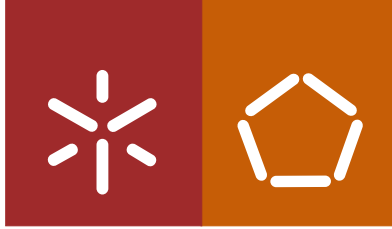


**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

João Pedro Amaral Oliveira

**Gestão da água num processo industrial  
de uma empresa têxtil**



**Universidade do Minho**

Escola de Engenharia

João Pedro Amaral Oliveira

## **Gestão da água num processo industrial de uma empresa têxtil**

Dissertação de Mestrado  
Mestrado em Engenharia Biológica Tecnologia Ambiental

Trabalho efetuado sob a orientação da  
**Professora Doutora Maria Olívia Pereira**  
e do  
**Engenheiro Ricardo Ferreira**

outubro de 2014

Nome: João Pedro Amaral Oliveira

N.º do Cartão de Cidadão/BI: 14006503 Telefone/Telemóvel: 914177047

Correio eletrónico: a58492@alunos.uminho.pt

Curso: Mestrado Integrado em Engenharia Biológica Ano de conclusão da dissertação: 2014

Área de Especialização: Tecnologia Ambiental

Escola de Engenharia, Departamento/Centro: Engenharia Biológica

### **TÍTULO DA DISSERTAÇÃO/TRABALHO DE PROJETO**

Título em PT: Gestão da água num processo industrial de uma empresa têxtil

Título em EN: Water management in an industrial process of a textile company

Orientador: Professora Doutora Maria Olívia Baptista de Oliveira Pereira

Coorientador: Engenheiro Ricardo Albino Mirra Ferreira

Número de Unidades ECTS da Dissertação: 30 Classificação em valores (0 a 20): 18

Classificação ECTS com base no percentil (A a F): \_\_\_\_\_

Declaro sob compromisso de honra que a dissertação agora entregue corresponde à que foi aprovada pelo júri constituído pela Universidade do Minho, UM.

Declaro que concedo à Universidade do Minho e aos seus agentes uma licença não-exclusiva para arquivar e tornar acessível, nomeadamente através do seu repositório institucional, nas condições abaixo indicadas, a minha dissertação, em suporte digital.

Concordo que a minha dissertação seja colocada no repositório da Universidade do Minho com o seguinte estatuto (assinale um):

- Disponibilização imediata do trabalho para acesso universal;
- Disponibilização do trabalho para acesso exclusivo na UM, durante o período de  
 1 ano,  2 anos ou  3 anos, sendo que após o tempo assinalado autorizo o acesso universal.
- Disponibilização do trabalho de acordo com o **Despacho RT-98/2010 c)** (embargo # anos)

Braga, 9 de Dezembro de 2014

Assinatura: \_\_\_\_\_

## Agradecimentos

Apesar de ter sido realizado de forma individual, este trabalho não teria sido concluído da melhor forma não fosse o incentivo e orientação de algumas pessoas, às quais aproveito para agradecer.

À minha orientadora, Doutora Maria Olívia Pereira, pela disponibilidade, comentários e indicações que reforçaram a minha confiança num trabalho bem feito, e pela compreensão das dificuldades que foram surgindo.

Ao Engenheiro Ricardo Ferreira, sem o qual o projeto nem sequer tinha acontecido, aproveito para agradecer a flexibilidade demonstrada para me ajudar, bem como os ensinamentos passados.

À Dr<sup>a</sup> Ana Pinheiro e ao Sr. José Pinheiro, por disponibilizarem a Mundotêxtil e as suas instalações para a aplicação do projeto.

Ao Professor Dr<sup>o</sup> Eugénio Ferreira, pela disponibilidade demonstrada e pela bibliografia sugerida.

Ao Carlos e ao Filipe pela ajuda diária, bem como a todos os outros responsáveis pelo processo de produção que me facilitaram a recolha de dados.

Aos Amigos de Sempre, aos quais agradeço a cumplicidade e apoio nos momentos mais difíceis.

Aos Amigos de para Sempre, que me acompanharam ao longo destes últimos cinco anos desde o primeiro dia, agradeço o facto de existirem, pois um obrigado é pouco para simbolizar aquilo que representam. Sem dúvida uma Família.

À Querida, pela cumplicidade e afeto demonstrado desde o início, especialmente nos dias menos bons. Acima de tudo, pela paciência e compreensão demonstradas, ajudando a preencher as várias lacunas que foram aparecendo por força das circunstâncias.

À Maria João, minha prima “meia-irmã”, que tal como em toda a vida tem estado sempre lá a servir de exemplo. Foi um prazer.

A toda a minha Família, especialmente à minha Mãe, ao meu Pai e à minha Irmã, pelo apoio e suporte que representam. Espero não vos deixar ficar mal.

A todos o meu eterno obrigado!

"A educação tem raízes amargas, mas  
os seus frutos são doces."

*Aristóteles*



## Resumo

A sociedade dos dias de hoje é caracterizada por uma cultura de consumismo alargada a todos os bens, sejam eles essenciais ou não. Dentro desses bens temos a água.

O desenvolvimento tecnológico, associado às necessidades humanas, elevou a utilização da água a um outro nível. Atualmente, a maioria dos processos industriais utiliza água como reagente ou como intermediário no processo produtivo, e a preocupação não passa minimamente pelo consumo desmedido de água mas apenas na maior ou menor qualidade dos seus produtos. É esta filosofia de consumismo que está errada e, como tal, o problema da gestão da água deveria estar bem enraizado na sociedade, principalmente no setor da produção industrial, onde podem ser tomadas algumas medidas para reduzir os consumos, visando a reutilização de água entre os processos de produção.

Com o presente trabalho pretendeu-se investigar a aplicabilidade de técnicas de gestão dos consumos de água ao processo de produção de atalhados de felpo.

Inicialmente, o objetivo passou por analisar os consumos de água, olhando às captações e às suas origens, bem como às descargas de efluente, de modo a caracterizar o processo de produção.

Além de avaliar as alterações entre captações e descargas, o objetivo deste projeto passou por minimizar os consumos de água e produção de efluentes dos processos húmidos (tinturaria de felpo e fio, e engomagem). Foi utilizada a abordagem proposta por Wang e Smith, de análise de Pinch aos consumos de água, considerando a salinidade como um dos principais contaminantes do processo industrial têxtil. Foram utilizados dois métodos de medição: os Sólidos Totais Dissolvidos e a *Practical Salinity Scale-1978*, tendo este último provado que representa os valores do teor em sais de uma amostra de forma mais precisa.

Os modelos utilizados provaram ser aplicáveis em processos têxteis, podendo o consumo de água ser reduzido em 6 %, excluindo a reutilização de água, e 7 % se a reutilização for considerada. A utilização de fatores de correção nos valores considerados revelou-se importante, permitindo reduzir os consumos em 8 %.

O foco recaiu também sobre o efluente produzido, tendo sido propostas medidas de otimização para o tratamento, de modo a tornar a gestão da água num processo industrial têxtil eficiente em toda a linha (desde a captação até à descarga).

**Palavras-chave:** consumo de água, salinidade, análise de Pinch, reutilização

## Abstract

Nowadays society has developed a culture of consumerism, that applies to every type of goods, either being essential goods or superfluous ones. Water happens to be one of those goods.

The technological development has increased the water requirements to a whole new level, as the vast majority of industrial processes uses water as a reagent or an intermediary in production processes. Unfortunately, the rate of water consumption does not concern industry, who cares mainly about achieving a greater quality of its products.

As this consumerist principle has been proven wrong, the water management should be deep rooted on nowadays society, particularly on industrial sectors, where measures can be taken to reduce water consumption or to promote water reuse between processes.

This work aims to ascertain the applicability of water management strategies to terry toweling production processes.

The purpose was, at first, to feature the production process, analyzing water consumption, regarding its harvesting and origins, as well as its later discarding, to characterize the production process. Furthermore, this project intended to minimize the water consumption and the effluent disposal from the wet processes – textile sizing, and terry and yarn dyeing.

The Wang and Smith's approach of Pinch analysis to water consumption was used, assuming the water salinity as the main pollutant acquired during the industrial process. Two measurement methods were used: Total Dissolved Solids and Pratical Salinity Scale-1978. The last one was proven to be more precise in representing the saline content of a sample.

These models were shown to be reliable for application to textile processes, reducing the water consumption by 6 %. A 7 % of water saving can be achieved if we take into account water reuse strategies. The application of correction factors has turned out to be significant, as it allowed a water consumption reduction of 8 %.

The focus was also on the production of effluents, offering measures for optimization of water processing, in order to improve the efficiency of water management, from harvesting to disposal.

**Keywords:** water consumption, salinity, water Pinch, reuse



## Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	v
Abstract.....	vi
Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas.....	xiii
Simbologia e Abreviaturas.....	xiv
<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1. Organização da Dissertação.....	4
<b>2. Gestão de recursos hídricos.....</b>	<b>7</b>
2.1. Panorama Mundial.....	7
2.2. Panorama Nacional.....	8
2.3. Panorama Regional.....	9
<b>3. A Mundotêxtil.....</b>	<b>11</b>
3.1. História da empresa.....	11
3.1.1. A Mundotêxtil e uma política de boas práticas ambientais.....	12
3.2. Processo Produtivo.....	12
3.3. A água e a Mundotêxtil.....	17
<b>4. Integração de Processos.....</b>	<b>23</b>
4.1. Análise de Pinch.....	24
4.1.1. Contextualização histórica.....	24
4.2. Análise de Pinch ao circuito de água.....	28
4.2.1. Caudal mínimo de água sem reutilização.....	31
4.2.2. Caudal mínimo de água com reutilização.....	33
4.2.3. Diagrama de rede.....	39
<b>5. A salinidade como contaminante em efluentes têxteis.....</b>	<b>47</b>
5.1. Salinidade.....	47
5.2. Métodos de medição.....	48
5.2.1. Sólidos Totais Dissolvidos.....	48
5.2.2. Practical Salinity Scale-1978.....	48
5.2.3. Comparação entre métodos.....	49

5.2.4.	Resultados obtidos .....	51
<b>6.</b>	<b>Caso de estudo.....</b>	<b>55</b>
6.1.	Caracterização do processo.....	55
6.2.	Caudal mínimo de água sem reutilização.....	57
6.3.	Caudal mínimo de água com reutilização.....	60
6.3.1.	Modelo gráfico.....	60
6.3.2.	Modelo tabelar.....	65
6.4.	Diagrama de rede.....	66
6.5.	Fator de correção .....	68
6.6.	Discussão de resultados.....	69
<b>7.</b>	<b>Gestão de recursos hídricos disponíveis.....</b>	<b>71</b>
7.1.	Localização e identificação de recursos hídricos disponíveis .....	71
<b>8.</b>	<b>Sistema de tratamento de águas e águas residuais.....</b>	<b>77</b>
8.1.	Descrição da ETA.....	77
8.2.	Descrição da ETAR.....	79
8.3.	Medidas propostas para otimizar o tratamento.....	82
8.3.1.	ETA.....	82
8.3.2.	ETAR.....	84
<b>9.</b>	<b>Conclusões e perspectivas de trabalho futuro.....</b>	<b>91</b>
	Bibliografia .....	93
	Anexos .....	103
	Anexo A – Fichas Técnicas.....	105
	Anexo B – Sólidos Totais Dissolvidos.....	113
	Anexo C – PSS-78.....	115
	Anexo D – PSS-78 com $T \neq 15 \text{ }^\circ\text{C}$ .....	117
	Anexo E – Caracterização de fontes de água .....	121
	E.1 - Fonte de água n°1 .....	122
	E.2 – Fonte de água n°2 .....	124
	Anexo F – Exemplos de cálculo .....	127
	F.1 – Captações e descargas de água .....	128
	F.2 – Salinidade.....	129
	F.3 – Análise de Pinch .....	131

F.4 – Caudal mínimo de água sem reutilização .....	132
F.5 – Caudal mínimo de água com reutilização .....	133
F.6 – Diagrama de rede .....	137
F.7 – Fator de correção.....	138



## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> - Processo Produtivo desenvolvido na Mundotêxtil.....	13
<b>Figura 2</b> - Captação no rio Vizela.....	17
<b>Figura 3</b> - Captação no ribeiro de Sá.....	18
<b>Figura 4</b> - Volume de água captado em 2013 e no primeiro semestre de 2014.....	18
<b>Figura 5</b> - Representação da transferência de massa de uma corrente rica para uma corrente de água em contracorrente.....	25
<b>Figura 6</b> - Representação da transferência de massa de uma corrente "imaginária" para uma corrente de água em contracorrente.....	26
<b>Figura 7</b> - (a) Concentração de contaminante em função da massa transferida, (b) Limite do perfil de água.....	29
<b>Figura 8</b> - Variedade de perfis de água.....	30
<b>Figura 9</b> - Representação simultânea de todas as correntes de processo de uma unidade industrial.....	33
<b>Figura 10</b> - Divisão da concentração de contaminante em intervalos de concentração $k$ .....	34
<b>Figura 11</b> - (a) Construção da Curva Composta de Composição, (b) Curva Composta de Composição.....	35
<b>Figura 12</b> - Linha de fornecimento ótima de água.....	36
<b>Figura 13</b> - Circuito de água.....	39
<b>Figura 14</b> - Diagrama de rede sem reutilização de água.....	40
<b>Figura 15</b> - Diagrama de rede com intervalos de concentração, correntes dos processos e caudal de água.....	41
<b>Figura 16</b> - (a) Diagrama de rede com a corrente de água do intervalo de concentração 1, (b) Diagrama de rede com as correntes de água dos intervalos de concentração 1 e 2.....	42
<b>Figura 17</b> - Diagrama de rede com as correntes de água dos intervalos de concentração 1, 2 e 3.....	43
<b>Figura 18</b> - Diagrama de rede com as correntes de água do processo global.....	44
<b>Figura 19</b> - Diagrama de blocos.....	45
<b>Figura 20</b> - Resíduo seco de uma amostra de efluente da Mundotêxtil.....	51
<b>Figura 21</b> - Diagrama de blocos dos processos húmidos da Mundotêxtil.....	56

