

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

**Estudo do Sujamento da Superfície de
Transferência de Calor do Evaporador de
uma Bomba de Calor aquecido pelo efluente
de uma fábrica de pasta para papel**

Sofia Assunção Fernandes

Mestrado em Engenharia Química
Novembro 2010

Agradecimentos

Ao Engenheiro Vitorino Beleza agradeço todo o apoio, compreensão e disponibilidade demonstrada ao longo do trabalho. Mas sobretudo o encorajamento e as palavras amigas dadas nos momentos mais importantes.

Agradeço ao Grupo Portucel Soporcel, na pessoa do Eng.º Fernando Martins, pela oportunidade e colaboração na realização deste projecto.

Agradeço aos meus pais o carinho e interesse demonstrado ao longo deste período.

Agradeço ao Sr. José Pimentel a motivação, as palavras de confiança e a compreensão demonstrada.

Às minhas parceiras de estudo, Lea e Vânia, agradeço o companheirismo e força transmitida.

Quero também agradecer aos meus amigos pelo apoio e paciência demonstrados nos dias mais críticos.

Resumo

O presente trabalho tem como principal objectivo a avaliação do sujamento da superfície de transferência de calor do evaporador de uma bomba de calor, quando se utiliza o efluente da fábrica de pasta e papel da Portucel Soporcel em Cacia como fluido de aquecimento. Para a realização deste estudo montou-se uma instalação, composta por uma bomba de calor, um circuito de água de arrefecimento do condensador da bomba de calor e um circuito de água residual quente para o aquecimento do evaporador da bomba de calor. O ensaio decorreu durante um período de 84 dias, durante o qual foram registadas as temperaturas em vários pontos dos circuitos e os caudais de circulação.

A evolução temporal da quantidade de calor transferida no evaporador, assim como, a comparação do coeficiente global de transferência de calor em condições ideais e experimentais, permitiu verificar que a razão U/U_0 para o evaporador da bomba de calor não teve um comportamento decrescente ao longo do período de ensaio, permitindo concluir que, nas condições operatórias da experiência, não ocorreu sujamento na superfície do evaporador. No estudo de corrosão do cobre quando exposto à água residual em questão, obteve-se, para a velocidade de corrosão, o valor de $1,56 \text{ mg}/(\text{dm}^2 \cdot \text{dia})$, indicando assim que a corrosão do cobre naquele meio é praticamente inexistente.

Palavra chave: Sujamento, permutadores de calor, bomba de calor, evaporador, corrosão

Abstract

This work aims to assess the fouling of the surface of a heat exchanger of a heat pump, when using as heating fluid the effluent of Portucel Soporcel pulp factory, in Cacia. In order to perform this study the experimental apparatus has been set up, being this composed by a heat pump, a water circuit - in order to cool the condenser of the heat pump, as well as a hot wastewater circuit - in order to warm the evaporator of the heat pump. This experiment occurred for an 84-day period, during which they have been recorded temperatures in various points of the circuit, and circulation flows.

The temporal evolution of the amount of heat transfer in the evaporator, as well as the comparison of the total coefficient of heat transfer in experimental and ideal conditions, has enabled to verify that the U/U_0 ratio in the evaporator of the heat pump has not varied significantly throughout the testing period. This leads to the conclusion that, for this experiment's conditions, it did not occur fouling in the evaporator's surface. As for the corrosion study of copper when exposed to the wastewater, it has been observed a corrosion velocity of 1,56 mg/(dm².day), meaning that the copper corrosion in this medium can be neglected.

Key words: Fouling, heat exchanger, heat pump, evaporator, corrosion

Índice

Capítulo 1. Introdução	1
1.1 Introdução Geral	1
1.2 Sujamento	1
1.2.1 Aspectos Gerais	1
1.2.2 Formação do sujamento	2
1.2.3 Consequências do Sujamento	5
1.2.4 Classificação do Sujamento de Superfícies	6
1.2.4.1 Deposição de Partículas	6
1.2.4.2 Cristalização	7
1.2.4.3 Reacção Química	7
1.2.4.4 Produtos de Corrosão	8
1.2.4.5 Biológico	8
1.2.5 Prevenção do Sujamento	9
1.3 Grupo Portucel Soporcel – Fábrica de Cacia	11
1.3.1 Fábrica de Cacia	Error! Bookmark not defined.
1.3.1.1 Tratamento da Água Residual	12
Capítulo 2. Descrição Experimental	13
2.1 Descrição da Instalação Experimental	13
2.1.1 Bomba de Calor	13
2.1.2 Circuito da Água Residual	15
2.1.3 Circuito da Água de Arrefecimento	16
2.2 Montagem da Instalação	17
2.3 Ensaios Experimentais	18
2.4 Caracterização da Água Residual	19
2.5 Estudo de Sujamento na Superfície de Transferência de Calor	20
2.6 Estudo da Corrosão	20
Capítulo 3. Resultados	21
3.1 Caracterização do Efluente	21
3.2 Estudo do Sujamento	21
3.2.1 Temperaturas	22
3.2.2 Caudais	26

3.2.3	Determinação dos Calores Trocados _____	28
3.2.4	Avaliação do Sujamento _____	30
3.2.5	Observação Visual da Serpentina do Evaporador _____	32
3.3	Estudo da Corrosão _____	33
Capítulo 4.	Conclusões e Sugestões para trabalhos futuros _____	34
Anexo A.	Caracterização do Efluente _____	37
Anexo B.	Verificação e ajuste dos termopares _____	39
Anexo C.	Registos experimentais _____	45
Anexo D.	Determinação das quantidades de calor transferidas _____	49
Anexo E.	Determinação dos U/U_0 _____	51

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Evolução temporal da espessura do depósito.	3
Figura 1.2 - Curva limiar do sujamento obtida através da temperatura em função da velocidade da corrente.	4
Figura 2.1 - <i>Esquema representativo da instalação em funcionamento.</i>	184
Figura 2.2 - Instalação Experimental.	188
Figura 3.1 – Desvio à temperatura T_b ao longo do trabalho experimental.	22
Figura 3.2 – Evolução temporal da temperatura à entrada (T2) e saída (T4) do evaporador.	23
Figura 3.3 – Evolução temporal da temperatura à entrada (T3) e saída (T6) do condensador e após a passagem na coluna de arrefecimento (T5).	23
Figura 3.4 – Evolução temporal do caudal da água residual e da água de arrefecimento... .	27
Figura 3.5 – Evolução temporal dos calores transferidos no evaporador e no condensador... ..	29
Figura 3.6 – Evolução temporal do U/U_0 para as condições do evaporador... ..	31
Figura 3.7 – Serpentina do evaporador antes (a) e após (b) contacto prolongado com a água residual.	
Figura A.1 – Representação gráfica do erro de calibração para T4.	43
Figura A.2 – Representação gráfica do erro de calibração para T5.	434
Figura A.3 – Representação gráfica do erro de calibração para T6.	434
Figura E.1 – Diagrama de Mollier para o Freon R12.	51
Figura E.2 – <i>Representação do comportamento do Freon R12 aquando da troca de calor no evaporador (a) e condensador (b).</i>	52

Índice de Tabelas

Tabela 1.1 – Caracterização típica de uma água residual resultante da produção de pasta de papel.	212
Tabela 3.1 – Características da água residual utilizada nos diversos ensaios experimentais.	21
Tabela 3.2 – Valores experimentais da variação de massa do fio de cobre após exposição em água residual.	213
Tabela A.1 – Valores de CQO obtidos experimentalmente para as três amostras de água residual ensaiadas.	217
Tabela A.2 – Valores das massas iniciais e finais obtidas para a determinação dos SST.	217
Tabela A.3 – Valores da concentração dos SST obtidos experimentalmente para as três águas residuais ensaiadas.	218
Tabela B.1 – Tabela de calibração para a temperatura de 20°C.	39
Tabela B.2 – Tabela de calibração para a temperatura de 25°C.	39
Tabela B.3 – Tabela de calibração para a temperatura de 30°C.	40
Tabela B.4 – Tabela de calibração para a temperatura de 35°C.	40
Tabela B.5 – Tabela de calibração para a temperatura de 40°C.	41
Tabela B.6 – Tabela de calibração para a temperatura de 45°C.	41
Tabela B.7 – Tabela de calibração para a temperatura de 50°C.	42
Tabela B.8 – Tabela de calibração para a temperatura de 55°C.	42
Tabela B.9 – Tabela de calibração para a temperatura de 60°C.	43
Tabela C.1 – Tabela de registros.	435
Tabela D.1 – Tabela com os valores de calor transferidos ao longo da experiência.	439
Tabela E.1 – Tabela com os valores de U/U_0 obtidos longo da experiência.	52

Nomenclatura

Símbolo	Definição	Unidade
Árabe		
C_p	Calor específico a pressão constante	J/(g.°C)
$T_b, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$	Temperatura	°C
A	Área	m ²
Q	Calor transferido	W
Q_0	Calor transferido nas condições iniciais	W
U	Coeficiente global de transferência de calor	W/(m ² .°C)
U_0	Coeficiente global de transferência de calor nas condições iniciais	W/(m ² .°C)
P_1, P_2	Pressão	bar
t	Tempo de exposição	Dia
R_1	Resistência à transferência	(m ² .K)/W
x_1	Espessura	m
CBO_5	Carência Bioquímica de Oxigênio	mg/L O ₂
CQO	Carência Química de Oxigênio	mg/L O ₂
SST	Sólidos Suspensos Totais	mg/L
Grego		
ρ	Massa Específica	kg/m ³
ΔT_1	Diferença de temperaturas média entre a entrada e saída do evaporador	°C
ΔT_3	Diferença de temperaturas média entre a entrada e saída do condensador	°C
ΔT_4	Diferença de temperaturas média entre a saída do condensador e saída da coluna de arrefecimento	°C
ΔT_{evap}	Diferença de temperaturas entre a entrada e saída do evaporador	°C
ΔT_{cond}	Diferença de temperaturas entre a entrada e saída do condensador	°C
ΔT_{lm}	Temperatura média logaritmica	°C
ΔT_{lm0}	Temperatura média logaritmica nas condições iniciais	°C
T_{qe}	Temperatura de entrada do fluido quente	°C
T_{qs}	Temperatura de saída do fluido quente	°C
T_{fe}	Temperatura de entrada do fluido frio	°C
T_{fs}	Temperatura de saída do fluido frio	°C
λ_1	Condutividade térmica	W/(m.K)
Φ_D	Taxa de deposição	????
Φ_R	Taxa de formação	????

Capítulo 1. Introdução

1.1 Introdução Geral

Nos dias de hoje vivemos uma nova revolução industrial. O objectivo é obter uma economia de baixo consumo energético ao utilizar fontes de energia mais seguras, competitivas e duradouras (E – EEA/1/2010. (2010)). Atento a este novo paradigma, o sector industrial tem vindo a apostar fortemente na independência energética, recorrendo às energias renováveis e à promoção integrada da eficiência energética, para garantir uma elevada competitividade e lucros crescentes. Desta forma, é atingida uma alta sustentabilidade económica e ambiental.

A conversão da energia térmica oceânica (OTEC - *Ocean Thermal Energy Conversion*) produz energia eléctrica a partir do aproveitamento da diferença de temperatura entre a água quente da superfície do oceano e a água fria mais profunda (Figueiredo, 2008). Esta tecnologia pode ser utilizada com outros fluidos que não a água do mar. No sector industrial, seria vantajoso aproveitar o potencial térmico dos efluentes para produção de energia eléctrica; no entanto, dada a utilização de permutadores por parte desta tecnologia, é necessário avaliar os possíveis problemas de sujamento na superfície de transferência de calor.

O presente trabalho consiste no estudo do sujamento da superfície de transferência de calor do evaporador de uma bomba de calor, utilizando o calor disponível no efluente de uma unidade de produção de pasta para papel. Na secção seguinte faz-se uma revisão bibliográfica sobre a problemática do sujamento em permutadores de calor.

1.2 Sujamento

1.2.1 Aspectos Gerais

Na indústria química a acumulação de materiais indesejados na superfície de equipamentos de transferência de calor, usualmente referida como sujamento, é um grave problema operacional. O sujamento da superfície de um permutador de calor pode ser provocado pela deposição de vários tipos de partículas sólidas ou semi-sólidas, material orgânico, cristalino, produtos com origem em processos corrosivos e provenientes de outras

reações químicas. Independentemente das suas características, o sujamento introduz uma resistência adicional à transferência de calor, o que origina uma redução na eficiência térmica do permutador de calor, para além de provocar um aumento das perdas de carga.

O sujamento acarreta um elevado custo de operação devido à diminuição da eficiência do processo de transferência de calor, ao aumento do consumo energético devido ao aumento de carga no transporte do fluido em causa, à crescente necessidade de manutenção e limpeza do equipamento e ao uso de produtos químicos para preveni-lo. Estes problemas têm motivado a investigação nesta área desde 1970, ano em que foram editadas as primeiras publicações sobre o tema (Bott, 1995).

Os problemas associados ao sujamento dos equipamentos de transferência de calor são conhecidos desde a criação do primeiro permutador de calor (Bott, 1995). Ao princípio, na década de 20 do século XX, a preocupação era direccionada para a observação do fenómeno e para a elaboração de métodos que reduzissem o sujamento. Posteriormente, de 1920 a 1945, apostou-se no desenvolvimento de técnicas de medição e representação do sujamento, tendo sido efectuadas expressões numéricas representativas das consequências do sujamento. A partir de 1945, esta área de investigação tem sido alvo de uma abordagem mais científica, graças aos grandes avanços tecnológicos na área, que permitiram formular e concretizar estratégias de prevenção mais eficazes.

1.2.2 Formação do sujamento

A compreensão dos mecanismos que conduzem à acumulação de depósitos na superfície de transferência de calor, faculta a informação necessária para, em determinadas situações, reduzir ou até mesmo evitar o sujamento.

Considera-se a taxa de crescimento dos depósitos como a diferença entre a taxa de deposição (ϕ_D) e a taxa de formação (ϕ_R) (Melo *et al.*, 1988).

A figura 1.1 demonstra a evolução temporal da espessura do depósito na superfície de transferência de calor.

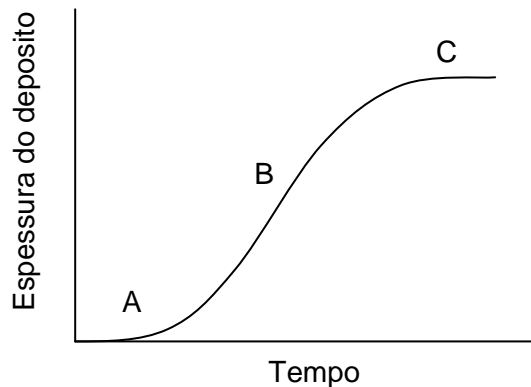


Figura 1.1 – Evolução temporal da espessura do depósito¹

Analisando a figura 1.1 denotam-se três regiões distintas. Na primeira zona (A) dá-se início ao processo de adesão. O período em que ocorre a adesão do depósito à superfície de transferência de calor é muito variável. Podendo surgir ao fim de várias semanas ou apenas em minutos, dependendo do tipo de sujamento e das condições em que ocorre (Bott, 1995).

Na região B visualiza-se o crescimento constante do depósito na superfície. É nesta etapa, que ocorre a competição entre a deposição e a remoção. Enquanto a taxa de deposição decresce gradualmente, a taxa de remoção dos depósitos aumenta, até que na etapa final (C) a taxa de deposição e de remoção atingem um estado estacionário, onde a espessura do depósito permanece praticamente constante (Bott, 1995).

A formação do sujamento é fortemente afectada pelas variáveis operatórias do permutador de calor, como a temperatura de funcionamento e a velocidade do fluído que o atravessa. Segundo Rodriguez & Smith (2007), a taxa de formação do sujamento depende directamente da temperatura da superfície do permutador, sendo que o aumento da temperatura influencia o crescimento da camada de depósito nas paredes. Os mecanismos de remoção estão relacionados com o transporte dos agentes de sujamento, antes que estes adiram à superfície do equipamento. Estudos realizados, que apreciam a influência da velocidade na a taxa de remoção, constatam que as correntes com elevada velocidade não favorecem a formação e crescimento do sujamento.

Na figura 1.2 representa-se a influência combinada da temperatura e pressão na evolução do sujamento.

¹ Adaptado de Bott (1995) pág. 4

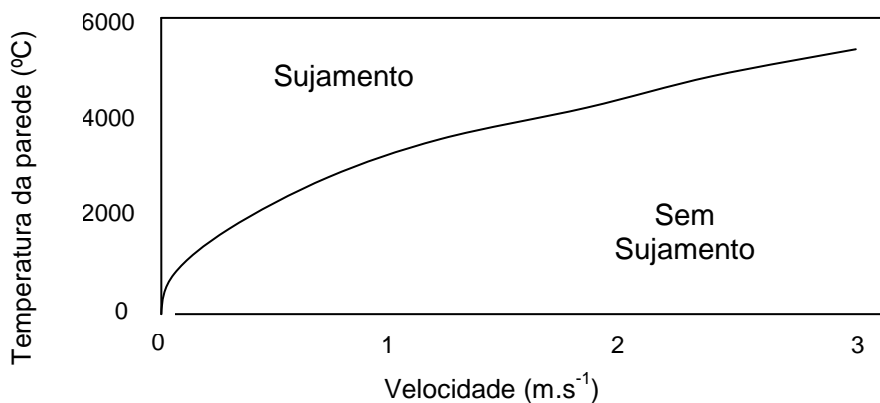


Figura 1.2 – Curva limiar do sujamento obtida através da temperatura em função da velocidade da corrente ²

A curva representada na figura 1.2 indica a temperatura máxima da superfície de transferência, para uma determinada velocidade, abaixo da qual a deposição de partículas na parede não é significativa. No caso das condições de operação se situarem acima do limiar de sujamento, pode-se esperar a formação e crescimento de depósito na superfície, sendo o sujamento mais severo quanto mais afastado da curva estiver o ponto que representa as condições de operação.

A formação de uma camada de depósito na superfície de transferência de calor origina um aumento da resistência global à troca de calor. Desta forma, a interferência do sujamento na transferência de calor pode ser determinada através do cálculo da sua resistência (R_1), dada pela equação 1.1:

$$R_1 = \frac{x_1}{\lambda_1} \quad (1.1)$$

Sendo, x_1 a espessura do depósito (m) e λ_1 a condutividade térmica do depósito ($W/(m.K)$). Porém, a determinação da resistência do depósito é de difícil obtenção.

