt.plot(instant, T_52, color="gold", linestyle='-', marker='^', markevery=20,
    label=T_52)
plt.plot(instant, T_22, color="blue", linestyle='-', marker='x', markevery=20,
    label=T_22)
plt.plot(instant, T_02, color="navy", linestyle='-', marker='d', markevery=20,
    label=T_02)
plt.xlabel('Tempo [s]')
plt.ylabel('Temperatura [°C]')
plt.ylim([0, 70])
plt.legend()
plt.title('Sistema TES')
plt.grid()

plt.figure()
plt.plot(instant, Ts_i, color="navy", linestyle='-', marker='o', markevery=20,
    label=Ts_i)
plt.plot(instant, Ts_o, color="blue", linestyle='-', marker='s', markevery=20,
    label=Ts_o)
plt.xlabel('Tempo [s]')
plt.ylabel('Temperatura [°C]')
plt.ylim([0, 70])
plt.legend()
plt.title('Entrada/Saída Circuito Secundário')
plt.grid()

plt.show()

#-----
[769]:
#CÁUDAS
#CIRCUITO SECUNDÁRIO
Cs_values = []

momentos_Cs = []
for i in range(1, len(instant)):
    if Cs[i] != Cs[i-1]:
        momentos_Cs.append(instant[i])

diferenca_Cs = []
for i in range(1, len(momentos_Cs)):
```

8


```
[ ]: #EVOLUÇÃO DOS CAUDAIS

diff_Cs = momentos_Cs[i] - momentos_Cs[i-1]
diferenca_Cs.append(diff_Cs)

for i in range(len(diferenca_Cs)) :
    caudal_Cs = (10 * 60) / diferenca_Cs[i]
    Cs_values.append(caudal_Cs)

Cs_inst_values = [0] * len(instant)
current_index = 0

start_index = None
for i in range(1, len(instant)):
    if instant[i] in momentos_Cs:
        start_index = i
        break

if start_index is not None:
    for i in range(start_index, len(instant)):
        if current_index < len(momentos_Cs) and instant[i] >= L
            momentos_Cs[current_index] :
                current_index += 1
        if current_index < len(Cs_values) :
            Cs_inst_values[i] = Cs_values[current_index]
        else:
            Cs_inst_values[i] = Cs_values[-1]

valid_values = Cs_inst_values[start_index:] if start_index is not None else []
Cs_med = np.mean(Cs_values)
Cs_var = np.var(Cs_values)

#-----

[ ]: #EVOLUÇÃO DOS CAUDAIS

plt.figure()
plt.plot(instant, Cs_inst_values, color="navy", label='Cs')
plt.plot(momentos_Cs, [Cs_inst_values[instant.to_list().index(momento)] for L
    momento in momentos_Cs], color='navy', linestyle='-', marker='.',)
plt.xlabel('Tempo [s]')
plt.ylabel('Caudal [l/min]')
plt.legend()
plt.title('Instrumentos de medição')
plt.ylim([-1, 20])
plt.grid()

plt.show()
print(f'Caudal médio = {round(Cs_med,3)} e Variância = {round(Cs_var,3)}')
```

```
[ ]: #ESPESSURA DA TERMOCLINA

#-----

T_instant = []
intervalos = int((len(instant) / 50))
numero_intervalos = int(len(instant)/intervalos)

for i in range(0, len(T_tes_adm[0]), intervalos):
    T_instant_values = []
    for T in T_tes_adm:
        if i < len(T):
            T_instant_values.append(T[i])
    T_instant.append(T_instant_values)

#-----

#GUARDAR DADOS NO FICHEIRO PARA ORIGIN

df_T = pd.DataFrame(T_instant)
df_T = df_T.T
df_y = pd.DataFrame(y_tes)

df = pd.concat([df_y, df_T], axis=1)

file_name = os.path.basename(selected_file)
new_path = 'Termoclina/Descarga/Values.to_fit'
curva_T = os.path.join(new_path, file_name)

df.to_csv(curva_T, header=False, index=False)

if os.path.exists(curva_T):
    print("Novo arquivo foi guardado com sucesso!")
else:
    print(f"O arquivo {curva_T} não foi guardado.")

#-----

#LER OS DADOS DO ORIGIN

file_name = os.path.basename(selected_file)
new_path = 'Termoclina/Descarga/Fit_values/'
curva_T_fit = os.path.join(new_path, file_name)

if os.path.exists(curva_T_fit):
    print("Novo arquivo lido com sucesso!")
else:
    print("Novo arquivo lido com sucesso!")
```

```

print(f"O arquivo {curva_fit} não existe.")

T_fit_values = pd.read_csv(curva_fit)

columns = [col for col in T_fit_values.columns if col.
            .startswith('Termoclina_thickness')]
T_fit = T_fit_values[columns]
y_fit = np.linspace(0, 1, len(T_fit))

#-----
T_fit_instant = [T_fit[col].tolist() for col in T_fit.columns]

def find_index_nearest(arr, value):
    arr = np.array(arr)
    idx = np.abs(arr - value).argmin()
    return idx

def func_espessura_termoclina(T_fit_instant):
    T_15 = 0.15
    T_85 = 0.85

    index_T_15 = find_index_nearest(T_fit_instant, T_15)
    index_T_85 = find_index_nearest(T_fit_instant, T_85)

    y_15 = y_fit[index_T_15]
    y_85 = y_fit[index_T_85]

    espessura_termoclina = abs(y_15 - y_85)

    if espessura_termoclina > 0.5:
        espessura_termoclina = 0

    return espessura_termoclina

espessura_termoclina = [0] + [func_espessura_termoclina(T_fit_instant[i]) for i
                              in range(len(T_fit_instant))]]

step = (len(instant) - 1) * 5 / (len(espessura_termoclina) - 1)
intervalos_termoclina = [i * step for i in range(len(espessura_termoclina))]
intervalos_termoclina[-1] = (len(instant) - 1) * 5

#-----
[ ] : #REPRESENTAÇÃO DA ESPESSURA DA TERMOCCLINA

```

```

markers ['o', 's', 'c', 'v', 'k', '>', 'p', 'P', '*', 'h', 'H', '+', 'x', 'u',
        'D', 'd', '|', '_,', '_,', '_,', '1', '2', '3', '4']]

plt.figure()
for i in range(numero_iteracoes):
    marker_type = markers[i % len(markers)]
    plt.plot(Ts_instant[i], y_tes_adm, marker=marker_type, linestyle='-',
             label=f'({intervalos + i * intervalos * 60} Segundos)')
    plt.xlabel('Temperatura adimensional [-]')
    plt.ylabel('Altura adimensional [-]')
    plt.title('Evolução das camadas do sistema TES')
    plt.grid()

plt.figure()
for i in range(len(T_instant)):
    marker_type = markers[i % len(markers)]
    plt.plot(T_fit.iloc[:, i], y_fit, linestyle='-', label=f'({intervalos +
        i * intervalos * 60} Segundos)')
    plt.xlabel('Temperatura adimensional [-]')
    plt.ylabel('Altura adimensional [-]')
    plt.ylim([-0.1, 1.1])
    plt.grid()

plt.figure()
plt.plot(intervalos_thermocline, espessura_thermocline, color='red',
         linestyle='-')
plt.xlabel('Instantes [s]')
plt.ylabel('Espessura da termocline [-]')
plt.ylim([-0.1, 1.1])
plt.grid()

```

```

#EFICIÊNCIAS

#-----
#EFICIENCIA DO PROCESSO DE DESCARGA (ENERGIA)

def func_rend_dis_energy(instant, Cs_med, rho_Ts_o, cp_Ts_o, rho_Ts_i,
                        cp_Ts_i, rho_T_98, cp_T_98, T_98):

    def num_rend_dis(instant):
        return ((Cs_med * 10**3) / 60) * ((rho_Ts_o[instant] *
            cp_Ts_o[instant] - rho_Ts_i[instant] * cp_Ts_i[instant]) *
            Ts_i[instant])

    def den_rend_dis(instant):

```

[]: #EVOLUÇÃO DAS EFICIÊNCIAS

```
        return ((Cs_med * 10**3) / 60) * (rho_T_98[0] * cp_T_98[0] * T_98[0])

        int_num_rend_dis = 0
        int_den_rend_dis = 0
        rend_dis = []

        for i in range(len(instant)-1):
            dt = instant[i+1] - instant[i]
            int_num_rend_dis += 0.5 * (num_rend_dis(i) + num_rend_dis(i+1)) * dt
            int_den_rend_dis += 0.5 * (den_rend_dis(i) + den_rend_dis(i+1)) * dt
            rend_dis.append(int_num_rend_dis / int_den_rend_dis)

        return rend_dis

rend_dis_energy = func_rend_dis_energy(instant, Cs_med, rho_Ts_o, cp_Ts_o,
    Ts_o, rho_Ts_i, cp_Ts_i, Ts_i, rho_T_98, cp_T_98, T_98)

#-----
#EFICIENCIA DO PROCESSO DE DESCARGA (TEMPERATURA)

def func_rend_dis_temp(instant, Ts_o, Ts_i, T_98):

    def num_rend_dis(instant):
        return Ts_o[instant] - Ts_i[instant]

    def den_rend_dis(instant):
        return T_98[0]

    int_num_rend_dis = 0
    int_den_rend_dis = 0
    rend_dis = []

    for i in range(len(instant)-1):
        dt = instant[i+1] - instant[i]
        int_num_rend_dis += 0.5 * (num_rend_dis(i) + num_rend_dis(i+1)) * dt
        int_den_rend_dis += 0.5 * (den_rend_dis(i) + den_rend_dis(i+1)) * dt
        rend_dis.append(int_num_rend_dis / int_den_rend_dis)

    return rend_dis

rend_dis_temp = func_rend_dis_temp(instant, Ts_o, Ts_i, T_98)

#-----
```

13

[]:

```
plt.figure()
plt.plot(instant[:-1], rend_dis_energy)
plt.xlabel('instant [s]')
plt.ylabel('$\epsilon$')
plt.ylim([0.1, 1.1])
plt.title('Eficiências (Energia)')
plt.grid(False)

plt.figure()
plt.plot(instant[:-1], rend_dis_temp)
plt.xlabel('instant [s]')
plt.ylabel('$\epsilon$')
plt.ylim([0.1, 1.1])
plt.title('Eficiências (Temperaturas)')
plt.grid(False)
plt.show()
```

[]: #CAPACITY RATIO

```
#-----
def func_cap_ratio_dis(Ts_i, Ts_o, cp_Ts_i, cp_Ts_o, rho_Ts_i, rho_Ts_o,
    Cs_med, instant):

    T_max = max(max(Ts_i), max(Ts_o))
    T_min = min(min(Ts_i), min(Ts_o))

    indice_T_max_in = np.argmax(Ts_i)
    indice_T_max_out = np.argmax(Ts_o)
    indice_T_min_in = np.argmin(Ts_i)
    indice_T_min_out = np.argmin(Ts_o)

    if Ts_i[indice_T_max_in] > Ts_o[indice_T_max_out]:
        cp_T_max = cp_Ts_i[indice_T_max_in]
        rho_T_max = rho_Ts_i[indice_T_max_in]
    else:
        cp_T_max = cp_Ts_o[indice_T_max_out]
        rho_T_max = rho_Ts_o[indice_T_max_out]

    if Ts_i[indice_T_min_in] < Ts_o[indice_T_min_out]:
        cp_T_min = cp_Ts_i[indice_T_min_in]
        rho_T_min = rho_Ts_i[indice_T_min_in]
    else:
        cp_T_min = cp_Ts_o[indice_T_min_out]
        rho_T_min = rho_Ts_o[indice_T_min_out]
```

14

```

result_cap_ratio_dis = []
for i in range(len(instant)):
    if i == 0:
        dt = 0
    else:
        dt = instant[i] - instant[i-1]

    integral_value = 0
    for j in range(1 + 1):
        if j == 0:
            integral_value += 0
        else:
            dt_j = instant[j] - instant[j-1]
            term1 = (Cs_med * 10**3 / 60) * ((cp_Ts_o[j-1] * rho_Ts_o[j-1])
            - (Ts_i[j-1] * rho_Ts_i[j-1] * cp_Ts_i[j-1]))
            term2 = (Cs_med * 10**3 / 60) * ((cp_Ts_o[j] * rho_Ts_o[j]
            - (Ts_i[j] * rho_Ts_i[j] * cp_Ts_i[j]))
            integral_value += 0.5 * (term1 + term2) * dt_j

    den_cap_ratio_dis = ((cp_T_max * T_max * rho_T_max) - (cp_T_min * T_min
    - rho_T_min)) * v_total
    result_cap_ratio_dis.append(integral_value / den_cap_ratio_dis)

return result_cap_ratio_dis

cap_ratio_dis = func_cap_ratio_dis(Ts_i, Ts_o, cp_Ts_i, cp_Ts_o, rho_Ts_i,
rho_Ts_o, Cs_med, instant)
display(cap_ratio_dis)
for i in range(len(cap_ratio_dis)):
    if cap_ratio_dis[i] < 0:
        cap_ratio_dis[i] = 0

```

```

[ ]: #EVOLUÇÃO DO CAPACITY RATIO

plt.figure()
plt.plot(instant, cap_ratio_dis, color="navy", linestyle='-', marker='o',
markerSize=20)
plt.xlabel('Tempo [s]')
plt.ylabel('')
plt.ylim([-0.1, 1.1])
plt.title('Capacity ratio')
plt.grid()

```

15

```

[766]: #ENERGIA ARMAZENADA

#-----
def func_energia_tes(instant, T_tes_K, v_tes):
    energia_tes = []
    for i in range(len(instant)):
        cp_tes = CP.PropSI('C', 'T', T_tes_K[i], 'Q', 0, 'Water') #J/kg.K
        rho_tes = CP.PropSI('D', 'T', T_tes_K[i], 'Q', 0, 'Water') #kg/m^3
        energia_tes_values = rho_tes * cp_tes * v_tes * (T_tes_K[i] - T_02[0])
        energia_tes.append(energia_tes_values)

    return energia_tes

energia_tes_02 = func_energia_tes(instant, T_tes_K[0], v_tes[0])
energia_tes_22 = func_energia_tes(instant, T_tes_K[1], v_tes[1])
energia_tes_52 = func_energia_tes(instant, T_tes_K[2], v_tes[2])
energia_tes_83 = func_energia_tes(instant, T_tes_K[3], v_tes[3])
energia_tes_98 = func_energia_tes(instant, T_tes_K[4], v_tes[4])

energia = []
for i in range(len(instant)):
    energia_values = energia_tes_02[i] + energia_tes_22[i] + energia_tes_52[i]
    + energia_tes_83[i] + energia_tes_98[i]
    energia.append(energia_values)

```

```

[ ]: #EVOLUÇÃO DA ENERGIA ARMAZENADA

plt.figure()
plt.plot(instant, energia, color="red", linestyle='-', marker='o', markerSize=20)
plt.xlabel('Tempo [s]')
plt.ylabel('Energia [J]')
plt.grid()
plt.show()

print(f'A quantidade final de energia armazenada é {energia[-1]:.2e} J')

```

```

[768]: #ENERGIA

#-----
def func_energia_camada(instant, m_tes, T_tes_K, T_02_K):
    exergia_camada = []

```

16

```
for i in range(len(instante)):\n    T_media = ((T_tes_K[0] + T_tes_K[1]) / 2)\n    cp_camada = CP.PropsSI('C', 'T', T_media, 'Q', 0, 'Water')\n    exerzia_instante = m_tes * ((T_02_K[0] - T_tes_K[1]) + T_tes_K[1]) * np.\n    <math>\\log(T_{tes_K[1]} / T_{02_K[0]})</math>\n    exerzia_camada.append(cp_camada * exerzia_instante)\n    return exerzia_camada\n\nexerzia_98 = func_exerzia_camada(instant, m_tes[0], T_tes_K[0], T_02_K)\nexerzia_83 = func_exerzia_camada(instant, m_tes[1], T_tes_K[1], T_02_K)\nexerzia_52 = func_exerzia_camada(instant, m_tes[2], T_tes_K[2], T_02_K)\nexerzia_22 = func_exerzia_camada(instant, m_tes[3], T_tes_K[3], T_02_K)\nexerzia_02 = func_exerzia_camada(instant, m_tes[4], T_tes_K[4], T_02_K)\n\ndef func_exerzia(exerzia_98, exerzia_83, exerzia_52, exerzia_22, exerzia_02):\n    exerzia = []\n    for i in range(len(exerzia_98)):\n        exerzia_instante = exerzia_98[i] + exerzia_83[i] + exerzia_52[i] * u\n        <math>\\leftarrow exerzia_{22}[i] + exerzia_{02}[i]</math>\n        exerzia.append(exerzia_instante)\n    return exerzia\n\nexerzia = func_exerzia(exerzia_98, exerzia_83, exerzia_52, exerzia_22, u\n    <math>\\leftarrow exerzia_{02}</math>)\n\n#-----\nT_tes_max = max(max(sublista) for sublista in T_tes) + 273.15\nT_tes_min = min(min(sublista) for sublista in T_tes) + 273.15\n\rho_cold = CP.PropsSI('D', 'T', T_tes_min, 'Q', 0, 'Water')\ncp_cold = CP.PropsSI('C', 'T', T_tes_min, 'Q', 0, 'Water')\nV_cold = V_total\nm_cold = V_cold * rho_cold\n\nexerzia_ideal = []\nfor i in range(len(instant)):\n    exerzia_ideal_values = cp_cold * m_cold * ((T_tes_max - T_tes_min) * u\n    <math>\\leftarrow T_{tes\_min} * np.log(T_{tes\_min} / T_{tes\_max})</math>)\n    exerzia_ideal.append(exerzia_ideal_values)\n\n#-----\nrend_exerzia = [exerzia[i] / exerzia_ideal[i]] for i in range(len(exerzia))\n\n#-----
```

17

```
[ ]:\n#EVOLUÇÃO DA EXERGIA\n\nplt.figure()\nplt.plot(instant, exerzia_98, color='red', marker='o', markevery=20, u\n    <math>\\leftarrow label=T_{98}</math>)\nplt.plot(instant, exerzia_83, color='orange', marker='s', markevery=20, u\n    <math>\\leftarrow label=T_{83}</math>)\nplt.plot(instant, exerzia_52, color='gold', marker='^', markevery=20, u\n    <math>\\leftarrow label=T_{52}</math>)\nplt.plot(instant, exerzia_22, color='blue', marker='x', markevery=20, u\n    <math>\\leftarrow label=T_{22}</math>)\nplt.plot(instant, exerzia_02, color='navy', marker='d', markevery=20, u\n    <math>\\leftarrow label=T_{02}</math>)\n#<math>\\leftarrow plot(instant, exerzia_{ideal}, color='darkgreen', marker='h', markevery=20, u</math>\n    <math>\\leftarrow label=Ideal</math>)\nplt.xlabel('instant [s]')\nplt.ylabel('$zeta$')\nplt.legend()\nplt.title('Exergia das camadas do sistema TES')\nplt.grid()\n\nplt.figure()\nplt.plot(instant, exerzia, label='Experimental')\nplt.plot(instant, exerzia_ideal, label='Ideal')\nplt.xlabel('instant [s]')\nplt.ylabel('$zeta$')\nplt.legend()\nplt.title('Exergia')\nplt.grid()\n\nplt.figure()\nplt.plot(instant, rend_exerzia)\nplt.xlabel('instant [s]')\nplt.ylabel(r'$\\eta_{zeta}$')\nplt.title('Rendimento Exergetico')\nplt.ylim([0.1, 1.1])\nplt.grid()\nplt.show()\n\n#ENTROPIA\n\n#CASO REAL\n\ndef func_entropia_camada(instant, T_tes_K):\n\n
```

[TTO]:

18

```
entropia_camada = []

for i in range(len(instant)):
    entropia_istante = 0
    entropia_istante = np.log(T_tes_K[i] / T_tes_K[i])
    T_med = ((T_tes_K[i] + T_tes_K[0]) / 2)
    cp_tes = CP.PropsSI('C', 'T', T_med, 'Q', 0, 'Water')
    entropia_camada.append(cp_tes * entropia_istante)

return entropia_camada

entropia_T_98 = func_entropia_camada(instant, T_tes_K[0])
entropia_T_83 = func_entropia_camada(instant, T_tes_K[1])
entropia_T_52 = func_entropia_camada(instant, T_tes_K[2])
entropia_T_22 = func_entropia_camada(instant, T_tes_K[3])
entropia_T_02 = func_entropia_camada(instant, T_tes_K[4])

def func_entropia(entropia_T_98, entropia_T_83, entropia_T_52, entropia_T_22,
entropia_T_02) :

    entropia_values = []

    for i in range(len(entropia_T_98)) :
        entropia_istante = entropia_T_98[i] + entropia_T_83[i] +
entropia_T_52[i] + entropia_T_22[i] + entropia_T_02[i]
        entropia_values.append(entropia_istante)

    return entropia_values

entropia = func_entropia(entropia_T_98, entropia_T_83, entropia_T_52,
entropia_T_22, entropia_T_02)