<b>Figura 22</b> - Limite do perfil de água e linha de fornecimento de água ótima para o processo de tinturaria de felpo. ....	58
<b>Figura 23</b> - Limite do perfil de água e linha de fornecimento de água ótima para o processo de tinturaria de fio. ....	58
<b>Figura 24</b> - Limite do perfil de água e linha de fornecimento de água ótima para o processo de engomagem. ....	59
<b>Figura 25</b> - Diagrama de blocos caracterizado dos processos húmidos da Mundotêxtil, sem reutilização de água. ....	60
<b>Figura 26</b> - Representação simultânea de todas as correntes de processo da Mundotêxtil. ....	61
<b>Figura 27</b> - Divisão da concentração de contaminante dos processos húmidos da Mundotêxtil em intervalos de concentração $k$ . ....	62
<b>Figura 28</b> - CCC do processo produtivo da Mundotêxtil e a respetiva linha de fornecimento de água ótima. ....	63
<b>Figura 29</b> - Circuito de água redesenhado para o processo de produção da Mundotêxtil considerando a reutilização de água. ....	67
<b>Figura 30</b> - Planta das instalações da Mundotêxtil e sinalização de novas fontes e reservatórios de água. ....	71
<b>Figura 31</b> - Fonte de água número 1. ....	72
<b>Figura 32</b> - Fonte de água número 2. ....	74
<b>Figura 33</b> - Estação de tratamento de água da Mundotêxtil. ....	77
<b>Figura 34</b> - Processo de tratamento de água. ....	78
<b>Figura 35</b> - Estação de tratamento de águas residuais da Mundotêxtil. ....	79
<b>Figura 36</b> - Gradagem e tamização. ....	79
<b>Figura 37</b> - Tanque de equalização. ....	80
<b>Figura 38</b> - Processo de tratamento de água residual. ....	81
<b>Figura 39</b> - Excesso de captação. ....	82
<b>Figura 40</b> - Etapas da digestão anaeróbia. ....	87

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 1</b> - Exemplos de unidades de tratamento. ....	3
<b>Tabela 2</b> - Volume de água captado no ribeiro de Sá e rio Vizela em 2013.....	19
<b>Tabela 3</b> - Volume de efluente descarregado no ribeiro de Sá e rio Vizela em 2013.....	20
<b>Tabela 4</b> - Captação e descarga no primeiro semestre de 2013 e 2014.....	21
<b>Tabela 5</b> - Metodologias e respetivos autores de modelos para <i>Water Pinch</i> . (adaptado de Klemes, 2013) .....	28
<b>Tabela 6</b> - Organização de dados recolhidos para análise de Pinch aos consumos de água. ....	29
<b>Tabela 7</b> - Divisão da concentração em intervalos $k$ no modelo tabelar. ....	37
<b>Tabela 8</b> - Diagrama de Intervalo de Concentrações. ....	38
<b>Tabela 9</b> - Salinidade de diferentes amostrar através dos STD. ....	52
<b>Tabela 10</b> - Salinidade de diferentes amostrar através da PSS-78. ....	53
<b>Tabela 11</b> - Variação entre o método dos STD e a PSS-78. ....	53
<b>Tabela 12</b> - Caracterização dos processos húmidos da Mundotêxtil. ....	56
<b>Tabela 13</b> - Caracterização dos processos húmidos sem reutilização de água.....	57
<b>Tabela 14</b> - Resultados da análise de Pinch considerando a reutilização de água. ....	64
<b>Tabela 15</b> - Dados necessários para a utilização do modelo tabelar. ....	65
<b>Tabela 16</b> - Carga transferida por cada corrente de processo $p$ em cada intervalo $k$ .....	65
<b>Tabela 17</b> - Diagrama de intervalos de concentração dos processos húmidos da Mundotêxtil...	66
<b>Tabela 18</b> - Caudal mínimo de água para cada processo, com reutilização. ....	67
<b>Tabela 19</b> - Utilização de um fator de correção nos valores de concentração à saída de cada processo. ....	68
<b>Tabela 20</b> - Resumo dos resultados obtidos na análise de Pinch aos consumos de água.....	69
<b>Tabela 21</b> - Caracterização da água da fonte número 1.....	73
<b>Tabela 22</b> - Caracterização da água da fonte número 2.....	74
<b>Tabela 23</b> - Caracterização da água à entrada e à saída do filtro de carvão ativado.....	83
<b>Tabela 24</b> – Variação, em percentagem, das concentrações de ferro e cloro, e da condutividade, à entrada e saída do filtro de carvão ativado.....	84
<b>Tabela 25</b> – Classificação de microrganismos em função da temperatura ótima de crescimento. (Adaptado de Silva, 2013) .....	85

## Simbologia e Abreviaturas

### Variáveis e Constantes

$C_{a;in}$	Concentração de contaminante na corrente de água à entrada, mg/L
$C_{a;out}$	Concentração de contaminante na corrente de água à saída, mg/L
$C_{contaminante}$	Concentração de contaminante, mg/L
$C_{entrada}$	Concentração limite de contaminante à entrada, mg/L
$C_k$	Concentração do intervalo $k$ , mg/L
$C_k^{lim}$	Limite inferior de concentração do intervalo $k$ , mg/L
$C_{k+1}^{lim}$	Limite superior de concentração do intervalo $k$ , mg/L
$C_{p;in}$	Concentração de contaminante na corrente de processo $p$ à entrada, mg/L
$C_{p;out}$	Concentração de contaminante na corrente de processo $p$ à saída, mg/L
$C_{Pinch}^*$	Concentração de Pinch, mg/L
$C_{saida}$	Concentração limite de contaminante à saída, mg/L
$f_{água}$	Caudal de água, t/h
$f_{água;min}$	Caudal de água mínimo para cada operação, t/h
$f_{água;min}^{total}$	Caudal de água mínimo para o sistema completo, t/h
$f_k$	Caudal de água necessário para o intervalo de concentração $k$ , t/h
$f_{p\ total}$	Caudal de efluente total produzido, t/h
$f_{p,k}$	Caudal de água necessário para cada processo $p$ em cada intervalo $k$ , t/h
$f_p^{lim}$	Caudal limite de efluente do processo $p$ , t/h
$k$	Intervalo de concentração
$k_{15}$	Razão entre a condutividade elétrica de uma amostra e de uma solução de KCl
$m_k$	Massa de contaminante transferida no intervalo de concentração $k$ , kg/h
$m_{p,k}$	Massa de contaminante transferida pela corrente do processo $p$ no intervalo de concentração $k$ , kg/h
$S$	Salinidade Prática



**Variáveis e Constantes com letras gregas**

$\Delta_{1,2}$	Varição entre os resultados obtidos através do método 1 e 2
$\Delta C_a$	Varição da concentração de contaminante na corrente de água, mg/L
$\Delta C_p$	Varição da concentração de contaminante na corrente do processo $p$ , mg/L
$\Delta m_k$	Massa de contaminante acumulada no final do intervalo de concentração $k$ , kg/h
$\Delta m_{\text{Pinch}}$	Massa total de contaminante transferida durante o intervalo de Pinch, kg/h
$\Delta m_{p,\text{total}}$	Massa total de contaminante transferida pelo processo $p$ , kg/h
$\Delta m_{\text{total}}$	Massa total de contaminante transferida entre correntes, kg/h
STD	Sólidos Totais Dissolvidos

**Siglas**

CCC	Curva Composta de Concentração
DIC	Diagrama de Intervalo de Concentração
EPTAR	Estação de pré-tratamento de águas residuais
ETA	Estação de tratamento de águas
ETAR	Estação de tratamento de águas residuais
IP	Integração de Processos
MEN	Mass Exchanger Network
PSS-78	Practical Salinity Scale-1978
psu	Practical salinity units
PTN	Pressão e Temperatura normal
SIDVA	Sistema Integrado de Despoluição do Vale do Ave



## 1. Introdução

O presente trabalho tem como objetivo a aplicação de técnicas de gestão de água, desde simples ações de identificação até algoritmos matemáticos, com vista a um consumo de água fundamentado numa sustentabilidade ambiental e económica, contribuindo da melhor forma para a preservação dos recursos hídricos disponíveis.

A água é um composto químico constituído por dois átomos de hidrogénio e um de oxigénio, e pode ser facilmente encontrada sob a forma dos três estados físicos (sólido, líquido, ou gasoso). Tem um ponto de ebulição a 100 °C, de fusão a 0 °C (em condições PTN) e uma massa volúmica de 1000 kg/m<sup>3</sup> a 4 °C (The Engineering ToolBox, 2014) (Waldburg, 1997).

Não é à toa que estas características ou propriedades básicas da água ultrapassam já o conhecimento científico, fazendo nesta altura parte da cultura geral da sociedade. Esta será, porventura, a principal propriedade da água – a não necessidade de um rótulo para conhecer as suas propriedades.

Atualmente a sociedade é caracterizada por hábitos excessivos de consumo e como tal, a água não foge à regra. A sociedade parece continuar a dar importância a outros assuntos, mas a água é e continuará a ser o nosso bem mais precioso, devendo ser preservado.

Cerca de dois terços do planeta estão cobertos de água e, ainda assim, esta parece faltar em bastantes (!) zonas do planeta Terra. Esta analogia diz muito sobre a importância da água, assim como das boas condições com que esta é precisa. Apesar dos recursos hídricos serem considerados como um recurso renovável (graças à existência do Ciclo da água), o excessivo consumo humano e, principalmente, a incorreta gestão dos recursos hídricos, levantam a hipótese destes poderem passar a considerados como recursos não renováveis.

Esta aparente dificuldade em satisfazer as necessidades mundiais de água faz com que a gestão da água deva estar enraizada na sociedade de forma cada vez mais ativa, devendo ser aplicada em questões do dia-a-dia, desde tarefas domésticas a simples questões de higiene.

O desenvolvimento tecnológico, aliado às necessidades humanas, elevaram a utilização da água a um outro nível, onde nesta altura não é vista apenas como essencial para todas as formas de vidas conseguirem sobreviver, mas também indispensável para quase todos os processos de produção, independentemente da área ou do grau de desenvolvimento da

## Introdução

tecnologia. Atualmente a necessidade de água por parte da humanidade vai muito para além da satisfação das suas necessidades fisiológicas.

A utilização da água no setor industrial acontece a todos os níveis, independentemente do tipo de indústria, mas a natureza da sua aplicação já é variável. Desde a indústria química onde é utilizada em processos de aquecimento/arrefecimento, transporte ou lavagem (CEFIC, 2014), até à indústria petrolífera onde, entre muitas aplicações, é utilizada como fluido de perfuração (MAERSK, 2014), passando pela indústria alimentar onde, para além da sua utilização óbvia na dieta alimentar, é crucial para a lavagem e desinfeção de equipamentos. Assume papel de destaque também, por exemplo, na indústria energética, ao ser utilizada em processos de produção de energia renovável (Renewable Energy, 2014), na indústria do papel, onde é utilizada no processo como reagente (sendo este tipo de indústria o que mais quantidade de água gasta nos seus processos) (Gunderson, 2010), ou até mesmo na indústria cinematográfica, assumindo várias vezes o papel de personagem principal em variados filmes. A aplicação da água na indústria é ilimitada e, como tal, a questão da sua gestão é imperativa para um crescimento sustentável de qualquer indústria, em qualquer ramo.

Apesar de todas as possíveis aplicações industriais o destaque vai para a sua aplicação na indústria têxtil. Neste ramo industrial, a água surge como reagente fundamental na preparação de corantes para etapas de tingimento, como agente principal em processos de lavagem, ou mesmo com papel secundário em etapas de melhoramento da qualidade de produtos, entre outras aplicações de menor relevo (testes laboratoriais, por exemplo). A este tipo de atividade industrial estão ligados grandes e graves casos de poluição ambiental dada a quantidade de efluentes gerados, assim como as elevadas cargas de poluente. Desta forma, a gestão da água em processos industriais têxteis assume um papel de ainda maior destaque (Kaye, 2013).

A aplicação de boas práticas de gestão da água num processo industrial revela-se um procedimento extenso que vai desde a origem de captação da água até à sua descarga, e que inclui fases/etapas aplicáveis ao processo: metodologias para a redução do consumo, estudos e avaliação da possibilidade de reutilização de água, mapeamento de todas as fontes de água disponíveis e de pontos de descarga possíveis, identificação de possíveis reservatórios para armazenamento; e aplicáveis ao *staff*: sensibilização para a diminuição do consumo de água, inclusão em questões de melhoria do processo com vista a uma gestão da água mais eficiente.

Uma vez que a gestão da água se estende da origem ao ponto de descarga, muitas empresas, na tentativa de cumprir normas ambientais e diminuir custos relacionados com a gestão da água, têm vindo a recorrer à instalação de estações de tratamento de águas (ETA) e/ou estações de tratamento de águas residuais (ETAR). A principal diferença entre estes dois tipos de estações de tratamento reside no facto da ETAR se ocupar do tratamento de efluentes provenientes de uma qualquer atividade, enquanto uma ETA procede ao tratamento de água (não só para consumo). A variada oferta disponível de tratamentos, aliada à eficácia quando o processo se encontra otimizado, fazem das estações de tratamento uma importante arma das indústrias em contribuir não só para a própria saúde financeira, mas também para a do planeta.

Os vários processos de tratamento podem ser de origem física, química ou biológica e a sua utilização divide-se em tratamento pré-primário, primário, secundário e terciário. É a combinação entre as várias unidades de tratamento das várias etapas que torna o processo eficaz. A tabela 1 refere alguns exemplos de tratamentos utilizados nas 4 principais etapas de um processo de tratamento, das mais variadas origens (Águas de Portugal, 2013).

**Tabela 1** - Exemplos de unidades de tratamento.

<b>Tratamento</b>	<b>Tratamento</b>	<b>Tratamento</b>	<b>Tratamento</b>
<b>Pré-Primário</b>	<b>Primário</b>	<b>Secundário</b>	<b>Terciário</b>
Equalização	Sedimentação	Lamas ativadas	Filtros de areia
Gradagem		Leitos percoladores	Desinfeção
Coagulação/Floculação		Digestores anaeróbios	Oxidação química
Oxidação/Redução		UASB	Troca iónica
Flotação		Lagoas	Ozonização
Neutralização			

A escolha do melhor processo fica a cargo dos responsáveis da estação, que devem ter em atenção não só a origem do efluente (várias origens significam várias características diferentes), a legislação a cumprir na altura da descarga, assim como o grau de eficiência pretendido (eficiência mais elevada em principio significa um maior investimento). Estes três pontos são fulcrais para a instalação de uma estação de tratamento.

Apesar das várias formas disponíveis de tratamento, a “melhor” continua a ser a redução no consumo de água. Para isso existem já algumas metodologias com vista à conservação da água e minimização de águas residuais, como exemplo, a análise de Pinch. Esta metodologia é largamente aplicada na minimização do consumo de energia, sendo mais recentemente aplicada na otimização dos consumos de água.