Uma alternativa para avaliar o sujamento, é sugerida por Bott (1995) que propõe efectuar-se a comparação entre o coeficiente global de transferência de calor ideal (no momento inicial), U_0 , com o obtido nas condições de sujamento, U .

Para as condições ideais, enquanto a superfície de transferência de calor está limpa,

$$Q_0 = U_0 \cdot A \cdot \Delta T_{Im0} \quad (1.2)$$

² Adaptado de Rodriguez & Smith (2007) pág. 840

Para as condições de sujamento,

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{lm} \quad (1.3)$$

Dividindo a expressão onde se representam as condições de sujamento (1.3) pela das condições ideais (1.2), temos que:

$$\frac{U}{U_0} = \frac{Q_0}{Q} \cdot \frac{A}{A} \cdot \frac{\Delta T_{lm}}{\Delta T_{lm0}} \quad (1.4)$$

Sendo U e U_0 o Coeficiente global de transferência de calor nas condições de sujamento e ideais, respectivamente ($W/(m^2 \cdot ^\circ C)$); Q e Q_0 o Calor transferido nas condições de sujamento e ideais, respectivamente (W); A a área de transferência de calor (m^2); ΔT_{lm} e ΔT_{lm0} a temperatura média logaritmica nas condições de sujamento e ideais.

O estudo do U/U_0 permite acompanhar a evolução da formação de sujamento no equipamento de transferência de calor. Inicialmente, temos que U/U_0 é igual a 1, pois nas condições iniciais não existe sujamento. Ao longo da experiência se U/U_0 prosseguir com valores próximos de 1, pode-se concluir que não ocorre formação de sujamento; caso U/U_0 evidencie um perfil decrescente comprova-se a formação de sujamento.

1.2.3 Consequências do Sujamento

A presença de sujidade em superfícies tem como principal consequência a diminuição da eficiência do permutador de calor, porque a sua presença provoca no sistema uma resistência adicional à transferência de calor, com a agravante de a condutividade térmica da camada de sujidade ser muito inferior à do metal que constitui o permutador.

A presença de depósitos ao longo da superfície do permutador de calor reduz a área de passagem do fluido, o que origina um aumento das perdas de carga. Este problema representa um acréscimo da energia utilizada para a bombagem, uma vez que a velocidade terá que aumentar para compensar as perdas de carga. Como está implícito, um aumento do consumo de energia representa um aumento nos custos operacionais do equipamento (Melo *et al.*, 1988).

A sujidade é, ainda, uma das grandes responsáveis pela ocorrência de processos corrosivos sob o depósito, o que se traduz na degradação do equipamento.

A fim de minimizar as consequências da ocorrência de sujamento, são aplicadas medidas de prevenção, que têm também os seus custos inerentes. Em muitos casos, usam-se produtos químicos, tais como inibidores de corrosão, de crescimento biológico e de formação e adesão de precipitados. No entanto, e porque a utilização desses reagentes pode representar uma ameaça ambiental, também as quantidades necessárias para se obter bons resultados crescem os custos operatórios. Mesmo prevenindo a acumulação de material indesejado nas superfícies através da aplicação de produtos químicos, é sempre necessário realizar periodicamente limpezas mecânicas. Esta prática deve ser executada unicamente na paragem anual da fábrica. Porém, se a taxa de sujamento assim o justificar, é necessário limpar o permutador de calor durante o período de operação do sistema. Esta acção implica retirar o permutador de calor de funcionamento para a limpeza o que pressupõe uma quebra da produção do sistema (Rodriguez & Smith, 2007).

1.2.4 Classificação do Sujamento de Superfícies

O sujamento de superfícies depende das características do fluido que as atravessa, podendo ser classificado em sujamento por: deposição de partículas, cristalização, reacção química, produtos de corrosão, solidificação ou congelamento e biológico.

Uma abordagem pormenorizada dos principais tipos de sujamento é descrita nos parágrafos seguintes.

1.2.4.1. Deposição de Partículas

De acordo com Melo *et al.* (1988) o sujamento por deposição de partículas é definido como a acumulação de partículas sólidas suspensas de um fluido na superfície de transferência de calor.

Se as condições do sistema forem adequadas, as partículas existentes no fluido podem permanecer em suspensão, não originando depósitos. No entanto, esta é uma situação difícil de se concretizar, pois as partículas tendem a aglomerar-se e sedimentar. Também, quando existem zonas do circuito em que a velocidade da água é insuficiente para manter os sólidos em suspensão ocorre deposição das partículas. Finalmente, as partículas poderão ser atraídas para as superfícies aquecidas ocorrendo a adesão das partículas à parede do permutador de calor (Teixeira *et al.*, 1997).

1.2.4.2. Cristalização

Um dos mais comuns tipos de sujamento é pelo processo de cristalização (Melo *et al.*,1988). A cristalização, vulgarmente designada por incrustação, envolve soluções aquosas que precipitam ou cristalizam, formando uma camada aderente, de cristais de sais ou óxidos insolúveis, na superfície de transferência de calor.

Os potenciais formadores de sujamento por incrustação, são o carbonato de cálcio, o sulfato de cálcio, os fosfatos de cálcio e magnésio e o silicato de magnésio (Cho *et al.*, 2004). Estes sais precipitam quando se ultrapassa o seu limite de solubilidade ou então no caso de terem solubilidade invertida, ou seja, a probabilidade de precipitarem com o aumento da temperatura é muito maior.

Outro factor que afecta a formação de incrustações, são superfícies corroídas, pois apresentam-se mais rugosas e, por esse motivo, mais aptas a receber o depósito e também a existência de sujamento biológico que favorece a adesão de cristais (Teixeira *et al.*,1997).

1.2.4.3. Reacção Química

O sujamento por reacção química é usualmente associada a compostos orgânicos (Bott, 1995). Um dos casos mais recorrentes deste género de sujamento, dá-se com a entrada, no permutador de calor, de um fluído com espécies que reagem entre si, originando produtos que aderem à superfície de calor. (Watkinson & Wilson, 1997). As reacções químicas originadas são fortemente influenciadas pela temperatura operatória do permutador de calor.

O sujamento por reacção química que usualmente é associado a fluidos orgânicos é atribuído a três classes de reacções: auto-oxidação, polimerização e decomposição térmica (Watkinson & Wilson, 1997). Sendo os processos mais susceptíveis, a este tipo de sujamento, o da refinação do petróleo, o da petroquímica e do processamento de alimentos. Porém, também se podem encontrar no depósito constituintes inorgânicos associados aos sais dissolvidos na fracção aquosa do produto orgânico, e por produtos de corrosão.

Embora a formação de sujamento por reacção química não seja de difícil remoção, como, quando comparada com outros géneros de sujamento, destaca-se a difícil identificação do agente de sujamento (Watkinson & Wilson, 1997).

1.2.4.4. Produtos de Corrosão

O sujamento por corrosão acontece quando o material metálico da superfície de transferência de calor reage com determinados constituintes do fluido que atravessa o permutador. Os produtos formados durante a corrosão depositam-se, posteriormente, na parede por precipitação.

A corrosão é influenciada por diversos parâmetros, sendo os principais: oxigénio dissolvido em água, ácidos e sais ácidos em solução aquosa, temperatura, presença de microrganismos, junções de metais diferentes, velocidade do fluido.

As reacções de corrosão, devem-se em grande parte ao metal usado na construção da superfície de transferência de calor. O cobre, usado preferencialmente em equipamento de transferência de calor, é um metal nobre (dado o seu elevado potencial de redução) e apresenta uma grande resistência à corrosão, devendo-se esta à formação de uma camada fina, compacta e aderente de produtos de corrosão com propriedades protectoras, designada por patina. Evidencia-se que o cobre e as suas ligas são resistentes à corrosão na maior parte dos meios salinos, alcalinos e em contacto com compostos orgânicos, ácidos oxidantes, enxofre, entre outros. Os agentes agressivos, como o oxigénio e a amónia, são dos únicos que podem conduzir à corrosão do cobre (Passos, 2007).

1.2.4.5. Biológico

O sujamento biológico ou biofilme é considerado como a deposição ou crescimento de depósitos de material com origem biológica na superfície de transferência de calor. Este material biológico é constituído por microrganismos (por exemplo, bactérias, algas e fungos) e também pelos seus produtos de excreção e outras partículas sólidas em suspensão no fluido. Após o desenvolvimento dos microrganismos, geralmente, esta camada adquire a forma de um filme, que se denomina por biofilme (Melo *et al.*, 1988).

A formação e subsequente crescimento de um biofilme pode-se decompor nas seguintes etapas: formação de um filme condicionador; transporte de microrganismos para a superfície; adesão firme dos microrganismos à superfície; transporte de nutrientes da fase líquida para a interface líquido-biofilme, bem como para o interior do filme microbiano; produção de biofilme devido ao consumo de nutrientes, conseqüente crescimento, reprodução e síntese de polímeros extracelulares e desprendimento de porções do biofilme (Pereira, 2001).

O crescimento dos microrganismos em certos fluidos surge pois eles, usualmente, encontram energia, fontes de carbono e nutrientes que permitem o seu desenvolvimento e multiplicação. As condições ambientais, tais como a temperatura, desempenham um papel importante na velocidade de crescimento da biomassa. Constatando-se que para um grande número de espécies, o valor óptimo da temperatura é de 37°C (Teixeira *et al.*, 1997).

O material biológico nas superfícies do permutador de calor é, por vezes, um indutor da formação de incrustações, da deposição de partículas e das reacções de corrosão. Em geral, isto está associado à actividade metabólica, que envolve reacções químicas, e à mudança de condições, particularmente o pH sob a película biológica (Bott, 1995).

1.2.5 Prevenção do Sujamento

Como explanado no tópico 1.2.3, as consequências da formação de sujamento são várias e implicam diversos custos. Embora existam em uso imensas técnicas para atenuar o desenvolvimento do sujamento na superfície, a realidade é que, cada vez mais, se efectuem estudos para desenvolver mecanismos que previnam o aparecimento de sujamento, ao contrário de apenas o minimizar.

De seguida, apresentam-se alguns dos mecanismos e reagentes utilizados comumente para atenuar o sujamento na superfície de transferência de calor.

- Ajustamento físico-químico da água, no entanto, obtém-se um efeito muito reduzido;
- Ajustamento físico que envolve o aumento da turbulência para que não ocorram zonas de estagnação e sobretudo limpezas periódicas;
- Uso de inibidores para reduzir a tensão superficial e/ou modificar as forças atractivas ou repulsivas entre as partículas;
- Tratamento do fluído que circula no permutador e a sua desinfeção, principalmente, no combate ao sujamento biológico;
- Aplicação de desinfectantes como o cloro e derivados e bromo e derivados, de biocidas, como compostos de organo-dibromados e de sais de amónio quaternário, eficaz no controlo de bactérias;
- Uso de polifosfatos, fosfonatos, dispersantes sintéticos e naturais e complexantes no controlo das incrustações;

- Em corrosão evidencia-se a importância do uso dos inibidores anódicos e catódicos, o uso de películas protectoras e também a passivação das superfícies.

Porém, existem muitas aplicações de permutadores de calor na indústria onde não podem ser adicionados a maioria dos aditivos químicos referidos anteriormente, para atenuar os severos problemas do sujamento. Desta forma, a melhor maneira de escapar às consequências do sujamento e aos seus custos associados é evitar a sua formação. Müller-Steinhagen (1998) afirma que uma forma de contornar esta situação é através de medidas preventivas eficazes. Para tal, é fundamental combinar os conhecimentos teóricos com os estudos laboratoriais, de forma a, avaliar a possível a formação e desenvolvimento do sujamento. A seguinte etapa refere-se à determinação óptima das condições operatórias, sendo o dimensionamento do permutador de calor a última etapa a ser realizada.

Também, Rodrigues & Smith (2007), reconhece que as variáveis operativas, como a temperatura da superfície e a velocidade do fluido, possuem um efeito significativo na taxa de deposição e formação do sujamento (como descrito anteriormente). Portanto a optimização das condições de operação como a programação das limpezas, quando optimizadas em simultâneo, resultam numa maior poupança energética e menores custos operatórios.

Salienta-se, ainda, um estudo realizado numa refinaria em Portugal, por Jerónimo *et al.* (1997), onde se comparou a eficiência térmica diária com a assumida no projecto do permutador de calor. Verificou-se que os valores admitidos em projecto não eram representativos do sujamento do equipamento na actualidade. O que significa que alguma variável significativa do sistema não foi levada em conta aquando do projecto. Reforça-se então a ideia de que na fase de projecto é de extrema importância uma análise exaustiva das variáveis do processo assim como das condições a que este se encontra, e também a ajuda obtida através da execução de ensaios laboratoriais.

Outro estudo realizado, recentemente, por Pronk *et al.*, em 2009, comprova que uma corrente de partículas sólidas ao atravessar um permutador de calor é capaz de remover o depósito das paredes e desta maneira prevenir o sujamento. Este mecanismo de prevenção do sujamento acredita-se depender fortemente da frequência e força da colisão das partículas da parede, permitindo, com aquele sistema, aumentar o coeficiente de transferência de calor em cerca de 8 vezes, quando comparado com a não utilização de partículas na limpeza do tubular.

Este mecanismo evidencia-se como uma promissora alternativa às técnicas de controlo convencionais, pois requer menores custos de investimento e manutenção. Salienta-se que já são encontradas estas aplicações em diversas partes da indústria, onde ocorre graves situações de formação do sujamento, com na industria de papel, refinarias e tratamento de águas residuais.

1.3 Grupo Portucel Soporcel – Fábrica de Cacia

O grupo Portucel Soporcel assume-se como líder europeu, posicionando-se entre os maiores produtores no mercado internacional como um dos maiores produtores de papéis finos não revestidos UWF (*Uncoated Woodfree Paper*), para a indústria gráfica e utilização em escritório, sendo também o maior produtor da Europa de pasta branca de eucalipto BEKP (*Bleached Eucalyptus Kraft Pulp*) (Grupo Portucel Soporcel, (P.S.), 2010).

As fábricas do grupo localizam-se em Cacia, Figueira da Foz e Setúbal. Destacando-se a nova fábrica em Setúbal, que equipada com a maior e mais sofisticada máquina de papel do mundo alcança uma produção de 500 mil toneladas de papel por ano.

A nível energético, o Grupo sobressai-se como o maior produtor nacional de energia a partir de uma fonte renovável, a biomassa florestal. Produzindo mais de 90 por cento da energia eléctrica a partir da valorização deste recurso.

O desempenho ambiental do Grupo, tem apresentado sucessivas melhorias do processo produtivo, sendo que todas as unidades industriais operam com elevados padrões de protecção do ambiente.

Quanto à fábrica de Cacia, esta produz 272 mil toneladas de pasta por ano para aplicações especiais, tendo neste momento uma posição consolidada internacionalmente em vários tipos de papel como: os papéis *décor*, papéis revestidos e os papéis *tissues* de alta qualidade (P.S., 2010). Tendo sido, nesta fábrica, que em 1957, se produziu pela primeira vez a nível internacional pasta de papel a partir de eucalipto pelo processo *Kraft*.

No que diz respeito ao tratamento da água residual oriunda dos processos de produção da pasta e papel, a fábrica possui uma estação de tratamento de água residual (ETAR), descrita no tópico 1.3.1.

1.3.1 Tratamento da Água Residual

A caracterização típica de uma água residual proveniente de uma indústria de produção de pasta e papel pode ser observada na tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Caracterização típica de uma água residual resultante da produção de pasta de papel

Parâmetro	Gama de valores típicos
SST (mg/L)	300 a 670
CQO (mg/L O ₂)	1150 a 1480
CBO ₅ (mg/L O ₂)	250 a 600
Fibra (mg/L)	180 a 250
Sódio (mg Na ⁺ /L)	520 a 720

Conforme se verifica na tabela 1.1, os valores apresentados pela água residual à entrada do tratamento primário são inapropriados para descarga ambiental. Por isso, ela deve ser sujeita a tratamento de modo que satisfaça as exigências legais

A estação de tratamento águas residuais, ETAR, é constituída essencialmente por uma grelha mecânica, um tanque de neutralização, um canal de desarenação, três parafusos de Arquimedes, um tanque de mistura rápida, um decantador primário e um secundário. A água residual oriunda da fábrica é encaminhada para a gradagem, onde a grelha mecânica remove os sólidos de maiores dimensões, de seguida é enviada para um tanque de neutralização onde se procede ao ajuste de pH. Após esta etapa a água residual atravessa um canal de desarenação, a fim de serem removidos mais alguns sólidos pesados. Salienta-se que a amostra de água residual com que se prosseguiu o trabalho experimental foi obtida no canal de desarenação. Posteriormente a água é elevada por meio de 3 parafusos de Arquimedes para o decantador primário onde se remove grande parte da carga sólida. Posteriormente, o efluente a 59 °C é arrefecido até cerca dos 35 °C em duas torres de arrefecimento e, prossegue para o tratamento biológico, composto por duas linhas, cada uma constituída por um tanque de lamas activadas e um decantador secundário. Após este tratamento, o efluente com características aceitáveis é descarregado, através de um emissário, para o oceano Atlântico.

Capítulo 2. Descrição Experimental

O estudo experimental visou a avaliação do sujamento da superfície de transferência de calor do evaporador de uma bomba de calor, quando utilizado efluente de uma unidade de produção de pasta para papel proveniente da fábrica Portucel Soporcel em Cacia.

Para a realização deste estudo, procedeu-se à montagem de uma instalação experimental no Laboratório de Tecnologia Química Doutora Lídia de Vasconcelos do Departamento de Engenharia Química do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), estando esta detalhada na secção 2.1. O funcionamento da instalação decorreu ao longo de 84 dias, entre os dias 23 de Abril e 15 de Julho de 2010, tendo a sua operação sido apenas interrompida para substituição da água residual, ou devido à falta de energia eléctrica.

2.1 Descrição da Instalação Experimental

A instalação, representada no diagrama de fluxo da figura 2.1, é composta por três grandes elementos, descritos nas sub-secções seguintes: bomba de calor; circuito de água de arrefecimento do condensador da bomba de calor; circuito da água residual quente para aquecimento do evaporador da bomba de calor.