#-----
#CASO COMPLETAMENTE MISTURADO

T_tes_min = min([min(sublista) for sublista in T_tes]) + 273.15

entropia_fullmixed = []

for i in range(len(instant)):
    T_med = [sublista[0] for sublista in T_tes]
    T_fullmixed = np.mean(T_med)
    cp_fullmixed = CP.PropsSI('C', 'T', T_fullmixed + 273.15, 'Q', 0, 'Water')
    entropia_fullmixed_values = cp_fullmixed * (np.log(T_tes_min / T_fullmixed))
    entropia_fullmixed.append(entropia_fullmixed_values)
```

```
#-----
#CASO COMPLETAMENTE ESTRATIFICADO

T_tes_min = min([min(sublista) for sublista in T_tes]) + 273.15

entropia_strat = []

for i in range(len(instant)):
    cp_T_min = CP.PropsSI('C', 'T', T_tes_min, 'Q', 0, 'Water')
    entropia_strat_values = cp_fullmixed * (np.log(T_tes_min / T_tes_min))
    entropia_strat.append(entropia_strat_values)

#-----

rend_entropia=[]

for i in range(len(instant)):
    rend_entropia_values = (entropia_fullmixed[i] - entropia[i]) /
entropia_fullmixed[i]
    rend_entropia.append(rend_entropia_values)

#-----

[ ]:
#EVOLUÇÃO DA ENTROPIA

plt.figure()
plt.plot(instant, entropia_T_98, color="red", marker='o', markevery=20,
label='T_98')
plt.plot(instant, entropia_T_83, color="orange", marker='s', markevery=20,
label='T_83')
plt.plot(instant, entropia_T_52, color="gold", marker='^', markevery=20,
label='T_52')
plt.plot(instant, entropia_T_22, color="blue", marker='x', markevery=20,
label='T_22')
plt.plot(instant, entropia_T_02, color="navy", marker='d', markevery=20,
label='T_02')
plt.xlabel('instant [s]')
plt.ylabel('s')
plt.legend()
plt.title('Entropia das camadas do sistema TES')
plt.grid(False)

plt.figure()
plt.plot(instant, entropia, label='Experimental')
plt.plot(instant, entropia_strat, label='Completamente estratificado')
plt.plot(instant, entropia_fullmixed, label='Completamente misturado')
plt.xlabel('instant [s]')
plt.ylabel('s')
```

```
plt.legend()
plt.title('Entropia')
plt.grid(False)

plt.figure()
plt.plot(instant, rend_entropia)
plt.xlabel('Instant [s]')
plt.ylabel('r\eta_{eta_{[s]}}')
plt.title('Rendimento Entrópico')
plt.grid(False)
plt.show()
```

```
[772]: #MTX
#-----
#CASO REAL

def func_energia_camada(instant, T_tes_K, v_tes, y_centro):

    momento_istante_camada = []
    for i in range(len(instant)):
        rho_mix = CP.PropSI('D', 'T', T_tes_K[i], 'Q', 0, 'Water')
        cp_mix = CP.PropSI('C', 'T', T_tes_K[i], 'Q', 0, 'Water')
        energia_istante_value = rho_mix * cp_mix * v_tes * T_tes_K[i]
        momento_istante_camada.append(y_centro * energia_istante_value)

    return momento_istante_camada

energia_02 = func_energia_camada(instant, T_tes_K[0], v_tes[0], y_centro[0])
energia_22 = func_energia_camada(instant, T_tes_K[1], v_tes[1], y_centro[1])
energia_52 = func_energia_camada(instant, T_tes_K[2], v_tes[2], y_centro[2])
energia_83 = func_energia_camada(instant, T_tes_K[3], v_tes[3], y_centro[3])
energia_98 = func_energia_camada(instant, T_tes_K[4], v_tes[4], y_centro[4])

energia_tes = [energia_98, energia_83, energia_52, energia_22, energia_02]

momento_tes = []
for i in range(len(instant)):
    momento_tes_value = (energia_02[i] + energia_22[i] + energia_52[i] +
~energia_83[i] + energia_98[i]) / len(energia_tes)
    momento_tes.append(momento_tes_value)

#-----
#CASO COMPLETAMENTE MISTURADO
```

21

```
energia_fullmixed = []
for i in range(len(instant)):
    T_med = [sublista[i] for sublista in T_tes]
    T_fullmixed = np.mean(T_med)
    rho_fullmixed = CP.PropSI('D', 'T', T_fullmixed + 273.15, 'Q', 0, 'Water')
    cp_fullmixed = CP.PropSI('C', 'T', T_fullmixed + 273.15, 'Q', 0, 'Water')
    energia_fullmixed_values = T_fullmixed * rho_fullmixed * cp_fullmixed * v_total
    energia_fullmixed.append(energia_fullmixed_values)

momento_fullmixed = []
for i in range(len(instant)):
    momento_fullmixed_value = (H/2) * energia_fullmixed[i]
    momento_fullmixed.append(momento_fullmixed_value)

#-----
#CASO COMPLETAMENTE ESTRATIFICADO

T_tes_max = max([max(sublista) for sublista in T_tes]) + 273.15
T_tes_min = min([min(sublista) for sublista in T_tes]) + 273.15

rho_hot = CP.PropSI('D', 'T', T_tes_max, 'Q', 0, 'Water')
cp_hot = CP.PropSI('C', 'T', T_tes_max, 'Q', 0, 'Water')
rho_cold = CP.PropSI('D', 'T', T_tes_min, 'Q', 0, 'Water')
cp_cold = CP.PropSI('C', 'T', T_tes_min, 'Q', 0, 'Water')

n = len(instant)
delta_y = H / n
y = H
momento_strat = []
for i in range(n):
    v_hot = v_total * (y / H)
    v_cold = v_total - v_hot

    energia_hot = rho_hot * cp_hot * T_tes_max * v_hot
    energia_cold = rho_cold * cp_cold * T_tes_min * v_cold

    y_hot = y / 2
    y_cold = (H - y_hot) / 2

    momento_strat_value = (y_cold * energia_cold + y_hot * energia_hot) / 2
    momento_strat.append(momento_strat_value)
```

22

<pre>y -= delta_y #----- mix=[] for i in range(len(instant)): mix_values = (momento_strat[i] - momento_tes[i]) / (momento_strat[i] - momento_fulmixed[i]) mix.append(mix_values) []: #EVOLUÇÃO DO MIX plt.figure() plt.plot(instant, momento_tes, color="red", marker='o', markevery=20, label='Depósito Real') plt.plot(instant, momento_strat, color="orange", marker='s', markevery=20, label='Depósito perfeitamente estratificado') plt.plot(instant, momento_fulmixed, color="gold", marker='^', markevery=20, label='Depósito completamente misturado') plt.xlabel('Instant [s]') plt.ylabel('Momento [J.m]') plt.legend() plt.grid(False) plt.figure() plt.plot(instant, mix) plt.xlabel('Instant [s]') plt.ylabel('MIX') plt.ylim((-0.1, 1.1)) plt.title('Número adimensional MIX') plt.grid(False) plt.show()</pre>	<pre>[76]: #PARAMETROS ADIMENSIONAIS #----- #NUMERO DE RICHARDSON Ri_dis = [] for i in range(len(instant)): T_med_Ri_dis = ((T_98_K[i] + T_02_K[i]) / 2) beta_Ri = CP.PropsSI('isobaric_expansion_coefficient', 'T', T_med_Ri_dis, ,Q', 0, 'Water') vs_Ri = ((Cs_med * 10**3) / 60) / (np.pi * (W/2)**2) Ri_value = (g * beta_Ri * (T_98_K[i] - T_02_K[i]) * H) / (vs_Ri**2)</pre>
--	---

23

<pre>Ri_dis.append(Ri_value) #----- #NUMERO DE PECLET Pe_dis = [] for i in range(len(instant)): T_med_Pe_dis = ((T_98_K[i] + T_02_K[i]) / 2) vt_Pe = ((Cs_med * 10**3) / 60) / (np.pi * (D / 2)**2) cp_Pe = CP.PropsSI('C', 'T', T_med_Pe_dis, 'Q', 0, 'Water') rho_Pe = CP.PropsSI('D', 'T', T_med_Pe_dis, 'Q', 0, 'Water') k_Pe = CP.PropsSI('L', 'T', T_med_Pe_dis, 'Q', 0, 'Water') alpha_Pe = k_Pe / (rho_Pe * cp_Pe) Pe_values = (vt_Pe * H) / alpha_Pe Pe_dis.append(Pe_values) #----- #NUMERO DE REYNOLDS Re_dis = [] for i in range(len(instant)): rho_Re = CP.PropsSI('D', 'T', Ts_i_K[i], 'Q', 0, 'Water') u_Re = CP.PropsSI('V', 'T', Ts_i_K[i], 'Q', 0, 'Water') vs_Re_dis = ((Cs_med * 10**3) / 60) / (np.pi * (W/2)**2) Re_value = (rho_Re * vs_Re_dis * W) / u_Re Re_dis.append(Re_value) Re_tank_dis = [] for i in range(len(instant)): T_tes_ch_med = (T_02[i] + T_22[i] + T_52[i] + T_83[i] + T_98[i]) / len(T_tes) rho_Re = CP.PropsSI('D', 'T', T_tes_ch_med + 273.15, 'Q', 0, 'Water') u_Re = CP.PropsSI('V', 'T', T_tes_ch_med + 273.15, 'Q', 0, 'Water') vs_Re_tank_ch = ((Cs_med * 10**3) / 60) / (np.pi * (D/2)**2) Re_value = (rho_Re * vs_Re_tank_ch * D) / u_Re Re_tank_dis.append(Re_value)</pre>	<pre>[]: #EVOLUÇÃO DOS PARAMETROS ADIMENSIONAIS #-----</pre>
--	--

24


```
#-----
#EVOLUÇÃO DO NÚMERO DE RICHARDSON

plt.figure()
plt.plot(instant, Ri_dis, label='Entrada')
plt.xlabel('instant [s]')
plt.ylabel('Ri')
plt.legend()
plt.title('Número de Richardson')
plt.grid(False)

#-----
#EVOLUÇÃO DO NÚMERO DE PECLET

plt.figure()
plt.plot(instant, Pe_dis, label='Depósito')
plt.xlabel('instant [s]')
plt.ylabel('Pe')
plt.legend()
plt.title('Número de Peclet')
plt.grid(False)

#-----
#EVOLUÇÃO DO NÚMERO DE REYNOLDS

plt.figure()
plt.plot(instant, Re_dis, label='Entrada')
plt.plot(instant, Re_tank_dis, label='Depósito')
plt.xlabel('instant [s]')
plt.ylabel('Re')
plt.legend()
plt.title('Número de Reynolds')
plt.grid(False)
print(f'Re_tank = ', np.max(Re_tank_dis))

#-----
```

```
[ ]: #GUARDAR VALORES PARA ANÁLISE

resultados = {
    'instantes': instant,
    'Espessura da termoclina': espessura_termoclina,
    'Intervalos da termoclina': intervalos_termoclina,
    'Eficiência da descarga': rend_dis_energY,
```

```
'Capacity ratio': cap_ratio_dis,
'Energia armazenada': energia,
'Rendimento exergetico': rend_exergia,
'Rendimento entropico': rend_entropia,
'MIX': mix,
'Richardson': Ri_dis,
'Peclet': Pe_dis,
'Reynolds de entrada': Re_dis,
'Reynolds do deposito': Re_tank_dis,
}

max_length = max(len(1st) for 1st in resultados.values())

for key, 1st in resultados.items():
    if len(1st) < max_length:
        resultados[key] = 1st + [np.nan] * (max_length - len(1st))

resultados_file = pd.DataFrame(resultados)

new_path = 'Gráficos/Descarga/'
file = os.path.join(new_path, file_name)

resultados_file.to_csv(file, index=False)

print(f"Dados salvos em '{file}'")
display(resultados_file)
```


D.3 analyse_carregamento_graficos.ipynb

```
[54]: #BIBLIOTECAS
import os
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import tkinter as tk
from tkinter import messagebox

[55]: #LER OS DADOS

#-----
diretorio = 'Gráficos/Carregamento'
arquivos = [f for f in os.listdir(diretorio) if f.endswith('.csv')]

dataframes = {}

for arquivo in arquivos:
    nome_variavel = os.path.splitext(arquivo)[0]
    caminho_arquivo = os.path.join(diretorio, arquivo)
    df = pd.read_csv(caminho_arquivo)
    dataframes[nome_variavel] = df

def agrupar_arquivos(diretorio):
    grupos = {'02': [], '04': [], '07': [], '40': [], '50': [], '60': [], '': []}
    arquivos = [f for f in os.listdir(diretorio) if f.endswith('.csv')]

    for arquivo in arquivos:
        partes = arquivo.split('.')
        nome_sem_ultima_parte = '.'.join(partes[:-1]) + '.csv'

        for chave in grupos:
            if chave in nome_sem_ultima_parte:
                grupos[chave].append(arquivo)
```

```
        return grupos

    nomes_grupos = {
        '02': 'caudal = 2 l/min',
        '04': 'caudal = 4,5 l/min',
        '07': 'caudal = 7 l/min',
        '40': 'temperatura = 40°C',
        '50': 'temperatura = 50°C',
        '60': 'temperatura = 60°C',
        '': 'todos os casos'
    }

def carregar_arquivos(diretorio, arquivos):
    dataframes = {}

    for arquivo in arquivos:
        nome_variavel = os.path.splitext(arquivo)[0]
        caminho_arquivo = os.path.join(diretorio, arquivo)
        df = pd.read_csv(caminho_arquivo)
        dataframes[nome_variavel] = df

    return dataframes

def on_select(event):
    global root, selected_group, dataframes

    try:
        selected_index = listbox.curselection()[0]
        selected_group = list(nomes_grupos.keys())[selected_index]
        messagebox.showinfo("Análise selecionada", f"Você escolheu analisar {nomes_grupos[selected_group]}")
        arquivos_grupo = grupos[selected_group]
        dataframes_grupo = carregar_arquivos(diretorio, arquivos_grupo)
        root.destroy()
    except IndexError:
        messagebox.showwarning("Atenção", "Nenhum item selecionado.")
    except Exception as e:
        messagebox.showerror("Erro", f"Ocorreu um erro ao ler os arquivos: {e}")

def create_gui():
    global listbox, root

    root = tk.Tk()
    root.title("Seleção da análise")
    listbox = tk.Listbox(root, width=50, height=15)
    listbox.pack(pady=10, padx=10, fill=tk.BOTH, expand=True)

    for nome_grupo in nomes_grupos.values():
        listbox.insert(tk.END, nome_grupo)

    listbox.bind('<<ListboxSelect>>', on_select)
```

```
root.mainloop()

grupos = agrupar_arquivos(diretorio)

create_gui()

#-----

[ ]: #GRÁFICOS

#-----

def plotar_graficos(dataframes):
    series = {}

    for nome_variavel, df in dataframes.items():
        for coluna in df.columns:
            if coluna not in ['Instantes', 'Intervalos da termoclina',
                              'Espessura da termoclina', 'Capacity ratio rounded']:
                if coluna not in series:
                    series[coluna] = []
                series[coluna].append((nome_variavel, df[coluna]))

    for coluna, dados in series.items():
        plt.figure()
        for nome_variavel, serie in dados:
            partes = nome_variavel.rsplit('_', 1)
            df = dataframes[nome_variavel]
            plt.plot(df['Instantes'], serie, label=partes[0])
            plt.xlabel('Tempo [s]')
            plt.ylabel(coluna)
            plt.legend() #loc='center left', bbox_to_anchor=(1, 0.5)
            plt.grid(True)
            plt.show()

    plt.figure()
    for nome_variavel, df in dataframes.items():
        partes = nome_variavel.rsplit('_', 1)
        if 'Intervalos da termoclina' in df.columns and 'Espessura da
        termoclina' in df.columns:
            plt.plot(df['Intervalos da termoclina'], df['Espessura da
            termoclina'], label=partes[0])
            plt.xlabel('Tempo [s]')
            plt.ylabel('Espessura da termoclina')
            plt.ylim(0, 0.5)
            plt.legend()
            plt.grid(True)
```

3

```
plt.show()

plotar_graficos(dataframes)

#-----

[ ]: #GRÁFICOS DE COMPARAÇÃO

#-----

def plotar_graficos_comp(dataframes):
    plt.figure()
    for nome_variavel, df in dataframes.items():
        partes = nome_variavel.rsplit('_', 1)
        if 'Richardson' in df.columns and 'Espessura da termoclina' in df.
        columns:
            plt.plot(df['Richardson'], df['Espessura da termoclina'],
                    label=partes[0])
            plt.xlabel('Richardson')
            plt.ylabel('Espessura da termoclina')
            plt.legend()
            plt.grid()
            plt.show()

    plt.figure()
    for nome_variavel, df in dataframes.items():
        partes = nome_variavel.rsplit('_', 1)
        if 'Richardson' in df.columns and 'Peclet' in df.columns:
            plt.plot(df['Peclet'], df['Richardson'], label=partes[0])
            plt.xlabel('Peclet')
            plt.ylabel('Richardson')
            plt.legend()
            plt.grid()
            plt.show()

    plt.figure()
    for nome_variavel, df in dataframes.items():
        partes = nome_variavel.rsplit('_', 1)
        if 'Peclet' in df.columns and 'Espessura da termoclina' in df.columns:
            plt.plot(df['Peclet'], df['Espessura da termoclina'],
                    label=partes[0])
            plt.xlabel('Peclet')
            plt.ylabel('Espessura da termoclina')
            plt.ylim(0, 0.5)
            plt.legend(bbox_to_anchor=(0.1, 1), loc='upper left')
            plt.grid()
```

4

```

plt.show()

plt.figure()
for nome_variavel, df in dataframes.items():
    partes = nome_variavel.rsplit('_', 1)
    if 'Richardson' in df.columns and 'Reynolds de entrada' in df.columns:
        plt.plot(df[['Reynolds de entrada'], df['Richardson']],
                label=partes[0])
        plt.xlabel('Reynolds de entrada')
        plt.ylabel('Richardson')
        plt.legend()
        plt.grid()
        plt.show()

plt.figure()
for nome_variavel, df in dataframes.items():
    partes = nome_variavel.rsplit('_', 1)
    if 'Peclet' in df.columns and 'Reynolds do deposito' in df.columns:
        plt.plot(df[['Peclet'], df['Reynolds do deposito']], label=partes[0])
        plt.xlabel('Reynolds do deposito')
        plt.ylabel('Peclet')
        plt.legend()
        plt.grid()
        plt.show()

plotar_graficos_comp(dataframes)

#-----

[]: #TABELAS
#-----

def plotar_tabelas(dataframes):
    last_value_energia = {}
    for nome_variavel, df in dataframes.items():
        if 'Energia armazenada' in df.columns:
            last_value = df['Energia armazenada'].iloc[-1]
            first_value = df['Energia armazenada'].iloc[0]
            last_value_energia[nome_variavel] = round((last_value * 10**-3) -
                (first_value * 10**-3))

    last_value_energia_df = pd.DataFrame(list(last_value_energia.items()))
    plt.figure(figsize = (5,2), dpi = 250)
    plt.axis('off')

```

5