O objetivo da análise de Pinch, no caso da água, passa pela otimização dos circuitos de água baseando-se na reutilização de correntes sempre que possível. Não só permite diminuir o caudal de água necessário, como também possibilita uma diminuição do caudal de efluente gerado, reduzindo custos com a utilização de água mas também com o tratamento dos efluentes (Wang & Smith, 1994).

### **1.1. Organização da Dissertação**

A dissertação aqui apresentada está estruturada em 9 capítulos principais, cada um deles organizado em subcapítulos:

Neste 1º Capítulo (Introdução) pretende-se elucidar o leitor para os temas abordados, assim como os objetivos principais do trabalho desenvolvido, além das motivações que estiveram na base da escrita desta dissertação. É também exposta a organização e de que forma são desenrolados os temas abordados.

O Capítulo 2 (Gestão de recursos hídricos) apresenta a noção de um recurso hídrico e a forma como estes estão distribuídos, tendo em conta os mais diversos panoramas: mundial, nacional e regional. Este capítulo, além de permitir perceber em que estado se encontram os recursos hídricos existentes, funciona também como uma motivação para o trabalho que foi desenvolvido.

No 3º Capítulo (A Mundotêxtil) é dado ênfase à empresa onde foi desenvolvido o projeto. É feita, inicialmente, uma pequena introdução histórica que permite entender a dimensão da empresa dentro dos diferentes mercados de atalhados de felpo. É ainda apresentada uma política de boas práticas ambientais que a empresa tem vindo a desenvolver e a aplicar, dando especial destaque aos cuidados tidos na captação e descarga de efluentes. O processo de produção de atalhados é também explicado de modo detalhado neste capítulo. Por fim, é feito

um balanço às captações de água e descargas de efluente anuais, que permite não só compreender toda a linha do processo, mas também tirar conclusões sobre medidas que podem ser tomadas para tornar a gestão da água um processo eficiente.

No Capítulo 4 (Integração de Processos) é feita uma introdução à integração de processos, apresentado o que esta significa, além das diferentes abordagens existentes. É dado destaque à análise de Pinch para a redução dos consumos de água. Antes de explicar os conceitos teóricos que estão na base do modelo desenvolvido por Wang e Smith (método aplicado no projeto), é feita uma contextualização histórica, que aborda as diferentes técnicas existentes para a aplicação do *Water Pinch*, apresentando ainda os seus autores. São expostas as metodologias aplicadas para a redução dos consumos de água tendo por base diferentes situações (reutilização e não reutilização de correntes), além de diferentes modelos (gráfico e tabelar) desenvolvidos pelos autores. A modificação da rede de água utilizada antes da aplicação da análise de Pinch é também abordada neste capítulo, detalhando o modo de construção de um diagrama de rede.

O contaminante considerado para a aplicação da análise de Pinch é destacado no 5º Capítulo (A salinidade como contaminante em efluentes têxteis). É descrito o termo “salinidade” e o que este representa no tratamento de efluentes. São apresentadas duas abordagens diferentes de medição de salinidade: medição dos sólidos totais dissolvidos, e através da condutividade, utilizando a *Practical Salinity Scale-1978* para determinação da salinidade prática. Os resultados obtidos na medição da salinidade de diferentes amostras de efluentes de processos têxteis são também presentes neste capítulo, sendo ainda feita uma comparação entre métodos de forma a conseguir seleccionar um para poder utilizar na análise de Pinch a realizar.

A análise de Pinch desenvolvida neste projeto é apresentada no Capítulo 6 (Caso de estudo). Inicialmente é feita uma caracterização dos efluentes de processo têxteis (tinturaria de fio e felpo, e engomagem) e da água utilizada nos processos, observando apenas a salinidade como contaminante. A recolha de dados permite aplicar a análise de Pinch, tendo sido determinado o menor consumo de água possível para a hipótese da não reutilização de correntes. Ao mesmo tempo é determinando o menor caudal de água necessário para satisfazer

## Introdução

as necessidades do processo, possibilitando a reutilização de correntes entre processos e utilizando dois modelos distintos: gráfico e tabelar. A alteração da rede de água recorrendo a um diagrama de rede é também incluída neste capítulo. É feita ainda uma análise de Pinch utilizando um fator de correção (que correlaciona os dois métodos de medição de salinidade abordados no capítulo anterior) nos valores de concentração de contaminante, para investigar a influência da eficácia métodos de medição utilizados. O capítulo é finalizado apresentado os resultados obtidos para as situações estudadas, sendo feita uma discussão dos mesmos.

No 7º Capítulo (Gestão de recursos hídricos disponíveis) são identificadas e caracterizadas novas fontes de água disponíveis nas instalações da empresa, assim como reservatórios de água desativados que permitem uma gestão dos recursos hídricos mais eficiente. Neste capítulo é ainda abordada a relação existente ente as condições atmosféricas e os recursos hídricos disponíveis.

A importância da otimização dos processos de tratamento de águas e águas residuais é debatida no Capítulo 8 (Sistema de tratamento de águas e águas residuais). São descritos os processos de tratamento da ETA e ETAR da Mundotêxtil, e apresentadas medidas para uma otimização das unidades processuais de tratamento existentes, de forma a estender a gestão da água a toda a linha (desde os consumos até à descarga).

Por fim, no Capítulo 9 (Conclusões e perspetivas de trabalho futuro) são apresentadas as principais conclusões, bem como perspetivas futuras a desenvolver no âmbito da gestão da água no processo de produção de atoalhados de felpo.



## 2. Gestão de recursos hídricos

Um recurso hídrico diz respeito a todas as águas, superficiais ou subterrâneas, disponíveis para qualquer tipo de uso. Já a sua gestão corresponde a todo o tipo de tomadas de ações/decisões, desde as mais simples até às mais complexas, e cujo objetivo passa por regular, controlar e proteger os recursos hídricos disponíveis, de modo a cumprir a legislação em vigor.

Os principais recursos hídricos são:

- Oceanos e Mares
- Calotes Polares
- Águas subterrâneas
- Lagos e rios
- Atmosfera

Oceanos e mares representam cerca de 96,5 % da quantidade total de água disponível no planeta, enquanto águas subterrâneas (principal fonte de água para consumo humano) representam apenas 0,76 % da quantidade total de água. Já os lagos e rios (principal fonte para atividades industriais) dizem respeito a 0,0072 % da quantidade global (Branco, 2007). A disparidade no que toca à distribuição da quantidade de água disponível por cada recurso hídrico eleva a importância da sua correta gestão a outro nível.

O facto da maior percentagem de água se encontrar disponível em oceanos e mares faz com que 97 % da água disponível seja salgada, correspondendo 3 % à percentagem total de água doce. É com esta pequena fração que a humanidade tem de satisfazer não só as suas necessidades biológicas, mas também outro tipo de atividades humanas (Branco, 2007).

### 2.1. Panorama Mundial

A importância da gestão de recursos hídricos é bem demonstrada quando é observada sob o ponto de vista mundial. Dados referentes a 1997 indicam a existência de 1000 milhões de pessoas sem acesso a qualquer tipo de recurso hídrico, e projetam que nos 30 anos seguintes cerca de 5500 milhões de pessoas se vissem privadas de água (Lima, 2001).

Estima-se que o valor total de água no planeta seja de  $1386 \text{ km}^3$ , valor que se tem mantido constante e que apoia a tese da água como recurso renovável (Lima, 2001).

Apesar deste valor global de água se ter mantido nos últimos 500 milhões de anos, a quantidade de água dentro de cada recurso tem vindo a sofrer alterações (por exemplo, lagos e rios estão continuamente a secar, em detrimento do constante aumento do nível médio das águas do mar). Este aspeto importa para a necessidade de um rigoroso controlo dos recursos hídricos de modo a manter um equilíbrio, fundamental para a satisfação das necessidades humanas.

Atualmente, a utilização de água a nível mundial cifra-se nos  $3940 \text{ km}^3$  anuais (menos de 10 % do total disponível) (Lima, 2001), e embora matematicamente seja facilmente observável que a quantidade de água disponível é mais do que suficiente para a satisfação das necessidades do ser humano, a distribuição geográfica, aliada às qualidades/características da água, demonstram exatamente o contrário.

## **2.2. Panorama Nacional**

Dados referentes a 2001 indicam que o volume máximo de água disponível em Portugal cifra-se nos  $157 \text{ km}^3$  (Lima, 2001). Este valor é influenciado pelas condições atmosféricas já que estas interagem diretamente com o ciclo da água, fazendo dessa forma com que o valor de água disponível em Portugal esteja dependente do ano em consideração, assim como das condições meteorológicas verificadas nesse ano. Nesse mesmo ano a disponibilidade hídrica, por área, foi de  $205\,555,6 \text{ m}^3$  (Lima, 2001).

Apesar de se tratar de um país pequeno, é possível delimitar várias regiões em função da principal utilização da água. A região do Alentejo prima pela atividade agrícola, sendo essa a área onde se verifica um maior consumo hidrográfico (Fragoso & Marques, 2006). A região do Minho e de Lisboa, fruto da elevada densidade populacional, são os principais consumidores de água para uso doméstico (Oliveira, 2006). Já as zonas envolventes aos rios Mondego e Vouga, e a região do Ave, conhecidos pela intensa atividade industrial, fazem desta atividade a principal consumidora de água (Costa, 2009).

As condições geográficas de Portugal fazem com que as situações de falta de água sejam esporádicas e, normalmente, de fácil resolução. Ainda assim, a utilização de água para as várias atividades está limitada por uma intensa legislação em vigor sobre a gestão de recursos

hídricos (Agência Portuguesa do Ambiente). Como tal, dentro das diversas utilizações possíveis para a água, é fundamental aplicar uma política de boas práticas com vista a uma melhor gestão dos recursos hídricos disponíveis.

### **2.3. Panorama Regional**

No que toca a um ponto de vista regional, é importante fazer referência à região do vale do Ave e à sua hidrografia, uma vez que é nesta região que se centrará o projeto a desenvolver.

O principal recurso hídrico do vale do Ave é o rio Ave. Tem uma bacia hidrográfica de 1391 km<sup>2</sup> e abrange cerca de 15 municípios (Costa, 2010). Os afluentes mais importantes são o rio Este e o rio Vizela. Destaque para o rio Vizela, já que se trata do destino final dado ao efluente, após tratamento, do projeto a desenvolver.

O desenvolvimento industrial verificado na região do vale do Ave (tal como já mencionado, o vale do Ave é um dos principais consumidores nacionais de água para uso industrial) levou à poluição do rio, problema que tem vindo a ser resolvido com o passar dos anos, tanto por ação de alguns industriais que se deixaram sensibilizar por questões ambientais, ao mesmo tempo que tentam cumprir a legislação em vigor (apesar de que nos dias de hoje ainda existem alguns relatos, ainda que ocasionais, de poluição por parte da indústria), ou por ação do Sistema Integrado de Despoluição do Vale do Ave (SIDVA), atualmente o maior sistema de tratamento de águas residuais de Portugal (TRATAVE, 2012).



### 3. A Mundotêxtil

#### 3.1. História da empresa

Fundada em 1975, a Mundotêxtil surge da associação de três empresas complementares no ramo da produção têxtil de diferentes segmentos, com o foco a recair principalmente nos mercados de Portugal e de países africanos com ligações lusas. O objetivo da associação empresarial passou sempre por promover uma entrada em novos mercados, permitindo dessa forma o crescimento de uma nova entidade. Esta vocação de exportação, aliada ao crescimento, fez com que em 1979 a Mundotêxtil deixasse de ser apenas uma empresa do ramo comercial têxtil, passando a tratar de todo o processo produtivo.

*Satorce*, empresa dedicada à produção de felpos, foi alvo de um investimento inicial de modo a aumentar e melhorar a capacidade de produção, tendo sido criada uma nova empresa, *A Timalha*, que se dedicaria aos processos de tingimento e acabamento.

Em Janeiro de 1986, a família Vaz Pinheiro adquire controlo do capital da empresa dando início a uma política de investimento e a uma ideia de grupo integrado, potencializando cada vez mais o crescimento do grupo Mundotêxtil. Esse investimento traduziu-se na criação ou aquisição de empresas de diferentes áreas têxteis: fiação, bordados, produção de felpo, etc; e na modernização de equipamento da existente (por exemplo, investimento em novos teares para a produção).

A vocação exportadora fez também com que fosse criada uma rede de escritórios de representantes e agentes de maneira a evoluir o setor comercial, permitindo estabelecer uma proximidade com o cliente e possibilitar à empresa estar presente e consciente das novas tendências, nos mais diversos mercados.

Em 1996, a Mundotêxtil abre a primeira filial estrangeira – *A Bianca* – com o objetivo de marcar posição no mercado americano. Este seria, de resto, o primeiro passo rumo à internacionalização da empresa, que mais tarde viria a lançar-se no mercado italiano com a *Realto, SRL* e estabeleceria uma parceria com os espanhóis *Reig Marti*. Mais recentemente fundou na Alemanha a *Blank* cujo objetivo passou por atingir, logo no momento, o mercado mundial de produtos de gama alta. Ainda na Alemanha, a Mundotêxtil associou-se à *Centra-Star*, estabelecendo uma parceria com investimento na área do comércio a retalho e no licenciamento da marca alemã.

Todos os investimentos efetuados na história da Mundotêxtil foram feitos com o intuito de tornar a empresa uma referência no que toca à produção de atoalhados para as maiores e mais reconhecidas cadeias de retalho do mundo.

### **3.1.1. A Mundotêxtil e uma política de boas práticas ambientais**

A produção industrial têxtil de atoalhados de felpo tem associada processos caracterizados não só pela grande quantidade de água que exigem, mas também pela delicadeza dos produtos químicos utilizados em cada um deles.

A grande quantidade de água utilizada em cada processo não pode apenas ser encarada como um consumo de recursos hídricos, deve também ser tido em conta a produção de efluentes. A estes efluentes gerados deve ser adicionado o facto dos processos utilizarem uma grande diversidade e quantidade de produtos químicos, e como tal o seu tratamento deve fazer parte de uma política correta de gestão da água.

Tentando implementar uma política de boas práticas ambientais, em 1995, a Mundotêxtil decidiu efetuar estudos característicos do efluente gerado, tentado ao mesmo tempo arranjar soluções de tratamento.