2.1.1 Bomba de Calor

Na instalação experimental a extracção do calor da água residual foi efectuada através de uma bomba de calor (BC) usada, da marca Leybold-Heraleus, modelo 666190, que tem as seguintes características técnicas:

- Bomba de calor da marca Leybold-Heraleus, modelo 666190;
- Potência do compressor: 130 W;
- Evaporador: serpentina com 12 espiras, em tubo de cobre, com um diâmetro interno de 13 cm, com diâmetro externo de 9,5 mm e o comprimento de 5,1 m;

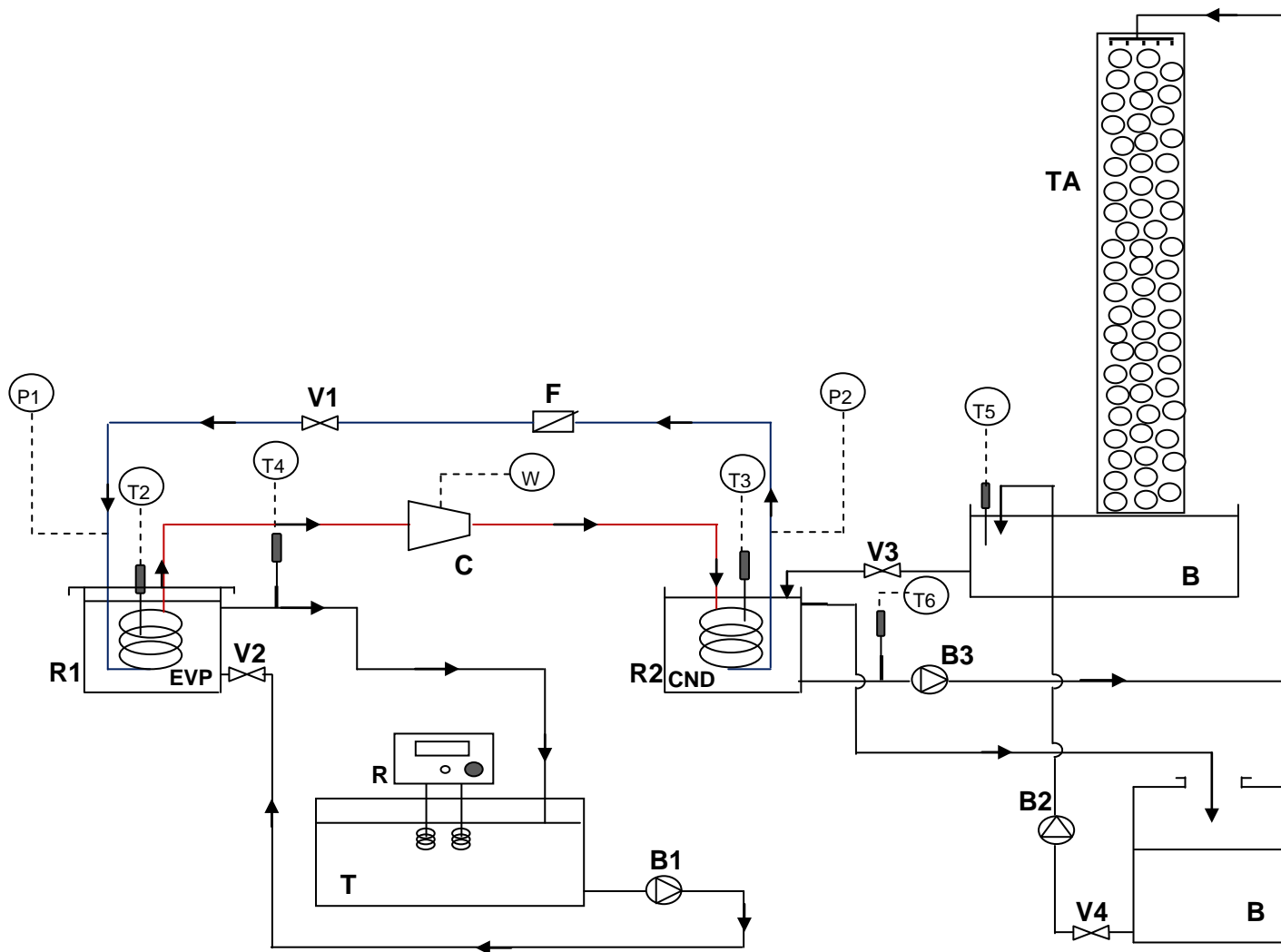


Figura 2.1 – Esquema representativo da instalação em funcionamento

Legenda: R1 - Reservatório 1; R2 – Reservatório 2; **EVP** – Evaporador; **CND** – Condensador; **C** - Compressor; **F** – Filtro; **V1** – Válvula de expansão; **V2,V3,V4** – Válvulas; **B1,B2,B3** – Bombas Centrífugas; **TQ** – Tanque Termostatizado; **R** – Resistência; **BA** – Bacia; **BD** – Bidão; **TA** – Torre de arrefecimento; **T2,T3,T4,T5,T6** – Termopares

- Condensador: serpentina com 12 espiras, em tubo de cobre, com um diâmetro interno de 13 cm. O tubo de cobre possui um diâmetro externo de 11 mm e o comprimento de 5,1 m;
- 2 Reservatórios circulares com um volume de 5L;
- 2 Termopares: um deles localizado no reservatório onde se localiza o evaporador (R1) e outro no reservatório do condensador (R2);
- Válvula de expansão;
- Filtro;
- 2 Manómetros: um para as pressões associadas ao evaporador e outro para as do condensador;
- Potenciómetro;
- Refrigerante: Freon R12.

Na BC o calor extraído da água residual no evaporador é transferido, por meio do refrigerante, para a água de arrefecimento no condensador. No evaporador EVP (ver figura 2.1), o calor recebido provoca a evaporação do refrigerante. Comprimindo o seu vapor por acção do compressor C, o refrigerante é, então, condensado por arrefecimento com água no condensador CND, cedendo o calor recebido no evaporador. Ao líquido refrigerante arrefecido, após passagem no filtro (F1), provoca-se a sua expansão na válvula V1, originando a sua passagem ao estado gasoso em EVP.

A temperatura no interior dos reservatórios R1 e R2 foi controlada por meio de dois termopares T2 e T3, devidamente inseridos no interior dos reservatórios em contacto com o fluido.

2.1.2 Circuito da Água Residual

O mantimento das condições térmicas da água residual descarregada pela instalação industrial revelou-se indispensável ao estudo do sujamento na superfície do evaporador de calor. Para tal, procedeu-se à montagem de um sistema de aquecimento, em que a resistência R manteve a água residual à temperatura de 59°C (correspondente à temperatura média do efluente descarregado). Desenhou-se um circuito fechado, onde a água residual circula do reservatório R1 para o tanque TQ, com um caudal relativamente constante de 85 L/h. Após o aquecimento, o efluente é novamente bombeado para o reservatório R1, pela bomba centrífuga B1, novamente para o reservatório R1, onde cede o calor ao refrigerante que passa no evaporador da bomba de calor.

Com o intuito de minimizar as perdas por evaporação verificadas no tanque TQ e no reservatório R1, estes componentes da instalação foram termicamente isolados.

Neste circuito efectuou-se uma picagem na tubagem à saída do reservatório R1 para a colocação do termopar T4, com a finalidade de controlar a temperatura da água residual após a evaporação.

Apresenta-se de seguida as características do equipamento utilizado neste circuito:

- Resistência (R) da marca DIGITERM, modelo 3000542 com uma potência de 1060W;
- Tanque (TQ) com um volume de 25 L;
- Bomba centrífuga (B1) da marca IWAKI MAGNET PUMP, com um caudal máximo de 9 L/min e uma altura manométrica de 1,0 m.c.a a 1,4 m.c.a;
- 1 Válvula;
- 1 Termopar.

2.1.3 Circuito da Água de Arrefecimento

O sistema de arrefecimento integrou, à falta de outro meio, uma improvisada torre de arrefecimento TA. A água quente contida no reservatório R2 é bombeada, por meio da bomba B3, para a torre de arrefecimento sendo uniformemente escoada pelo enchimento da torre (através de um chuveiro) até atingir a bacia BA. Para esta bacia é também bombeada, por meio da bomba B2, uma reduzida quantidade de água a partir do reservatório BD, de modo a compensar as perdas de água por evaporação na torre. Entretanto, BD recebe o excesso de água do reservatório R2 por meio de um tubo ladrão.

Neste circuito controlou-se a temperatura da água após o escoamento na torre de arrefecimento, assim como a temperatura da água à saída do reservatório R2. No primeiro caso, mergulhou-se o termopar T5 em BA, quanto ao controlo da temperatura à saída do reservatório R2, este foi feito pelo termopar T6 inserido numa picagem da tubagem.

As características do equipamento utilizado neste circuito são as seguintes:

- Torre de arrefecimento construída a partir de uma coluna cilíndrica de acrílico com uma altura de 2,55 m e diâmetro interno de 15,3 cm, na qual se perfurou a base para permitir a saída de água e sustentar o enchimento. A coluna foi preenchida até a altura de 1,94 m com enchimento de plástico ao *Plastic Flexiringa*.

- 2 Bombas centrífugas (B2 e B3) da marca IWAKI MAGNET PUMP, com um caudal máximo de 9 L/min e uma altura manométrica de 3,1 m.c.a a 4,3 m.c.a;
- Torre de arrefecimento.. No topo da coluna foi colocado um distribuidor para alimentação da água ao enchimento;
- Bidão com capacidade para 25 L;
- Bacia com capacidade para 25 L;
- 2 Válvulas;
- 2 Termopares.

2.2 Montagem da Instalação

A montagem da instalação descrita na secção anterior, foi realizada entre os dias 2 de Março e 1 de Abril de 2010. Após a montagem da instalação foram efectuados ensaios apenas com água, para testar o bom funcionamento da instalação. Esta etapa de ensaios decorreu entre o dia 12 e 21 de Abril de 2010.

A instalação onde decorreram os ensaios posteriores, com a água residual em estudo, está ilustrada na figura 2.2.



Figura 2.2 - Instalação Experimental

2.3 Ensaio Experimentais

Durante o período em que a instalação esteve em funcionamento, realizou-se a renovação da água residual por três vezes. Para este efeito, o funcionamento da instalação era interrompido, esvaziava-se o efluente contido no reservatório R1 e no tanque TQ e substituíam-se por novo efluente, recolhido na fábrica da Portucel Soporcel em Cacia. O funcionamento da instalação era então reiniciado, regulando-se o caudal dos circuitos da água residual e da água de arrefecimento até atingirem um estado estacionário.

Os ensaios experimentais foram realizados nos seguintes períodos:

1ºEnsaio: realizado durante um período de 20 dias, entre 23 de Abril e 12 de Maio de 2010;

2ºEnsaio: realizado durante 28 dias, entre 12 de Maio e 9 de Junho;

3ºEnsaio: realizado durante um período de 36 dias, entre 9 de Junho e 15 de .

Afim de garantir o bom funcionamento da instalação, realizaram-se as seguintes tarefas em todos os ensaios experimentais:

- Verificou-se diariamente a temperatura do banho termostaticado, ajustando-a para o valor de 59°C sempre que necessário;
- Procedeu-se à reposição do nível de água no circuito de arrefecimento e no circuito de água residual sendo, neste caso, a reposição efectuada com água desmineralizada;
- Controlou-se semanalmente caudal de água residual que circulava no circuito fechado de aquecimento e a água que circulava no circuito fechado de arrefecimento. Quando necessário, procedeu-se ao ajuste dos caudais acima referidos. O ajuste do caudal de efluente celulósico fez-se por meio da regulação da válvula V2; no caso do caudal de água, o seu ajuste foi efectuada com a regulação das válvulas V3 e V4;
- Adicionou-se, semanalmente, hipoclorito de sódio na água do circuito da torre de arrefecimento, para prevenir o aparecimento de camadas de biofilme no enchimento da torre.

2.4 Caracterização da Água Residual

Tal como referido anteriormente, a água residual foi obtida na fábrica de pasta para papel Portucel-Soporcel, SA, em Cacia. Para cada ensaio experimental, procedeu-se à recolha de 30 L de efluente na zona do tratamento primário, imediatamente antes da decantação. O efluente recolhido era transportado para o laboratório de tecnologias do ISEP, procedendo-se à sua colocação na instalação experimental no dia de chegada.

Realizou-se a caracterização do efluente em cada uma das recolhas. Os parâmetros ensaiados foram os seguintes: o pH, a condutividade, a temperatura, a Carência Química de Oxigénio (CQO) e os sólidos suspensos totais (SST). Os ensaios foram realizados de acordo com os seguintes procedimentos:

- Determinação do pH, condutividade e temperatura
 - A medição destes parâmetros foi efectuada directamente no aparelho – CONSORT C862
- Determinação da CQO
 - Segundo o manual do aparelho, colorímetro HACH DR2000, método 8000, para a determinação da CQO na gama de 0 a 1000 mg/L O₂.
- Determinação dos sólidos suspensos totais
 - Método gravimétrico, seguindo-se o procedimento descrito no Standard Methods, 1998, 20th Edition, 2-54 – 2-60.

2.5 Estudo de Sujamento na Superfície de Transferência de Calor

De modo a avaliar a formação de sujamento, assim como a consequente interferência na eficiência de transferência de calor no evaporador de uma bomba de calor, efectuou-se o registo diário dos seguintes valores: as temperaturas obtidas pelos termopares colocados em linha (T2, T3, T4, T5 e T6), a temperatura do banho termostaticado (Tb), as pressões na bomba de calor dadas pelos manómetros de baixa pressão (P1) e de alta pressão (P2), a potência correspondente ao compressor, o caudal de efluente em circulação e o caudal de água no circuito de arrefecimento.

2.6 Estudo da Corrosão

Além do sujamento, a possível corrosão do cobre, material de que é feita a serpentina, devido ao contacto prolongado que a água residual tem com a serpentina, foi também avaliada.

O estudo da velocidade de corrosão do cobre foi efectuado através de uma análise gravimétrica. Para tal, procedeu-se à limpeza e pesagem em balança analítica de um fio de cobre, posteriormente colocado no interior do reservatório R1, contendo a água residual. O fio de cobre permaneceu em contacto com a água residual desde o dia 19 de Maio até ao fim do trabalho experimental, o que correspondeu a um período de exposição de 56 dias. Na conclusão da experiência, efectuou-se novamente uma limpeza do fio de cobre, com o objectivo de remover, eventualmente, os produtos de corrosão, e pesou-se o fio na balança analítica usada inicialmente.

Capítulo 3. Resultados

3.1 Caracterização do Efluente

No início de cada ensaio experimental procedeu-se, na água residual, à determinação do pH, condutividade, CQO, SST e SSS. Na tabela 1 apresentam-se os valores obtidos.

Tabela 3.1 – Características da água residual utilizada nos diversos ensaios experimentais

Parâmetros	Água Residual		
	1ºEnsaio	2ºEnsaio	3ºEnsaio
Temperatura, °C	36,7	29,6	34,8
pH, Escala de Sorënsen	10,1	10,4	10,3
Condutividade, $\mu\text{S}/\text{cm}$	2350	1020	2130
CQO, mg/L O ₂	1375	482	1883
SST, mg/L	375	360	448

Face aos resultados apresentados na Tabela 3.1, verifica-se que as características da água residual utilizada no 2º ensaio divergem das da água residual utilizada nos restantes ensaios. Os valores obtidos para a temperatura, condutividade e CQO são bastante inferiores. Esta divergência está associada à amostragem, uma vez que o dia determinado para a recolha da segunda amostra coincidiu com uma paragem da fábrica.

As descrições dos métodos para determinação da CQO e SST encontram-se no Anexo A.

3.2 Estudo do Sujamento

Nesta secção pretende-se avaliar a formação de sujamento na superfície de transferência de calor do evaporador. Para tal, é indispensável realizar uma análise dos parâmetros registados ao longo dos ensaios experimentais (Anexo C).

Durante o período experimental de 84 dias, procedeu-se à renovação da água residual por três vezes. Embora se tenham considerado três ensaios, uma vez que as

condições operatórias foram mantidas constantes, a análise que se segue diz respeito ao ensaio global.

3.2.1 Temperaturas

A diminuição na eficiência de transferência de calor, provocada pela formação de sujamento é, usualmente, visualizada experimentalmente pela variação das temperaturas. De seguida, efectua-se a análise de todas as temperaturas envolventes na instalação.

Salienta-se que as temperaturas registadas pelo banho termostaticado (T_b) e pelos termopares (T_2 , T_3 , T_4 , T_5 e T_6) foram alvo de uma verificação, entre a gama de temperaturas 20°C a 60°C , comparativamente com um termómetro devidamente calibrado. Após a verificação de cada termopar, procedeu-se ao seu ajuste, cujo procedimento encontra-se descrito no Anexo B.

Um dos requisitos operatórios foi manter a água residual, contida no tanque TQ, à temperatura de 59°C . Na figura 3.1 encontra-se o desvio percentual em relação à temperatura T_b (59°C) ao longo da experiência.

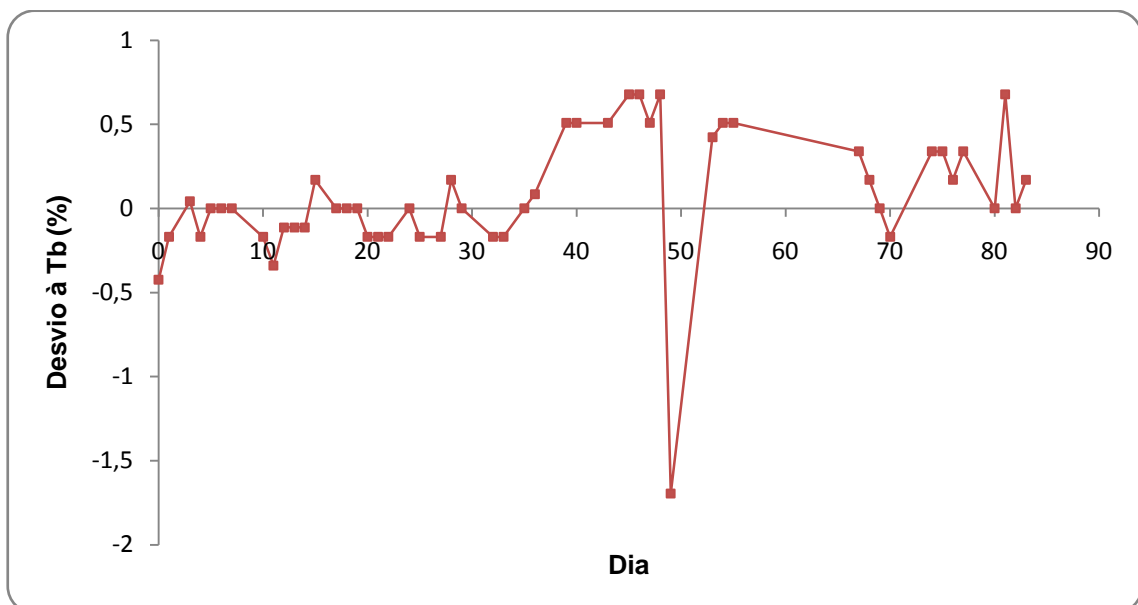


Figura 3.1 – Desvio à temperatura T_b ao longo do trabalho experimental

Observando a figura 3.1, verifica-se um maior desvio absoluto para o dia 49, correspondente a 1,7%. Para os restantes dias, o desvio absoluto é igual ou inferior a 0,7%. Pode-se constatar que de uma forma geral a T_b manteve-se constante ao longo do trabalho.