```

plt.table(cellText=last_value_energia_df.values, colLabels=["Ensaio",
    "Energia térmica [kJ]", loc='center', colColours=['#3f3f3f']*4,
    cellLoc='center', colWidths=[0.4, 0.2])

max_values_ef = {}
for nome_variavel, df in dataframes.items():
    if 'Eficiência do carregamento' in df.columns:
        max_value = df['Eficiência do carregamento'].max()
        max_values_ef[nome_variavel] = round(max_value, 2)

max_values_ef_df = pd.DataFrame(list(max_values_ef.items()))
plt.figure(figsize = (5,2), dpi = 250)
plt.axis('off')
plt.table(cellText=max_values_ef_df.values, colLabels=["Ensaio",
    "Eficiência do carregamento", loc='center', colColours=['#3f3f3f']*4,
    cellLoc='center', colWidths=[0.4, 0.2])

max_values_cr = {}
for nome_variavel, df in dataframes.items():
    if 'Capacidade ratio' in df.columns:
        max_value = df['Capacidade ratio'].max()
        max_values_cr[nome_variavel] = round(max_value, 2)

max_values_cr_df = pd.DataFrame(list(max_values_cr.items()))
plt.figure(figsize = (5,2), dpi = 250)
plt.axis('off')
plt.table(cellText=max_values_cr_df.values, colLabels=["Ensaio", "Capacity",
    "ratio", loc='center', colColours=['#3f3f3f']*4, cellLoc='center',
    colWidths=[0.4, 0.2])

max_values_exer = {}
for nome_variavel, df in dataframes.items():
    if 'Rendimento exergético' in df.columns:
        max_value = df['Rendimento exergético'].max()
        max_values_exer[nome_variavel] = round(max_value, 2)

max_values_exer_df = pd.DataFrame(list(max_values_exer.items()))
plt.figure(figsize = (5,2), dpi = 250)
plt.axis('off')
plt.table(cellText=max_values_exer_df.values, colLabels=["Ensaio",
    "Rendimento exergético", loc='center', colColours=['#3f3f3f']*4,
    cellLoc='center', colWidths=[0.4, 0.2])

plotar_tabelas(dataframes)

#-----

```

6

D.4 analise_descarga_graficos.ipynb

```
[51]: #BIBLIOTECAS

import numpy as np
import os
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import tkinter as tk
from tkinter import messagebox
```

```
[52]: #LER OS DADOS
```

```
#-----
diretorio = 'Gráficos/Descarga'
arquivos = [f for f in os.listdir(diretorio) if f.endswith('.csv')]

dataframes = {}

for arquivo in arquivos:
    nome_variavel = os.path.splitext(arquivo)[0]
    caminho_arquivo = os.path.join(diretorio, arquivo)
    df = pd.read_csv(caminho_arquivo)
    dataframes[nome_variavel] = df

def agrupar_arquivos(diretorio):
    grupos = {'02': [], '04': [], '07': [], '40': [], '50': [], '60': [], '': []}
    arquivos = [f for f in os.listdir(diretorio) if f.endswith('.csv')]

    for arquivo in arquivos:
        partes = arquivo.split('.')
        nome_sem_ultima_parte = '.'.join(partes[:-1]) + '.csv'

        for chave in grupos:
            if chave in nome_sem_ultima_parte:
                grupos[chave].append(arquivo)
```

```
    return grupos

nomes_grupos = {
    '02': 'caudal = 2 l/min',
    '04': 'caudal = 4,5 l/min',
    '07': 'caudal = 7 l/min',
    '40': 'temperatura = 40°C',
    '50': 'temperatura = 50°C',
    '60': 'temperatura = 60°C',
    '': 'todos os casos'
}
```

```
def carregar_arquivos(diretorio, arquivos):
    dataframes = {}

    for arquivo in arquivos:
        nome_variavel = os.path.splitext(arquivo)[0]
        caminho_arquivo = os.path.join(diretorio, arquivo)
        df = pd.read_csv(caminho_arquivo)
        dataframes[nome_variavel] = df

    return dataframes
```

```
def on_select(event):
    global root, selected_group, dataframes

    try:
        selected_index = listbox.curselection()[0]
        selected_group = list(nomes_grupos.keys())[selected_index]
        messagebox.showinfo("Análise selecionada", f"Você escolheu analisar {nomes_grupos[selected_group]}")
        arquivos_grupo = grupos[selected_group]
        dataframes = carregar_arquivos(diretorio, arquivos_grupo)
        root.destroy()
    except IndexError:
        messagebox.showwarning("Atenção", "Nenhum item selecionado.")
    except Exception as e:
        messagebox.showerror("Erro", f"Ocorreu um erro ao ler os arquivos: {e}")

def create_gui():
    global listbox, root

    root = tk.Tk()
    root.title("Seleção da análise")
    listbox = tk.Listbox(root, width=50, height=15)
    listbox.pack(pady=10, padx=10, fill=tk.BOTH, expand=True)

    for nome_grupo in nomes_grupos.values():
        listbox.insert(tk.END, nome_grupo)

    listbox.bind('<<ListboxSelect>>', on_select)
```

```
root.mainloop()

grupos = agrupar_arquivos(diretorio)

create_gui()

#-----

[ ]: #GRÁFICOS

#-----

def plotar_graficos(dataframes):
    series = {}

    for nome_variavel, df in dataframes.items():
        for coluna in df.columns:
            if coluna not in ['Instantes', 'Intervalos da termocлина',
                              'Espessura da termocлина', 'Capacity ratio rounded']:
                if coluna not in series:
                    series[coluna] = []
                series[coluna].append((nome_variavel, df[coluna]))

    for coluna, dados in series.items():
        plt.figure()
        for nome_variavel, serie in dados:
            partes = nome_variavel.rsplit('_', 1)
            df = dataframes[nome_variavel]
            plt.plot(df['Instantes'], serie, label=partes[0])
            plt.xlabel('Tempo [s]')
            plt.ylabel(coluna)
            plt.ylim(-0.1, 1.1)
            plt.legend()
            plt.grid(True)
            plt.show()

    plt.figure()
    for nome_variavel, df in dataframes.items():
        partes = nome_variavel.rsplit('_', 1)
        if 'Intervalos da termocлина' in df.columns and 'Espessura da
        termocлина' in df.columns:
            plt.plot(df['Intervalos da termocлина'], df['Espessura da
            termocлина'], label=partes[0])
            plt.xlabel('Tempo [s]')
            plt.ylabel('Espessura da termocлина')
            plt.ylim(0, 0.5)
            plt.legend()

3
```

```
plt.grid(True)
plt.show()

plotar_graficos(dataframes)

#-----

[ ]: #GRÁFICOS DE COMPARAÇÃO

#-----

def plotar_graficos_comp(dataframes):
    plt.figure()
    for nome_variavel, df in dataframes.items():
        partes = nome_variavel.rsplit('_', 1)
        if 'Richardson' in df.columns and 'Espessura da termocлина' in df.
        columns:
            plt.plot(df['Richardson'], df['Espessura da termocлина'],
                    label=partes[0])
            plt.xlabel('Richardson')
            plt.ylabel('Espessura da termocлина')
            plt.legend()
            plt.grid()
            plt.show()

    plt.figure()
    for nome_variavel, df in dataframes.items():
        partes = nome_variavel.rsplit('_', 1)
        if 'Richardson' in df.columns and 'Peclet' in df.columns:
            plt.plot(df['Peclet'], df['Richardson'], label=partes[0])
            plt.xlabel('Peclet')
            plt.ylabel('Richardson')
            plt.legend()
            plt.grid()
            plt.show()

    plt.figure()
    for nome_variavel, df in dataframes.items():
        partes = nome_variavel.rsplit('_', 1)
        if 'Peclet' in df.columns and 'Espessura da termocлина' in df.columns:
            plt.plot(df['Peclet'], df['Espessura da termocлина'],
                    label=partes[0])
            plt.xlabel('Peclet')
            plt.ylabel('Espessura da termocлина')
            plt.ylim(0, 0.5)
            plt.legend(bbox_to_anchor=(0.1, 1), loc='upper left')
            plt.grid()
            plt.show()

4
```



```

plt.figure()
for nome_variavel, df in dataframes.items():
    partes = nome_variavel.rsplit('-', 1)
    if 'Richardson' in df.columns and 'Reynolds de entrada' in df.columns:
        plt.plot(df[['Reynolds de entrada'], df['Richardson']],
                label=partes[0])
    plt.xlabel('Reynolds de entrada')
    plt.ylabel('Richardson')
    plt.grid()
    plt.legend()
    plt.show()

plt.figure()
for nome_variavel, df in dataframes.items():
    partes = nome_variavel.rsplit('-', 1)
    if 'Peclet' in df.columns and 'Reynolds do depósito' in df.columns:
        plt.plot(df[['Peclet'], df['Reynolds do depósito']], label=partes[0])
    plt.xlabel('Reynolds do depósito')
    plt.ylabel('Peclet')
    plt.grid()
    plt.legend()
    plt.show()

plotar_graficos_comp(dataframes)

#-----#TABELAS

def plotar_tabelas(dataframes):
    last_value_energia = {}
    for nome_variavel, df in dataframes.items():
        if 'Energia armazenada' in df.columns:
            last_value = df['Energia armazenada'].iloc[-1]
            first_value = df['Energia armazenada'].iloc[0]
            last_value_energia[nome_variavel] = np.abs(round((last_value * 10**-3) - (first_value * 10**-3)))

    last_value_energia_df = pd.DataFrame(list(last_value_energia.items()))
    plt.figure(figsize = (5,2), dpi = 250)
    plt.axis('off')

```

5

```

plt.table(cellText=last_value_energia_df.values, colLabels=["Ensaio",
        "Energia térmica [kJ]"], loc='center', colColours=['#3f3f3f']*4,
        cellLoc='center', colWidths=[0.4, 0.2])

    max_values_ef = {}
    for nome_variavel, df in dataframes.items():
        if 'Eficiência da descarga' in df.columns:
            max_value = df['Eficiência da descarga'].max()
            max_values_ef[nome_variavel] = round(max_value, 2)

    max_values_ef_df = pd.DataFrame(list(max_values_ef.items()))
    plt.figure(figsize = (5,2), dpi = 250)
    plt.axis('off')
    plt.table(cellText=max_values_ef_df.values, colLabels=["Ensaio",
        "Eficiência da descarga"], loc='center', colColours=['#3f3f3f']*4,
        cellLoc='center', colWidths=[0.4, 0.2])

    max_values_cr = {}
    for nome_variavel, df in dataframes.items():
        if 'Capacity ratio' in df.columns:
            max_value = df['Capacity ratio'].max()
            max_values_cr[nome_variavel] = round(max_value, 2)

    max_values_cr_df = pd.DataFrame(list(max_values_cr.items()))
    plt.figure(figsize = (5,2), dpi = 250)
    plt.axis('off')
    plt.table(cellText=max_values_cr_df.values, colLabels=["Ensaio",
        "ratio"], loc='center', colColours=['#3f3f3f']*4, cellLoc='center',
        colWidths=[0.4, 0.2])

    max_values_exer = {}
    for nome_variavel, df in dataframes.items():
        if 'Rendimento exergético' in df.columns:
            max_value = df['Rendimento exergético'].max()
            max_values_exer[nome_variavel] = round(max_value, 2)

    max_values_exer_df = pd.DataFrame(list(max_values_exer.items()))
    plt.figure(figsize = (5,2), dpi = 250)
    plt.axis('off')
    plt.table(cellText=max_values_exer_df.values, colLabels=["Ensaio",
        "Rendimento exergético"], loc='center', colColours=['#3f3f3f']*4,
        cellLoc='center', colWidths=[0.4, 0.2])

plotar_tabelas(dataframes)