O plano inicial passou por construir uma unidade de tratamento físico-químico (pré-primário), que permitisse a descarga no rio, obedecendo à legislação em vigor. Estando instalada na região do vale do Ave, e fruto de um interesse regional, a Mundotêxtil optou por construir uma estação de pré-tratamento de águas residuais (EPTAR), sendo esse efluente pré-tratado encaminhado para o SIDVA, desistindo a empresa de tratar o efluente na sua totalidade, dentro das suas instalações.

Em 2004, e como resultado de pressões externas, aliado a esta tentativa de boas práticas ambientais, a Mundotêxtil coloca em prática uma unidade de tratamento biológico, passando a ter uma solução para os efluentes gerados nos seus processos.

## **3.2. Processo Produtivo**

Parte integrante da gestão da água em qualquer processo industrial passa por compreender o processo em si e as suas etapas, de maneira a que as medidas a tomar sejam sempre no sentido de reduzir o consumo de água. Para isso é descrito o processo de produção de atoalhados de felpo da Mundotêxtil.

Atualmente a empresa possui tinturaria de fio, tinturaria de felpo, tecelagem (inclusive a preparação), confeção (corte e/ou costura), embalagem, armazéns de expedição, e inclusive lojas de venda direta ao público. Opera, basicamente, em toda a linha do processo de produção de felpos.

A figura 1 demonstra como se resume esse processo.

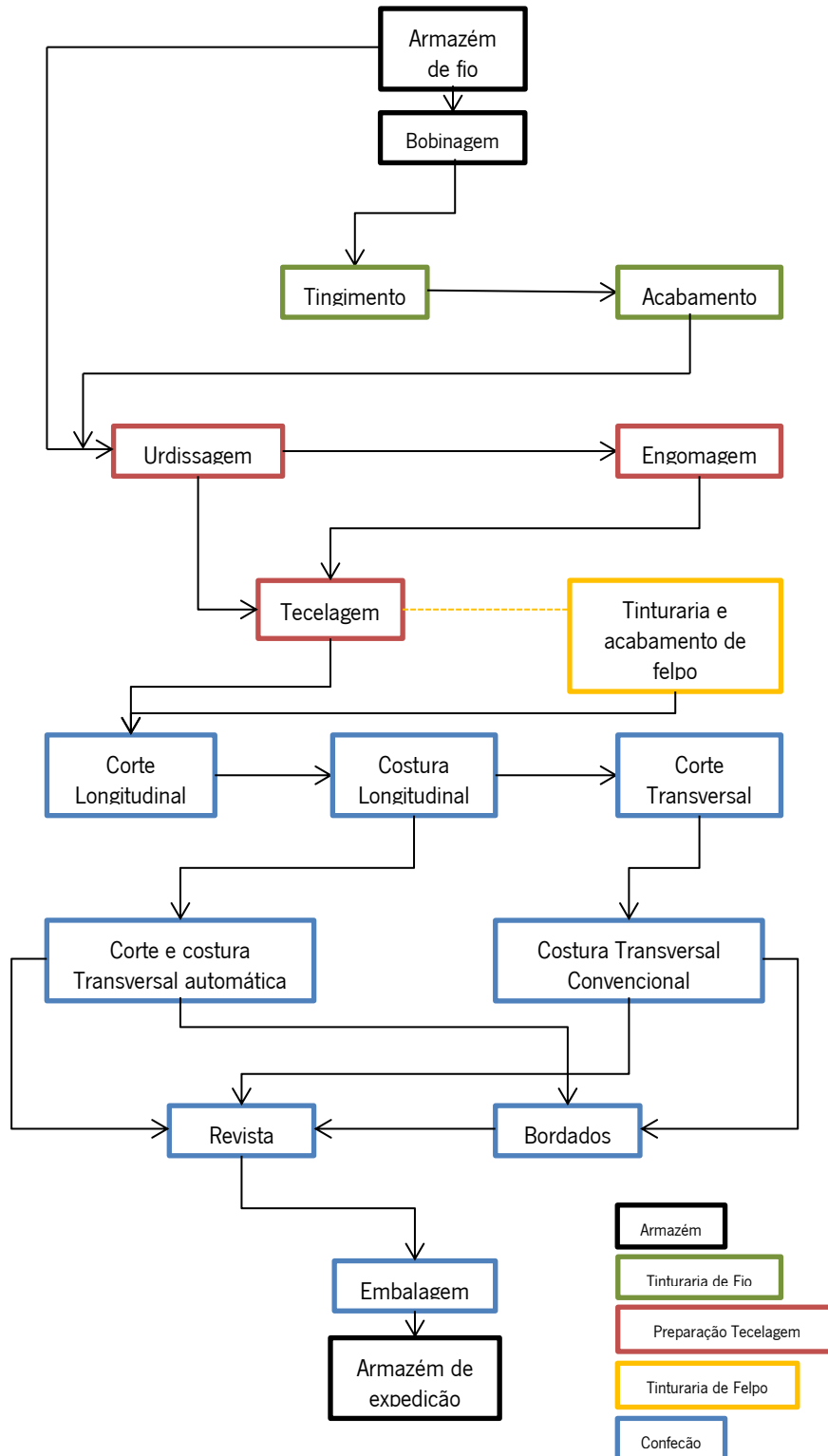


Figura 1 - Processo Produtivo desenvolvido na Mundotêxtil.

É desde logo um processo diferente de qualquer outro da indústria têxtil, uma vez que pode ser visto como um todo ou fragmentado. A empresa pode decidir, por exemplo, tingir o fio antes da sua transformação em felpo, ou produzir o felpo (eliminando etapas como o tingimento do fio) e só depois tingir o felpo. O felpo produzido com fio tingido e ainda submetido a etapas de lavagem e acabamento em tinturaria de felpo tem o nome de *jacquard* (nome do seu criador, Joseph Marie Jacquard). Um felpo *jacquard* tem mais que uma cor, enquanto o felpo tingido na tinturaria de felpo é monocolor. Desta forma, o processo deve ser visto como qualquer outro processo completo, mas que consoante o desejo do fabricante e do comprador, está sujeito a modificações.

O processo é iniciado com a receção e **armazenamento** do fio, em cru, pronto a ser utilizado. O fio passa de seguida por um processo de **bobinagem**, onde é desenrolado da bobine primitiva e posteriormente enrolado numa nova bobine.

Após bobinagem, a matéria-prima está pronto para a etapa de **tingimento do fio**. Esta é das etapas mais complexas do processo produtivo e a que merece maior destaque no que à gestão da água diz respeito. É uma etapa onde são utilizadas um conjunto de soluções contendo corantes reativos, assim como auxiliares e aditivos, com o objetivo de colorir uniformemente o fio (Ricardo Ferreira, 2010). Da receita de tingimento fazem parte produtos como hidróxido de sódio (NaOH), utilizado para melhorar a absorção do tingimento, ou ácido acético, uma vez que uma solução de cariz ácido permitirá que ocorra uma melhor fixação da cor (Bastian, 2009). No final são ainda utilizados detergentes para lavar o produto. O processo é ainda caracterizado por ser descontínuo, uma vez que para o tingimento completo do fio são usadas várias soluções diferentes (às quais se dá o nome de “banho”), e que possuem características diferentes consoante a cor a tingir. Uma cor escura requer uma média de 12 banhos diferentes, enquanto uma cor mais clara apenas 8. As características do banho variam não só consoante a cor, mas também consoante a etapa do processo de tingimento, uma vez que a cada um dos banhos está associada uma composição diferente.

Após o tingimento é feito o **acabamento**, que no caso de pós-tinturaria, consiste em tratamentos físicos e não químicos, onde o objetivo passa por formatar o artigo têxtil à sua funcionalidade final.

Este será o caminho normal a percorrer se o objetivo passar por produzir o felpo utilizando fio previamente tingido, caso do felpo *jacquard*. Se se pretender produzir felpo a partir de fio em cru, então são eliminadas as etapas descritas até agora e o processo inicia-se apenas



na etapa de **tecelagem**. Antes é feita uma preparação de tecelagem, iniciada por um processo de **urdissagem**, onde os fios são transferidos das bobinas para um órgão de teia e dispostos paralelamente uns em relação aos outros. No caso do fio tingido, essa disposição é feita de acordo com as cores pretendidas para o produto final. Após a urdissagem a preparação termina com a **engomagem** onde é aplicada à teia uma goma com o objetivo de torná-la mais resistente, verificando-se a educação do atrito no processo de tecelagem. Essa goma consiste num banho composto por água, agentes colantes e outros auxiliares (detergentes, por exemplo) (Ricardo Ferreira, 2010).

Os agentes colantes utilizados têm diversas composições e a sua escolha fica a cargo do produtor, baseando-se nas características finais que quer dar ao seu produto. No caso da Mundotêxtil são utilizadas misturas gordas com emulsionantes especiais (EMS-TEXTILWACHS), além de um outro constituído à base de amido (EMSIZE E 18). O amido é de resto a base mais utilizada nas gomas da engomagem. Durante o processo é ainda adicionada catalase (BIOTOUCH CAT), uma enzima produzida por uma estirpe geneticamente modificada de um fungo não patogénico, e cujo objetivo passa pela transformação do peróxido de hidrogénio ( $H_2O_2$ ), usado no processo de branqueamento do fio, em água e oxigénio. A presença do peróxido de hidrogénio revela-se prejudicial para outras etapas, nomeadamente o tingimento. As fichas técnicas dos produtos utilizados na engomagem encontram-se no anexo A.

A utilização de enzimas em processos têxteis é contudo motivo de debate uma vez que apesar da sua utilização permitir tornar o processo mais amigo do ambiente (permite uma diminuição tanto no consumo de água como no tempo de duração do processo), aumenta a carga orgânica do efluente gerado, pois além da decomposição do peróxido de hidrogénio, as enzimas degradam o amido do agente encolante, formando dextrinas, um polissacarídeo de baixo peso molecular (Manuais ambientais CETESB, 2003). Esta propriedade de degradação do amido fez com que tenha sido das primeiras aplicações enzimáticas na indústria têxtil (Aires-Barros *et al.*, 2003). A utilização de enzimas deve ser então debatida e avaliados os prós e os contras relacionados com a sua utilização.

Terminada a preparação do fio, este está pronto a ser transformado no produto final, o felpo. Para isso mesmo serve a etapa de **tecelagem**, onde ocorre o cruzamento entre os fios da teia (na direção do comprimento do tecido) e os fios da trama (na direção da largura do tecido).

A etapa seguinte depende dos caminhos tomados anteriormente. Caso tenha sido utilizado fio cru na preparação da tecelagem, então a etapa seguinte será a do **tingimento do**

**felpo**, processo que demora várias horas a estar concluído e que é caracterizado pela utilização de bastante água e produtos químicos.

No processo de tingimento existem algumas pré-etapas de preparação. Caso o felpo a tingir tenha sido engomado (engomagem), é feita inicialmente uma desengomagem de natureza enzimática para retirar a goma e outras impurezas que possam prejudicar o tingimento. Para os casos em que o felpo não foi previamente engomado é feita uma lavagem. Consoante a cor desejada a dar ao felpo pode ser feito um branqueamento, em que o objetivo passa por retirar a cor natural do algodão (cru), e utiliza-se quando a intenção é de que o felpo seja branco ou se pretende que uma determinada cor seja melhor reproduzida. Após estas etapas de preparação é feito o tingimento, seguido de lavagem. De referir que todas as etapas de preparação e de tingimento são realizadas com a mesma maquinaria e às quais se dá o nome de *jet*. Importa acrescentar ainda a utilização de grandes quantidade de NaCl durante o processo de tingimento, que atua como eletrólito, auxiliando a adsorção do corante por parte da fibra de algodão. A utilização de sal no processo terá consequências no tratamento do efluente uma vez que aumenta bastante a condutividade (Ferrari, 2007).

Terminado o tingimento, são realizadas etapas de acabamento. O felpo é sujeito a centrifugação para que seja libertada a maior parte da água que tem absorvido, passando de seguida por um processo de secagem e endireitamento, que permitirá libertar o felpo das tensões acumuladas ao longo de todas as etapas e fixar as dimensões pretendidas.

Finalizado o tingimento e respetivo acabamento, o felpo é **cortado** e **costurado** conforme o objetivo final do produto. Se foi utilizado fio já tingido na tecelagem e o objetivo não passa por produzir felpo *jacquard*, então a etapa de tingimento do felpo pode ser eliminada passado logo para as de corte e costura.

Finalizadas estas duas etapas, o produto final é revistado antes de ser embalado, estando assim pronto a ser expedido.

Sendo o objetivo do projeto gerir da melhor forma todos os consumos de água da empresa, faz sentido desviar o foco para apenas as etapas onde a água faz parte do processo. Desta forma, vai ser dado maior destaque aos processos de tingimento/tinturaria, tanto de fio como de felpo, e para o processo de engomagem. Importa realçar o tingimento uma vez que corresponde a cerca de 98 % dos gastos da empresa no que à água diz respeito.

Ainda na matéria da gestão da água, é imperativo não fazer alusão apenas aos consumos, mas também lembrar que associado a um grande consumo de água está também uma grande produção de efluentes. Como tal, o tingimento é também o responsável pela maior quantidade de efluente gerado.

### 3.3. A água e a Mundotêxtil

Dependendo não só das quantidades de felpo produzidas mas também das suas características, como por exemplo a cor, podem ser atingidos valores na ordem dos 200  $L_{\text{água}}/kg_{\text{felpo}}$  (apesar de, em média, o valor ser mais baixo), e por isso é incomportável para uma empresa, que se pretende sustentável, utilizar água da companhia da região onde está inserida.

No caso de uma empresa com uma dimensão socioeconómica como a da Mundotêxtil, este fator ganha ainda maior relevância, visto que o facto de ser o maior produtor nacional de atoalhados faz com que seja também dos maiores consumidores de água da região. Nesse sentido, a empresa encontrou soluções naturais para a captação de água, o que permite que o negócio continue a evoluir de maneira positiva.

Para o processo, é utilizada água captada em poços existentes nas instalações da empresa e água da chuva, que é depois encaminhada para um tanque de água bruta secundário. Essa massa de água irá combinar com a água captada em dois pontos naturais distintos: um principal, o rio Vizela (figura 2), e um secundário, o ribeiro de Sá (figura 3). Toda esta água captada é armazenada num tanque de água bruta primário.



Figura 2 - Captação no rio Vizela.



Figura 3 - Captação no ribeiro de Sá.