Nas figuras 3.2 e 3.3 representa-se a evolução temporal das temperaturas de entrada e saída do evaporador e do condensador, correspondentes ao circuito da água residual e da água de arrefecimento, respectivamente.

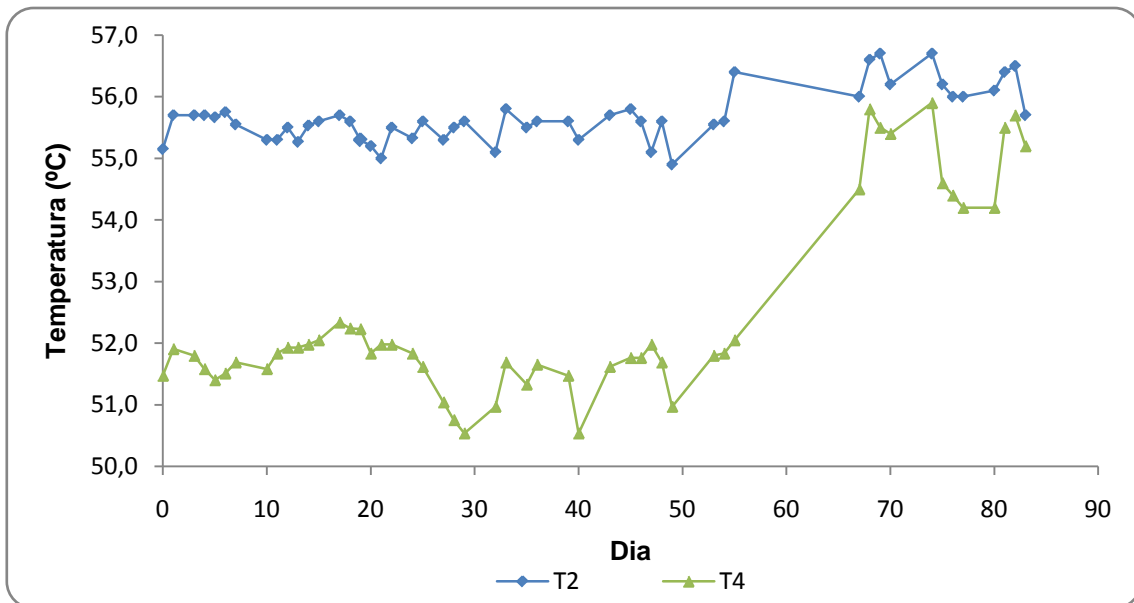


Figura 3.2 – Evolução temporal da temperatura à entrada (T2) e saída (T4) do evaporador

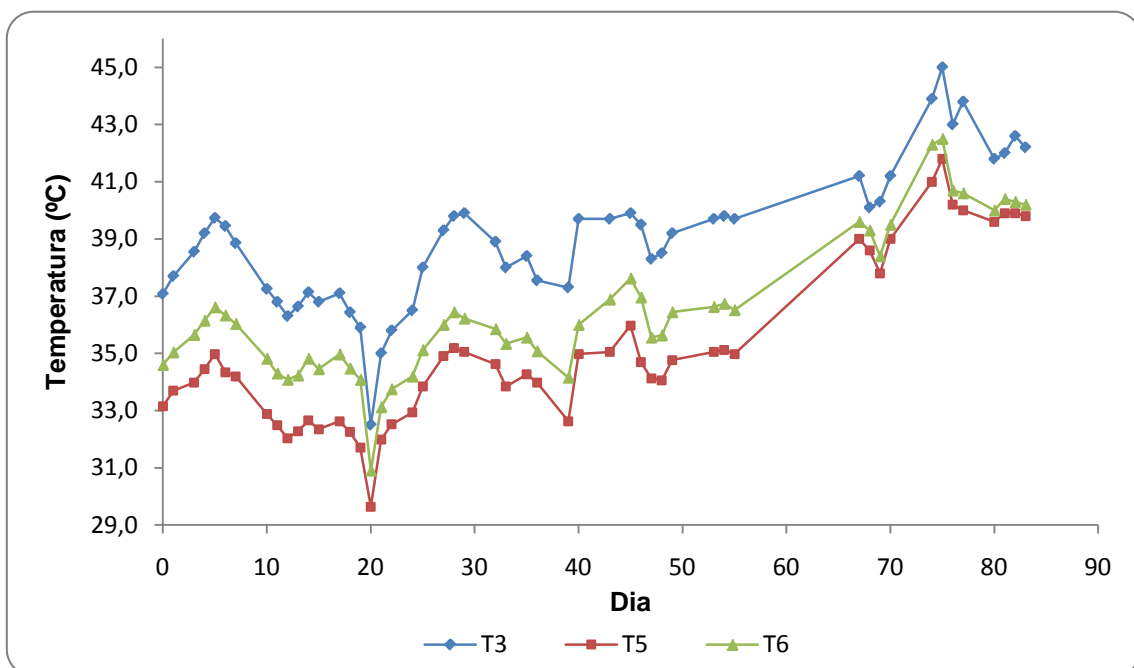


Figura 3.3 – Evolução temporal da temperatura à entrada (T3) e saída (T6) do condensador e após a passagem na coluna de arrefecimento (T5)

Analisando o gráfico da figura 3.2 pode-se verificar que, como era de prever, a temperatura T2 é sempre superior à temperatura T4, o que comprova a transferência de calor ocorrida no evaporador.

É possível evidenciar duas fases distintas na evolução das temperaturas, que são retratadas de seguida.

- 1ª Fase – Do dia 0 ao dia 55 - Observa-se que as temperaturas T2 e T4 têm um comportamento coerente entre si, mantendo-se ao longo do tempo com valores próximos dos iniciais. As oscilações nos valores das temperaturas, T2 e T4, estão relacionadas com as alterações da temperatura ambiente no interior do laboratório. Esta, por sua vez, depende das condições atmosféricas, da hora do dia em que foram efectuados os registos, assim como da actividade do laboratório nesse momento. Para este período de experiência (1ª fase) obteve-se uma diferença de temperaturas média entre a entrada e a saída do evaporador (ΔT_1) de 3,9 °C com um desvio padrão de 0,5°C.
- 2ª Fase – Do dia 56 ao dia 83 – Durante este período é possível visualizar-se uma ligeira subida da T2. Quanto a T4, esta sofreu um aumento abrupto de 52,2°C (no dia 55) para 54,5°C (no dia 67). Verificou-se que para esta 2ª fase o valor do ΔT_1 médio é igual a 1,2°C, com um desvio padrão de 0,5°C. O aumento da temperatura de saída do evaporador (T4) está associada a uma diminuição na transferência de calor, o que seria um indicativo da formação de sujamento na parede da serpentina, contida no reservatório R1.

No entanto, salienta-se que esta alteração súbita das temperaturas, correspondente à 2ª fase, coincidiu com uma paragem no funcionamento da instalação, que decorreu a 18/06/10, devido a um corte da electricidade no laboratório, até ao dia 21/06/10. Quando o laboratório iniciou o seu funcionamento, apenas a bomba de calor entrou em actividade, continuando os circuitos de água residual e água de arrefecimento desligados, durante um dia. Esta situação provocou o funcionamento da bomba de calor sem que as serpentinas do evaporador e condensador estivessem submersas em fluido, o que levou ao sobre-aquecimento de todo o sistema.

Constata-se que o valor do ΔT_1 médio varia de $3,9 \pm 0,5$ °C para $1,2 \pm 0,5$ °C da 1ª para a 2ª fase. Porém, esta evidente diminuição da troca de calor do evaporador não pode ser associada à formação de sujamento, pois ocorre aquando da súbita alteração no comportamento das temperaturas provocada pela situação anómala no funcionamento do sistema, considerando-se, desta forma, os registos a partir do dia 56 inadequados para qualquer tipo de avaliação.

Comparando a T2 de valor médio igual a 55,7 °C com a T_b de 59 °C verifica-se uma grande perda térmica. Este decréscimo na temperatura pode ter sido provocado por perdas

de calor ao longo da tubagem, entre o TQ e o R1, por convecção externa com o ar. Porém com este elevado gradiente de temperaturas esta não será a única causa para o sucedido. A localização do termopar T2, no interior do reservatório 1 próximo da serpentina do evaporador onde ocorria a troca de calor, também, pode ter influenciado esta diferença entre a T2 e a T_b. Isto porque, a temperatura registada em T2, já estava a ser afectada pela troca de calor dada na serpentina, não correspondendo esta à temperatura de entrada no reservatório 1.

Relativamente à figura 3.3 averigua-se que a T3 é, durante todo o período experimental, superior à T6, o que certifica a troca de calor no condensador.

Verifica-se, também, que a torre de arrefecimento teve o efeito desejado, uma vez que, a temperatura após a passagem pela torre de arrefecimento (T5) apresenta, ao longo de todo o ensaio, valores inferiores à temperatura de saída do reservatório R2 (T6).

Para uma apreciação, mais profunda, da figura 3.3 torna-se, também, necessário a divisão do ensaio em duas fases.

- 1ª Fase – Do dia 0 ao dia 56 – Verifica-se que o comportamento das temperaturas envolvidas no circuito de água de arrefecimento é similar em todo o período experimental. No entanto, observam-se diversas variações nas temperaturas (T3, T5 e T6) ao longo do tempo. O decréscimo das temperaturas, registado para o dia 20 e 47, está associado à paragem da instalação para renovação da água residual. Quanto às restantes oscilações, uma das possíveis causas, além da variação da temperatura ambiente do laboratório, como explicada anteriormente, deve-se à reposição diária de água no bidão, pois envolvia elevadas quantidades de água, cerca de 3 L/dia.

A diferença média das temperaturas entre a entrada e saída do condensador (ΔT_3), ao longo desta fase, é de 2,7 °C com um desvio padrão de 0,5 °C.

Relativamente à influência da torre de arrefecimento, obteve-se para a 1ª fase uma diferença média de temperaturas entre a saída do condensador e a passagem pela coluna de arrefecimento (ΔT_4) de 1,6 °C com um desvio padrão de 0,4 °C.

- 2ª Fase – Do dia 56 ao dia 83 – Neste período, também se observa um aumento súbito das temperaturas. Esta variação ocorre aquando da interrupção do funcionamento da instalação, como explanado anteriormente.

Para esta fase o ΔT_3 encontrado foi de 1,9 °C com um desvio padrão associado de 0,6 °C. Determinou-se, para ΔT_4 , um valor igual a 0,6 °C e um desvio padrão de 0,2 °C.

Em suma, verifica-se que o circuito de arrefecimento sofreu alterações nas suas temperaturas observando-se um comportamento de sentido ascendente. Relativamente ao ΔT_3 , este varia de $2,7 \pm 0,5$ °C para $1,9 \pm 0,6$ °C entre a 1ª e a 2ª fase, reconhecendo-se que estas variações de temperatura concordantes com as observadas no circuito de água residual.

Em ambos os circuitos, que se identificam nas figuras 3.2 e 3.3, constatou-se que da 1ª fase para a 2ª fase ocorre uma diminuição ΔT relativos ao evaporador e condensador. Todas estas alterações surgem repentinamente após o dia 56, portanto os valores registados posteriormente a esta situação serão desprezados, uma vez que não se apresentam fidedignos.

3.2.2 Caudais

O caudal dos circuitos de água residual e água de arrefecimento foi outro dos parâmetros a controlar no sistema em funcionamento. Para este efeito, ao longo do ensaio experimental, realizaram-se verificações e posteriores ajustes do caudal, quando necessário, de forma a que o seu valor fosse relativamente constante.

A análise dos caudais ao longo do período experimental é de bastante importância, pois o seu valor intervém directamente na taxa de calor transferido. Seguidamente, na figura 3.4, apresenta-se a evolução temporal dos caudais.

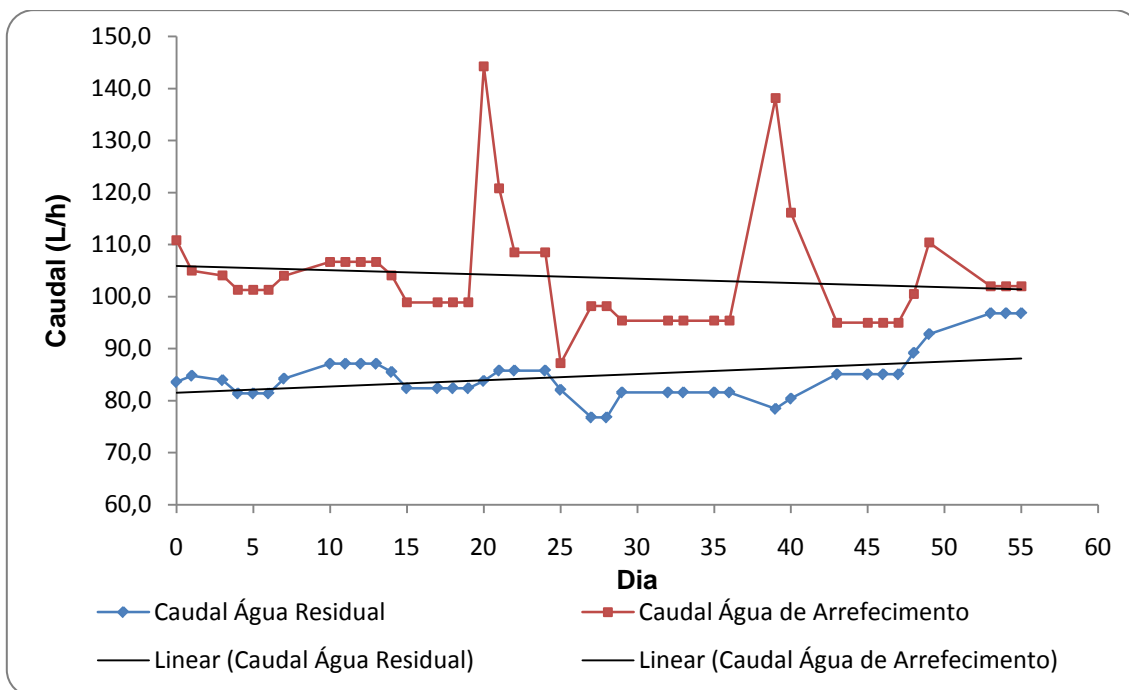


Figura 3.4 – Evolução temporal do caudal da água residual e da água de arrefecimento

Observando a figura 3.4 denota-se que o caudal da água de arrefecimento é em todo o período experimental superior ao caudal de efluente. Registrando-se maiores oscilações no caudal de água de arrefecimento do que no de efluente, mantendo-se este, relativamente constante, para um valor de 84,6 L/h com um desvio padrão de 4,7 L/h.

O controlo dos caudais, durante o período experimental, foi de difícil execução. Embora o caudal fosse um parâmetro que deveria ser constante ao longo do período experimental, em termos operacionais não se conseguiu obter estabilidade nos seus valores. Tendo-se verificado que todas as acções que envolveram a interrupção e arranque da instalação, como na renovação do efluente (dia 20 e 47) e em numerosas falhas de electricidade no laboratório, provocaram grandes variações nos caudais, uma vez que, procedia-se novamente à regulação das válvulas.

Esta maior variação no caudal de água do circuito de arrefecimento é justificável, uma vez que, este depende das variações de caudal da água escoada pela TA e, também, da água bombeada do BD. Deste modo, qualquer pequena alteração numa das válvulas (V3 e V4) vai-se reflectir, posteriormente, no caudal do circuito. Para o caso do circuito da água residual, a regulação do caudal realizava-se por meio da válvula 2 que permaneceu, durante os ensaios, totalmente aberta. Daí o seu comportamento relativamente constante ao longo do tempo.

Perante os resultados obtidos, constata-se que teria sido útil efectuar-se, diariamente, a verificação e ajuste dos caudais do circuito. Minimizando-se, dessa forma, determinados picos nos valores dos caudais.

3.2.3 Determinação dos Calores Trocados

Neste sub-capítulo, é realizada uma análise das taxas de transferência de calor ocorridas no evaporador e no condensador. Efectua-se, também, a comparação destes valores com o trabalho realizado pelo compressor, da bomba de calor, ao longo do trabalho experimental.

A taxa de transferência de calor (Q), quer no evaporador quer no condensador, pode ser obtida através do balanço global de energia, presente na equação 3.1.

$$Q = \dot{Q} \cdot \rho \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (3.1)$$

Em que,

- Q = Calor transferido (J/s)
- \dot{Q} = Caudal de água residual (evaporador) ou água (condensador), (dm^3/s)
- ρ = Massa volúmica do fluído (kg/dm^3)
- C_p = Calor específico do fluído ($\text{J}/(\text{g}\cdot^\circ\text{C})$)
- ΔT = Diferença da temperatura da água residual entre a entrada e saída do evaporador ou da água entre a entrada e saída do condensador, ($^\circ\text{C}$)

A determinação da taxa de transferência de calor é efectuada no Anexo D.

De seguida apresenta-se na figura 3.5, o calor transferido no evaporador e no condensador. É também, analisada a evolução da potência (W) usada pelo compressor durante o funcionamento da bomba de calor.