#-----#

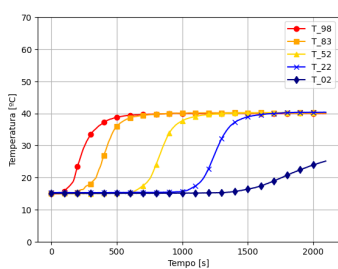
```

6

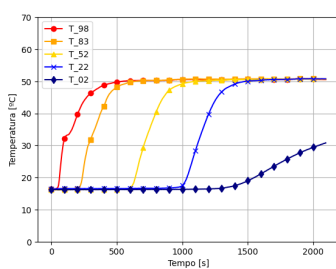
Anexo E - Apresentação Detalhada dos Resultados

E.1 Processo de carregamento

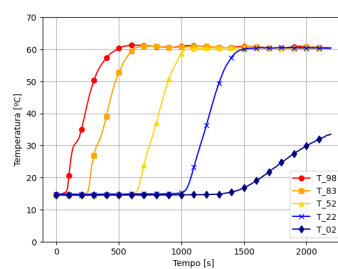
E.1.1 Distribuição da temperatura



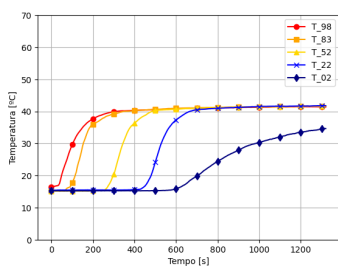
(a) 2 l/min 40°C



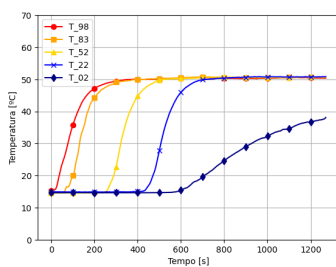
(b) 2 l/min 50°C



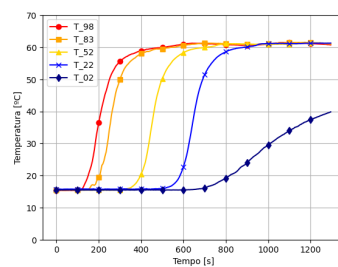
(c) 2 l/min 60°C



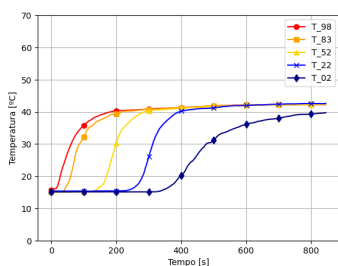
(d) 4,5 l/min 40°C



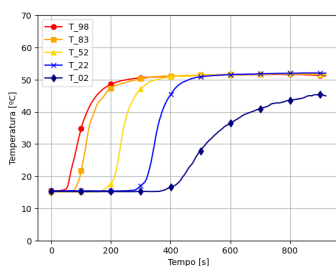
(e) 4,5 l/min 50°C



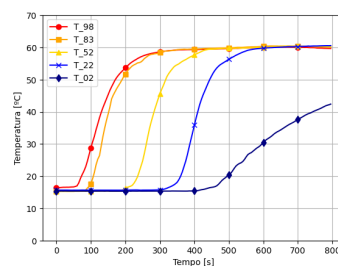
(f) 4,5 l/min 60°C



(g) 7 l/min 40°C

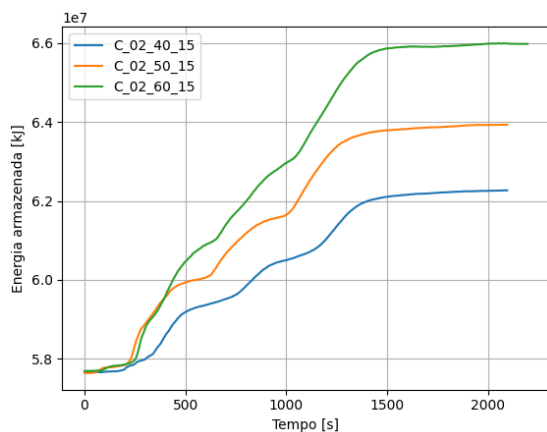


(h) 7 l/min 50°C

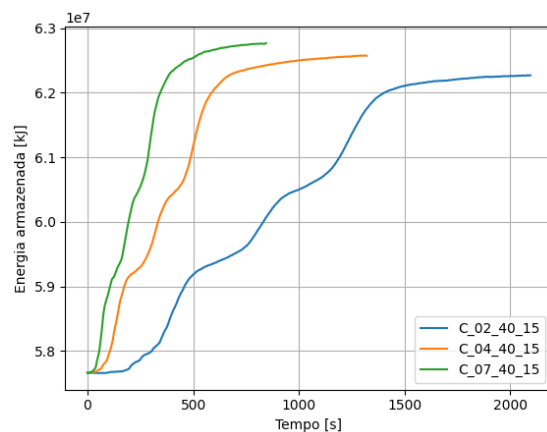


(i) 7 l/min 60°C

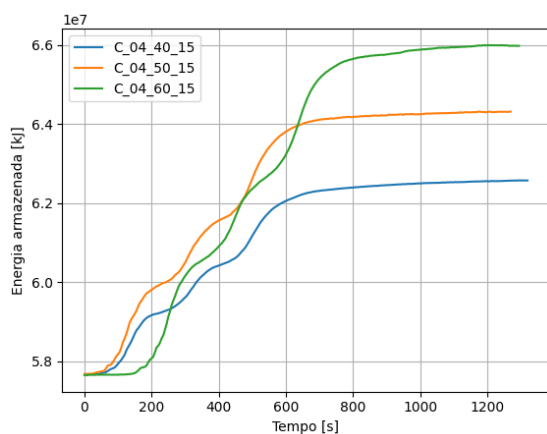
E.1.2 Energia armazenada



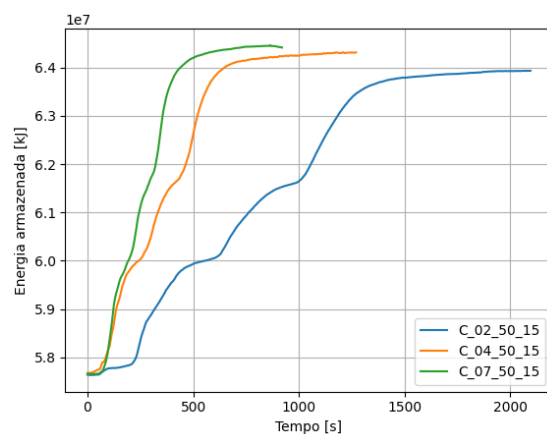
(a) 2 l/min



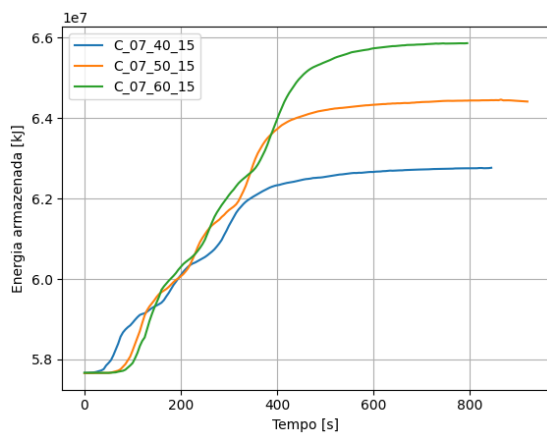
(b) 40°C



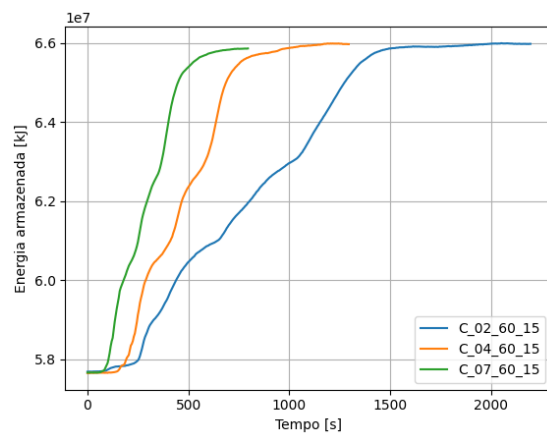
(c) 4,5 l/min



(d) 50°C

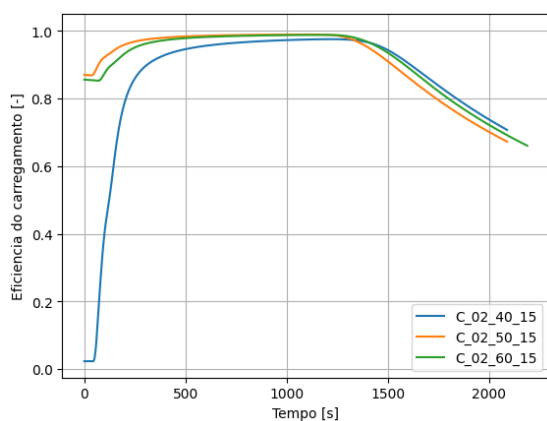


(e) 7 l/min

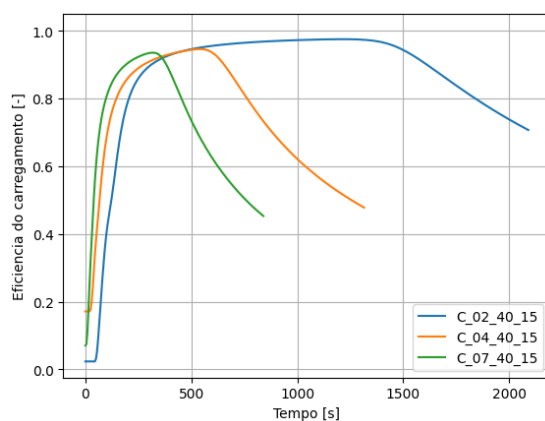


(f) 60°C

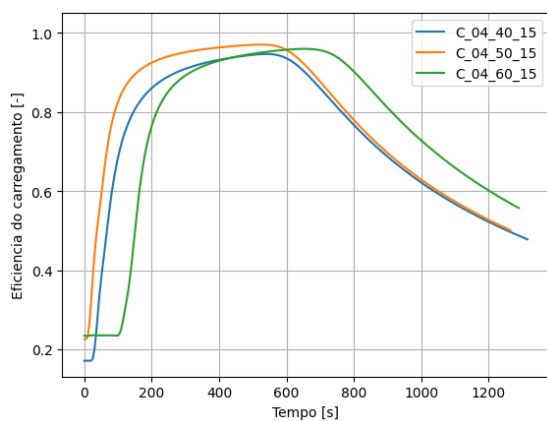
E.1.3 Eficiência do processo de carregamento



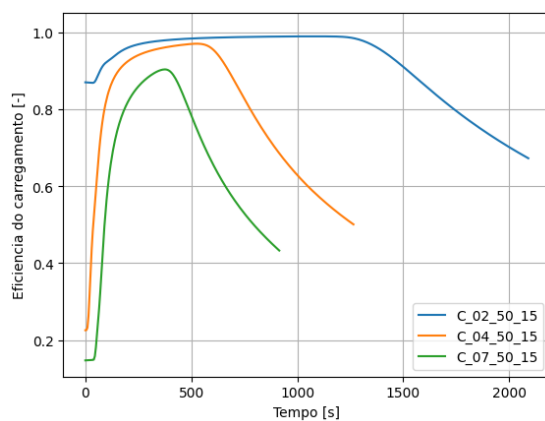
(a) 2 l/min



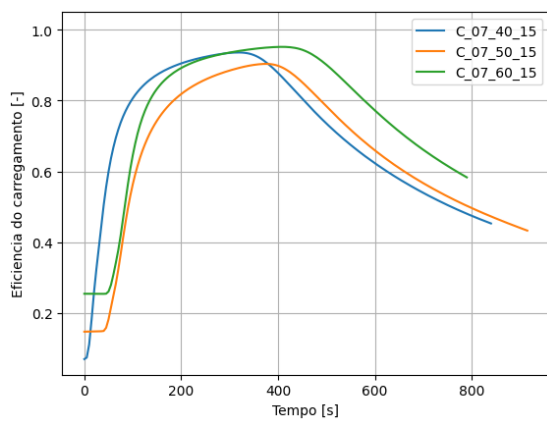
(b) 40°C



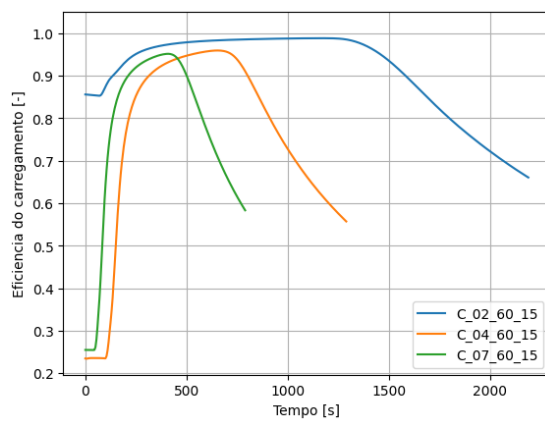
(c) 4,5 l/min



(d) 50°C

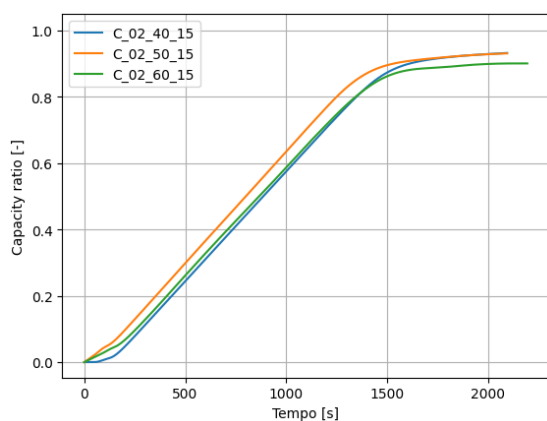


(e) 7 l/min

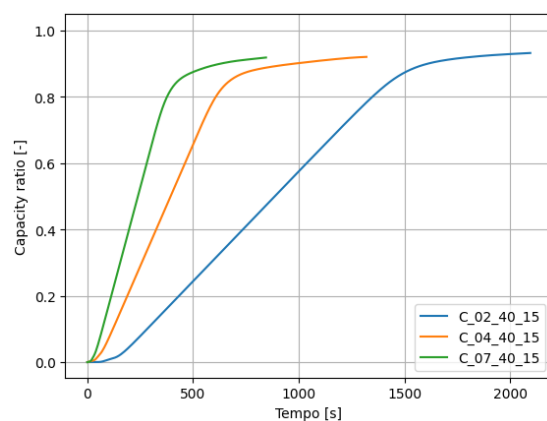


(f) 60°C

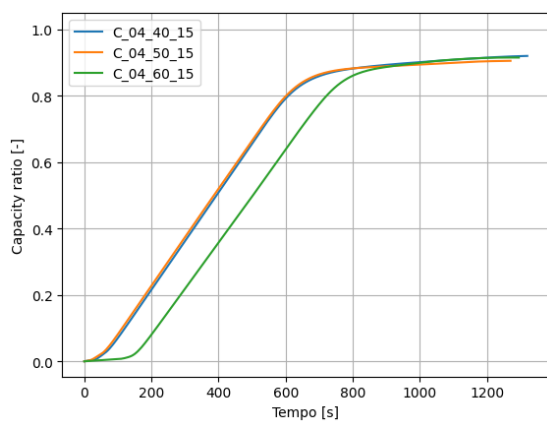
E.1.4 Capacity ratio



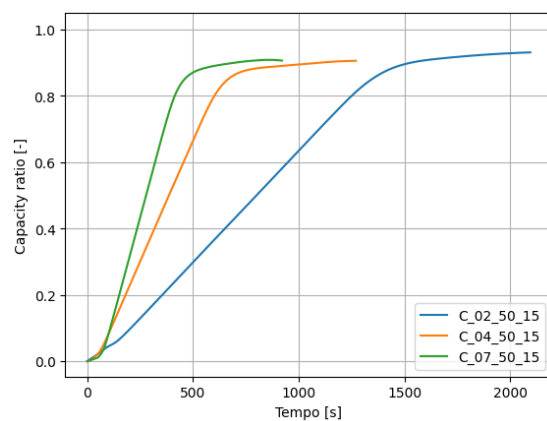
(a) 2 l/min



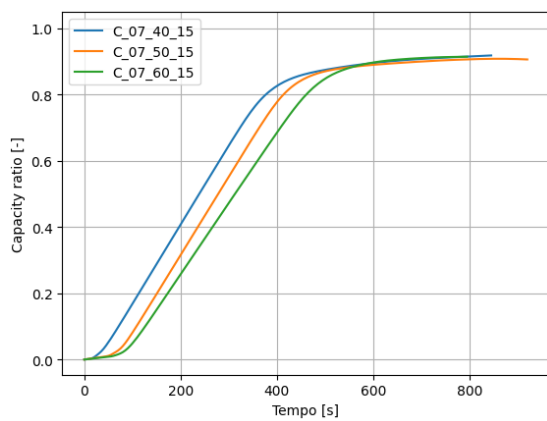
(b) 40°C



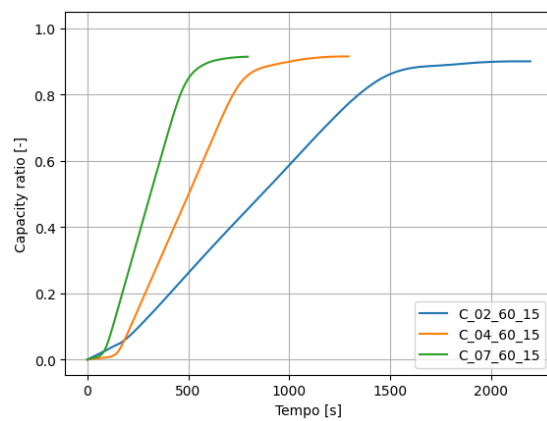
(c) 4,5 l/min



(d) 50°C

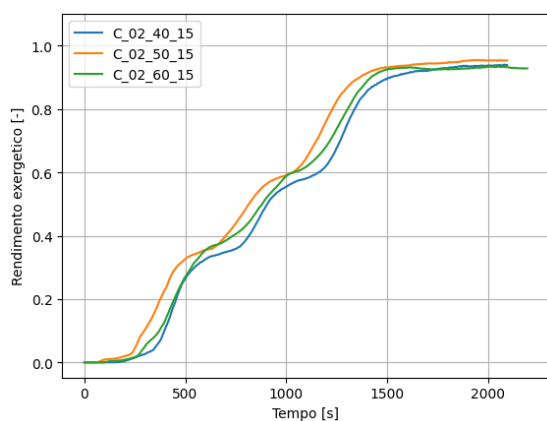


(e) 7 l/min

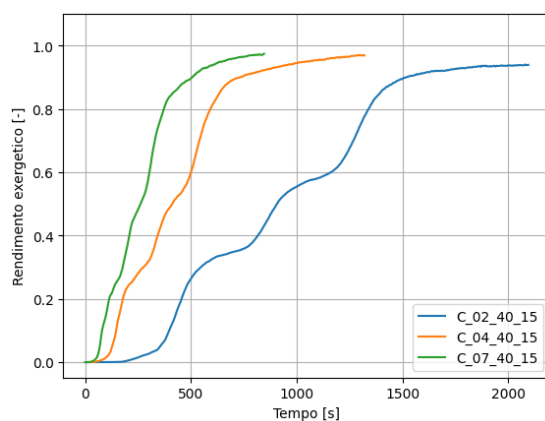


(f) 60°C