A figura 4 demonstra as captações feitas mensalmente no ano de 2013 e no primeiro semestre de 2014.

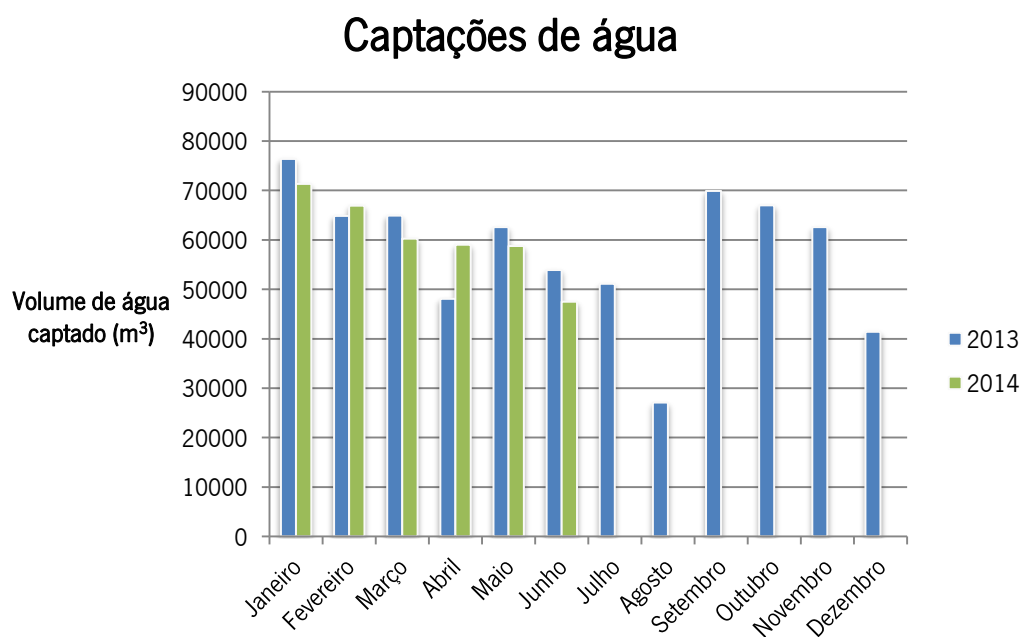


Figura 4 - Volume de água captado em 2013 e no primeiro semestre de 2014.

São captados mensalmente dezenas de milhares de  $m^3$  de água do rio Vizela e do ribeiro de Sá. Entre estes dois recursos, a maior parte da água captada provem do rio Vizela, já que comparativamente ao ribeiro de Sá possui um volume muito maior de água, além do fator sazonalidade não se fazer sentir tanto no rio como no ribeiro (tabela 2).

**Tabela 2** - Volume de água captado no ribeiro de Sá e rio Vizela em 2013.

	Volume Captado (m <sup>3</sup> )		Média mensal de captações diárias (m <sup>3</sup> /dia)
	Ribeiro de Sá	Rio Vizela	
Janeiro	13376	62972	2462,839
Fevereiro	2341	62520	2316,464
Março	3007	61890	2093,452
Abril	682	47411	1603,100
Maio	2549	60004	2017,839
Junho	2086	51837	1797,433
Julho	1546	49555	1648,419
Agosto	2025	25051	873,419
Setembro	18508	51377	2254,355
Outubro	8720	58261	2160,677
Novembro	4115	58470	2018,871
Dezembro	2422	38969	1335,194
<b>ANUAL</b>	<b>61377</b>	<b>628317</b>	
<b>TOTAL</b>	<b>689694</b>		

O consumo anual da empresa em 2013 cifrou-se nos 689694 m<sup>3</sup> de água.

Apesar do valor médio de captações diárias (m<sup>3</sup>/dia) não ser constante ao longo dos meses, o comportamento no que toca ao volume de captação mensal tem sido constante de ano para ano, tal como indica a figura 4. Tal como em 2013, no primeiro semestre de 2014, os meses com maior captação foram os de Janeiro, Fevereiro e Março, tendo sido Janeiro o mês com um maior volume de água captada em ambos os anos.

A água captada não pode ser utilizada diretamente no processo de produção, sendo por isso sujeita a um processo de tratamento. Para isso a Mundotêxtil conta nas suas instalações com uma ETA, onde a água é tratada até possuir as características mínimas desejadas para poder ser utilizada no processo produtivo.

Como já referido, associado a um grande consumo de água está também uma grande produção de efluentes. Atualmente parte do efluente é descarregado no SIDVA e uma outra parte é tratado na ETAR existente nas instalações da empresa, para ser de seguida reencaminhado para o rio Vizela.

A tabela 3 faz referência ao volume de efluente descarregado pela Mundotêxtil em 2013.

**Tabela 3** - Volume de efluente descarregado no ribeiro de Sá e rio Vizela em 2013.

	Volume Descarregado (m <sup>3</sup> )		Média mensal de descargas diárias (m <sup>3</sup> /dia)
	SIDVA	ETAR	
Janeiro	19241	45601	2091,677
Fevereiro	16445	42841	2117,357
Março	14815	49889	2087,226
Abril	11595	34670	1542,167
Maió	20053	38798	1898,419
Junho	18117	32996	1703,767
Julho	13652	31601	1459,774
Agosto	5814	15828	698,129
Setembro	20390	42121	2083,700
Outubro	17631	48194	2123,387
Novembro	14448	48135	2086,100
Dezembro	17556	25439	1386,935
ANUAL	189757	456113	
<b>TOTAL</b>	<b>645870</b>		

Em 2013 a Mundotêxtil fez um total de descarga de 645870 m<sup>3</sup> de efluente, dos quais 456113 m<sup>3</sup> para o Rio Vizela.

Um dado que se pode observar comparando as tabelas 2 e 3 é o facto do volume descarregado ser inferior ao volume captado. Este é um acontecimento natural já que o volume da água captado e utilizado na empresa, não é completamente descarregado. Ao volume de água captado e usado para o processo produtivo, que acaba por ser descarregado na ETAR, há ainda a juntar o volume de água evaporado na secagem do fio e do felpo, a água utilizada nas centrais de ar condicionado, o volume de vapor de água produzido, a rega de espaços verdes, a utilização em instalações sanitárias e ainda a limpeza/lavagem das instalações. Ainda assim é um bom indicador de que ainda existem algumas medidas a tomar de forma a tornar a gestão da água um processo mais eficiente.

É ainda contabilizada a água em processos de aquecimento/arrefecimento que não é tratada na ETAR e como tal não é contabilizada como volume de água descarregado.

Outro dado importante prende-se com a dificuldade em controlar o volume do tanque de água bruta primário. Uma vez que o processo de captação não se encontra automatizado, isto é, é o operador o responsável por delinear quais os momentos de captação, ocorrem diariamente situações de sobrecarga de água no tanque levando o mesmo a transbordar. Esta água está a ser contabilizada como água captada mas não no efluente descarregado. Sobre esta temática resta referir que a automatização do tanque está a ser preparada para Setembro de 2014, e que não foi solucionada mais cedo pois o processo de controlo utilizado envolve a pressurização da linha de água após o fecho das válvulas, e nos momentos de sobrecarga do tanque pode ter contraindicações complicadas. O facto do local de captação se encontrar a umas centenas de metros do tanque faz com que o impacto causado pela imensa quantidade de água presente nos tubos, que ligam a origem de captação e o tanque de água bruta primário, potenciase a formação de ruturas nas tubagens. O sistema a instalar permitirá desligar as bombas à distância e sem pressurizar as linhas.

A estes fatores, há ainda a juntar os erros associados a qualquer processo de medição.

A tabela 4 permite-nos observar a relação entre captação e descarga no primeiro semestre de 2013 e 2014.

**Tabela 4** - Captação e descarga no primeiro semestre de 2013 e 2014.

	Captações			Descargas		
	2013 (m³)	2014 (m³)	Variação de captação no primeiro semestre de 2014 em comparação com o de 2013	2013 (m³)	2014 (m³)	Variação de descarga no primeiro semestre de 2014 em comparação com o de 2013
Janeiro	76348	71299		64842	62627	
Fevereiro	64861	66892		59286	56284	
Março	64897	60225		64704	51752	
Abril	48093	59034		46265	49402	
Maio	62553	58734		58851	48549	
Junho	53923	47467		51113	42210	
	370675	363651	-2 %	345061	310824	-10 %

Em 2014 foi captado menos 2 % do volume de água em igual período de 2013, enquanto o volume descarregado diminuiu 10 % no primeiro semestre de 2014 em relação ao de 2013. Conclui-se que esta situação de excesso de captação em relação ao volume descarregado não só se manteve ao longo do ano, como se agravou ao longo do primeiro semestre deste ano. Pelos motivos referidos anteriormente, os consumos da empresa devem ser observados através

do volume descarregado (que diminui em relação a igual período de 2013) e não tanto ao volume captado, cuja diminuição verificada não foi tão grande como no volume descarregado.

Estes valores apesar de parecerem contraproducentes podem significar exatamente o contrário, isto é, uma melhoria da eficiência processual.

O menor volume descarregado traduz-se num menor consumo de água em processos húmidos, principalmente de tinturaria, com melhores relações de banho ( $L_{\text{água}}/kg_{\text{teipó}}$ ).



## 4. Integração de Processos

A Integração de Processos (IP) pode ser descrita como uma ferramenta de auxílio para uma correta gestão e otimização de recursos térmicos e mássicos.

Inicialmente desenvolvida nos anos 70 para fazer face à crise petrolífera, a primeira aplicação focou-se na poupança e eficiência energética. O sucesso obtido fez com que o conceito fosse alargado a outras áreas (Klemes, 2013).

O principal objetivo passará por desenvolver um sistema eficiente de massa e energia, utilizando técnicas que facilitem a modificação de processos. As técnicas utilizadas são bastante rigorosas e sistemáticas, o que por vezes pode ser criticado uma vez que segundo a IP, não basta que uma ideia seja boa para ser posta em prática (El-Halwagi, 1997). Ainda assim, este facto torna a otimização de um processo mais eficiente já que o resultado obtido é fundamentado (Natural Resources Canada, 2008).

O facto de ser aplicável tanto na parte do projeto de uma nova unidade como na otimização de uma já existente constitui uma vantagem, já que permite uma utilização diversificada e independente da dimensão da indústria (Klemes, 2013).

As alterações efetuadas são sempre em vista à diminuição de consumos (água, energia ou matéria prima), além da emissão de poluentes. Pode também ser utilizada para eliminar etapas/equipamentos dos processos unitários que se revelem desnecessários e/ou prejudiciais para o sistema global (Natural Resources Canada, 2008).

Como qualquer tipo de ferramenta, apresenta contrariedades evidentes, cujo grau de gravidade aumenta ou diminui consoante a área a intervir (Hamaguchi, 2007).

A complexidade das metodologias envolve muitas vezes tecnologia e mão-de-obra de elevado custo, e por isso o período de retorno pode-se revelar extenso em alguns casos (Natural Resources Canada, 2008).

É, ainda, preciso ter em conta que, por vezes, as alterações efetuadas podem causar um impacto negativo na confiabilidade do processo, já que associado a uma alteração existe sempre um risco de falha (Hamaguchi, 2007).

Existem muitas técnicas utilizadas no âmbito da IP. Para o projeto em questão foi selecionada a análise de Pinch para a redução dos consumos de água.

#### 4.1. Análise de Pinch

Um dos principais problemas na gestão da utilização da água passa pela sua utilização desmedida nos processos. Independentemente do tipo de indústria existem situações em que nem toda a água residual tem de ser enviada para a estação de tratamento, uma vez que dependendo das suas características pode ser utilizada noutros processos. Desta forma, a IP surge como uma alternativa válida a aplicar para um uso eficiente de água.

Todas as técnicas possíveis para minimizar o consumo num âmbito industrial devem incluir o máximo de reaproveitamento de água possível, existindo quatro casos possíveis (Wang & Smith, 1994; Ujang *et al.*, 2002):

- Reutilização direta de um efluente de um processo para outro (ou do mesmo processo).
- Tratamento parcial antes da reutilização.
- Combinação entre utilização direta e tratamento parcial.
- Alterações dos processos (substituição de processos húmidos por processos secos, que obtenham o mesmo resultado).

A análise aos ciclos de água na indústria por integração dos processos é já prática recorrente, sobretudo em processos químicos, podendo ser desenvolvida através de métodos gráficos ou por otimização utilizando algoritmos matemáticos (Hamaguchi, 2007).

##### 4.1.1. Contextualização histórica

A IP contempla a utilização eficiente de todos os recursos hídricos disponíveis, exigindo a criação de um equilíbrio (focado em modelos matemáticos), para uma correta otimização dos consumos. Neste sentido, começa por surgir o conceito de “*Mass Exchanger Network Synthesis*” (MEN) que sugere a transferência de um contaminante, preferencialmente, de uma corrente rica para uma corrente pobre (El-Halgawi & Manousiouthakis, 1989).

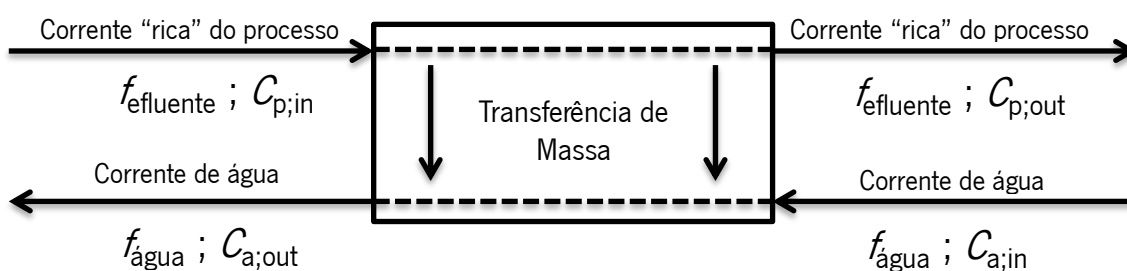
Aliado ao desenvolvimento tecnológico, novas técnicas foram exploradas aplicando conceitos antigos. Tentando contornar limitações financeiras, associadas a alterações drásticas nos processos, é aplicada uma técnica combinada de reutilização e recuperação de efluentes, apelidada de “*Water Pinch*”. É descrita como uma ferramenta matemática, com base em

técnicas gráficas e/ou modelos tabelares, para um desenvolvimento sustentável que engloba todas as características do processo, e de forma detalhada (Alva-Argáez & Kokossis, 1998).