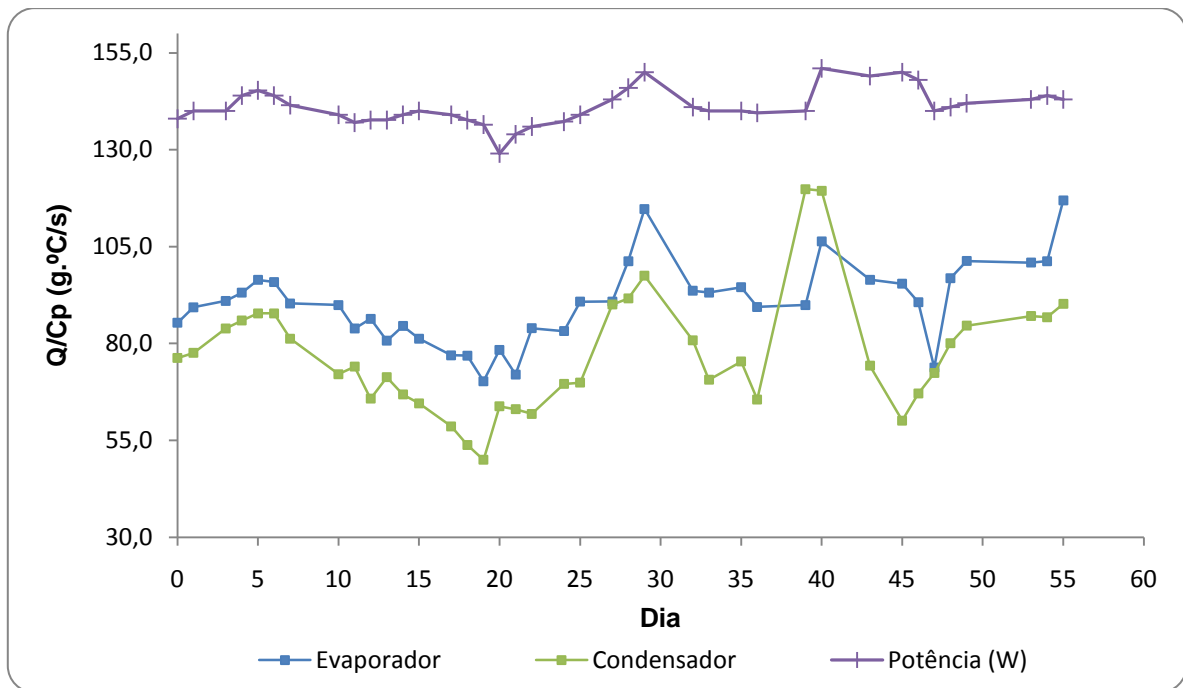


Figura 3.5 – Evolução temporal dos calores transferidos no evaporador e no condensador

De uma forma geral, a transferência de calor ocorrida no evaporador e no condensador apresenta um comportamento concordante no decorrer de toda a experiência. No entanto, era de esperar que a transferência de calor fosse, relativamente, constante ao longo do tempo no caso de não se verificar a formação de sujamento, ou então, que tivesse uma evolução, ligeiramente, decrescente no caso de ocorrência de sujamento. Perante os resultados obtidos, não é possível identificar nenhum dos casos, devido ao perfil oscilante dos calores trocados.

Salienta-se que o calor transferido depende, dos parâmetros avaliados anteriormente, das temperaturas (tópico 3.2.1) e dos caudais (tópico 3.2.2). Portanto, estas oscilações no valor do calor transferido são reflexos das variações ocorridas nas temperaturas, como seria de esperar, mas também nos caudais que seria um parâmetro a manter constante. Por exemplo, do dia 36 ao dia 39 verifica-se a ocorrência de um acentuado aumento na transferência de calor ocorrida no condensador, sendo que este comportamento, coincide com uma altura em que o caudal do circuito do condensador teve, também, um aumento abrupto.

Além destas duas variáveis (temperaturas e caudais), também é possível verificar na figura 3.5 que a potência do compressor da bomba de calor varia ao longo da experiência, estando a sua evolução coerente com as trocas de calor realizadas. Estamos perante mais um factor que promove a inconstante evolução da transferência de calor ocorrida na serpentina do evaporador e condensador.

3.2.4 Avaliação do Sujamento

Para avaliar a formação de sujamento no evaporador da bomba de calor, comparou-se o coeficiente global de transferência de calor em condições ideais (U_0) com o coeficiente global de transferência de calor nas condições experimentais (U), através das seguintes equações:

$$Q_0 = U_0 \cdot A \cdot \Delta T_{lm0} \quad (3.2)$$

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{lm} \quad (3.3)$$

Dividindo a eq. 3.3 pela eq. 3.2, obtemos:

$$\frac{U}{U_0} = \frac{Q_0}{Q} \cdot \frac{A}{A} \cdot \frac{\Delta T_{lm}}{\Delta T_{lm0}} \quad (3.4)$$

Em que,

- U = Coeficiente global de transferência de calor nas condições experimentais, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
- U_0 = Coeficiente global de transferência de calor nas condições iniciais, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
- Q = Calor transferido nas condições experimentais, W
- Q_0 = Calor transferido nas condições iniciais, W
- A = Área de transferência de calor, (m^2)
- ΔT_{lm} = Temperatura média logaritmica nas condições experimentais, ($^\circ C$)
- ΔT_{lm0} = Temperatura média logaritmica nas condições iniciais, ($^\circ C$)

Refere-se que a área de transferência, uma vez que, se refere à mesma serpentina vai-se anular na divisão.

Quanto ao cálculo de ΔT_{lm} , assim como todos os valores obtidos para o U/U_0 , podem ser verificados no anexo E.

O estudo do U/U_0 permite acompanhar a evolução da formação de sujamento no equipamento de transferência de calor, assim como a sua evolução temporal. Inicialmente, temos que U/U_0 é igual a 1, pois nas condições iniciais não existe sujamento. Ao longo da experiência se U/U_0 prosseguir com valores próximos de 1, então estamos perante um efluente que não provoca sujamento nas superfícies de transferência de calor; caso U/U_0 evidencie um perfil decrescente comprova-se a formação de sujamento.

Na figura 3.6. visualiza-se o resultado gráfico do U/U_0 .

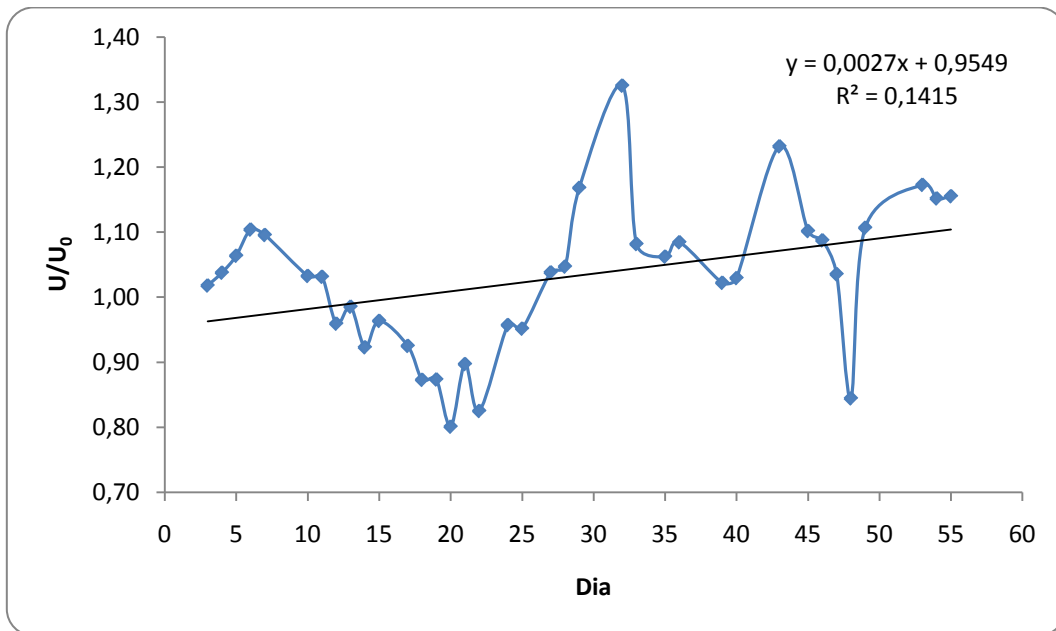


Figura 3.6 – Evolução temporal do U/U_0 para as condições do evaporador

Quanto à evolução temporal do U/U_0 verifica-se que o seu comportamento alterna constantemente entre valores superiores e inferiores a 1, não sendo possível observar uma evolução coerente com o teoricamente previsto. O valor de U/U_0 apenas deveria ser igual a 1 para o momento inicial, uma vez que, representa as condições ideais de funcionamento, no entanto, ao longo do período de funcionamento identificam-se vários momentos em que este valor é superior a 1 (dia 32, U/U_0 igual a 1,33). O sucedido é, muito provavelmente, devido aos picos ocorridos no caudal de água residual e a pequenas oscilações na temperatura, que nesta determinação têm grande influência.

Perante os resultados expressos na figura 3.6 pode-se constatar que os picos inferiores (dia 20 e 48) e superiores (dia 32 e 40) estão em conformidade com os da curva representativa da troca de calor dada no evaporador (figura 3.5).

Em suma, a figura 3.6 não nos permite tirar conclusões quanto à formação de sujamento durante os 56 dias de experiência. No entanto, se houvesse a formação e crescimento de sujamento na parede do evaporador, seria de esperar que mesmo com oscilações o valor de U/U_0 tivesse um sentido decrescente, o que não se verifica. Antes pelo contrário, uma vez que a média global de U/U_0 é de 1,04 com um desvio padrão de 0,1. Também se tivermos em conta o ensaio global, verifica-se um valor máximo de U/U_0 igual a 1,33 para o dia 32 e um valor mínimo de 0,80 para o dia 20.

3.2.5 Observação Visual da Serpentina do Evaporador

A serpentina do evaporador que esteve em contacto com a água residual foi visualmente inspeccionada e o seu aspecto registado. Na figura 3.10, visualiza-se a aparência antes e após o trabalho experimental.



Figura 3.7 – Serpentina do evaporador antes (a) e após (b) contacto prolongado com a água residual

Pela figura 3.7 é possível constatar que a serpentina onde decorreu a evaporação, após contacto prolongado com o efluente, apresenta sujidade na superfície das paredes do tubo. A sujidade presente pode justificar a tendência verificada no gráfico da figura 3.6 para a razão U/U_0 .

Porém, este efluente oriundo do fabrico de pasta de papel contém sólidos suspensos de grande dimensão o que não facilita a adesão dos sólidos à parede da serpentina. Tendo-se verificado que durante o funcionamento da instalação, com a serpentina submersa em água residual, as partículas sólidas de maior dimensão tinham tendência a depositar no fundo do reservatório 1, sendo que as partículas de tamanhos inferiores circulavam com o efluente não se denotando especial aderência por parte destas à parede da serpentina.

3.3 Estudo da Corrosão

Na equação 4.1, pode-se observar a equação 3.5, a partir da qual se obtém a velocidade de corrosão, v_{corr} .

$$v_{\text{corr}} = \frac{\Delta m}{A_c \cdot t} \quad (3.5)$$

Em que,

- Δm – Representa a perda de massa (mg)
- A_c – Área do fio de cobre (dm^2)
- t – Tempo de exposição (dia)

O fio de cobre exposto em água residual por um período de 56 dias (t), tinha um diâmetro de 0,0215 dm e um comprimento de 1,78 dm.

Na tabela 4.2 encontram-se os valores de perda de massa (Δm) do fio de cobre após a exposição com a água residual.

Tabela 3.2 - Valores experimentais da variação de massa do fio de cobre após exposição em água residual

m_{inicial} (g)	$m_{\text{inicial}} \text{ média}$ (g)	m_{final} (g)	$m_{\text{final}} \text{ média}$ (g)	Δm (g)
0,9694		0,9585		
0,9693	0,9694	0,9590	0,9589	0,0105
0,9695		0,9588		
0,9693		0,9591		

Deste modo,

$$v_{\text{corr}} = \frac{10,5}{0,12 \cdot 56} \Leftrightarrow v_{\text{corr}} = 1,56 \text{ mg}/(\text{dm}^2 \cdot \text{dia})$$

Este valor de velocidade de corrosão, 1,56 $\text{mg}/(\text{dm}^2 \cdot \text{dia})$, correspondente a 0,09 MPY, possibilita afirmar que a corrosão do cobre por contacto com esta água residual é praticamente inexistente.

Capítulo 4. Conclusões e Sugestões para trabalhos futuros

Tendo em linha de conta os diferentes tipos de sujamento, pode-se assumir que para este caso específico, não ocorreu sujamento biológico nem por produtos de corrosão. No primeiro caso, porque a elevada temperatura (59°C) a que se encontra a água residual utilizada na experiência não promove o desenvolvimento dos microrganismos; no segundo caso, obteve-se que a velocidade de corrosão do cobre quando exposto à água residual é de 1,56 mg/(dm².dia) o que indica uma corrosão praticamente inexistente.

A avaliação da quantidade de calor transferida no evaporador durante o ensaio experimental, assim como, a comparação do coeficiente global de transferência de calor nas condições iniciais e experimentais, permitiu verificar que embora a razão U/U_0 para o evaporador da bomba de calor tivesse um comportamento oscilante, a sua evolução temporal não foi decrescente, permitindo concluir que, nas condições operatórias da experiência, não ocorreu sujamento na superfície do evaporador.

Sugestões para trabalhos seguintes

O ensaio efectuado ao longo de alguns meses permitiu verificar que alguns erros foram cometidos por falta de experiência. Reconhecendo que os erros podem ser bons ensinamentos, desde já se avançam algumas recomendações a ter em conta em ensaios futuros com a instalação usada neste estudo:

- Reforço do isolamento em todas as linhas para reduzir as perdas através da tubagem muito dependentes das condições do ar do laboratório;
- Melhoria das condições de mistura no banho termostaticado para uniformizar a temperatura do efluente;
- Instalar uma torre de arrefecimento mais eficiente para garantir que a temperatura da água arrefecida mantenha valores aproximadamente constantes;
- Garantir, por meio de controlo automático ou por verificação frequente, os caudais das correntes em jogo;
- Colocação de termopares suplementares à entrada dos reservatórios;
- Efectuar ensaios a diferentes temperaturas do efluente fabril, sobretudo a temperaturas mais elevadas, e com variação das condições hidráulicas do efluente junto do evaporador da bomba de calor.

Referências Bibliográficas

APHA, AWWA, WEF (1998). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th Edition, APHA, AWWA, WEF, Washington, DC, 2-54 - 2-60.

Bott, T.R. (1995). *Fouling of Heat Exchangers*. Amsterdam. ELSEVIER.

Cho Y.I., Fan C., & Choi, B. G. (1997) – Theory of Electronic Anti-Fouling Technology To Control Precipitation Fouling in Heat Exchangers. *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, 24(6), 757-770.

Cho Y.I., Lee S., Kim W., & Suh, S. (2004) – Physical Water Treatment for the Mitigation of Mineral Fouling in Cooling-Tower Water Applications. *ECI Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning: Fundamentals and Applications*, Santa Fé, New Mexico, USA.

E – EEA/1/2010. (2010). Energia - Utilização Racional de Energia e Eficiência Energético-Ambiental em Equipamentos Colectivos (IPSS e ADUP). Consult. 08 Out 2010, disponível em http://www.ccr-norte.pt/novonorte/eea_1_2010.pdf

Energia. Consult. 11 Out 2010, disponível em http://europa.eu/legislation_summaries/energy/index_pt.htm. (s.d.).

Figueiredo, J.J. (2008). Conversão da energia termal oceânica e seu uso económico na Zona Económica Exclusiva do Brasil entre as latitudes de 5°N 15°S. Consult. 08 Out 2010, disponível em <http://www.scribd.com/doc/16591696/Tcc-Jean-Josias-Dos-Santos-Figueiredo2>

GRUPO PORTUCCEL SOPORCEL -O ano em revista 2009. Consult. 21 Set 2010, disponível em http://files.portucelsoporcel.net/dynamic-media/files/rc_soporcel2009_ar_pt.pdf

Incropera, F. P. & DeWitt, D. P. (2003). *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa, Quinta Edição* (C. A. B. Silva, trad.). Rio de Janeiro: LTC Editora.

Jerónimo, M. A. S., Melo, L. F., Braga, A. S., Ferreira, P. J. B. F., & Martins, C. (1997). Monitoring the Thermal Efficiency of Fouled Heat Exchangers: A Simplified Method. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 14, 455-463.

Melo, L. F., Bott, T. R. & Bernardo C. A. (1988). *Fouling Science and Technology*. Kluwer Academic Publishers.

Müller-Steinhagen, H. (1998). Mitigation of Process Heat Exchanger Fouling: An Integral Approach. *Trans IChemE*, 76, Part A.

Passos, C. A. G. S. (2007). *Corrosão do Cobre em Água do Mar Sintética na Ausência e n Presença de um Inibidor*. Lisboa: S. Passos. Relatório de Projecto Tecnológico I apresentado à Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.

Pereira, M.O. (2001). *Comparação da eficácia de 2 biocidas em sistemas de biofilme (carbamato e glutaraldeído) em sistemas de biofilme*. Braga: M. Pereira. Dissertação de Doutoramento apresentada à Universidade do Minho.

Pronk, P., Infante Ferreira, C. A., & Witkamp, G. J. (2009) - Prevention of fouling and scaling in stationary and circulating liquid-solid fluidized bed heat exchangers: Particle impact measurements and analysis. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 3857-3868.

Rodriguez, C. & Smith, R. (2007). Optimization of Operating Conditions for Mitigating Fouling in Heat Exchanger Networks. *Trans IChemE*, 85(A6), 839-851.

Seader, J. D., & Henley, E. J. (1998). *Separation Process Principles*. John Wiley & Sons, Inc.

Teixeira, F., Pereira, I., Santos R., & Beleza, V. (1997). *Tratamento de águas de arrefecimento*. POLITEMA, Instituto Politécnico do Porto.

Watkinson A. P., & Wilson, D. I. (1997). Chemical Reaction Fouling: A Review. *Experiemental Thermal and Fluid Science*, 14, 361-374.

Anexo A. Caracterização do Efluente

A.1. Valores experimentais medidos para a Carência Química de Oxigênio

A tabela A.1 apresenta os valores da Carência Química de Oxigênio, CQO, obtidos para a água residual usada no trabalho experimental.