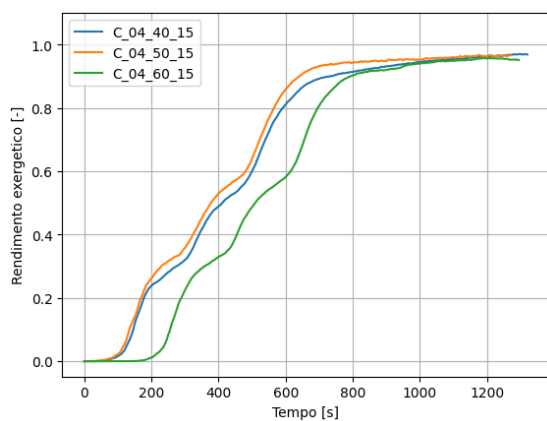
E.1.5 Rendimento exergético



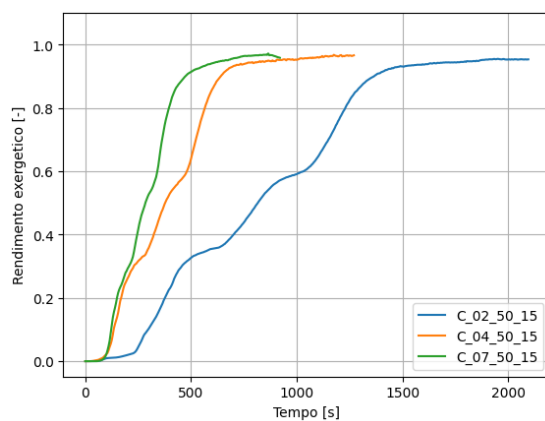
(a) 2 l/min



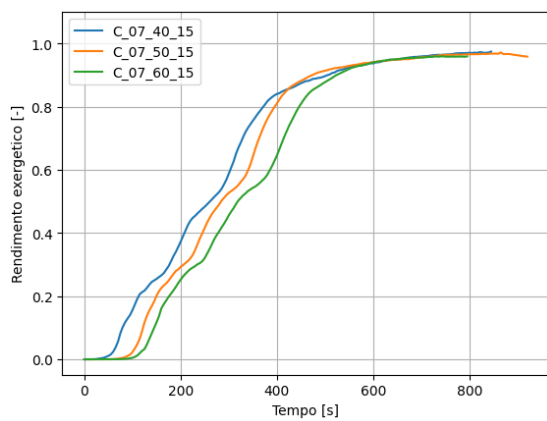
(b) 40°C



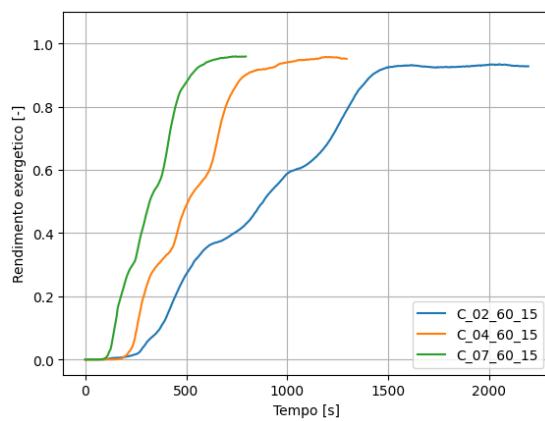
(c) 4,5 l/min



(d) 50°C

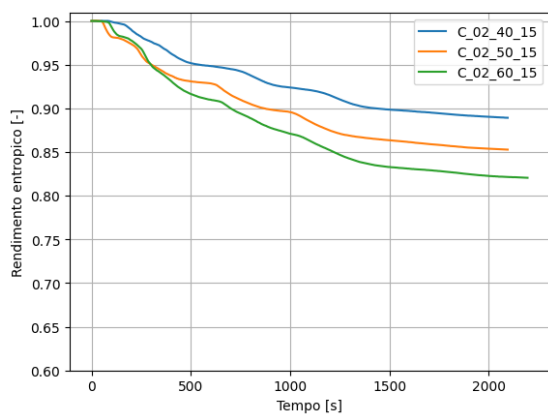


(e) 7 l/min

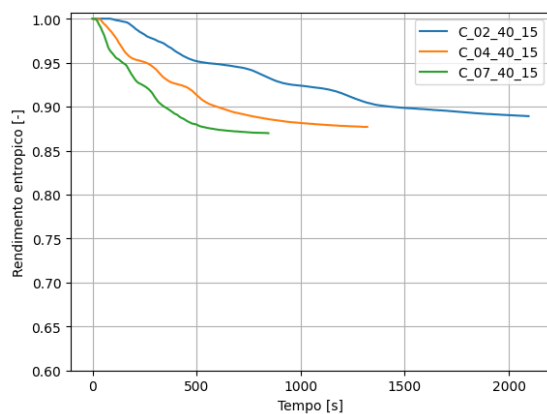


(f) 60°C

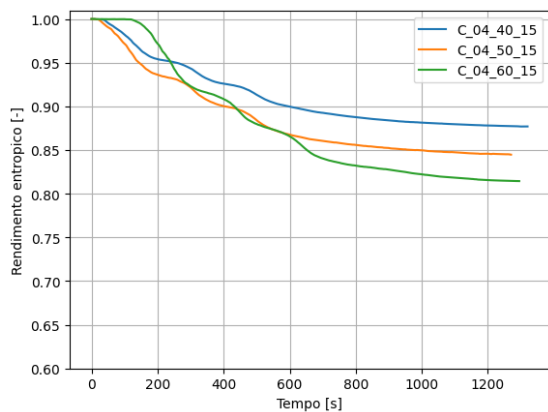
E.1.6 Rendimento entrópico



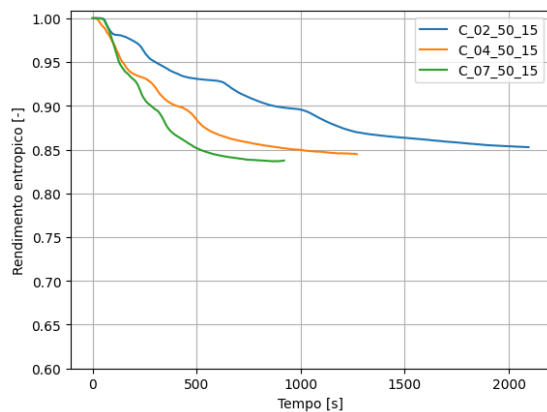
(a) 2 l/min



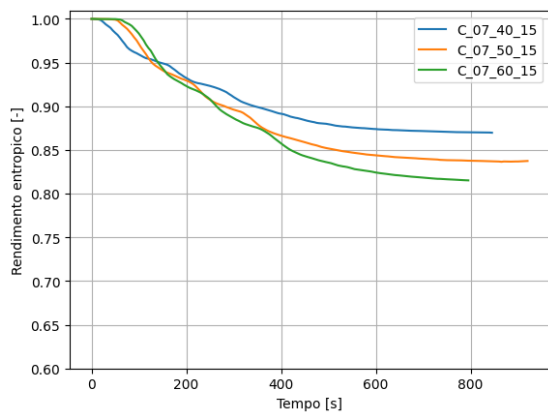
(b) 40°C



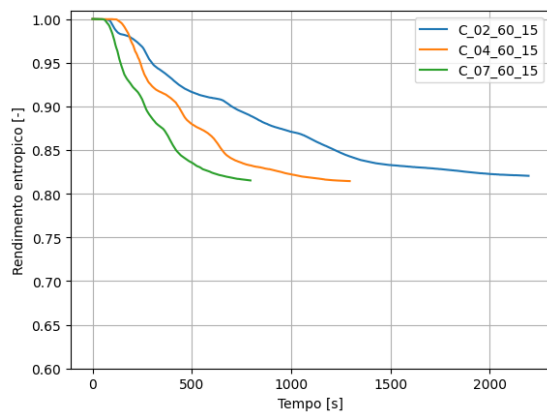
(c) 4,5 l/min



(d) 50°C

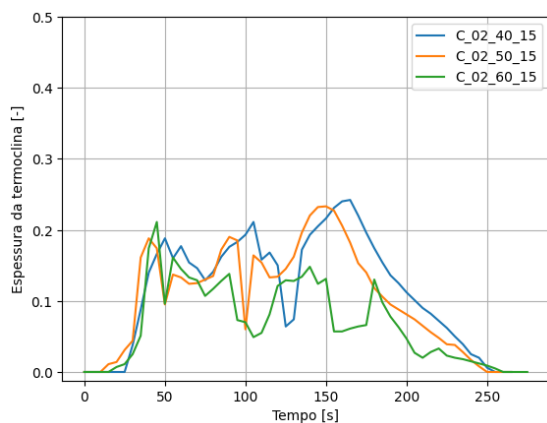


(e) 7 l/min

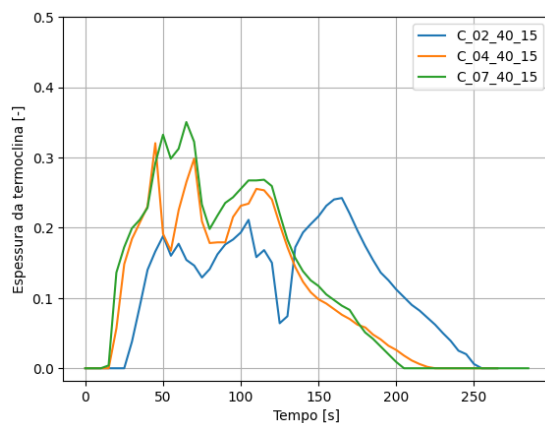


(f) 60°C

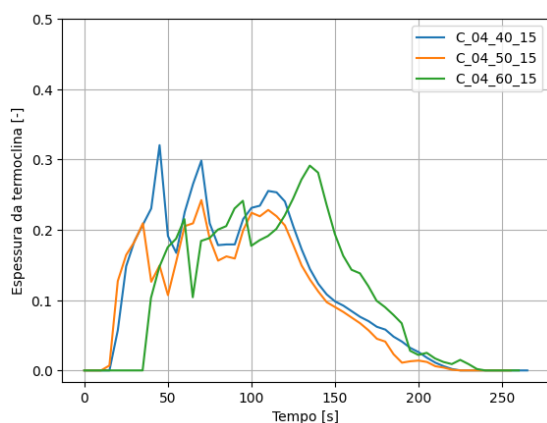
E.1.7 Espessura da termoclina



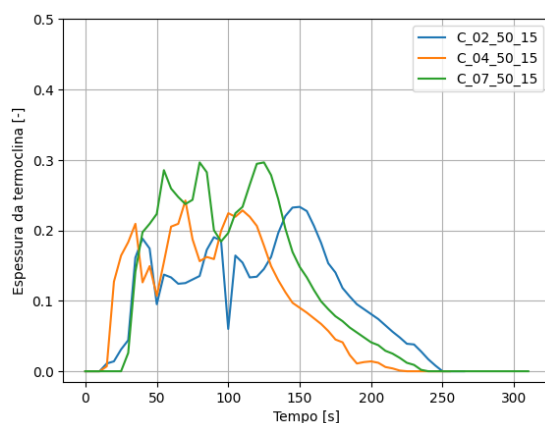
(a) 2 l/min



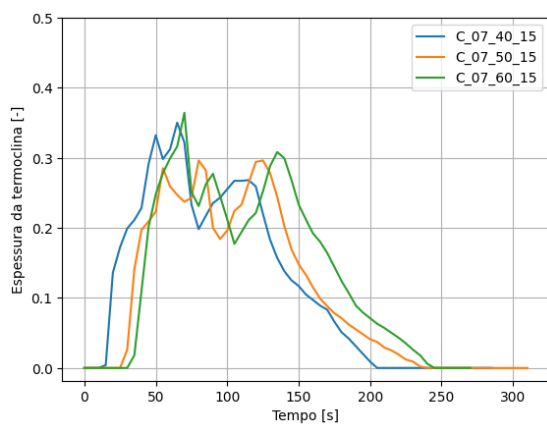
(b) 40°C



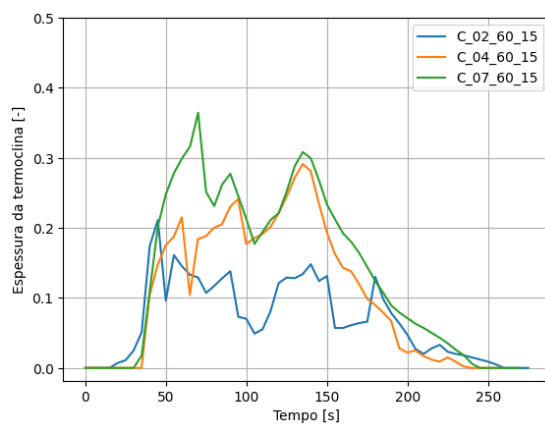
(c) 4,5 l/min



(d) 50°C

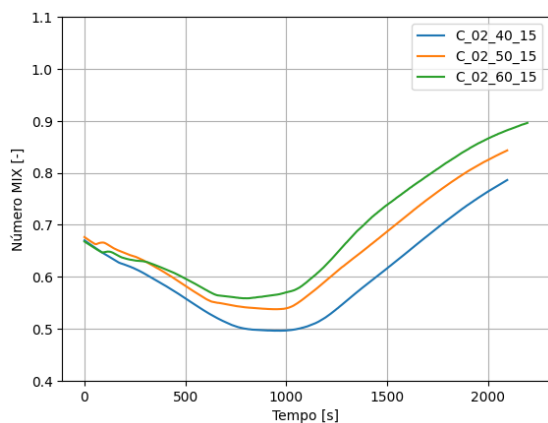


(e) 7 l/min

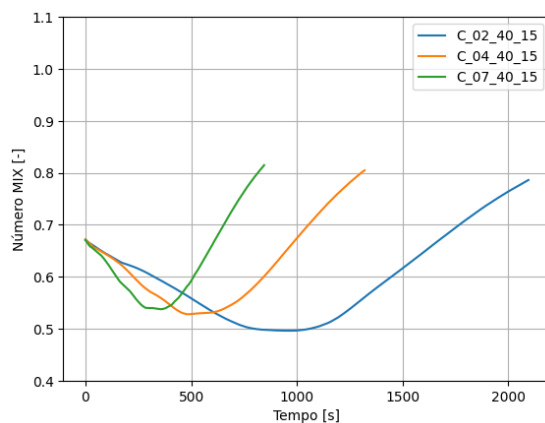


(f) 60°C

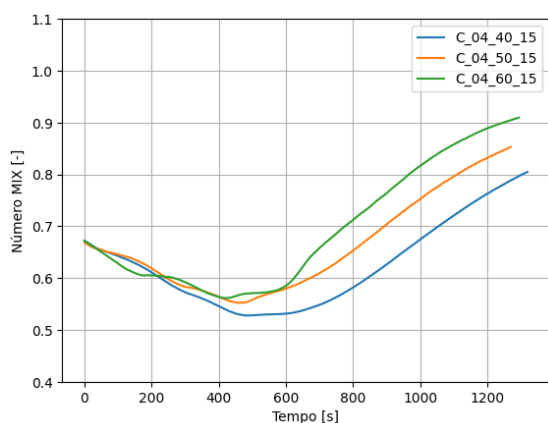
E.1.8 MIX



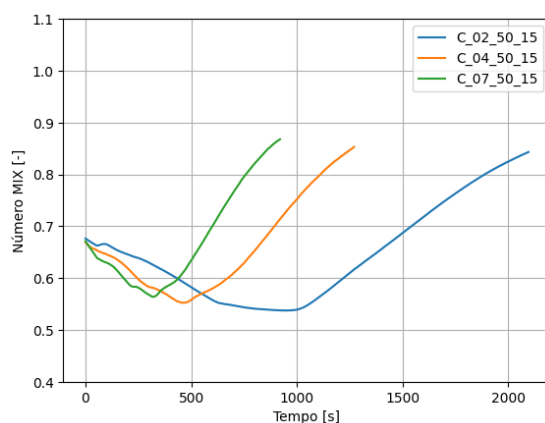
(a) 2 l/min



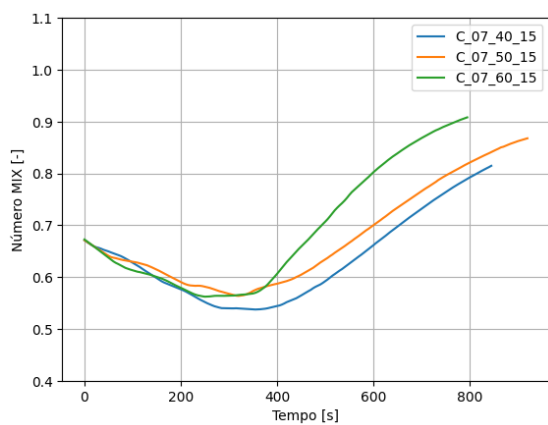
(b) 40°C



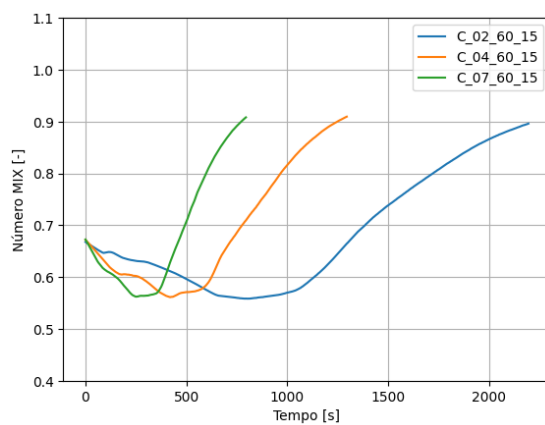
(c) 4,5 l/min



(d) 50°C

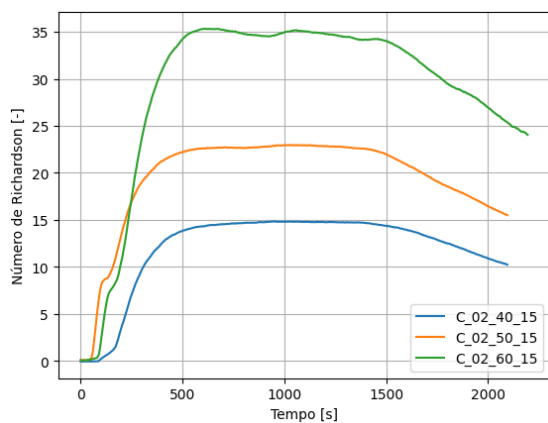


(e) 7 l/min

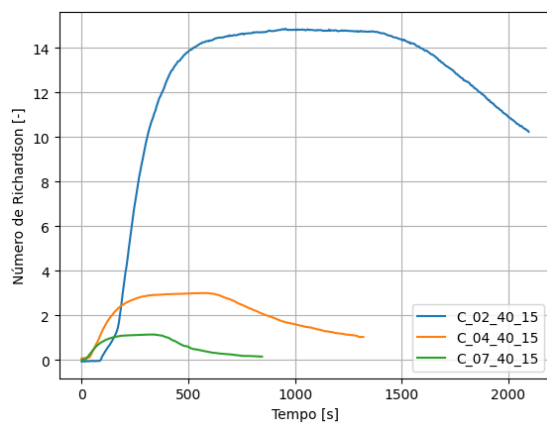


(f) 60°C

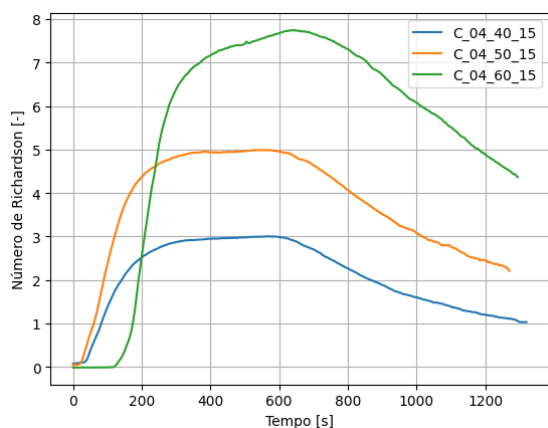
E.1.9 Número de Richardson



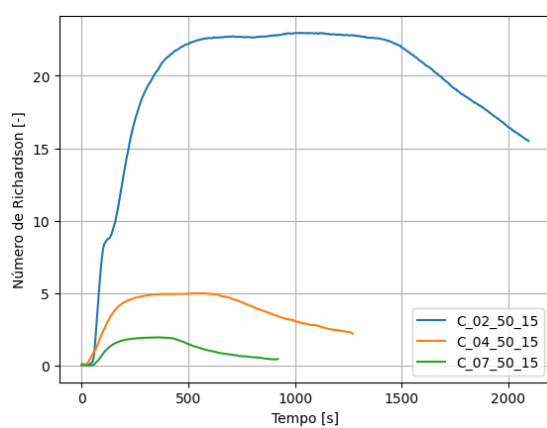
(a) 2 l/min



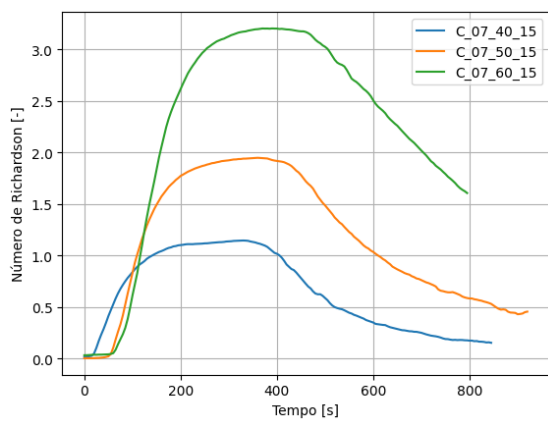
(b) 40°C



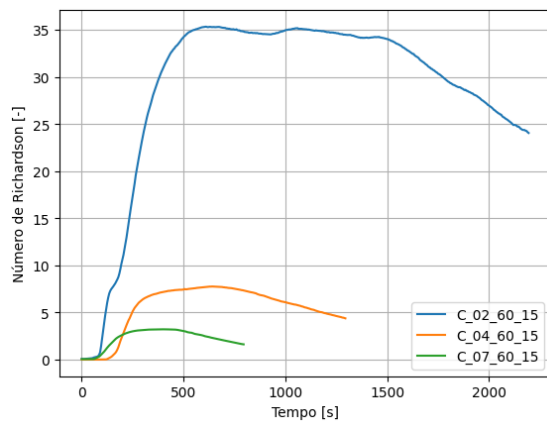
(c) 4,5 l/min



(d) 50°C

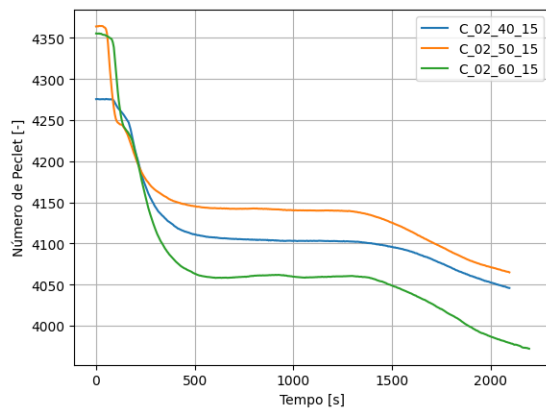


(e) 7 l/min

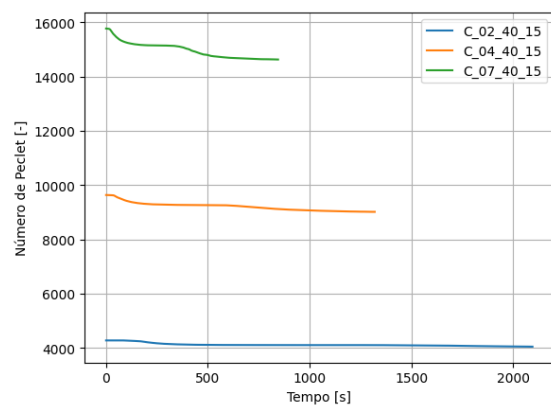


(f) 60°C

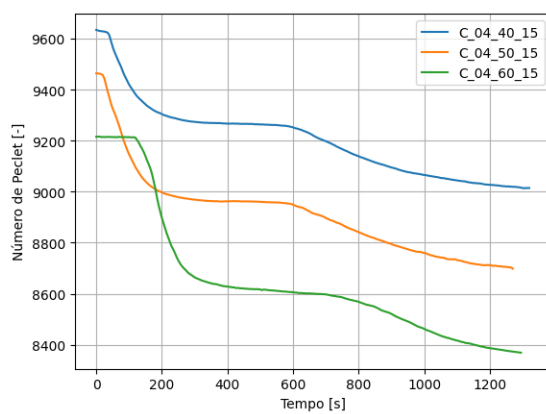
E.1.10 Número de Peclet