Inicialmente aplicado para questões energéticas (facto que fez com que fosse criticado, uma vez que extrapolou o conceito de troca de energia à troca de massa), o método baseia-se na caracterização da quantidade e da qualidade das correntes de água nos processos, para que seja possível encontrar soluções de reciclagem e reutilização ao invés do tratamento, tendo sempre em conta a quantidade e qualidade mínima de água exigida para cada processo. Pode ser descrito como a implementação de técnicas estratégicas para a minimização de água em integração de processos (Manan *et al.*, 2004).

Em 1989, El-Hawagi e Manousiouthakis iniciam, na California, estudos no âmbito de ampliarem o conceito de “*Thermal Pinch*” à transferência de massa, tratando de estabelecer uma relação ótima na transferência de massa entre correntes ricas e correntes pobres (Hamaguchi, 2007).

Em 1994, Wang e Smith esquematizam o processo de transferência de massa entre correntes, considerando a solução deste problema através de um método gráfico. O objetivo passou por minimizar o consumo de água partindo do princípio de que os contaminantes são transferidos de uma corrente concentrada para uma pouco concentrada, tal como apresenta a figura 5:

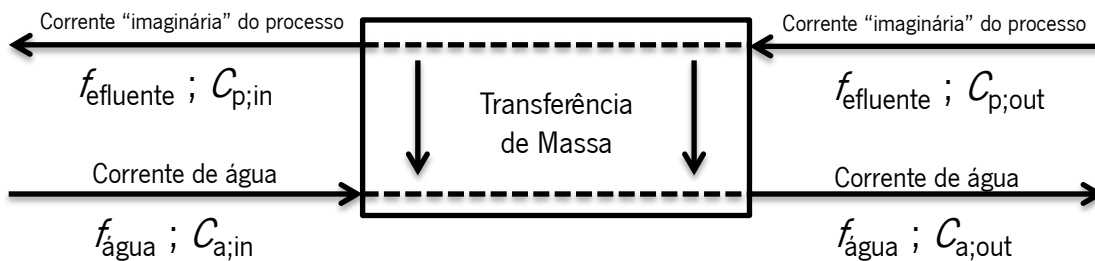


**Figura 5** - Representação da transferência de massa de uma corrente rica para uma corrente de água em contracorrente.

Os poluentes são transferidos de uma corrente rica ( $f_{\text{efluente}}$ ) com uma concentração à entrada ( $C_{p,in}$ ) elevada para um caudal de água doce  $f_{\text{água}}$  (entenda-se, sem contaminantes), em que a concentração de contaminante na entrada ( $C_{a,in}$ ) se pretende baixa. Após a transferência de massa da corrente mais concentrada para a menos concentrada, a concentração de contaminante na saída da corrente de água ( $C_{a,out}$ ) é superior a  $C_{a,in}$ , verificando-se o contrário na corrente de efluente onde  $C_{p,in}$  é superior à concentração verificada na saída do processo ( $C_{p,out}$ ).

Os limites de concentração da água são definidos pelos limites de entrada e saída do processo. A única exigência passa por garantir que na corrente de água, à entrada,  $C_{a,in}$  seja inferior a  $C_{p,out}$  e à saída,  $C_{a,out}$  seja inferior a  $C_{p,in}$  (Mann & Liu, 1999).

Uma vez que nem todos os processos industriais são caracterizados pelo contacto entre a corrente rica do processo e a corrente de água, é utilizado o conceito de corrente “imaginária” (ou aparente) para representar uma corrente de processo. É essa corrente imaginária que define os limites de concentração característicos do processo, e importantes para a reutilização de água (Mann & Liu, 1999). A figura 6 esquematiza o sistema unitário com uma corrente “imaginária”:



**Figura 6** - Representação da transferência de massa de uma corrente "imaginária" para uma corrente de água em contracorrente.

O método de Wang e Smith permite determinar o caudal mínimo de água necessário para satisfazer as necessidades de água de todas as unidades de um processo industrial. Este será o modelo utilizado neste projeto.

Apesar disso, o modelo final proposto como ótimo através deste método pode tornar-se bastante dispendioso. Para fazer face a esse problema, Olesen e Polley, em 1997, formularam o seu próprio modelo, pondo em prática os fundamentos de Wang e Smith, mas focando-se na parte de *design* do sistema integrado (Olesen & Polley, 1997).

Em 1996, Dhole e a sua equipa desenvolveram novos modelos gráficos, construindo curvas de entrada e saída de água, denominando-as de “Curvas Compostas Duplas”. No eixo das abcissas são representados os caudais, enquanto nas ordenadas são apresentadas as concentrações de contaminantes (Dhole *et al.*, 1996).

Apesar dos modelos gráficos oferecerem vantagens (principalmente ao nível da compreensão dos métodos), outros autores debruçaram-se em desenvolver mecanismos matemáticos. Menon, Ravagnani e Módenes desenvolveram uma metodologia algorítmica, de fácil compreensão, que concilia técnicas de programação matemática com os conceitos-chave

da análise de Pinch original, apresentando como principal vantagem a oferta de várias soluções para o projeto final do sistema de processos integrados (Menon *et al.*, 2001).

Hallale, em 2002, reconhece a eficiência do método gráfico para a otimização de sistemas integrados, ao mesmo tempo que aponta deficiências aos estudos efetuados por Dhole (Hallale, 2002). Segundo Hallale, os cálculos efetuados por Dhole e a sua equipa não representavam os circuitos de água de forma clara, uma vez que, consoante o modelo, o destaque deve ser dado ora à concentração de contaminantes (em processos de lavagem, extração, etc), ora ao caudal de efluente (nos casos dos reatores biológicos, torres de arrefecimento, etc) (Hallale, 2002).

Mohammadnejad, Bidhendi e Mehrdadi decidiram inovar, criando em 2010, algoritmos que permitissem fazer uma análise de Pinch correta olhando a um ou a mais contaminantes, aplicando mais tarde (2011) esses conceitos a uma refinaria de petróleo e obtendo bons resultados (Mohammadnejad *et al.*, 2010; Mohammadnejad *et al.*, 2011).

Independentemente do autor, o *Water Pinch* pode ser dividido em 5 passos distintos:

- (i) **Análise da rede de água** – Esquematizar o sistema integrado de consumo de água
- (ii) **Recolha de dados** – Identificar fontes e possíveis fontes de água, assim como as suas características; identificar as correntes dos processos e suas características.
- (iii) **Minimização dos consumos de água** – Determinar qual o caudal mínimo de água fresca necessário, e conseqüentemente a minimização de efluentes gerados.
- (iv) **Redesenhar a rede de água** – Alterar o sistema integrado para que seja possível consumir o menor caudal possível (determinado no ponto iii)
- (v) **Avaliação económica** – Verificar se as alterações do projeto fazem com que este seja economicamente viável.

Apesar dos passos descritos anteriormente descreverem na generalidade como se procede à análise de Pinch, a forma como são realizados varia de acordo com os autores. Neste sentido, o terceiro passo revela-se o mais diversificado e que representa a imagem de marca de

cada autor. A tabela 5 apresenta algumas das metodologias já apresentadas, assim como o respetivo autor, para a determinação do caudal mínimo de água.

**Tabela 5** - Metodologias e respetivos autores de modelos para *Water Pinch*. (adaptado de Klemes, 2013)

Método	Autor(es)
<i>Limiting Composite Curve</i>	Wang e Smith
<i>Water Suplus Diagram</i>	Hallale
<i>Souce/Sink Composite Curve</i>	El-Halwagi, Gabriel e Harell
<i>Water Cascade Analysis</i>	Manan, Tan e Foo
<i>Algebraic Targeting Approach</i>	Al-Mutlaq
<i>Source Composite Curve</i>	Bandyopadhyay

## 4.2. Análise de Pinch ao circuito de água

O método proposto por Wang e Smith (1994) é mesmo o mais tradicional, e como tal será o utilizado neste projeto. Foca-se na carga de contaminante das correntes, uma vez que para um efluente poder ser reutilizado, a concentração de contaminante à saída de um processo deve ser inferior à concentração limite de entrada de um outro.

O resultado da aplicação deste método deve passar pela redução dos consumos de água e conseqüente diminuição de efluente gerado, mantendo-se as cargas de contaminantes constantes em cada processo (Hamaguchi, 2007).

Uma vez que o foco recai sobre a carga de contaminantes, os autores criaram dois métodos alternativos onde determinam o caudal mínimo de água necessário sem e com reutilização.

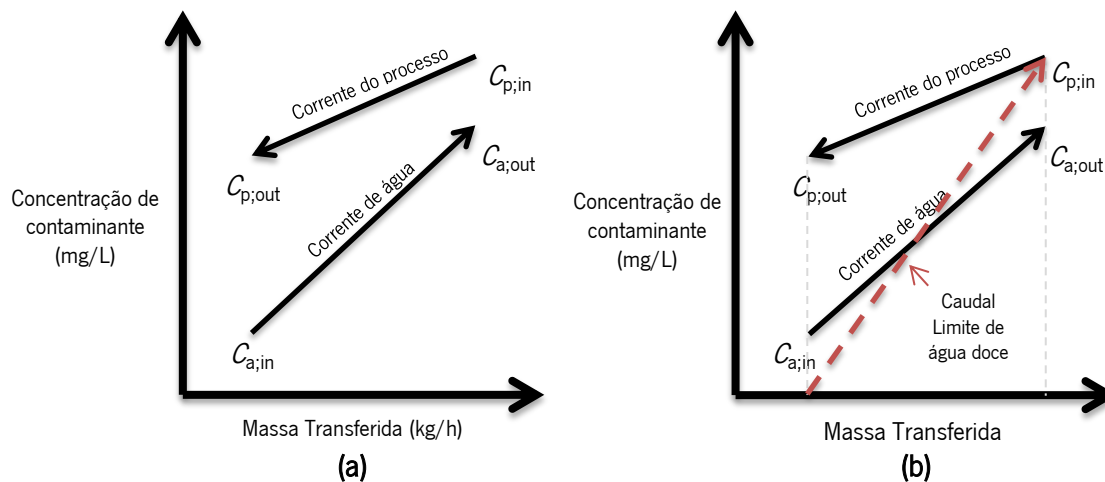
Antes de comentar as diferenças entre os métodos propostos é importante referir que, em ambos os casos, a recolha de dados de cada operação unitária tem especial importância, uma vez que qualquer tipo de erro refletir-se-á no resultado final. A recolha de informação inclui dados como o caudal de água utilizado para cada processo ( $f_{\text{água}}$ ), as concentrações limites de contaminante verificadas à entrada ( $C_{\text{entrada}}$ ) e à saída ( $C_{\text{saída}}$ ), para além da massa total de contaminante transferida de uma corrente “rica” do processo para a corrente de água ( $\Delta m_{\text{total}}$ ). A tabela 6 apresenta um exemplo da organização destes dados.

**Tabela 6** - Organização de dados recolhidos para análise de Pinch aos consumos de água.

Processo	$f_{\text{água}}$ (t/h)	$C_{\text{entrada}}$ (mg/L)	$C_{\text{saída}}$ (mg/L)	$\Delta m_{\text{total}}$ (kg/h)
1	$f_1$	$C_{1;\text{in}}$	$C_{1;\text{out}}$	$\Delta m_{1;\text{total}}$
2	$f_2$	$C_{2;\text{in}}$	$C_{2;\text{out}}$	$\Delta m_{2;\text{total}}$
3	$f_3$	$C_{3;\text{in}}$	$C_{3;\text{out}}$	$\Delta m_{3;\text{total}}$

Uma vez recolhidos todos os dados importantes para a caracterização dos processos, dá-se início ao terceiro passo (Minimização dos consumos de água).

É feita a representação gráfica da concentração de contaminante (mg/L) em função da massa transferida (kg/h), tal como exemplifica a figura 7a.



**Figura 7** - (a) Concentração de contaminante em função da massa transferida, (b) Limite do perfil de água.

Aquando da representação gráfica é assumida que a função característica da variação da concentração num efluente ao longo do processo é linear, já que é um facto que se verifica constantemente (especialmente em processos caracterizados por diluição). Ainda assim, se o comportamento da função for não linear pode ser usada uma aproximação linear.

Para a operação ser eficiente, a linha que representa a água residual deve ser superior em todos os pontos à da corrente de água, e a amplitude entre as retas, dependente do processo.

Como podemos observar na figura 7b, as concentrações de entrada e saída de contaminante ( $C_{p;\text{in}}$  e  $C_{p;\text{out}}$ ) características de cada processo, são os fatores limitantes na determinação da quantidade mínima de água necessária. O objetivo passa por representar o

caudal de água limite característico do processo, denominado pelos autores como “limite do perfil de água”, para que seja possível determinar o menor caudal possível de água doce (figura 7b) (Mann & Liu, 1999).

A determinação do limite do perfil de água não obriga a que o processo ocorra nessas condições, representa apenas uma situação limite. Uma vez que as características do processo estão bem definidas (nomeadamente a quantidade de massa transferida ( $\Delta m_{total}$ )), é perceptível que, desde que se cumpram os requisitos do processo, existem muitas opções para o fornecimento de água, designadas de “linhas de perfil de água”, sendo uma delas a linha representativa do fornecimento de água ótima. A figura 8 apresenta alguns exemplos de linhas de perfil de água.