Tabela A.1 – Valores de CQO obtidos experimentalmente para as três amostras de água residual ensaiadas

CQO (mg/L O ₂)											
1ºEnsaio				2ºEnsaio				3ºEnsaio			
1ª Toma	2ª Toma	3ª Toma	Média	1ª Toma	2ª Toma	3ª Toma	Média	1ª Toma	2ª Toma	3ª Toma	Média
1350	1400	950		480	465	475		685	1605	1575	
1330	1415	935	1375	475	500	495	482	660	1590	1560	1588
1370	1385	960		460	520	470		680	1615	1585	

Refere-se que a 3ª toma do 1º ensaio assim como a 1ª toma do 3º ensaio foram desprezadas, uma vez que, os seus valores divergem dos restantes obtidos.

A.2. Valores obtidos laboratorialmente para a concentração de Sólidos Suspensos Totais

Na tabela A.2 apresentam-se os valores obtidos laboratorialmente, pelo método gravimétrico, para a concentração de Sólidos Suspensos Totais nas amostras ensaiadas.

Tabela A.2 – Valores das massas iniciais e finais obtidas para a determinação dos SST

	1º Ensaio		2º Ensaio		3º Ensaio	
	1ªtoma	2ªtoma	1ªtoma	2ªtoma	1ªtoma	2ªtoma
m _{inicial} (g)	24,9146	24,9756	25,0254	25,0633	25,4273	25,7747
m _{final} (g)	24,9213	24,9839	25,0325	25,0706	25,4365	25,7834
Δm (g)	0,0067	0,0083	0,0071	0,0073	0,0092	0,0087

A concentração de SST presente nas amostras, é calculada através da equação A.1.

$$\text{Concentração SST} = \frac{(m_{\text{final}} - m_{\text{inicial}}) \text{ g}}{V_{\text{amostra, mL}}} \cdot \frac{1000 \text{ mL}}{1 \text{ L}} \cdot \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} \quad (\text{A.1})$$

Sendo o V_{amostra} de 20 mL, temos uma concentração de SST presentes na 1ª toma do 1º ensaio de:

$$\text{SST} = \frac{0,0067}{20} \cdot \frac{1000}{1} \cdot \frac{1000}{1} = 335 \text{ mg/L}$$

Na tabela A.3 apresentam-se os valores da concentração de SST obtidos para as três águas residuais analisadas.

Tabela A.3 – Valores da concentração dos SST obtidos experimentalmente para as três águas residuais ensaiadas

SST (mg/L)					
1º Ensaio		2º Ensaio		3º Ensaio	
1ªtoma	2ªtoma	1ªtoma	2ªtoma	1ªtoma	2ªtoma
335	415	355	365	460	435
375		360		448	

Anexo B. Verificação e ajuste dos termopares

Neste anexo são apresentados os resultados da verificação dos termopares (T2, T3, T4, T5 e T6) e do banho termostatizado (Tb), para as temperaturas de 20°C a 60°C, com passos de 5°C.

Tabela B.1 – Tabela de calibração para a temperatura de 20°C

Banho	Erro	Cal	T2	Erro	T3	Erro	T4	Erro	T5	Erro	T6	Erro
19.9	0.2	20.1	21.0	-0.9	20.7	-0.6	20.0	0.1	20.2	-0.1	20.5	-0.4
19.9	0.2	20.1	21.0	-0.9	20.7	-0.6	20.1	0.0	19.9	0.2	20.5	-0.4
19.9	0.2	20.1	21.0	-0.9	20.6	-0.5	19.9	0.2	20.2	-0.1	20.5	-0.4
19.9	0.2	20.1	20.9	-0.8	20.7	-0.6	19.9	0.2	20.0	0.1	20.6	-0.5
19.9	0.2	20.1	20.9	-0.8	20.7	-0.6	20.1	0.0	19.9	0.2	20.6	-0.5
19.9	0.2	20.1	21.0	-0.9	20.7	-0.6	20.0	0.1	20.2	-0.1	20.7	-0.6
19.9	0.2	20.1	20.9	-0.8	20.7	-0.6	20.2	-0.1	20.0	0.1	20.6	-0.5
19.9	0.2	20.1	21.0	-0.9	20.7	-0.6	20.0	0.1	20.1	0.0	20.6	-0.5
19.9	0.2	20.1	21.0	-0.9	20.7	-0.6	20.1	0.0	19.9	0.2	20.5	-0.4
19.9	0.2	20.1	20.9	-0.8	20.7	-0.6	20.0	0.1	20.0	0.1	20.5	-0.4
	0.2			-0.9		-0.6		0.1		0.1		-0.5

Tabela B.2 – Tabela de calibração para a temperatura de 25°C

Banho	Erro	Cal	T2	Erro	T3	Erro	T4	Erro	T5	Erro	T6	Erro
24.6	0.0	24.6	25.6	-1.0	25.3	-0.7	25.7	-1.1	26.1	-1.5	26.1	-1.5
24.8	0.0	24.8	25.6	-0.8	25.4	-0.6	26.2	-1.4	26.4	-1.6	26.6	-1.8
24.9	0.0	24.9	25.9	-1.0	25.5	-0.6	26.4	-1.5	26.5	-1.6	26.6	-1.7
24.9	0.0	24.9	26.0	-1.1	25.5	-0.6	26.4	-1.5	26.4	-1.5	26.6	-1.7
24.9	0.1	25.0	25.9	-0.9	25.7	-0.7	26.4	-1.4	26.5	-1.5	26.7	-1.7
24.9	0.1	25.0	25.9	-0.9	25.6	-0.6	26.5	-1.5	26.4	-1.4	26.8	-1.8
24.9	0.1	25.0	25.9	-0.9	25.7	-0.7	26.4	-1.4	26.6	-1.6	26.8	-1.8
24.9	0.1	25.0	26.0	-1.0	25.7	-0.7	26.5	-1.5	26.4	-1.4	26.8	-1.8
24.9	0.1	25.0	26.0	-1.0	25.6	-0.6	26.4	-1.4	26.4	-1.4	26.8	-1.8
24.9	0.1	25.0	25.9	-0.9	25.7	-0.7	26.5	-1.5	26.4	-1.4	26.8	-1.8
24.9	0.1	25.0	25.9	-0.9	25.6	-0.6	26.5	-1.5	26.5	-1.5	26.9	-1.9
24.9	0.1	25.0	25.9	-0.9	25.7	-0.7	26.5	-1.5	26.4	-1.4	26.8	-1.8
	0.1			-0.9		-0.7		-1.4		-1.5		-1.8

Tabela A.3 – Tabela de calibração para a temperatura de 30°C

Banho	Erro	Cal	T2	Erro	T3	Erro	T4	Erro	T5	Erro	T6	Erro
29.8	0.1	29.9	30.9	-1.0	30.6	-0.7	32.7	-2.8	32.9	-3.0	33.0	-3.1
29.9	0.1	30.0	30.9	-0.9	30.8	-0.8	32.7	-2.7	33.0	-3.0	33.0	-3.0
29.9	0.1	30.0	31.1	-1.1	30.5	-0.5	32.9	-2.9	33.0	-3.0	33.0	-3.0
29.9	0.1	30.0	31.0	-1.0	30.7	-0.7	32.9	-2.9	33.0	-3.0	33.1	-3.1
29.9	0.1	30.0	31.0	-1.0	30.6	-0.6	33.0	-3.0	33.0	-3.0	33.1	-3.1
29.9	0.1	30.0	31.0	-1.0	30.7	-0.7	33.0	-3.0	33.0	-3.0	33.1	-3.1
29.9	0.1	30.0	31.0	-1.0	30.6	-0.6	32.9	-2.9	33.0	-3.0	33.1	-3.1
29.9	0.1	30.0	31.1	-1.1	30.6	-0.6	32.9	-2.9	33.0	-3.0	33.1	-3.1
29.9	0.1	30.0	31.0	-1.0	30.7	-0.7	32.8	-2.8	33.0	-3.0	33.1	-3.1
29.9	0.1	30.0	31.0	-1.0	30.7	-0.7	33.0	-3.0	33.0	-3.0	33.1	-3.1
29.9	0.1	30.0	31.0	-1.0	30.6	-0.6	32.9	-2.9	33.0	-3.0	33.1	-3.1
	0.1			-1.0		-0.7		-2.9		-3.0		-3.1

Tabela A.4 – Tabela de calibração para a temperatura de 35°C

Banho	Erro	Cal	T2	Erro	T3	Erro	T4	Erro	T5	Erro	T6	Erro
34.9	0.0	34.9	35.8	-0.9	35.6	-0.7	39.3	-4.4	39.4	-4.5	39.3	-4.4
34.8	0.1	34.9	35.9	-1.0	35.8	-0.9	39.3	-4.4	39.4	-4.5	39.3	-4.4
34.9	0.0	34.9	35.9	-1.0	35.7	-0.8	39.3	-4.4	39.3	-4.4	39.3	-4.4
34.9	0.1	35.0	36.0	-1.0	35.7	-0.7	39.3	-4.3	39.3	-4.3	39.3	-4.3
34.9	0.1	35.0	36.2	-1.2	35.7	-0.7	39.3	-4.3	39.3	-4.3	39.3	-4.3
34.9	0.1	35.0	35.9	-0.9	35.6	-0.6	39.3	-4.3	39.4	-4.4	39.3	-4.3
34.9	0.1	35.0	36.0	-1.0	35.7	-0.7	39.3	-4.3	39.3	-4.3	39.4	-4.4
34.9	0.1	35.0	36.1	-1.1	35.6	-0.6	39.3	-4.3	39.4	-4.4	39.4	-4.4
34.9	0.1	35.0	36.0	-1.0	35.7	-0.7	39.3	-4.3	39.5	-4.5	39.5	-4.5
34.9	0.1	35.0	35.9	-0.9	35.7	-0.7	39.3	-4.3	39.4	-4.4	39.3	-4.3
34.9	0.1	35.0	35.9	-0.9	35.7	-0.7	39.4	-4.4	39.4	-4.4	39.4	-4.4
34.9	0.1	35.0	35.8	-0.8	35.8	-0.8	39.4	-4.4	39.4	-4.4	39.3	-4.3
	0.1			-1.0		-0.7		-4.3		-4.4		-4.4

Tabela A.5 – Tabela de calibração para a temperatura de 40°C

Banho	Erro	Cal	T2	Erro	T3	Erro	T4	Erro	T5	Erro	T6	Erro
39.8	0.2	40.0	41.0	-1.0	40.7	-0.7	45.6	-5.6	45.7	-5.7	45.6	-5.6
39.9	0.1	40.0	41.0	-1.0	40.7	-0.7	45.6	-5.6	45.7	-5.7	45.6	-5.6
39.8	0.1	39.9	40.9	-1.0	40.7	-0.8	45.8	-5.9	45.8	-5.9	45.6	-5.7
39.9	0.1	40.0	40.9	-0.9	40.8	-0.8	45.7	-5.7	45.9	-5.9	45.6	-5.6
39.9	0.1	40.0	41.0	-1.0	40.7	-0.7	45.7	-5.7	45.9	-5.9	45.6	-5.6
39.9	0.0	39.9	41.0	-1.1	40.8	-0.9	45.7	-5.8	45.7	-5.8	45.6	-5.7
39.8	0.1	39.9	40.9	-1.0	40.7	-0.8	45.7	-5.8	45.6	-5.7	45.5	-5.6
39.9	0.1	40.0	41.0	-1.0	40.7	-0.7	45.7	-5.7	45.8	-5.8	45.5	-5.5
39.8	0.1	39.9	40.9	-1.0	40.8	-0.9	45.6	-5.7	45.7	-5.8	45.6	-5.7
39.8	0.1	39.9	40.9	-1.0	40.5	-0.6	45.5	-5.6	45.6	-5.7	45.6	-5.7
39.8	0.1	39.9	40.9	-1.0	40.6	-0.7	45.6	-5.7	45.8	-5.9	45.7	-5.8
39.8	0.1	39.9	40.9	-1.0	40.7	-0.8	45.7	-5.8	45.8	-5.9	45.7	-5.8
	0.1			-1.0		-0.8		-5.7		-5.8		-5.7

Tabela A.6 – Tabela de calibração para a temperatura de 45°C

Banho	Erro	Cal	T2	Erro	T3	Erro	T4	Erro	T5	Erro	T6	Erro
44.7	-0.1	44.6	45.7	-1.1	45.4	-0.8	51.8	-7.2	51.9	-7.3	51.6	-7.0
44.8	-0.1	44.7	45.8	-1.1	45.5	-0.8	51.8	-7.1	52.0	-7.3	51.7	-7.0
44.9	0.0	44.9	45.8	-0.9	45.6	-0.7	52.1	-7.2	52.1	-7.2	51.8	-6.9
44.8	0.0	44.8	45.9	-1.1	45.6	-0.8	51.9	-7.1	52.1	-7.3	51.9	-7.1
44.8	0.1	44.9	45.8	-0.9	45.6	-0.7	51.9	-7.0	52.1	-7.2	52.0	-7.1
44.9	0.0	44.9	45.8	-0.9	45.7	-0.8	51.9	-7.0	52.2	-7.3	52.0	-7.1
44.9	0.0	44.9	45.9	-1.0	45.6	-0.7	52.1	-7.2	52.2	-7.3	51.8	-6.9
44.8	0.1	44.9	45.9	-1.0	45.8	-0.9	52.1	-7.2	52.3	-7.4	52.0	-7.1
44.8	0.1	44.9	45.9	-1.0	45.6	-0.7	52.1	-7.2	52.1	-7.2	52.0	-7.1
44.9	0.0	44.9	45.9	-1.0	45.5	-0.6	51.9	-7.0	52.2	-7.3	51.9	-7.0
44.9	0.0	44.9	45.9	-1.0	45.6	-0.7	52.1	-7.2	52.2	-7.3	52.0	-7.1
44.8	0.1	44.9	45.9	-1.0	45.6	-0.7	52.0	-7.1	52.1	-7.2	51.9	-7.0
	0.0			-1.0		-0.7		-7.1		-7.3		-7.0

Tabela A.7 – Tabela de calibração para a temperatura de 50°C

Banho	Erro	Cal	T2	Erro	T3	Erro	T4	Erro	T5	Erro	T6	Erro
49.8	-0.1	49.7	50.7	-1.0	50.4	-0.7	58.3	-8.6	58.5	-8.8	58.2	-8.5
49.8	0.0	49.8	50.8	-1.0	50.5	-0.7	58.3	-8.5	58.6	-8.8	58.3	-8.5
49.8	0.0	49.8	50.8	-1.0	50.6	-0.8	58.3	-8.5	58.5	-8.7	58.2	-8.4
49.8	0.0	49.8	50.9	-1.1	50.6	-0.8	58.3	-8.5	58.5	-8.7	58.2	-8.4
49.8	-0.1	49.7	50.8	-1.1	50.6	-0.9	58.3	-8.6	58.6	-8.9	58.3	-8.6
49.8	0.0	49.8	50.8	-1.0	50.5	-0.7	58.3	-8.5	58.4	-8.6	58.2	-8.4
49.8	-0.1	49.7	50.8	-1.1	50.5	-0.8	58.3	-8.6	58.4	-8.7	58.3	-8.6
49.8	0.0	49.8	50.8	-1.0	50.6	-0.8	58.4	-8.6	58.6	-8.8	58.3	-8.5
49.8	0.0	49.8	50.8	-1.0	50.7	-0.9	58.4	-8.6	58.5	-8.7	58.3	-8.5
49.8	0.0	49.8	50.9	-1.1	50.7	-0.9	58.4	-8.6	58.5	-8.7	58.2	-8.4
49.8	0.0	49.8	50.8	-1.0	50.5	-0.7	58.3	-8.5	58.6	-8.8	58.1	-8.3
49.8	0.0	49.8	50.8	-1.0	50.7	-0.9	58.3	-8.5	58.5	-8.7	58.2	-8.4
0.0				-1.0		-0.8		-8.6		-8.7		-8.5

Tabela A.8 – Tabela de calibração para a temperatura de 55°C

Banho	Erro	Cal	T2	Erro	T3	Erro	T4	Erro	T5	Erro	T6	Erro
54.5	-0.2	54.3	55.5	-1.2	55.0	-0.7	64.2	-9.9	64.3	-10.0	64.1	-9.8
54.4	-0.1	54.3	55.6	-1.3	55.1	-0.8	64.1	-9.8	64.5	-10.2	64.1	-9.8
54.5	-0.1	54.4	55.5	-1.1	55.2	-0.8	64.1	-9.7	64.3	-9.9	63.8	-9.4
54.6	-0.2	54.4	55.5	-1.1	55.1	-0.7	64.2	-9.8	64.3	-9.9	63.8	-9.4
54.6	-0.2	54.4	55.6	-1.2	55.2	-0.8	64.1	-9.7	64.4	-10.0	64.0	-9.6
54.6	-0.3	54.3	55.5	-1.2	55.1	-0.8	64.1	-9.8	64.1	-9.8	63.6	-9.3
54.5	-0.2	54.3	55.4	-1.1	55.3	-1.0	64.1	-9.8	64.3	-10.0	63.8	-9.5
54.6	-0.2	54.4	55.5	-1.1	55.3	-0.9	64.0	-9.6	64.5	-10.1	63.8	-9.4
54.5	-0.1	54.4	55.5	-1.1	55.1	-0.7	64.2	-9.8	64.6	-10.2	64.0	-9.6
54.5	-0.1	54.4	55.7	-1.3	55.3	-0.9	64.1	-9.7	64.5	-10.1	64.0	-9.6
54.6	-0.2	54.4	55.6	-1.2	55.3	-0.9	64.1	-9.7	64.5	-10.1	63.8	-9.4
-0.2				-1.2		-0.8		-9.8		-10.0		-9.5

Tabela A.9 – Tabela de calibração para a temperatura de 60°C

Banho	Erro	Cal	T2	Erro	T3	Erro	T4	Erro	T5	Erro	T6	Erro
59.4	-0.2	59.2	60.3	-1.1	60.2	-1.0	70.5	-11.3	70.6	-11.4	70.3	-11.1
59.4	-0.2	59.2	60.4	-1.2	60.1	-0.9	70.3	-11.1	70.7	-11.5	70.0	-10.8
59.5	-0.3	59.2	60.5	-1.3	60.0	-0.8	70.3	-11.1	70.8	-11.6	70.0	-10.8
59.4	-0.3	59.1	60.4	-1.3	60.0	-0.9	70.5	-11.4	70.8	-11.7	70.2	-11.1
59.4	-0.3	59.1	60.4	-1.3	59.9	-0.8	70.1	-11.0	70.7	-11.6	70.1	-11.0
59.5	-0.4	59.1	60.4	-1.3	60.1	-1.0	70.3	-11.2	70.5	-11.4	69.9	-10.8
59.5	-0.4	59.1	60.1	-1.0	59.9	-0.8	70.2	-11.1	70.7	-11.6	70.0	-10.9
59.5	-0.3	59.2	60.2	-1.0	60.0	-0.8	70.3	-11.1	70.6	-11.4	70.1	-10.9
59.4	-0.2	59.2	60.5	-1.3	59.9	-0.7	70.3	-11.1	70.7	-11.5	70.1	-10.9
59.4	-0.3	59.1	60.3	-1.2	60.1	-1.0	70.3	-11.2	70.8	-11.7	70.0	-10.9
59.4	-0.3	59.1	60.4	-1.3	60.1	-1.0	70.5	-11.4	70.8	-11.7	70.3	-11.2
	-0.3			-1.2		-0.9		-11.2		-11.6		-10.9

Os termopares Tb, T2 e T3 obtiveram um erro aproximadamente constante, ao longo da gama de temperaturas testadas. Contrariamente, T4, T5 e T6 tiveram um erro variável, pelo que se procedeu ao ajuste linear dos respectivos resultados, de modo a obter o valor do erro. Os resultados gráficos estão respectivamente representados nas Figuras A.1, A.2 e A.3.