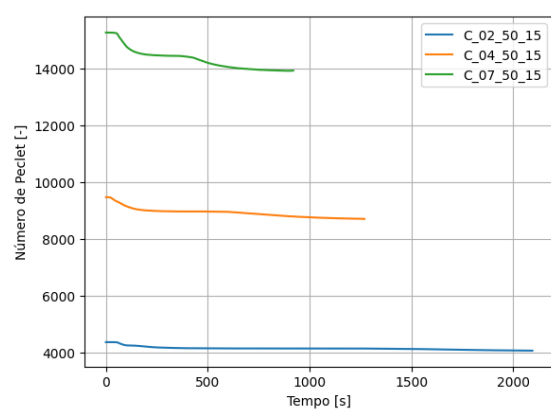
(a) 2 l/min



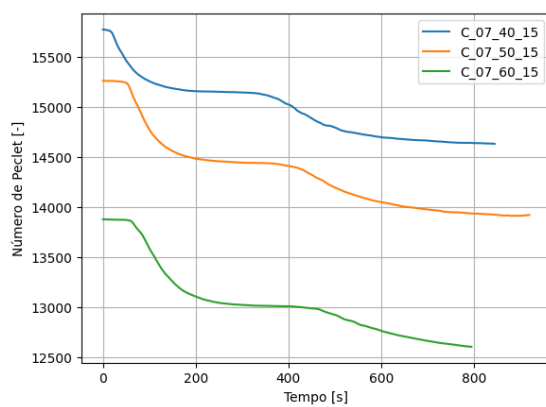
(b) 40°C



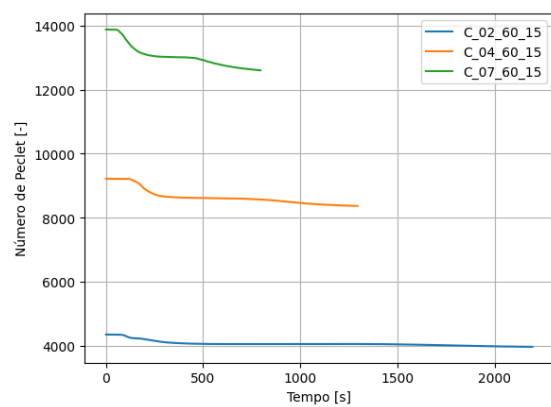
(c) 4,5 l/min



(d) 50°C

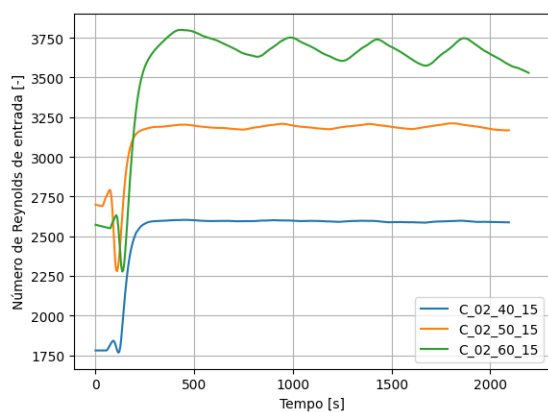


(e) 7 l/min

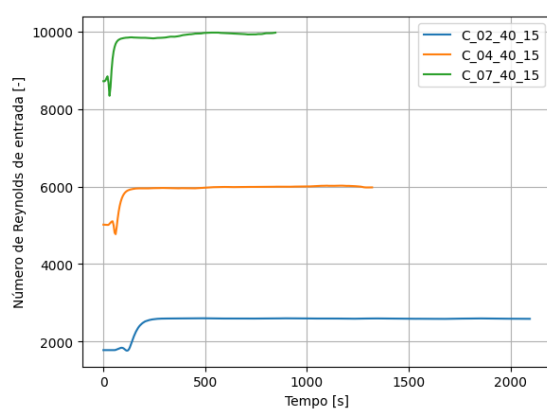


(f) 60°C

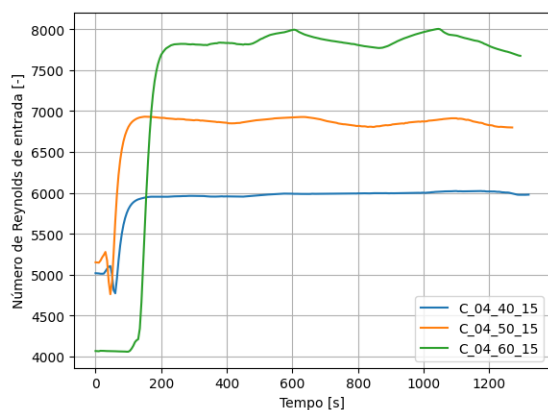
E.1.11 Número de Reynolds à entrada do sistema TES



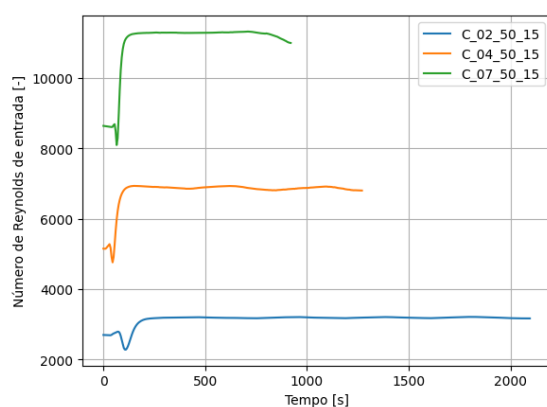
(a) 2 l/min



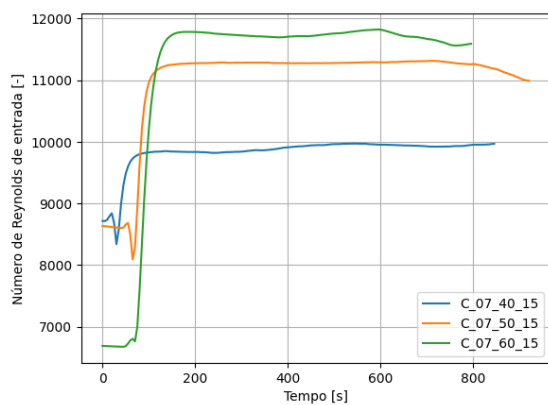
(b) 40°C



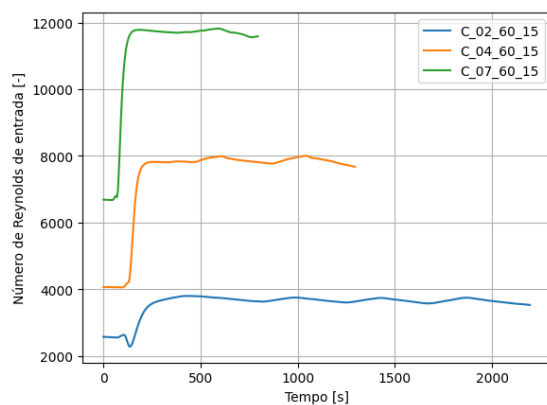
(c) 4,5 l/min



(d) 50°C

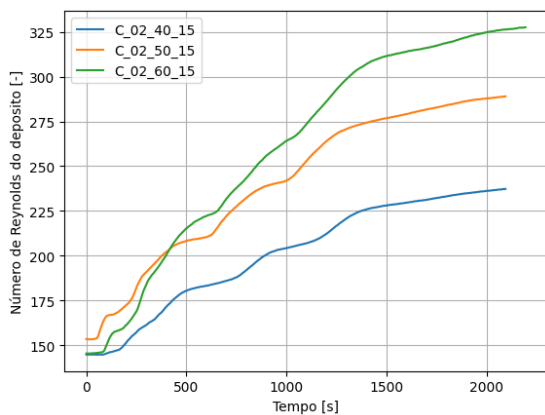


(e) 7 l/min

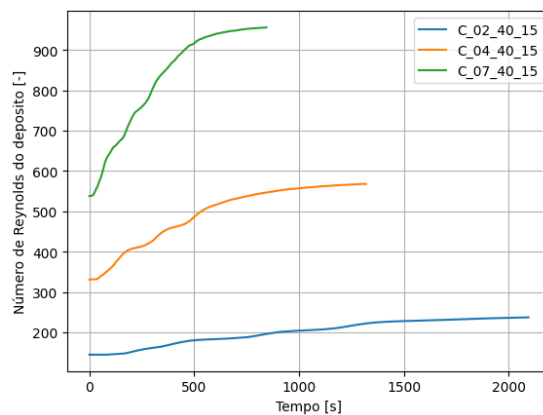


(f) 60°C

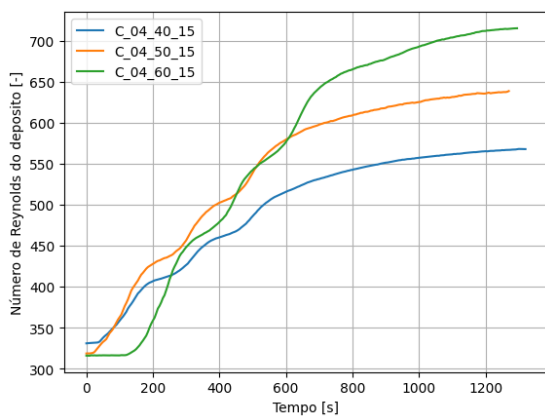
E.1.12 Número de Reynolds no interior do sistema TES



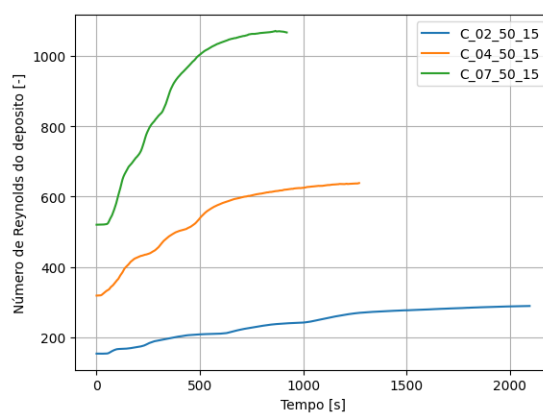
(a) 2 l/min



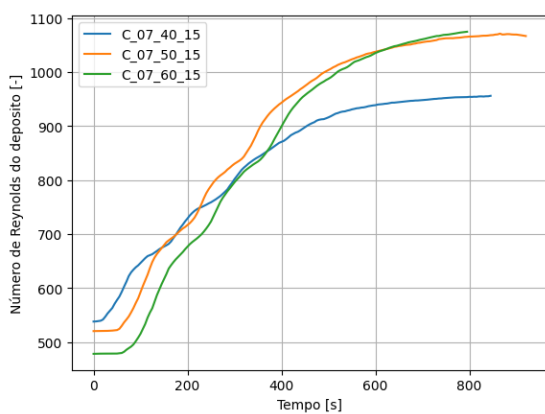
(b) 40°C



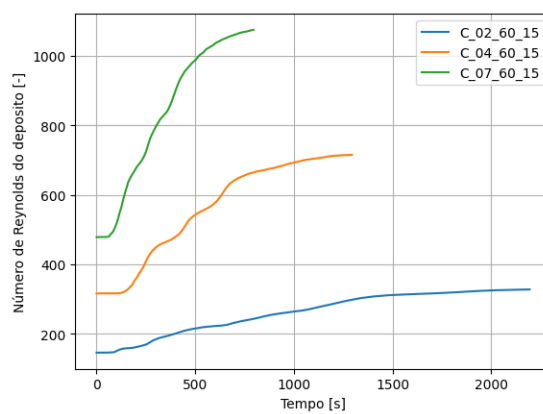
(c) 4,5 l/min



(d) 50°C



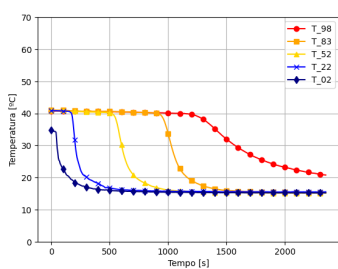
(e) 7 l/min



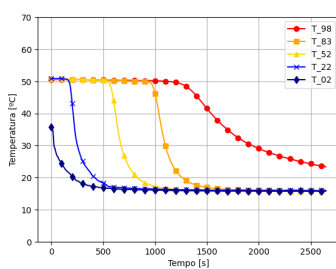
(f) 60°C

E.2 Processo de descarga

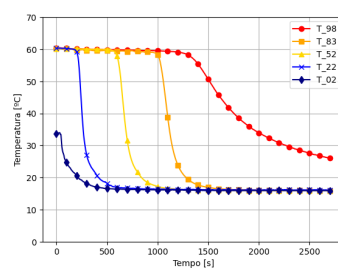
E.2.1 Distribuição da temperatura



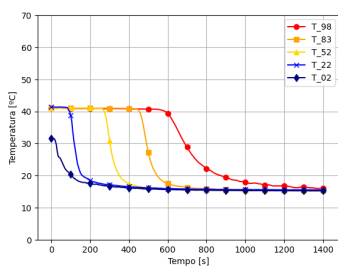
(a) 2 l/min 40°C



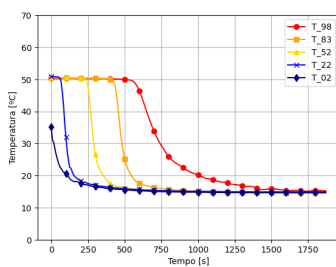
(b) 2 l/min 50°C



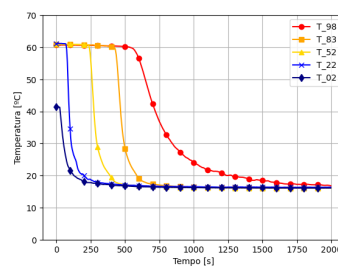
(c) 2 l/min 60°C



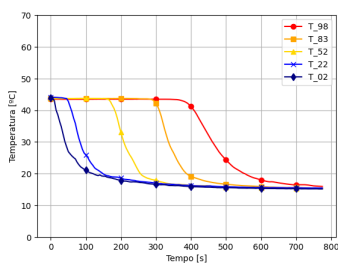
(d) 4,5 l/min 40°C



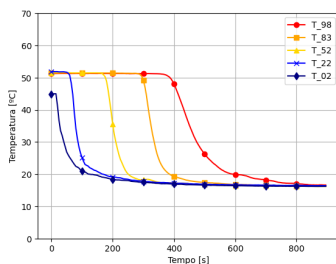
(e) 4,5 l/min 50°C



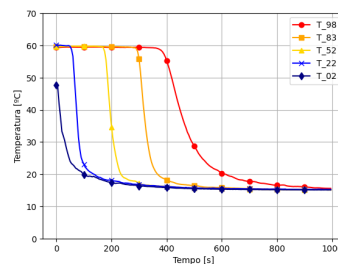
(f) 4,5 l/min 60°C



(g) 7 l/min 40°C

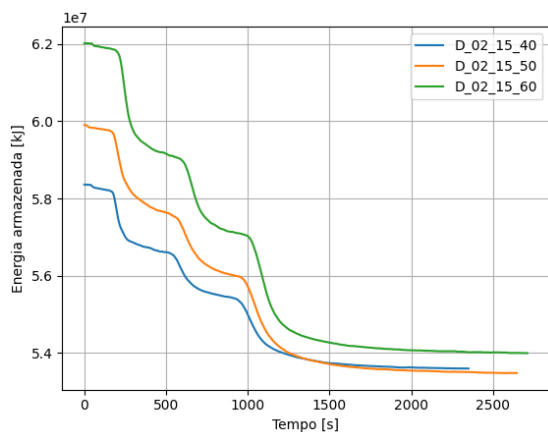


(h) 7 l/min 50°C

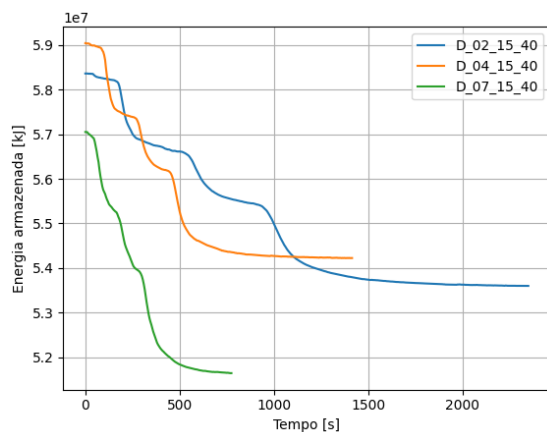


(i) 7 l/min 60°C

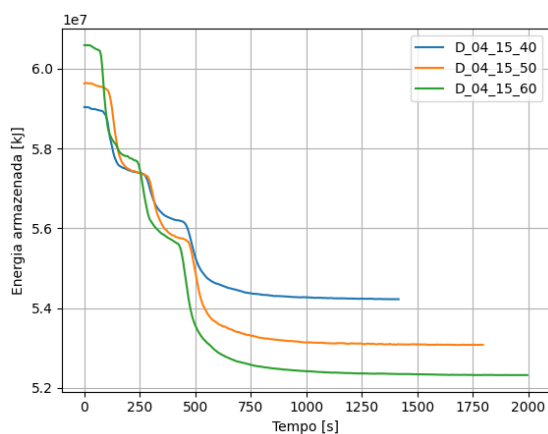
E.2.2 Energia armazenada



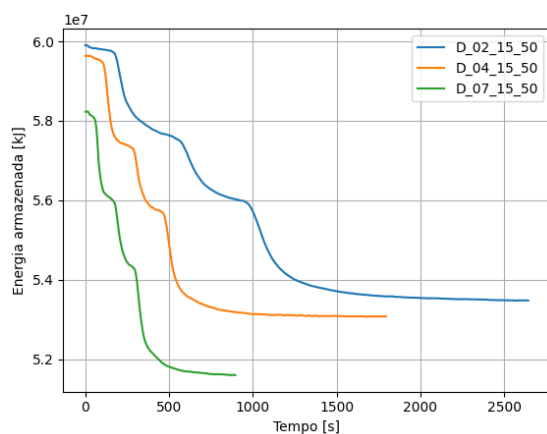
(a) 2 l/min



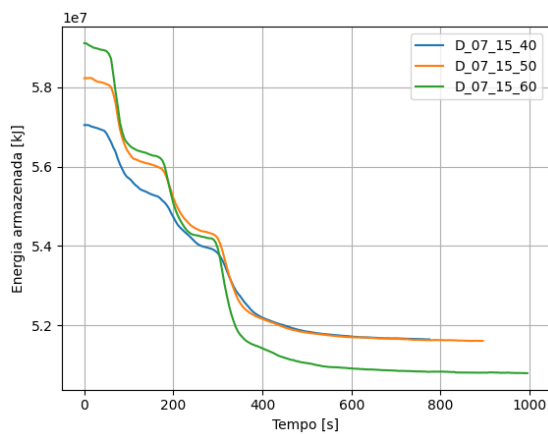
(b) 40°C