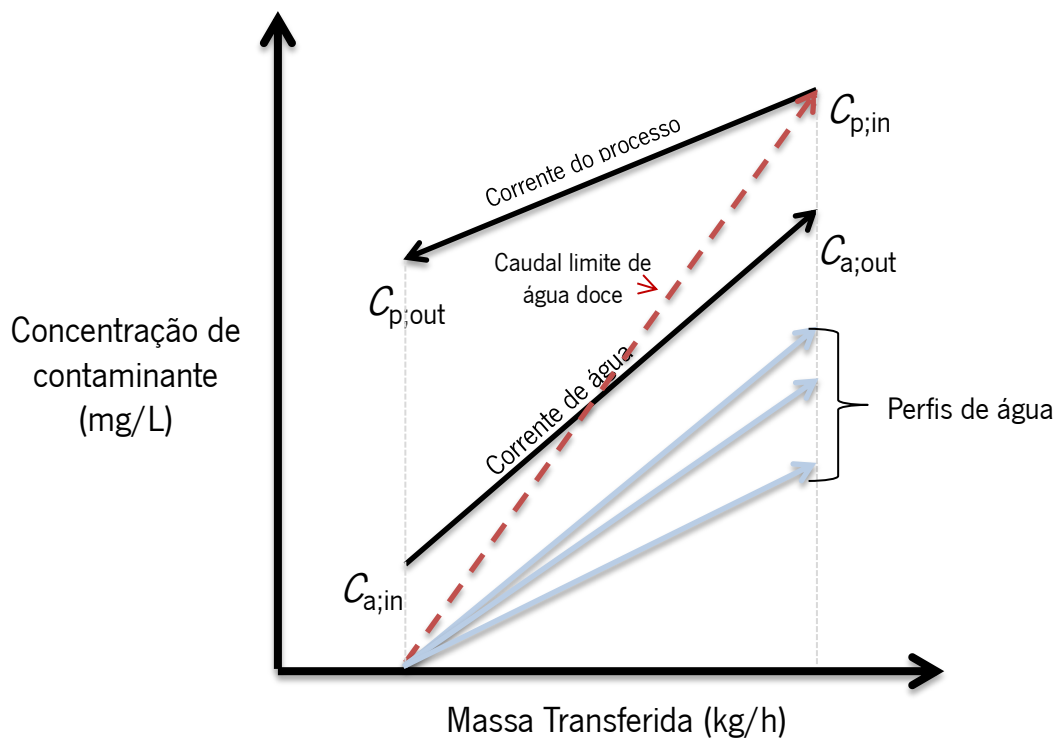


Figura 8 - Variedade de perfis de água.

A aplicação de uma análise de Pinch nos consumos de água em sistemas integrados passará por averiguar a possibilidade de reutilização de correntes. Desta forma, a maximização da concentração à entrada da corrente de água aumentará as possibilidades de reutilização de água de outros processos (Wang & Smith, 1994). Isto faz com que as abordagens sejam diferentes quando os processos são observados sob o ponto de vista unitário ou como um sistema integrado.



Especificadas as concentrações de entrada e saída de contaminante na água residual do processo, conhecendo a massa transferida, é possível determinar o caudal mínimo de água doce para tornar a operação eficiente.

A equação 1 relaciona o caudal de efluente do processo com as concentrações de contaminante no efluente e a massa transferida. Representa o caudal de efluente necessário para permitir a transferência de massa ( $\Delta m_{total}$ ) entre correntes, com concentrações limite à entrada e à saída ( $C_{p,in}$  e  $C_{p,out}$ , respetivamente).

$$f_p^{lim} \text{ (t/h)} = \frac{\Delta m_{total} \text{ (kg/h)}}{[C_{p,out} - C_{p,in}] \text{ (mg/L)}} \times 10^3 \quad (1)$$

Da mesma forma que a equação 1, a equação 2 apresenta o caudal mínimo de água necessário para transferir a mesma quantidade de massa ( $\Delta m_{total}$ ) em situações de concentração limite à entrada e à saída ( $C_{a,in}$  e  $C_{a,out}$ , respetivamente).

$$f_{\text{água}} \text{ (t/h)} = \frac{\Delta m_{total} \text{ (kg/h)}}{[C_{a,out} - C_{a,in}] \text{ (mg/L)}} \times 10^3 \quad (2)$$

Consoante a complexidade dos projetos, aliado aos fundos disponíveis, deve ser avaliada a possibilidade de reutilizar ou reciclar água entre os vários processos. A análise de Pinch deverá depois ser modelada conforme a decisão tomada.

#### 4.2.1. Caudal mínimo de água sem reutilização

Antes de avaliar a possibilidade de reutilizar água num sistema integrado de processos, deve ser determinada a situação ótima para a não reutilização das correntes de água, identificando individualmente qual o caudal mínimo de água doce necessário. Para isso, é representada graficamente a concentração de contaminantes em função da carga transferida para cada operação unitária, representado na figura 7a.

Tal como já referenciado, a determinação de um caudal limite de água não obriga a que seja o esse o perfil de água a utilizar, uma vez que existem outras opções que satisfazem as necessidades do processo (figura 7b).

A utilização de um método gráfico permitiu verificar que existe uma relação entre a linha de fornecimento de água ótima e a corrente de água do processo. O declive da linha de fornecimento de água é representado pela equação 3, enquanto a equação 4 demonstra a relação com caudal de água fornecido.

$$\text{Declive} = \frac{\Delta C_a \text{ (mg/L)}}{\Delta m_{\text{total}} \text{ (kg/h)}} \quad (3)$$

$$f_{\text{água}} \text{ (t/h)} = \frac{\Delta m_{\text{total}} \text{ (kg/h)}}{[C_{a,\text{out}} - C_{a,\text{in}}] \text{ (mg/L)}} \times 10^3 = \frac{1}{\text{Declive}} \times 10^3 \quad (4)$$

Existe uma relação inversa entre o declive da água fornecida no processo e o caudal mínimo de água necessário. Da mesma forma, pode-se afirmar que quanto mais inclinada a linha de fornecimento de água mais pequeno será o caudal a fornecer.

Uma vez que o objetivo passa por reduzir os consumos de água em processos unitários, sabendo de antemão que quanto mais inclinada a linha menor será o caudal fornecido, pode-se afirmar que os consumos de água são minimizados ao utilizar água doce com  $C_{a,\text{in}} = 0$ , maximizando a concentração à saída (deverá ser igual às especificações do processo). Já que o objetivo inicial passa por prever o caudal de água mínimo necessário numa situação de não reutilização, a teoria formulada anteriormente de que a concentração de contaminantes na água à entrada deveria ser maximizada para potenciar a reutilização de correntes, não necessita de ser tida em conta.

Baseando-se o princípio da não reutilização de correntes na utilização de água doce ( $C_{a,\text{in}} = 0$ ), o caudal de água mínimo necessário pode ser determinado através da equação 5:

$$f_{\text{água};\text{min}} \text{ (t/h)} = \frac{\Delta m_{\text{total}} \text{ (kg/h)}}{C_{a,\text{out}} \text{ (mg/L)}} \times 10^3 \quad (5)$$

Para a determinação do caudal de água mínimo necessário para um sistema de processos integrados sem reutilização de água, é necessário fazer o somatório dos caudais necessários para cada uma das operações unitárias, tal como demonstra a equação 6:

$$f_{\text{água,min}}^{\text{total}} (\text{t/h}) = \sum \frac{\Delta m_{\text{total}} (\text{kg/h})}{C_{\text{a,out}} (\text{mg/L})} \times 10^3 \quad (6)$$

No final deverá ser possível operar em cada processo exigindo uma menor quantidade de água.

#### 4.2.2. Caudal mínimo de água com reutilização

O modelo proposto por Wang e Smith (1994) contempla, além da não reutilização de água, a reutilização de água em sistemas integrados de processos.

Uma vez que se pretende avaliar o caudal de água mínimo para satisfazer as necessidades de um sistema integrado constituído por um conjunto de operações unitárias, a representação gráfica que relaciona a concentração de contaminantes com a carga transferida é feita para o processo global (que considera em simultâneo todas as correntes do processo), onde a variação de concentração ( $\Delta C_p$ ) para cada operação unitária é absoluta, enquanto a carga transferida ( $\Delta m_{\text{total}}$ ) é iniciada no ponto onde o processo anterior terminou (Hamaguchi, 2007), tal como demonstra a figura 9.

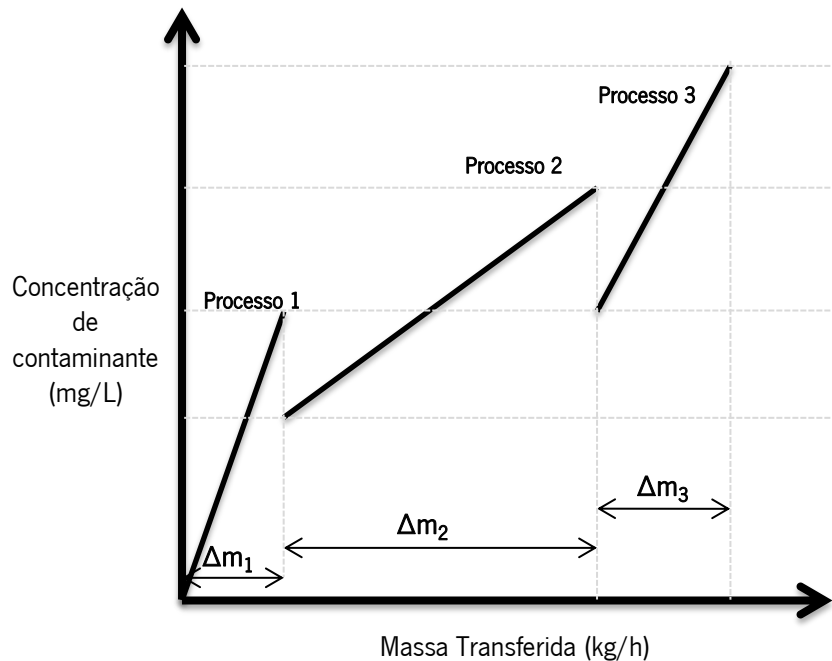


Figura 9 - Representação simultânea de todas as correntes de processo de uma unidade industrial.

Os efluentes podem ser reutilizáveis caso as concentrações de saída sejam compatíveis com as de entrada de um outro processo.

Após a representação gráfica das correntes de água de cada processo, é feita uma divisão do eixo das ordenadas (Concentração de Contaminantes) em intervalos de concentração  $k$  conforme a figura 10 (Mann & Liu, 1999).

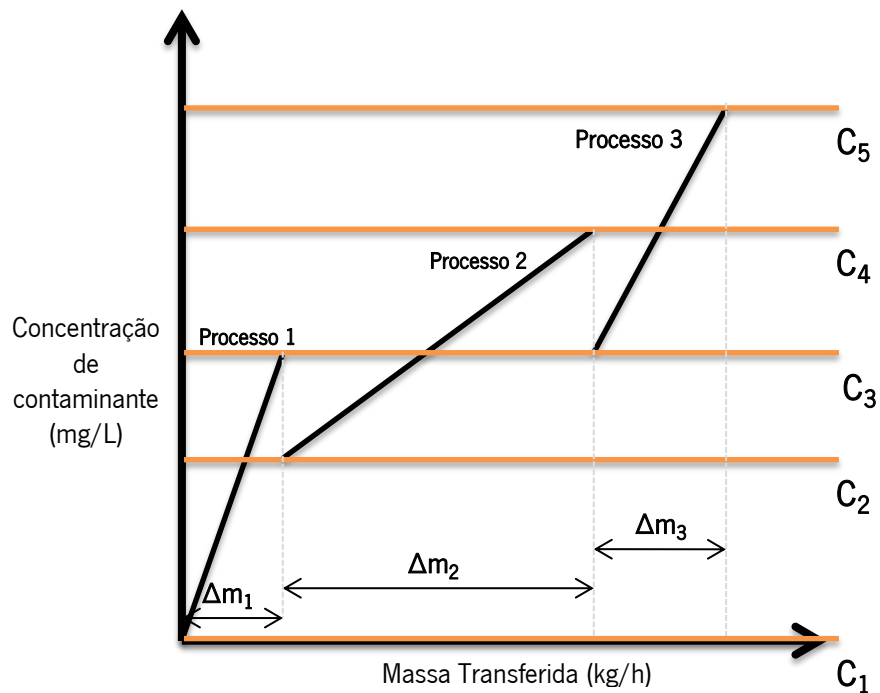


Figura 10 - Divisão da concentração de contaminante em intervalos de concentração  $k$ .

Este modelo de representação gráfica será a chave por detrás do método de *Water Pinch* proposto por Wang e Smith.

O passo seguinte passa por combinar os limites dos perfis de água de cada processo para cada intervalo de concentração  $k$  (1, 2, 3 e 4, representados na figura 10), sendo então possível traçar a curva característica do sistema integrado de processos, chamada de “Curva Composta de Concentração” (CCC) pelos autores (Mann & Liu, 1999). As figuras 11a e 11b representam a construção e aspeto final da CCC, respetivamente.

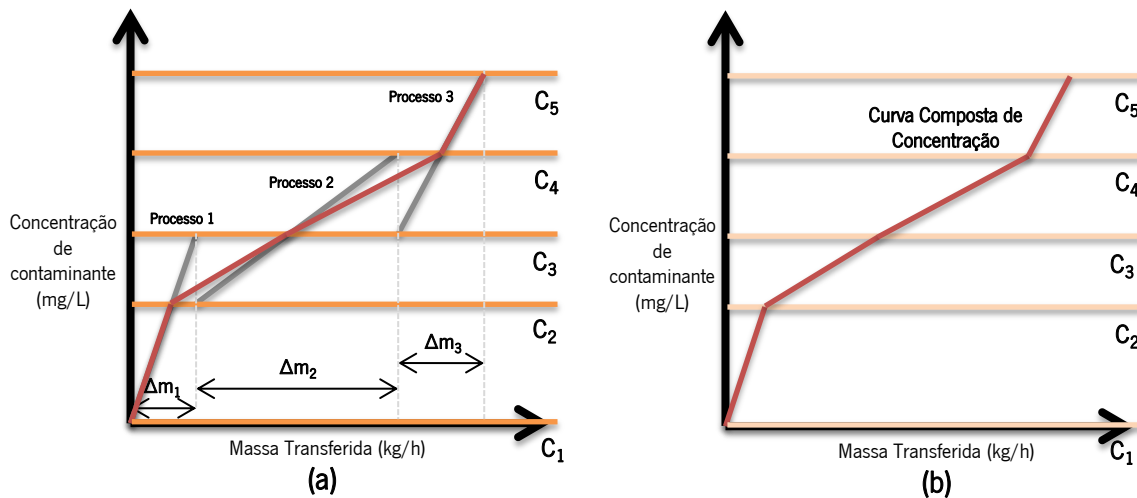


Figura 11 - (a) Construção da Curva Composta de Composição, (b) Curva Composta de Composição.

Após desenhada a CCC para o sistema integrado de processos é possível determinar o menor caudal de água necessário para poder satisfazer as necessidades do processo.

Para isso é necessário construir uma nova curva que represente a variação da concentração de contaminante na água ( $\Delta C_a$ ) em função da transferência de massa acumulada ( $\Delta m_{total}$ ). À medida que a carga transferida vai aumentando (o contaminante vai sendo transferido para a corrente de água), a concentração vai aumentado até atingir o valor máximo em  $C_{pinch}^*$ , isto depois de ter tido um valor mínimo de  $C_{a,in} = 0$  (Mann & Liu, 1999).