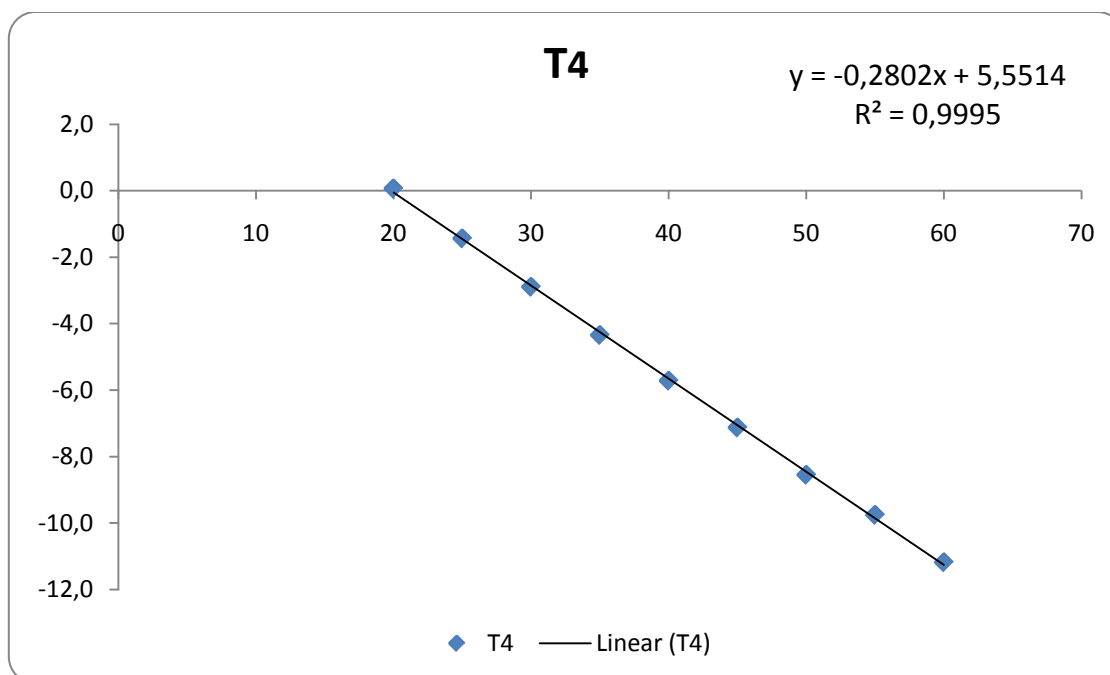


Figura A.1 – Representação gráfica do erro de calibração para T4

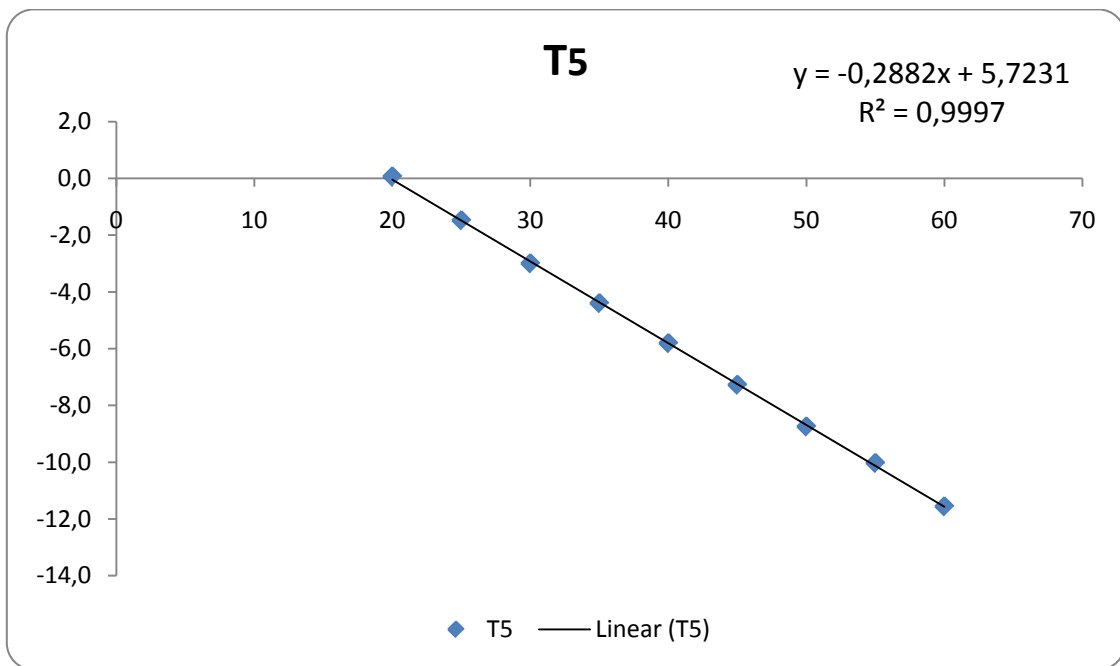


Figura A.2 – Representação gráfica do erro de calibração para T5

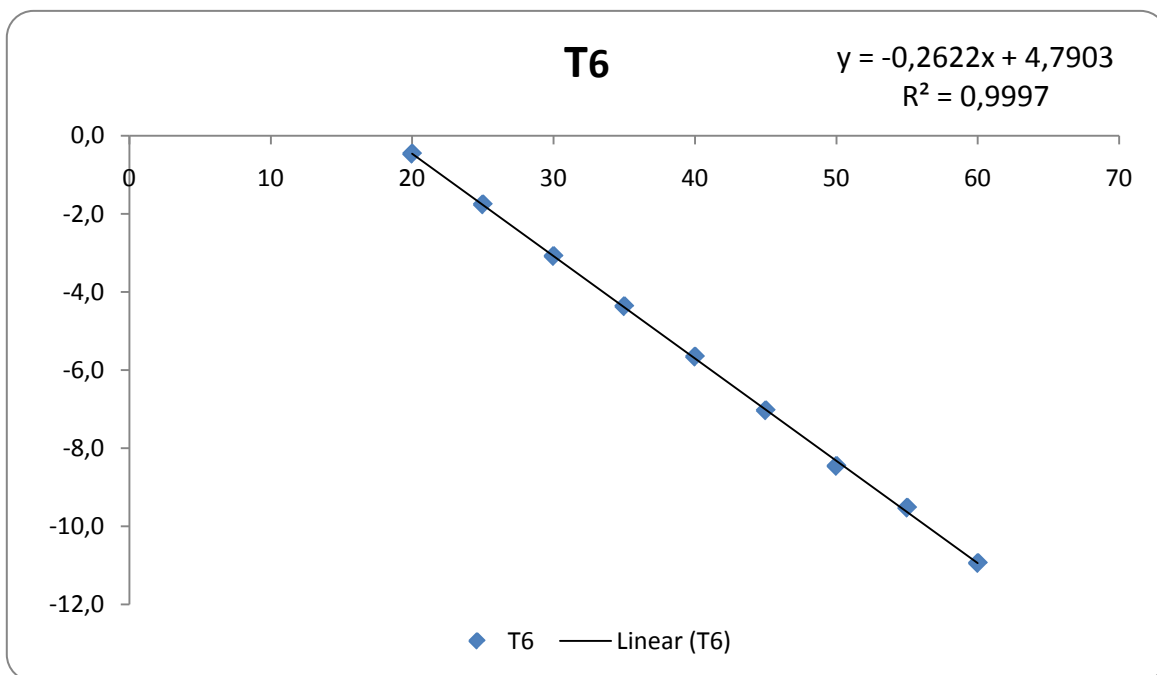


Figura A.3 – Representação gráfica do erro de calibração para T6

Anexo C. Registos experimentais

Na tabela seguinte são apresentados os registos completos apontados ao longo do trabalho.

Tabela C.1 – Tabela de registos

Data	Banho (°C)	Banho (°C)	T2 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T4 (°C)	T5 (°C)	T5 (°C)	T6 (°C)	T6 (°C)	Potência (W)	P1 (bar)	P2 (bar)	Q _{efluente} (L/h)	Q _{água} (L/h)
23-04-2010 09:00	58,3	58,0	55,2	54,0	38,0	37,3	62,3	50,4	38,7	33,3	40,7	34,8				82,4	120,8
23-04-2010 12:00	59,2	58,9	56,7	55,5	37,4	36,7	64,2	51,8	38,2	32,9	40,0	34,3				82,4	112,5
23-04-2010 15:00	59,3	59,0	56,6	55,4	37,9	37,2	64,1	51,7	38,6	33,2	40,6	34,7				84,8	105
23-04-2010 19:00	59,4	59,1	56,9	55,7	37,8	37,1	64,6	52,1	38,6	33,2	40,3	34,5	138			84,8	105
24-04-2010 11:05	59,2	58,9	56,9	55,7	38,4	37,7	64,4	51,9	39,3	33,7	41,0	35,0	140			84,8	105
26-04-2010 09:00	59,3	59,0	57,0	55,8	38,2	37,5	64,6	52,1	38,8	33,3	40,7	34,8	139			84,8	105
26-04-2010 12:00	59,5	59,2	56,9	55,7	39,4	38,7	64,1	51,7	39,7	34,0	41,7	35,6				84,8	105
26-04-2010 17:30	59,2	58,9	56,9	55,7	39,7	39,0	64,1	51,7	40,2	34,3	42,3	36,0	140			84,8	105
26-04-2010 17:40	59,3	59,0	56,8	55,6	39,7	39,0	64,2	51,8	40,1	34,3	42,6	36,2	141			81,4	101,3
27-04-2010 09:20	59,2	58,9	56,7	55,5	39,2	38,5	64,0	51,6	39,7	34,0	41,8	35,6				81,4	101,3
27-04-2010 17:35	59,2	58,9	57,1	55,9	40,6	39,9	63,9	51,5	41,0	34,9	43,2	36,7	144			81,4	101,3
28-04-2010 09:00	59,3	59,0	57,0	55,8	40,1	39,4	64,0	51,6	40,8	34,8	43,0	36,5	144			81,4	101,3
28-04-2010 12:10	59,3	59,0	56,8	55,6	40,6	39,9	63,7	51,4	41,2	35,0	43,3	36,7	146			81,4	101,3
28-04-2010 17:40	59,3	59,0	56,8	55,6	40,6	39,9	63,4	51,2	41,3	35,1	43,1	36,6	146			81,4	101,3
29-04-2010 09:20	59,4	59,1	57,0	55,8	40,2	39,5	63,7	51,4	40,0	34,2	42,7	36,3	144			81,4	101,3
29-04-2010 17:35	59,2	58,9	56,9	55,7	40,1	39,4	64,0	51,6	40,4	34,5	42,8	36,4	144			81,4	101,3
30-04-2010 10:00	59,3	59,0	56,8	55,6	39,8	39,1	64,2	51,8	40,3	34,4	42,6	36,2	142			81,4	101,3
30-04-2010 17:40	59,3	59,0	56,7	55,5	39,3	38,6	64,0	51,6	39,7	34,0	42,1	35,9	141			87,1	106,7
03-05-2010 10:56	59,2	58,9	56,8	55,6	38,0	37,3	64,2	51,8	38,1	32,8	40,6	34,7	139			87,1	106,7

Data	Banho (°C)	Banho (°C)	T2 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T4 (°C)	T5 (°C)	T5 (°C)	T6 (°C)	T6 (°C)	Potência (W)	P1 (bar)	P2 (bar)	Q _{efluente} (L/h)	Q _{água} (L/h)
04-05-2010 11:00	59,1	58,8	56,5	55,3	37,5	36,8	64,3	51,8	37,6	32,5	40,0	34,3	137			87,1	106,7
05-05-2010 08:50	59,2	58,9	56,7	55,5	37,0	36,3	64,4	51,9	37,4	32,3	39,7	34,1	138			87,1	106,7
05-05-2010 10:25	59,2	58,9	56,8	55,6	37,2	36,5	64,4	51,9	36,6	31,8	39,9	34,2	137			87,1	106,7
05-05-2010 18:10	59,3	59,0	56,6	55,4	36,8	36,1	64,5	52,0	36,9	32,0	39,5	33,9	138			87,1	106,7
06-05-2010 09:30	59,3	59,0	56,6	55,4	37,3	36,6	64,4	51,9	36,9	32,0	39,6	34,0	137			87,1	106,7
06-05-2010 12:30	59,2	58,9	56,4	55,2	37,4	36,7	64,3	51,8	37,5	32,4	40,1	34,4	138			87,1	106,7
06-05-2010 17:40	59,2	58,9	56,4	55,2	37,3	36,6	64,6	52,1	37,5	32,4	40,0	34,3	138			87,1	106,7
07-05-2010 09:10	59,2	58,9	56,8	55,6	37,6	36,9	64,5	52,0	37,6	32,5	40,3	34,5	137			87,1	106,7
07-05-2010 14:00	59,2	58,9	56,8	55,6	37,7	37,0	64,5	52,0	37,7	32,6	40,8	34,9	140			87,1	106,7
07-05-2010 19:15	59,3	59,0	56,6	55,4	38,2	37,5	64,5	52,0	38,2	32,9	41,0	35,0	140			82,4	98,9
08-05-2010 10:55	59,4	59,1	56,8	55,6	37,5	36,8	64,6	52,1	37,4	32,3	40,2	34,4	140			82,4	98,9
10-05-2010 09:10	59,3	59,0	56,9	55,7	37,8	37,1	65,0	52,3	37,8	32,6	40,9	35,0	139			82,4	98,9
10-05-2010 21:05	59,3	59,0	56,8	55,6	36,4	35,7	64,9	52,3	36,7	31,8	39,9	34,2	136			82,4	98,9
11-05-2010 17:50	59,3	59,0	56,8	55,6	37,6	36,9	64,9	52,3	37,7	32,6	40,5	34,7	139			82,4	98,9
11-05-2010 19:40	59,3	59,0	56,8	55,6	37,4	36,7	64,8	52,2	37,4	32,3	40,3	34,5	138			82,4	98,9
12-05-2010 19:00	59,3	59,0	56,5	55,3	36,6	35,9	64,7	52,1	36,5	31,7	39,7	34,1	137			82,4	98,9
12-05-2010 20:30	59,3	59,0	56,5	55,3	36,6	35,9	65,0	52,3	36,5	31,7	39,7	34,1	136			82,4	98,9
12-05-2010 23:05	59,2	58,9	56,4	55,2	33,2	32,5	64,3	51,8	33,6	29,6	35,4	30,9	129			83,8	144,3
13-05-2010 21:30	59,2	58,9	56,2	55,0	35,7	35,0	64,5	52,0	36,9	32,0	38,4	33,1	134	3,2	8,0	85,8	120,8
14-05-2010 22:10	59,2	58,9	56,7	55,5	36,5	35,8	64,6	52,1	37,8	32,6	39,3	33,8	136	3,2	8,0	85,8	108,5
15-05-2010 10:40	59,2	58,9	56,7	55,5	36,5	35,8	64,4	51,9	37,5	32,4	39,2	33,7	136	3,2	8,0	85,8	108,5
17-05-2010 08:35	59,2	58,9	56,8	55,6	36,7	36,0	64,8	52,2	37,8	32,6	39,3	33,8	136	3,2	8,5	85,8	108,5
17-05-2010 12:00	59,2	58,9	56,3	55,1	37,1	36,4	64,0	51,6	38,1	32,8	39,9	34,2	137	3,6	8,5	85,8	108,5
17-05-2010 17:55	59,4	59,1	56,5	55,3	37,5	36,8	64,2	51,8	38,5	33,1	40,1	34,4	138	3,2	8,0	85,8	108,5
17-05-2010 20:30	59,4	59,1	56,5	55,3	37,5	36,8	64,2	51,8	38,5	33,1	40,1	34,4	138	3,2	8,0	85,8	108,5
18-05-2010 13:20	59,2	58,9	56,8	55,6	38,7	38,0	64,0	51,6	39,5	33,8	41,1	35,1	139	3,2	8,0	82,1	87,2
19-05-2010 22:05	59,2	58,9	56,5	55,3	40,0	39,3	63,2	51,0	41,0	34,9	42,3	36,0	143	3,6	8,5	76,8	98,2