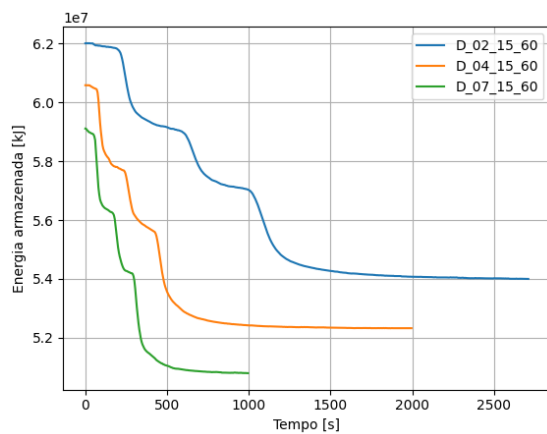
(c) 4,5 l/min



(d) 50°C

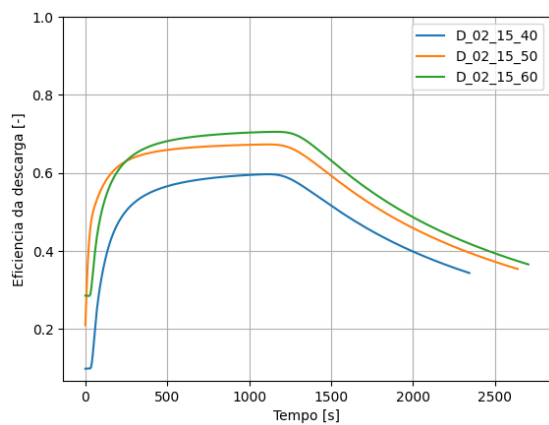


(e) 7 l/min

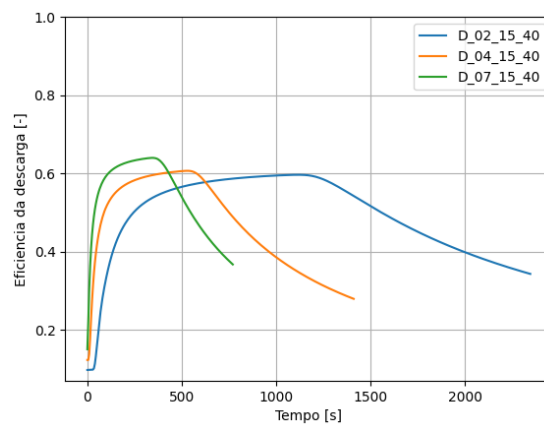


(f) 60°C

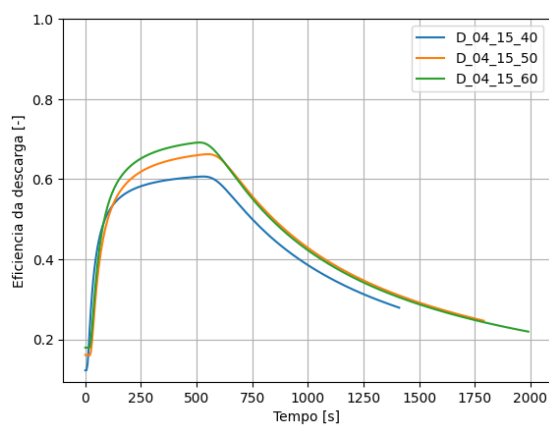
E.2.3 Eficiência do processo de descarga



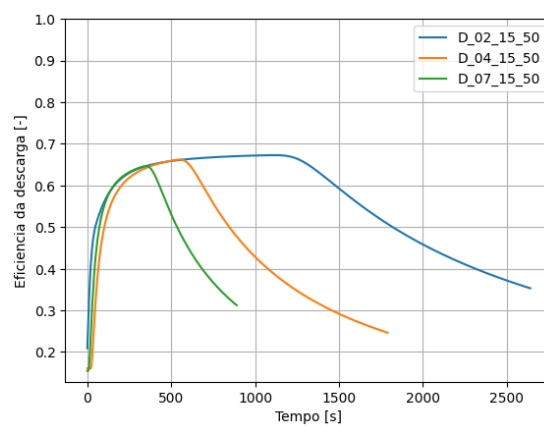
(a) 2 l/min



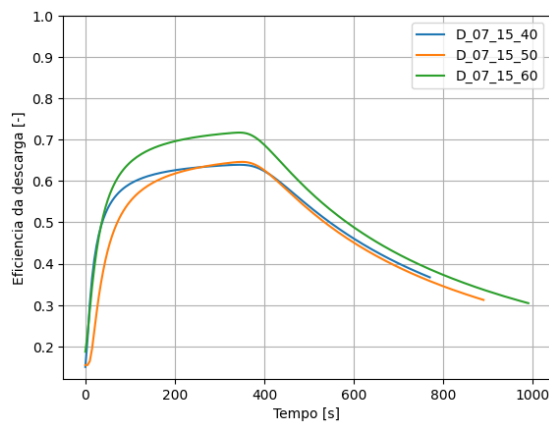
(b) 40°C



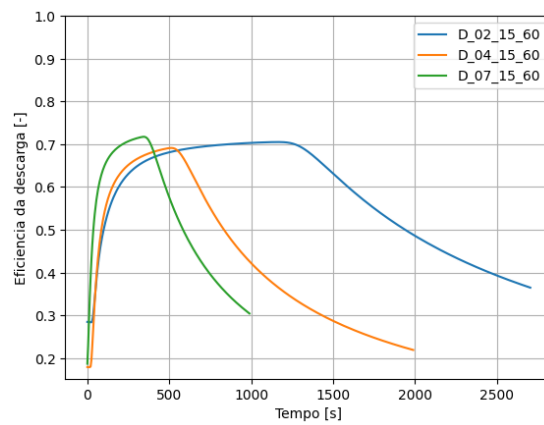
(c) 4,5 l/min



(d) 50°C

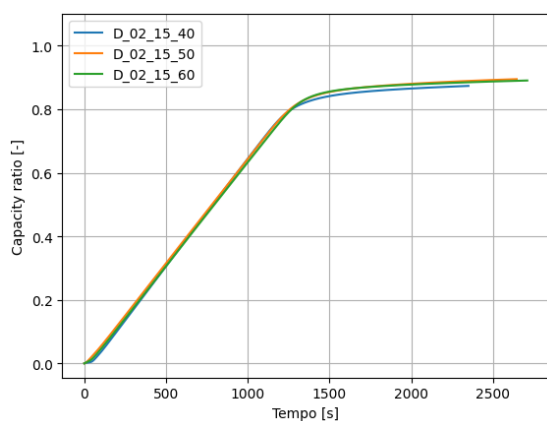


(e) 7 l/min

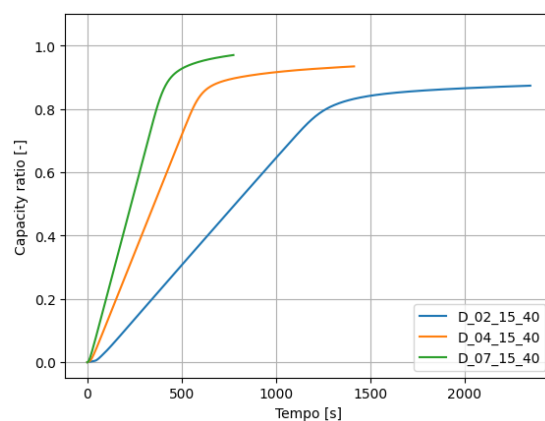


(f) 60°C

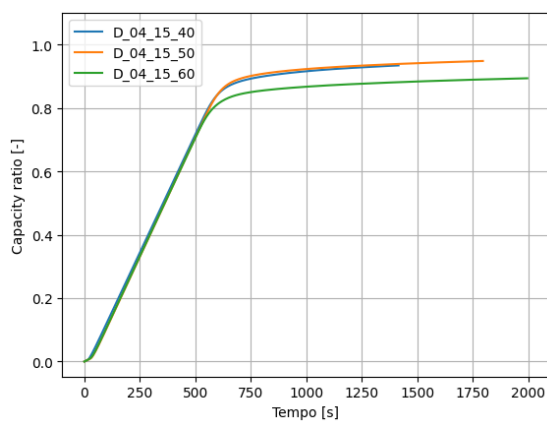
E.2.4 Capacity ratio



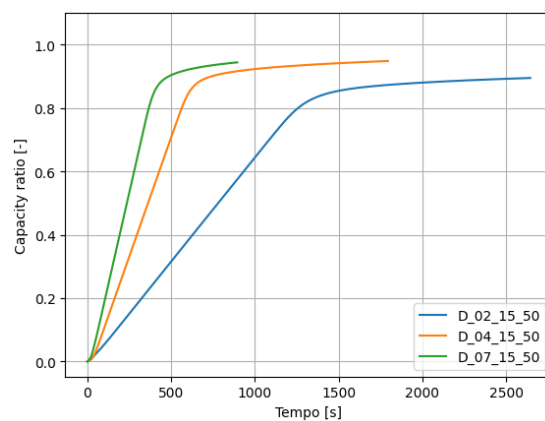
(a) 2 l/min



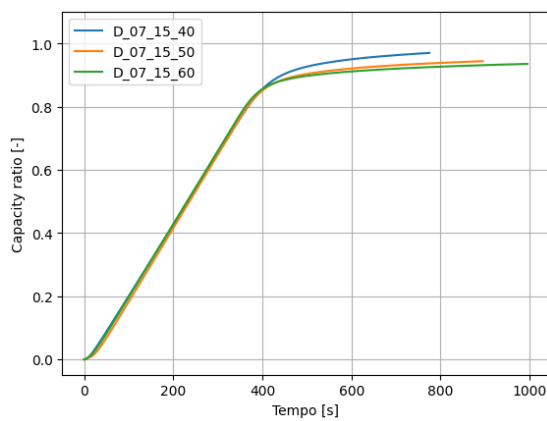
(b) 40°C



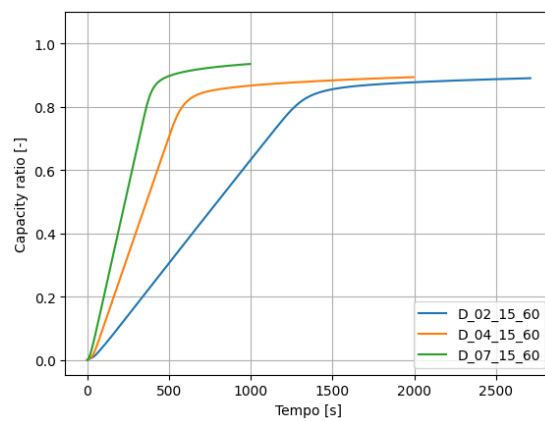
(c) 4,5 l/min



(d) 50°C

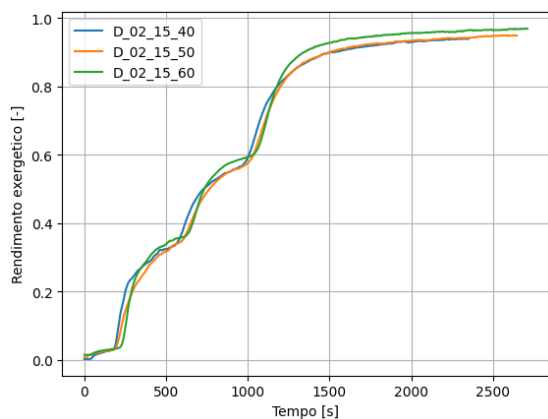


(e) 7 l/min

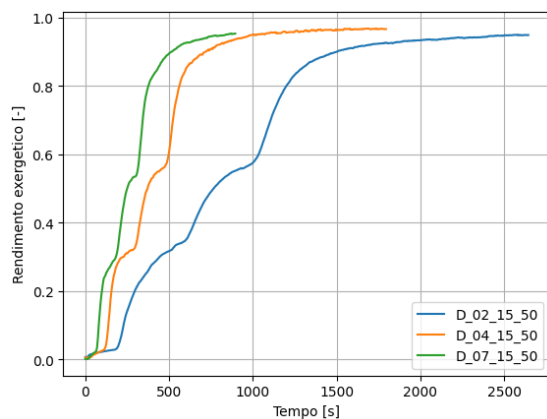


(f) 60°C

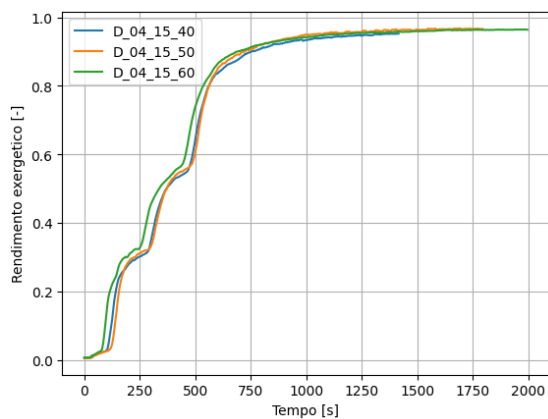
E.2.5 Rendimento exergético



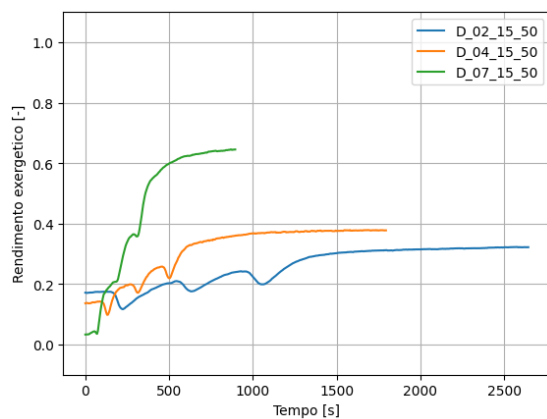
(a) 2 l/min



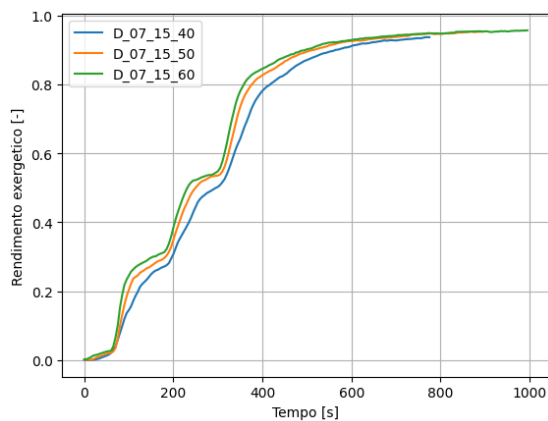
(b) 40°C



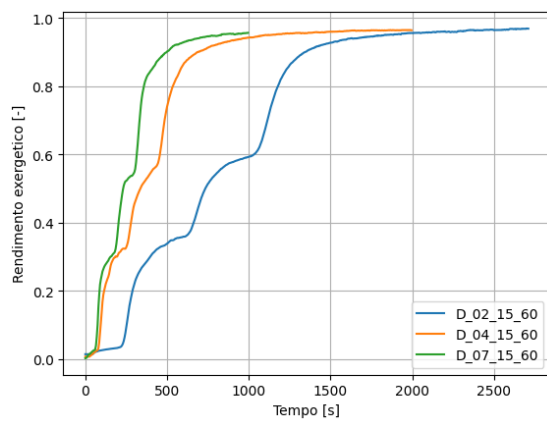
(c) 4,5 l/min



(d) 50°C

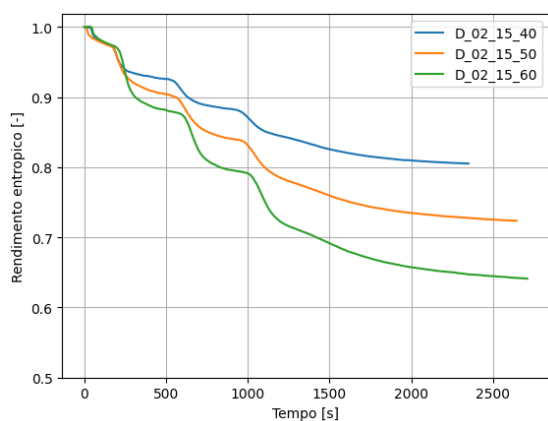


(e) 7 l/min

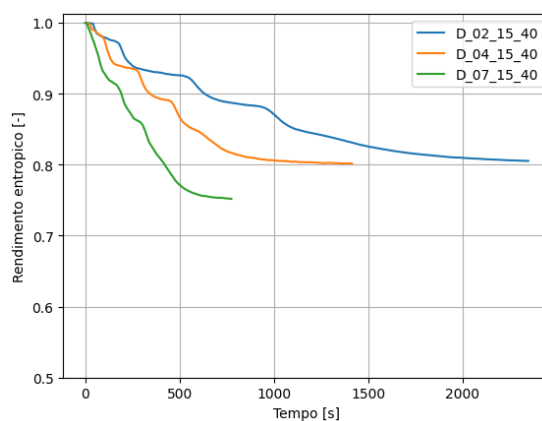


(f) 60°C

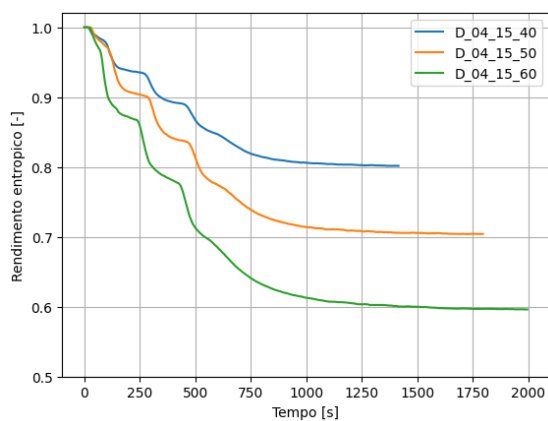
E.2.6 Rendimento entrópico



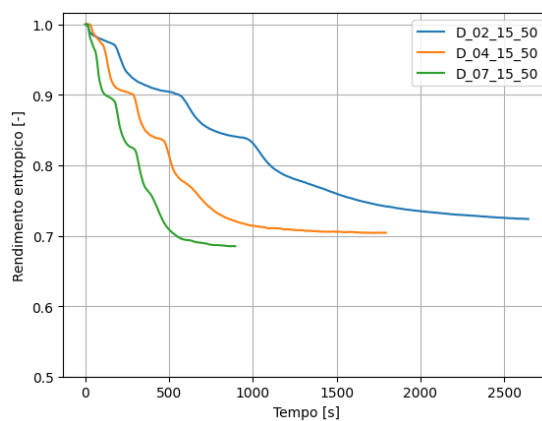
(a) 2 l/min



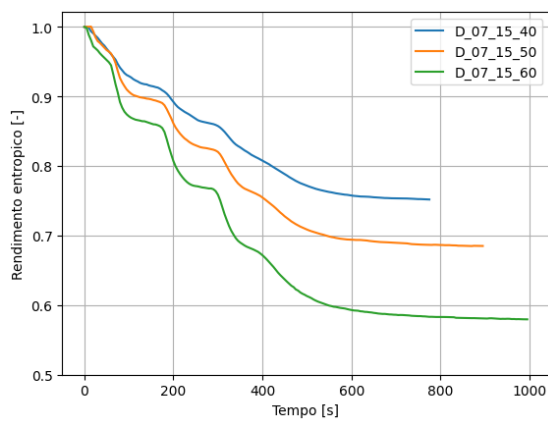
(b) 40°C



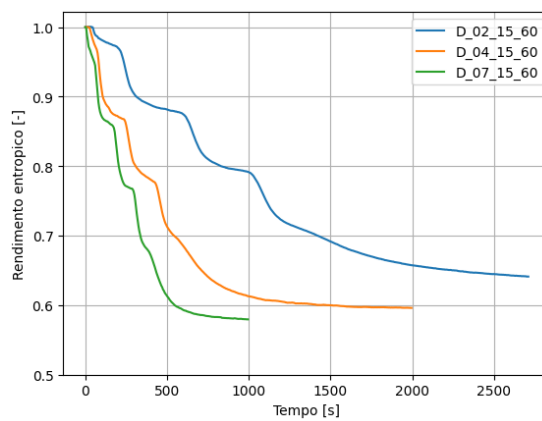
(c) 4,5 l/min



(d) 50°C

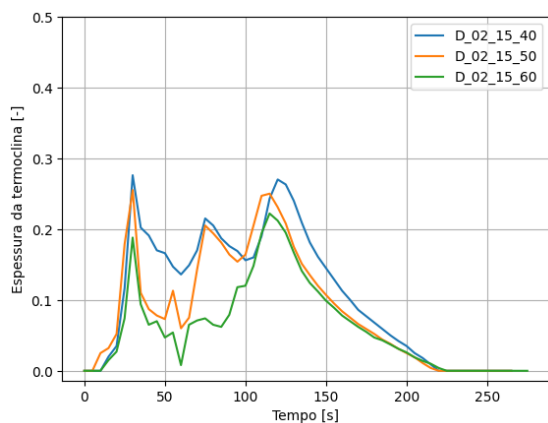


(e) 7 l/min

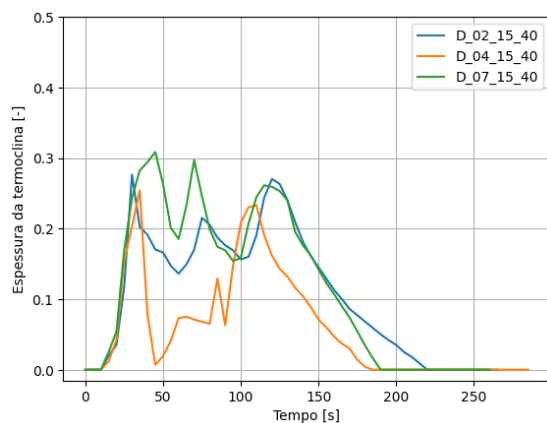


(f) 60°C

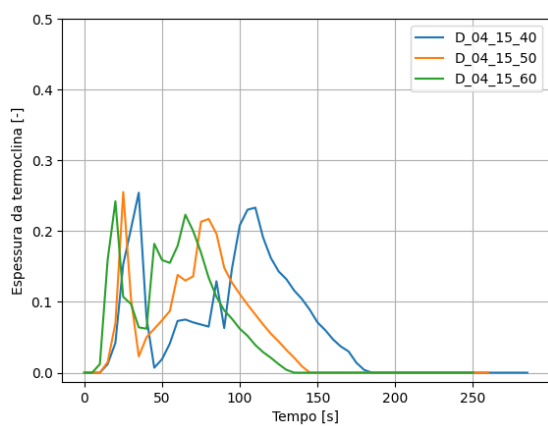
E.2.7 Espessura da termoclina



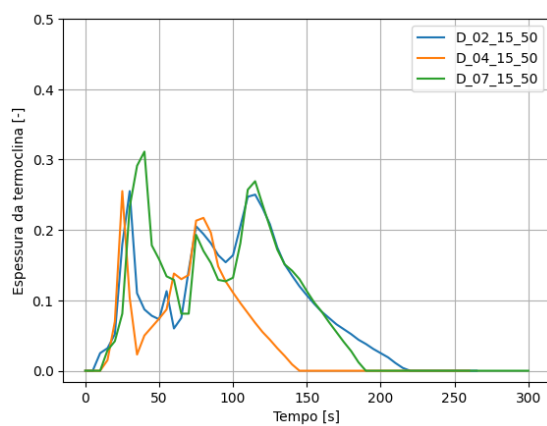
(a) 2 l/min



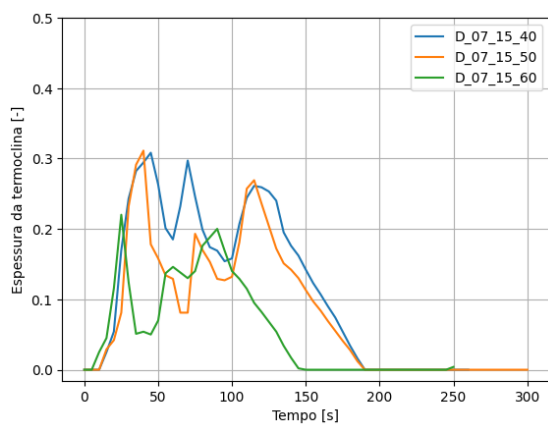
(b) 40°C



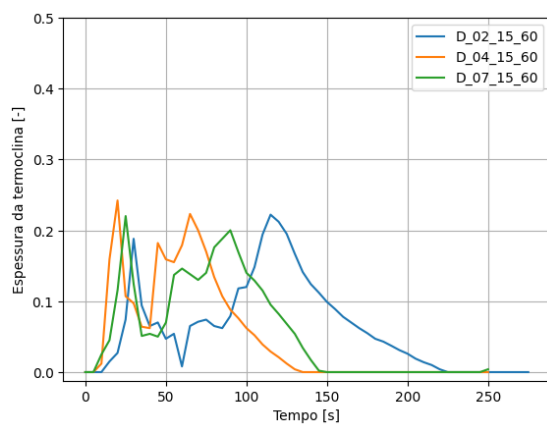
(c) 4,5 l/min