Data	Banho (°C)	Banho (°C)	T2 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T4 (°C)	T5 (°C)	T5 (°C)	T6 (°C)	T6 (°C)	Potência (W)	P1 (bar)	P2 (bar)	Q _{efluente} (L/h)	Q _{água} (L/h)
22-05-2010 11:45	59,3	59,0	56,8	55,6	40,6	39,9	62,5	50,5	41,2	35,0	42,6	36,2	150	3,8	9,0	81,6	95,4
24-05-2010 21:50	59,2	58,9	56,3	55,1	39,6	38,9	63,1	51,0	40,6	34,6	42,1	35,9	141	3,6	8,5	81,6	95,4
26-05-2010 19:30	59,2	58,9	57,0	55,8	38,7	38,0	64,1	51,7	39,5	33,8	41,4	35,3	140	3,2	8,0	81,6	95,4
27-05-2010 21:15	59,3	59,0	56,7	55,5	39,1	38,4	63,6	51,3	40,1	34,3	41,7	35,6	140	3,2	8,5	81,6	95,4
28-05-2010 23:15	59,3	59,0	56,8	55,6	38,5	37,8	64,2	51,8	39,6	33,9	41,3	35,3	139	3,2	8,0	81,6	95,4
29-05-2010 11:35	59,4	59,1	56,8	55,6	38,0	37,3	63,9	51,5	39,8	34,1	40,8	34,9	140	3,2	8,0	81,6	95,4
31-05-2010 22:55	59,6	59,3	56,8	55,6	37,5	36,8	63,9	51,5	36,7	31,8	39,4	33,9	140	3,2	8,0	77,7	153,5
01-06-2010 20:55	59,6	59,3	56,8	55,6	38,5	37,8	63,7	51,4	38,9	33,4	40,2	34,4	140	3,2	8,5	79,2	122,8
02-06-2010 18:00	59,6	59,3	56,5	55,3	40,4	39,7	62,5	50,5	41,1	35,0	42,3	36,0	151	3,8	9,5	80,4	116,2
04-06-2010 22:55	59,6	59,3	56,9	55,7	40,4	39,7	64,0	51,6	41,2	35,0	43,5	36,9	149	3,7	9,0	85,1	95,0
07-06-2010 18:30	59,7	59,4	57,0	55,8	40,6	39,9	64,2	51,8	42,5	36,0	44,5	37,6	150	3,8	9,0	85,1	95,0
08-06-2010 16:40	59,7	59,4	56,8	55,6	40,2	39,5	64,2	51,8	40,7	34,7	43,6	37,0	148	3,7	9,0	85,1	95,0
09-06-2010 20:40	59,6	59,3	56,3	55,1	39,0	38,3	64,5	52,0	39,9	34,1	41,7	35,6	140	3,2	8,0	85,1	95,0
09-06-2010 23:00	59,7	59,4	56,8	55,6	39,2	38,5	64,1	51,7	39,8	34,1	41,8	35,6	141	3,6	8,5	89,2	100,5
11-06-2010 19:40	58,3	58,0	56,1	54,9	39,9	39,2	63,1	51,0	40,8	34,8	42,9	36,4	142	3,6	8,5	92,8	110,4
14-06-2010 23:00	59,5	59,2	56,9	55,7	40,3	39,6	64,4	51,9	41,0	34,9	42,9	36,4	142	3,6	8,5	96,8	102
15-06-2010 18:00	59,6	59,3	56,6	55,4	40,5	39,8	64,1	51,7	41,4	35,2	43,4	36,8	144	3,6	9,0	96,8	102
16-06-2010 18:00	59,6	59,3	56,8	55,6	40,5	39,8	64,3	51,8	41,3	35,1	43,3	36,7	144	3,6	8,8	96,8	102
17-06-2010 15:30	59,6	59,3	57,6	56,4	40,4	39,7	64,6	52,1	41,1	35,0	43,0	36,5	143	3,6	9,0	96,8	102
29-06-2010 12:30	59,6	59,2	51,1	56,0	39,6	41,2	39,1	54,5	40,2	39,0	41,8	39,6	144	3,6	8,8	99,8	110,8
30-06-2010 18:45	59,6	59,1	51,1	56,6	39,8	40,1	56,8	55,8	39,9	38,6	40,5	39,3	143	3,6	9,0	99,8	110,8
01-07-2010 17:30	59,6	59,0	51,0	56,7	39,0	40,3	56,7	55,5	39,2	37,8	40,6	38,4	144	3,7	9,0	99,8	100,6
02-07-2010 17:00	59,6	58,9	50,6	56,2	39,9	41,2	56,3	55,4	40,0	39,0	41,4	39,5	146	3,8	9,0	99,8	100,6
05-07-2010 22:40	59,6	59,2	51,9	56,7	42,9	43,9	57,0	55,9	41,9	41,0	42,5	42,3	151	3,9	9,8	99,8	100,6
07-07-2010 17:40		59,2		56,2		45		54,6		41,8		42,5	157	4,0	10,2	99,8	100,6
08-07-2010 18:00		59,1		56,0		43		54,4		40,2		40,7	145	3,9	9,5	95,9	97,9
09-07-2010 18:00		59,2		56,0		43,8		54,2		40,0		40,6	148	3,8	9,5	95,9	97,9
12-07-2010 18:45		59,0		56,1		41,8		54,2		39,6		40	144	3,6	9,0	95,9	97,9

Data	Banho (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T5 (°C)	T6 (°C)	Potência (W)	P1 (bar)	P2 (bar)	Q _{efluente} (L/h)	Q _{água} (L/h)
14-07-2010 16:40	59,0	56,5	42,6	55,7	39,9	40,3	149	3,8	9,0	95,9	97,9
15-07-2010 19:00	59,1	55,7	42,2	55,2	39,8	40,2	149	3,8	9,3	95,9	97,9

Refere-se que os valores das temperaturas a sombreado, dizem respeito aos valores das temperaturas corrigidas. A partir do dia 07 de Julho de 2010 as temperaturas foram obtidas directamente de um termómetro calibrado não sendo necessário efectuar qualquer ajuste do seu valor.

Anexo D. Determinação das quantidades de calor transferidas

A quantidade de calor transferida foi calculada pela seguinte expressão:

$$Q = \dot{Q} \cdot \rho \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Apresenta-se de seguida o exemplo de cálculo para o primeiro registo obtido para o evaporador.

- $T_2 = 54,0^\circ\text{C}$
- $T_4 = 50,4^\circ\text{C}$
- $\dot{Q} = 82,4 \text{ L/h}$
- $\rho = 1 \text{ kg/dm}^3$

$$\frac{Q}{C_p} = 82,4 \cdot \left(\frac{1000}{3600}\right) \cdot (54,0 - 50,4) \Leftrightarrow \frac{Q}{C_p} = 94,4 \text{ g} \cdot ^\circ\text{C/s}$$

Na tabela D1 observam-se os calores trocados pelo evaporador e condensador ao longo do trabalho experimental.

Tabela D.1 – Tabela com os valores de calor transferidos ao longo da experiência

Dia	Data	ΔT_1 (T_2-T_4)	ΔT_3 (T_3-T_5)	ΔT_4 (T_3-T_6)	Q1/Cp (g. $^\circ\text{C/s}$)	Q2/Cp (g. $^\circ\text{C/s}$)	Q3/Cp (g. $^\circ\text{C/s}$)
0	23-04-10	3,68	3,93	2,48	85,4	121,0	76,2
1	24-04-10	3,79	4,00	2,66	89,4	116,8	77,6
3	26-04-10	3,90	4,57	2,90	91,0	132,0	83,9
4	27-04-10	4,12	4,76	3,05	93,1	133,8	85,9
5	28-04-10	4,26	4,76	3,12	96,4	133,8	87,8
6	29-04-10	4,24	5,11	3,12	95,9	143,9	87,8
7	30-04-10	3,86	4,65	2,81	90,3	134,4	81,2
10	03-05-10	3,72	4,37	2,43	89,9	129,6	72,1
11	04-05-10	3,47	4,31	2,50	83,8	127,8	74,0
12	05-05-10	3,57	4,26	2,22	86,4	126,4	65,8
13	06-05-10	3,34	4,36	2,40	80,7	129,2	71,3
14	07-05-10	3,55	4,48	2,31	84,5	129,5	66,8
15	08-05-10	3,55	4,46	2,35	81,2	122,4	64,6
17	10-05-10	3,36	4,47	2,13	76,9	122,8	58,6
18	10-05-10	3,36	4,18	1,96	76,9	114,9	53,8
19	12-05-10	3,07	4,20	1,82	70,3	115,3	50,0
20	12-05-10	3,37	2,86	1,59	78,3	114,7	63,8
21	13-05-10	3,02	3,01	1,88	72,0	101,1	63,0
22	14-05-10	3,52	3,28	2,05	83,9	98,8	61,8

Dia	Data	$\Delta T1$ (T2-T4)	$\Delta T3$ (T3-T5)	$\Delta T4$ (T3-T6)	Q1/Cp (g.°C/s)	Q2/Cp (g.°C/s)	Q3/Cp (g.°C/s)
24	17-05-10	3,49	3,57	2,31	83,2	107,5	69,6
25	18-05-10	3,98	4,16	2,89	90,8	100,8	69,9
27	19-05-10	4,26	4,39	3,30	90,8	119,8	90,0
28	21-05-10	4,75	4,61	3,36	101,2	125,7	91,6
29	22-05-10	5,06	4,85	3,68	114,7	128,5	97,5
32	24-05-10	4,13	4,28	3,05	93,6	113,4	80,8
33	26-05-10	4,11	4,16	2,66	93,1	110,3	70,6
35	27-05-10	4,17	4,13	2,84	94,5	109,5	75,4
36	28-05-10	3,95	3,57	2,47	89,4	94,6	65,5
39	31-05-10	4,13	4,67	3,15	89,9	180,5	119,8
40	02-06-10	4,76	4,72	3,70	106,3	152,4	119,4
43	04-06-10	4,08	4,65	2,82	96,5	122,7	74,3
45	07-06-10	4,04	3,93	2,28	95,4	103,6	60,1
46	08-06-10	3,84	4,81	2,54	90,7	126,8	67,1
47	09-06-10	3,12	4,18	2,74	73,8	110,2	72,4
48	09-06-10	3,91	4,45	2,87	96,9	124,2	80,1
49	11-06-10	3,93	4,44	2,76	101,3	136,0	84,6
53	14-06-10	3,75	4,65	3,07	100,9	131,8	87,1
54	16-06-10	3,77	4,68	3,06	101,2	132,6	86,8
55	17-06-10	4,35	4,72	3,18	117,0	133,8	90,2
67	29-06-10	1,50	2,20	1,60	41,6	67,7	49,2
68	30-06-10	0,80	1,50	0,80	22,2	46,2	24,6
69	01-07-10	1,20	2,50	1,90	33,3	69,9	53,1
70	02-07-10	0,80	2,20	1,70	22,2	61,5	47,5
74	05-07-10	0,80	2,90	1,60	22,2	81,0	44,7
75	07-07-10	1,60	3,20	2,50	44,4	89,4	69,9
76	08-07-10	1,60	2,80	2,30	42,6	76,2	62,6
77	09-07-10	1,80	3,80	3,20	48,0	103,4	87,1
80	12-07-10	1,90	2,20	1,80	50,6	59,9	49,0
81	13-07-10	0,90	2,10	1,60	24,0	57,1	43,5
82	14-07-10	0,80	2,70	2,30	21,3	73,5	62,6
83	15-07-10	0,50	2,40	2,00	13,3	65,3	54,4

Anexo E. Determinação dos U/U_0

O estudo do sujamento foi efectuado tendo em consideração a seguinte equação:

$$\frac{U}{U_0} = \frac{Q_0}{Q} \cdot \frac{A}{A} \cdot \frac{\Delta T_{lm}}{\Delta T_{lm0}}$$

Para a execução desta equação foi necessário efectuar-se o calculo da temperatura média logaritmica (ΔT_{lm}), através da equação E.1.

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{qe} - T_{fs}) - (T_{qs} - T_{fe})}{\ln\left(\frac{T_{qe} - T_{fs}}{T_{qs} - T_{fe}}\right)} \quad (E.1)$$

Onde,

- T_{qe} = Temperatura de entrada do fluído quente, ($^{\circ}\text{C}$)
- T_{qs} = Temperatura à saída do fluído quente, ($^{\circ}\text{C}$)
- T_{fe} = Temperatura à entrada do fluído frio, ($^{\circ}\text{C}$)
- T_{fs} = Temperatura à saída do fluído frio, ($^{\circ}\text{C}$)

Para o cálculo da ΔT_{lm} é necessário ter em conta as temperaturas de evaporação e condensação do Freon R12, visualizadas na figura E.1.

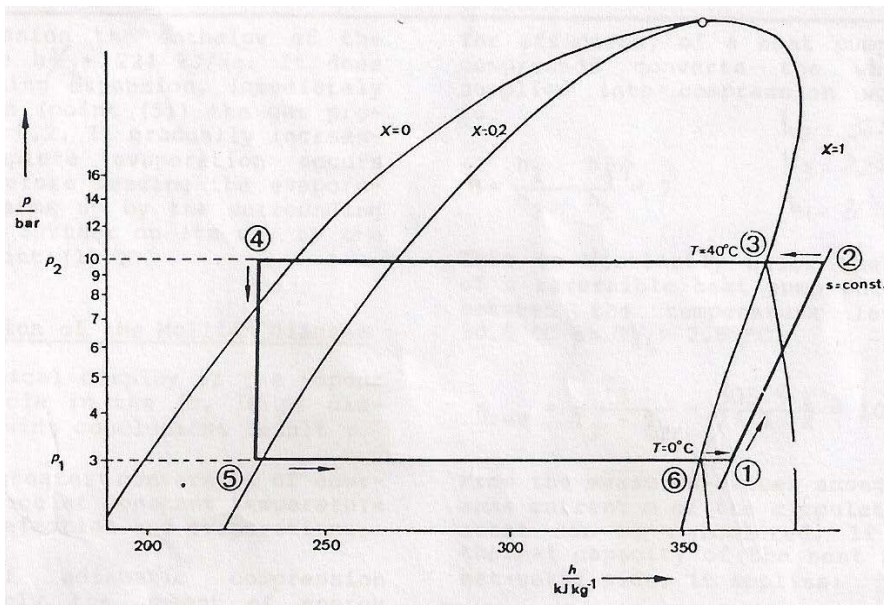


Figura E.1 – Diagrama de Mollier para o Freon R12³

³ Fonte: Ficha Técnica da Bomba de Calor Leybold-Heraeus, modelo 666190

Na figura E.2 representa-se o que sucede aquando da transferência de calor no evaporador e condensador.

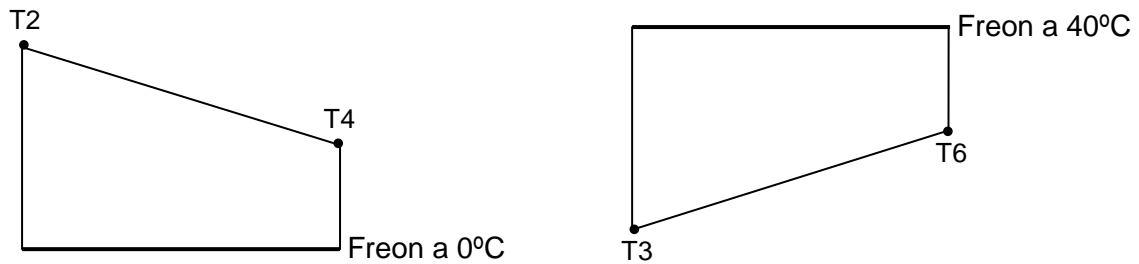


Figura E.2 – Representação do comportamento do Freon R12 aquando da troca de calor no evaporador (a) e condensador (b)

Deste modo,

- Evaporação
$$\Delta T_{lm} = \frac{(T2 - 0) - (T4 - 0)}{\ln\left(\frac{T2 - 0}{T4 - 0}\right)}$$
- Condensação
$$\Delta T_{lm} = \frac{(40 - T6) - (40 - T3)}{\ln\left(\frac{40 - T6}{40 - T3}\right)}$$

De seguida é apresentada na tabela E.1 os valores de U/U_0 obtidos para o trabalhos realizado.

Tabela E.1 – Tabela com os valores de U/U_0 obtidos longo da experiência

Dia	Data	Δt_{evap}	Δt_{cond}	U/U_0 Evap	U/U_0 cond
0	23-04-10	53,3	4,0	1,00	1,00
1	24-04-10	53,8	3,5	1,02	0,82
3	26-04-10	53,7	2,6	1,04	0,58
4	27-04-10	53,6	1,8	1,06	0,40
5	28-04-10	53,5	1,2	1,10	0,25
6	29-04-10	53,6	1,6	1,10	0,34
7	30-04-10	53,6	2,3	1,03	0,51
10	03-05-10	53,4	3,8	1,03	0,98
11	04-05-10	53,5	4,3	0,96	1,07
12	05-05-10	53,7	4,7	0,99	1,32
13	06-05-10	53,6	4,5	0,92	1,15
14	07-05-10	53,7	3,9	0,96	1,08
15	08-05-10	53,8	4,3	0,92	1,21
17	10-05-10	54,0	3,9	0,87	1,21

Dia	Data	Atevap	Atcond	U/U0 Evap	U/U0 cond
18	10-05-10	53,9	4,5	0,87	1,61
19	12-05-10	53,8	5,0	0,80	1,82
20	12-05-10	53,5	8,3	0,90	2,38
21	13-05-10	53,5	5,9	0,82	1,72
22	14-05-10	53,7	5,2	0,96	1,53
24	17-05-10	53,6	4,6	0,95	1,21
25	18-05-10	53,6	3,2	1,04	0,85
27	19-05-10	53,1	1,9	1,05	0,39
28	21-05-10	53,1	1,2	1,17	0,23
29	22-05-10	53,0	1,0	1,33	0,19
32	24-05-10	53,0	2,3	1,08	0,52
33	26-05-10	53,7	3,1	1,06	0,82
35	27-05-10	53,4	2,8	1,08	0,68
36	28-05-10	53,6	3,5	1,02	1,00
39	31-05-10	53,5	4,1	1,03	0,62
40	02-06-10	52,9	1,4	1,23	0,22
43	04-06-10	53,6	1,2	1,10	0,30
45	07-06-10	53,8	0,7	1,09	0,22
46	08-06-10	53,7	1,4	1,04	0,39
47	09-06-10	53,5	2,9	0,84	0,72
48	09-06-10	53,6	2,7	1,11	0,62
49	11-06-10	52,9	1,8	1,17	0,40
53	14-06-10	53,7	1,3	1,15	0,27
54	16-06-10	53,7	1,1	1,16	0,23
55	17-06-10	54,2	1,3	1,32	0,26
67	29-06-10	55,2	-	0,46	-
68	30-06-10	56,2	-	0,24	-
69	01-07-10	56,1	-	0,36	-
70	02-07-10	55,8	-	0,24	-
74	05-07-10	56,3	-3,0	0,24	-1,24
75	07-07-10	55,4	-3,6	0,49	-0,95
76	08-07-10	55,2	-1,6	0,47	-0,46
77	09-07-10	55,1	-1,7	0,53	-0,37
80	12-07-10	55,1	-	0,56	-
81	13-07-10	55,9	-1,0	0,26	-0,42
82	14-07-10	56,1	-1,1	0,23	-0,31
83	15-07-10	55,4	-0,8	0,15	-0,28