(d) 50°C

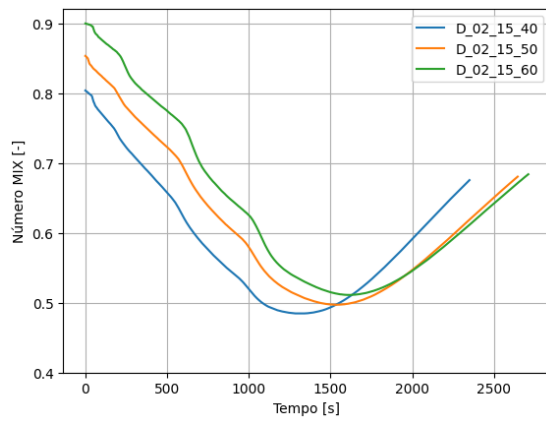


(e) 7 l/min

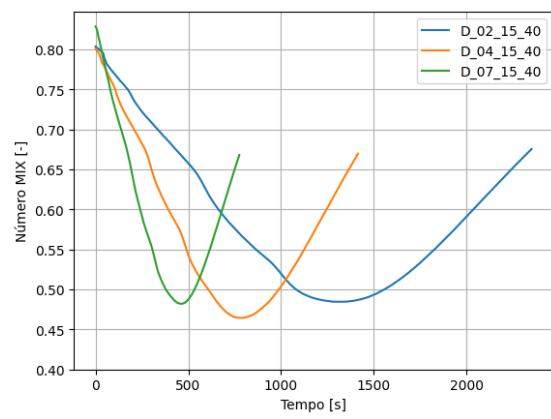


(f) 60°C

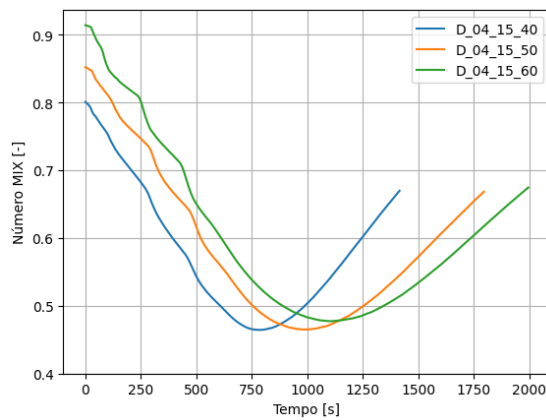
E.2.8 MIX



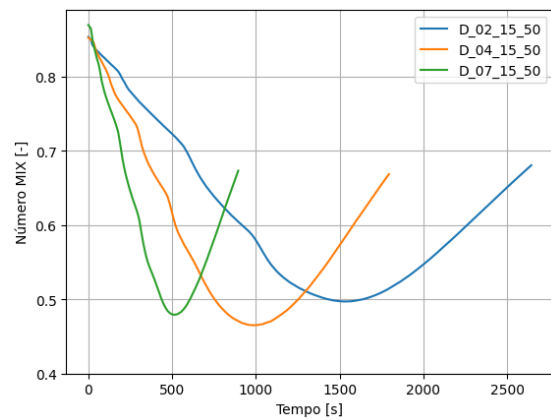
(a) 2 l/min



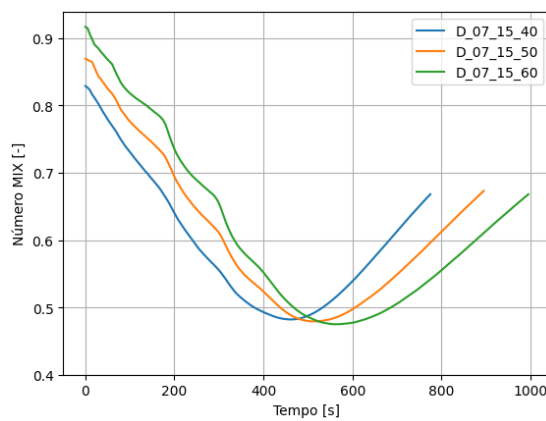
(b) 40°C



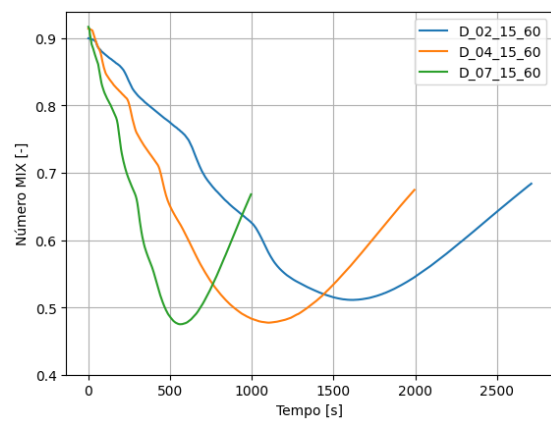
(c) 4,5 l/min



(d) 50°C

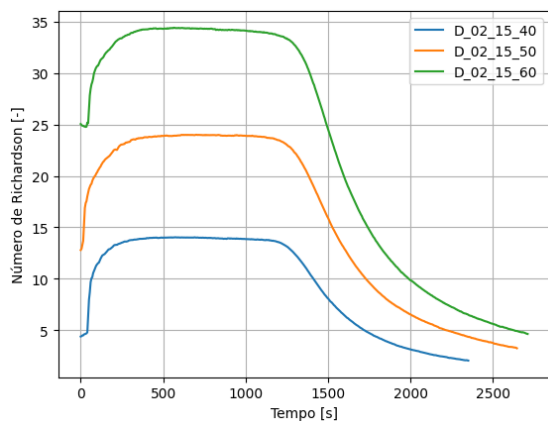


(e) 7 l/min

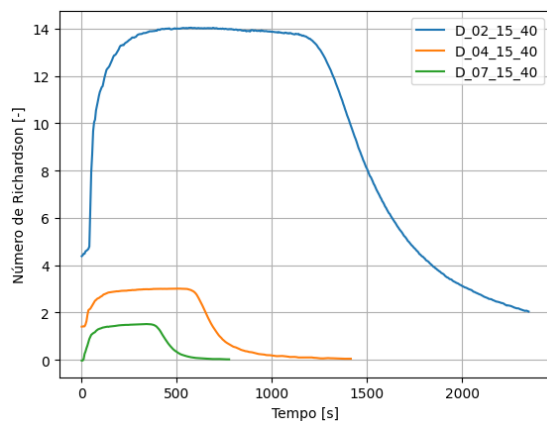


(f) 60°C

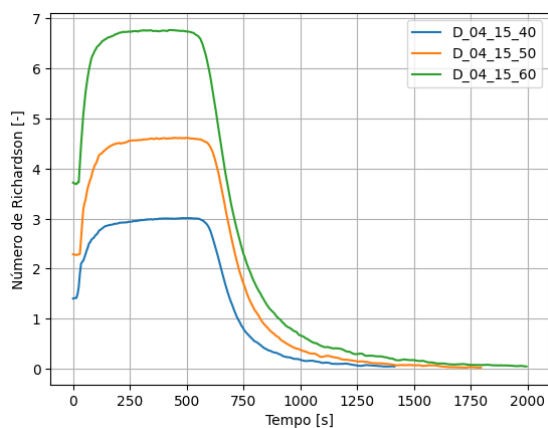
E.2.9 Número de Richardson



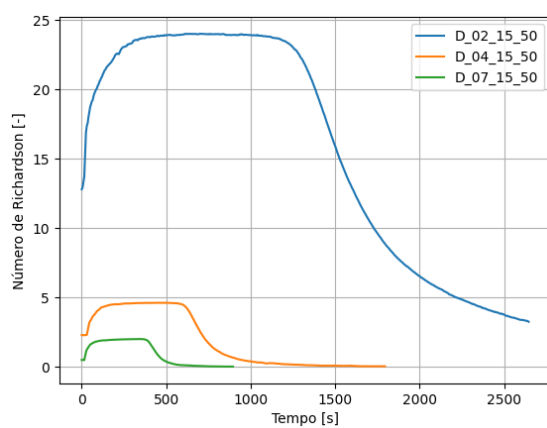
(a) 2 l/min



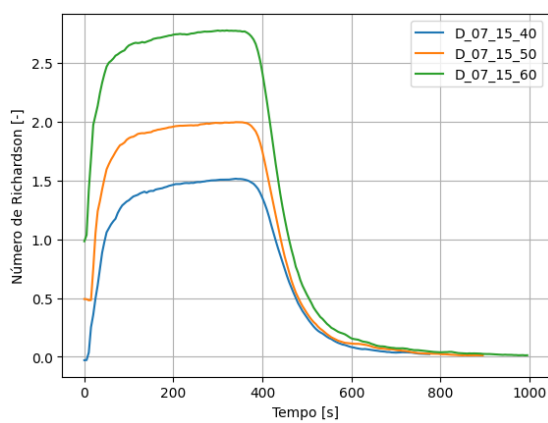
(b) 40°C



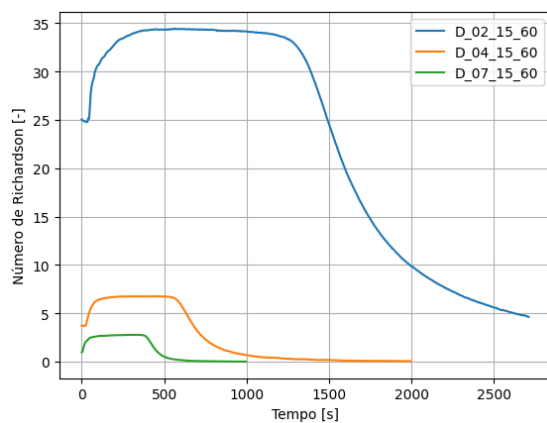
(c) 4,5 l/min



(d) 50°C

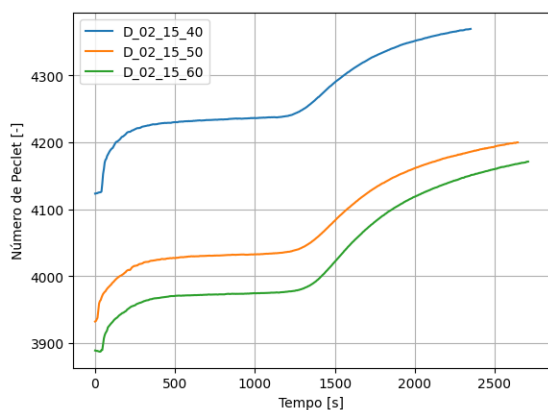


(e) 7 l/min

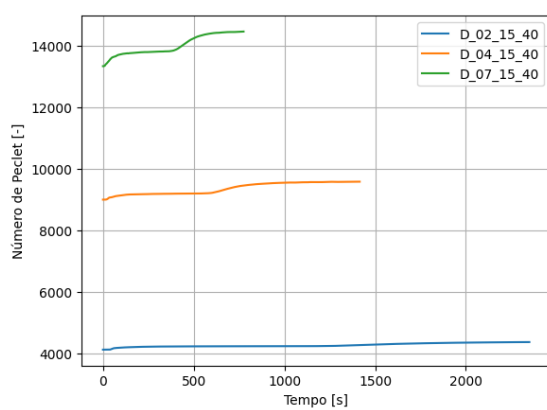


(f) 60°C

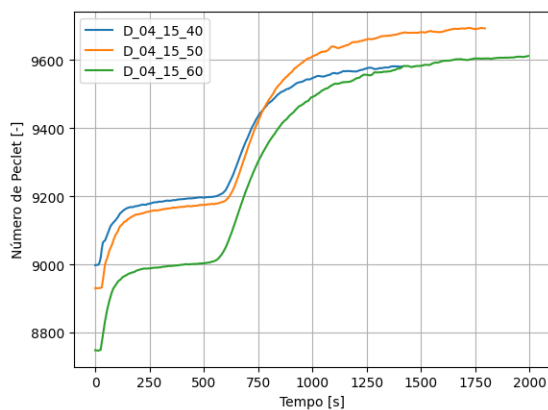
E.2.10 Número de Peclet



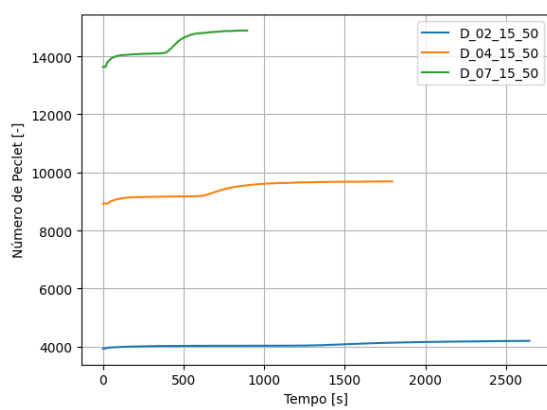
(a) 2 l/min



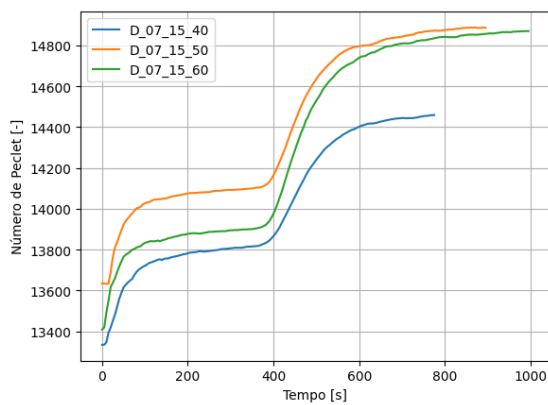
(b) 40°C



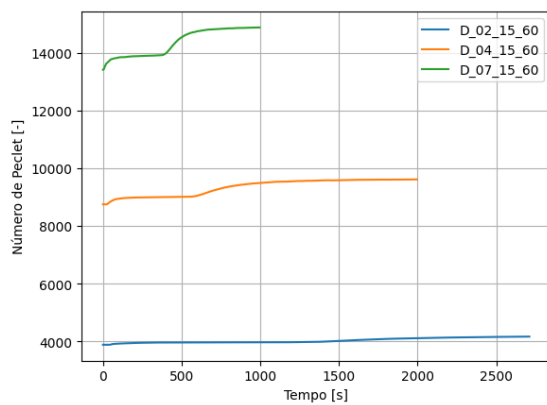
(c) 4,5 l/min



(d) 50°C

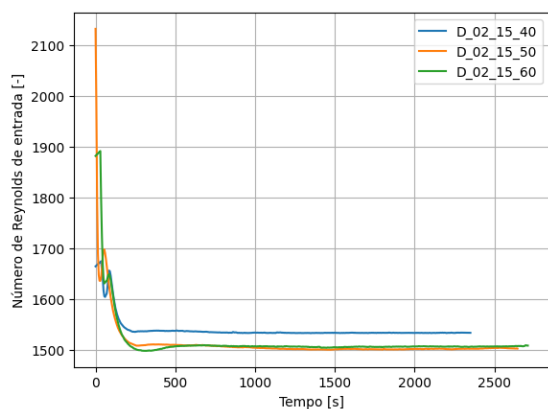


(e) 7 l/min

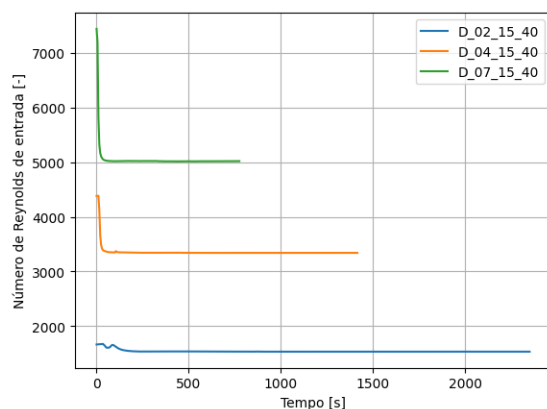


(f) 60°C

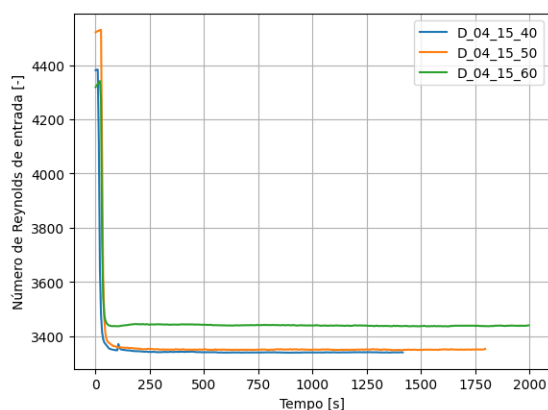
E.2.11 Número de Reynolds à entrada do sistema TES



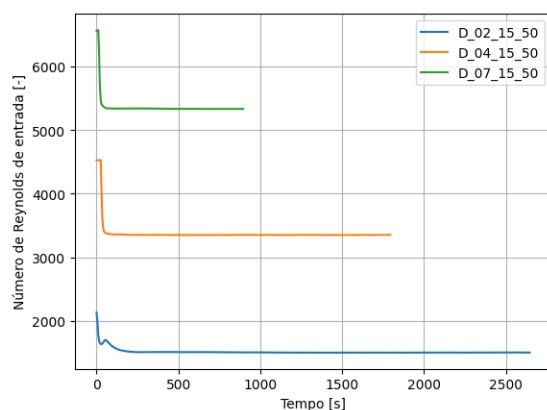
(a) 2 l/min



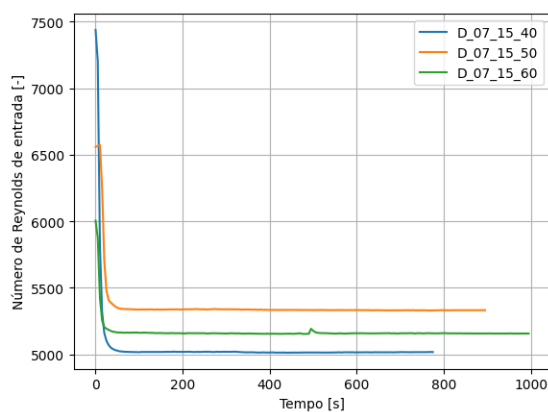
(b) 40°C



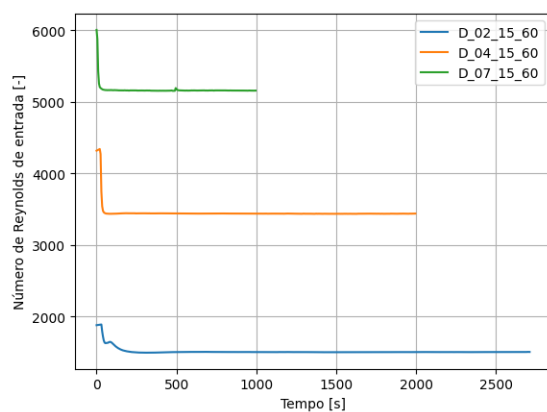
(c) 4,5 l/min



(d) 50°C

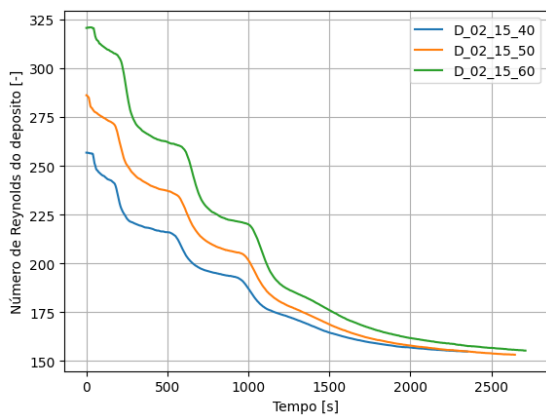


(e) 7 l/min

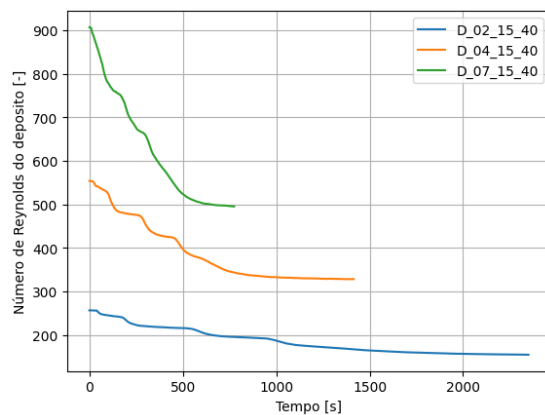


(f) 60°C

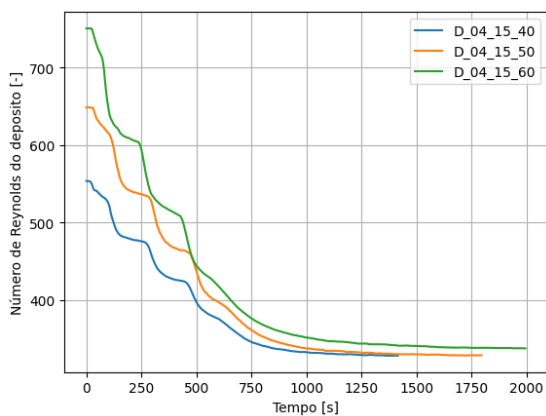
E.2.12 Número de Reynolds no interior do sistema TES



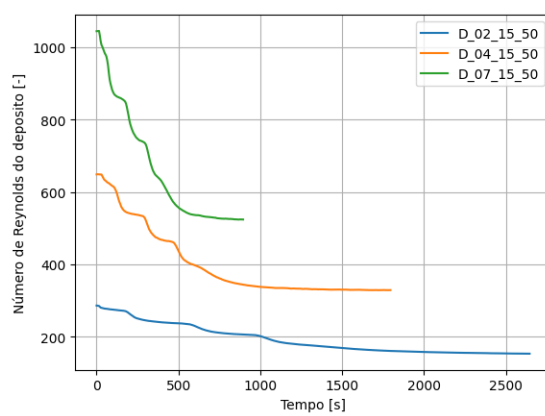
(a) 2 l/min



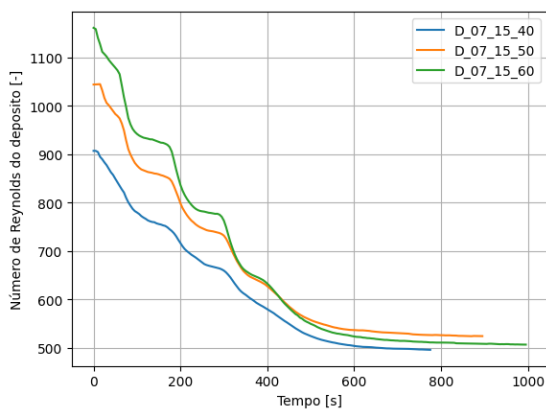
(b) 40°C



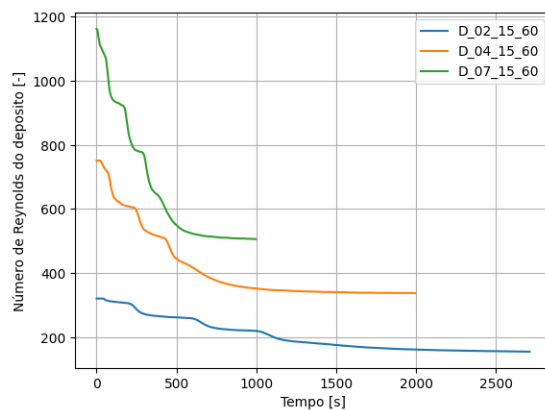
(c) 4,5 l/min



(d) 50°C



(e) 7 l/min



(f) 60°C