Como já referido anteriormente, quanto maior o declive menor será o caudal de água utilizado, por isso pretende-se que a linha representativa do caudal mínimo de água seja o mais inclinada possível, estando por isso mais próxima da CCC. Importa ainda referir que, tal como para casos anteriores, a curva referente ao caudal de água deve estar abaixo (ou ao mesmo nível) da curva de concentração do processo para que o fenómeno de transferência de massa ocorra. Assim sendo, o caudal mínimo de água doce é representado por uma reta com ordenada na origem ( $C_{a,in} = 0$ ) e que tangencia a CCC (Pinch de água doce), tal como representado na figura 12 (Kim, 2013).

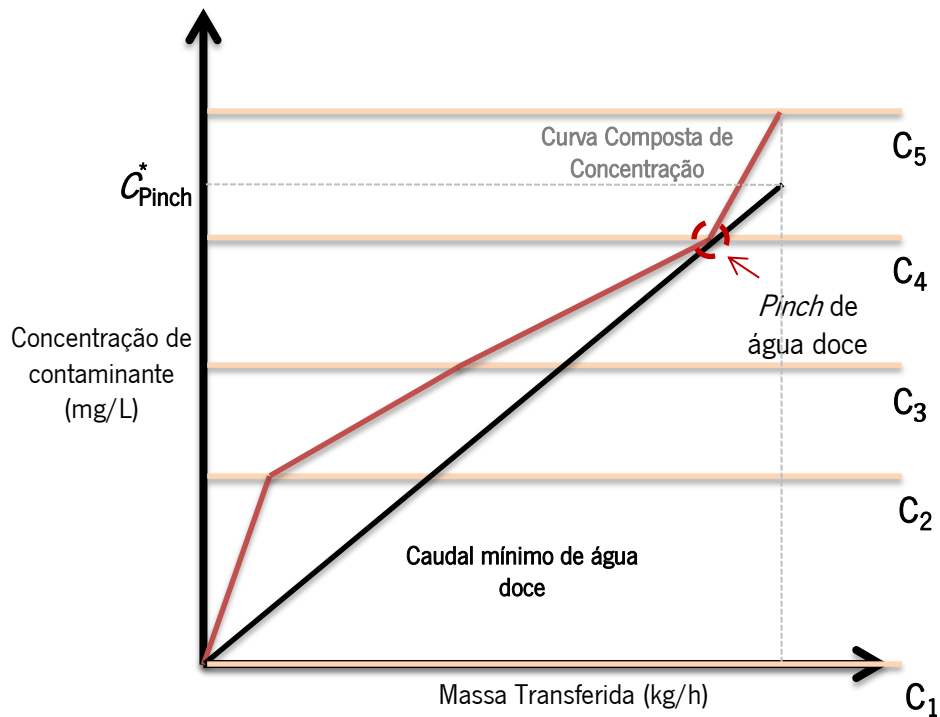


Figura 12 - Linha de fornecimento ótima de água.

A determinação do Pinch de água doce é importante uma vez que estabelece o declive da linha de água doce, permitindo determinar a concentração de contaminante na saída de água, utilizando o menor caudal possível ( $C_{pinch}^*$ ).

Uma vez que  $C_{a,in} = 0$ , o caudal de água mínimo necessário é dado através da equação 7:

$$f_{\text{água};\text{min}} (\text{t/h}) = \frac{\Delta m_{\text{Pinch}} (\text{kg/h})}{C_{\text{Pinch}}^* (\text{mg/L})} \times 10^3 \quad (7)$$

O objetivo final é de que  $f_{\text{água};\text{min}}$  seja inferior ao caudal utilizado atualmente. Só dessa forma a análise de Pinch pode ser considerada vantajosa na otimização de sistemas integrados de processos.

Wang e Smith (1994), além do método gráfico, propõem um modelo tabelar para a resolução do mesmo problema.

Tem em comum com a CCC a recolha de dados exaustivos que caracterizem o processo, mas com a vantagem de não ser necessário a construção de curvas de concentração, o que em certa parte favorece os casos de programação computacional (Wang & Smith, 1994).

Ainda assim o método gráfico demonstra o comportamento quer de cada corrente quer do sistema na globalidade, o que permite apontar erros e soluções mais facilmente (Mann & Liu, 1999).

Wang e Smith sugerem ainda que o método tabelar é mais prático quando utilizado em casos de um só contaminante (Hamaguchi, 2007).

O método tabelar inicia-se da mesma forma que o método gráfico, utilizando os mesmos intervalos de concentração  $k$  (1,2,3 e 4 do exemplo anterior) na construção da CCC, mas desta vez representados de forma tabelar (tabela 7).

Tabela 7 - Divisão da concentração em intervalos  $k$  no modelo tabelar.

Intervalo de concentração, $k$	Limites de concentração, $C_k$ (mg/L)	Massa transferida, $m_k$ (kg/h)	Massa acumulada, $\Delta m_k$ (kg/h)
1	$C_{1;in}-C_{1;out}$	$m_1$	$\Delta m_1$
2	$C_{2;in}-C_{2;out}$	$m_2$	$\Delta m_2$
3	$C_{3;in}-C_{3;out}$	$m_3$	$\Delta m_3$
4	$C_{4;in}-C_{4;out}$	$m_4$	$\Delta m_4$

Para cada intervalo de concentração  $k$  é calculada a carga de contaminante transferida por um processo  $p$  para a corrente de água:

$$m_{p,k}(\text{kg/h}) = \frac{f_p^{\text{lim}}(\text{t/h}) \times [C_{k+1} - C_k](\text{mg/L})}{10^3} \quad (8)$$

Desta forma é possível determinar a massa total transferida em cada intervalo de concentração  $k$ , como o somatório da massa transferida por cada processo nesse intervalo:

$$m_k \text{ kg/h} = \frac{[C_{k+1} - C_k](\text{mg/L})}{10^3} \times \sum_p f_p^{\text{lim}}(\text{t/h}) \quad (9)$$

Da mesma forma é possível determinar a massa acumulada ao final de cada intervalo:

$$\Delta m_k \text{ kg/h} = \sum_k m_k \text{ kg/h} \quad (10)$$

Através da tabela 7 é possível aplicar o método, organizando os dados recolhidos numa outra tabela, apelidada de “Diagrama de Intervalo de Concentrações” (DIC) pelos seus autores (Mann & Liu, 1999).

A tabela 8 exemplifica o aspeto geral de um DIC:

**Tabela 8** - Diagrama de Intervalo de Concentrações.

Concentração, $C_{k+1}^{lim}$ (mg/L)	1 ( $f_1^{dim}$ kg/h)	2 ( $f_2^{dim}$ kg/h)	3 ( $f_3^{dim}$ kg/h)	Carga Mássica, $m_k$ (kg/h)	Carga mássica acumulada, $\Delta m_k$ (kg/h)	Caudal, $f_k$ (t/h)
$C_1$	↑				0	
				$m_1$		
$C_2$		↑		$m_2$	$\Delta m_1$	$f_1$
				$m_3$		
$C_3$			↑		$\Delta m_2$	$f_2$
				$m_4$		
$C_4$					$\Delta m_3$	$f_3$
$C_5$					$\Delta m_4$	$f_4$

O caudal de água exigido para cada intervalo de concentração é determinado utilizando os valores de carga mássica acumulada e dos limites de concentração através de:

$$f_k(t/h) = \frac{\Delta m_k \text{ kg/h}}{C_{k+1}^{lim} \text{ mg/L}} \times 10^3 \quad (11)$$

No DIC considera-se o maior caudal obtido para cada intervalo de concentração ( $f_k$ ) como aquele que representa o Pinch de água doce, uma vez que é o caudal mínimo exigido para o processo (Wang & Smith, 1994).

Realizados os dois métodos é expectável que o resultado obtido seja semelhante em ambos os casos.

De referir que esta análise deve ser parte integrante de qualquer projeto na altura da sua conceção e não apenas como ferramenta de otimização, que é o objetivo deste projeto. Pode ser utilizado em todos os processos que utilizam água e sejam produzidos efluentes líquidos.



A aplicação da análise de Pinch pode permitir uma redução no consumo de água até 60 %, mediante o processo. Para o caso da produção de fibras, onde está inserida a atividade da MundoTêxtil, a redução do consumo de água pode atingir os 25 % (Linnhoff *et al.*, 1998).

#### 4.2.3. Diagrama de rede

Após a determinação do caudal mínimo de água que satisfaz o sistema integrado, é importante redesenhar o sistema de água que potencie a transferência de massa necessária e satisfaça os limites de concentração dos processos.

A representação do sistema pode ser feita utilizando várias técnicas, com destaque para o diagrama de blocos, o diagrama de rede ou o diagrama de conteúdo mássico (Mann & Liu, 1999). Na representação deste projeto foi utilizado o diagrama de rede uma vez que é o mais utilizado para sistemas com reutilização de água, apesar de também ser aplicável em casos de não reutilização.

Antes de mais, importa representar o sistema antes da aplicação da análise Pinch, independentemente de ser considerada a reutilização ou não de água. A figura 13 representa o circuito de água do exemplo já debatido anteriormente.

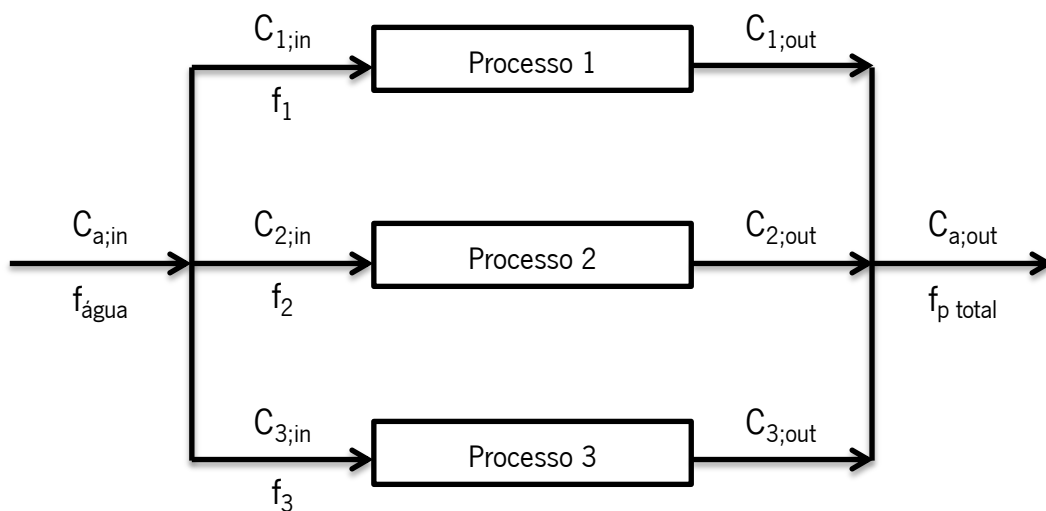


Figura 13 - Circuito de água.

A figura 14 apresenta o aspeto de um diagrama de rede para o exemplo sugerido sem reutilização de água.

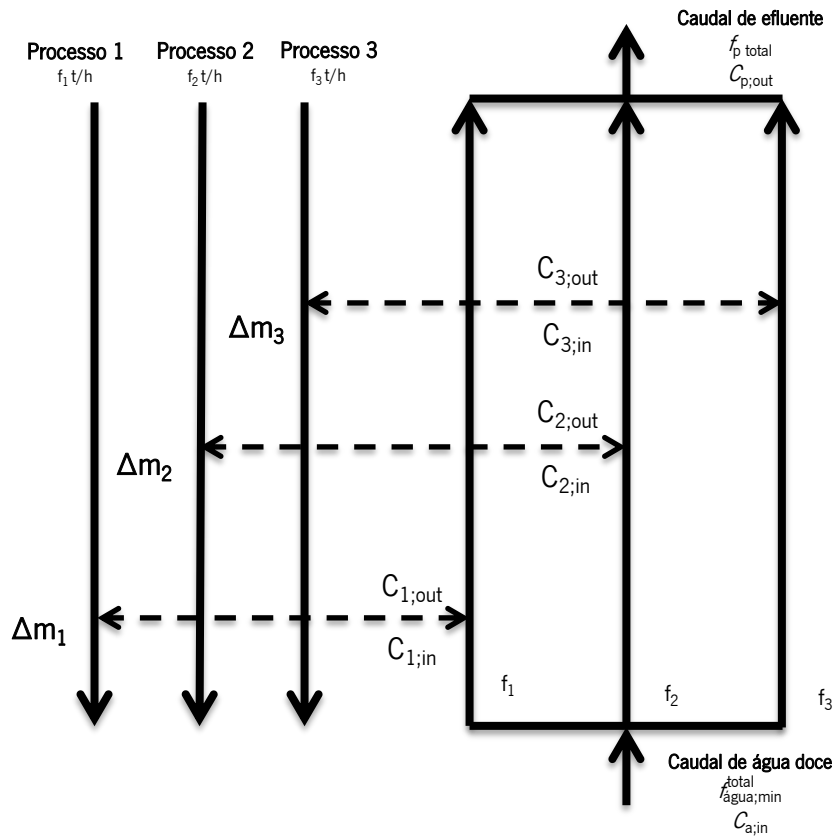


Figura 14 - Diagrama de rede sem reutilização de água.

As linhas representadas no lado direito do diagrama dizem respeito às correntes de água, desde a origem (água doce) até ao final do sistema de processos (efluente), enquanto as linhas representadas do lado esquerdo do diagrama correspondem à operação unitária (Mann & Liu, 1999). Tal como fundamenta a análise de Pinch, as correntes de água e do processo estão representadas em contracorrente.

As linhas a tracejado fazem a união entre o sistema integrado de processos e a respetiva operação unitária, apresentando ainda os valores de concentração na entrada e na saída (Kim, 2013).

Uma vez que não se pretende reutilizar água, o esquema final do sistema terá o mesmo aspeto no que toca às correntes de água e efluente. Quaisquer alterações na rede poderão estar associadas ao equipamento (tubagens, juntas, por exemplo) e não na esquematização.

Ainda assim, o diagrama de rede surge como uma ferramenta inestimável nos casos de reutilização de água, uma vez que permite subdividir o esquema em intervalos de concentração, potenciando as possibilidades de reutilização.

O diagrama (figura 15) começa a ser construído representando os mesmos intervalos de concentração usados para a construção da CCC. De seguida é traçada uma reta a todo o comprimento, do lado direito do diagrama, representado a corrente de água, e do lado esquerdo as correntes de processo com as respetivas características (Mann & Liu, 1999). A figura 15 exemplifica.

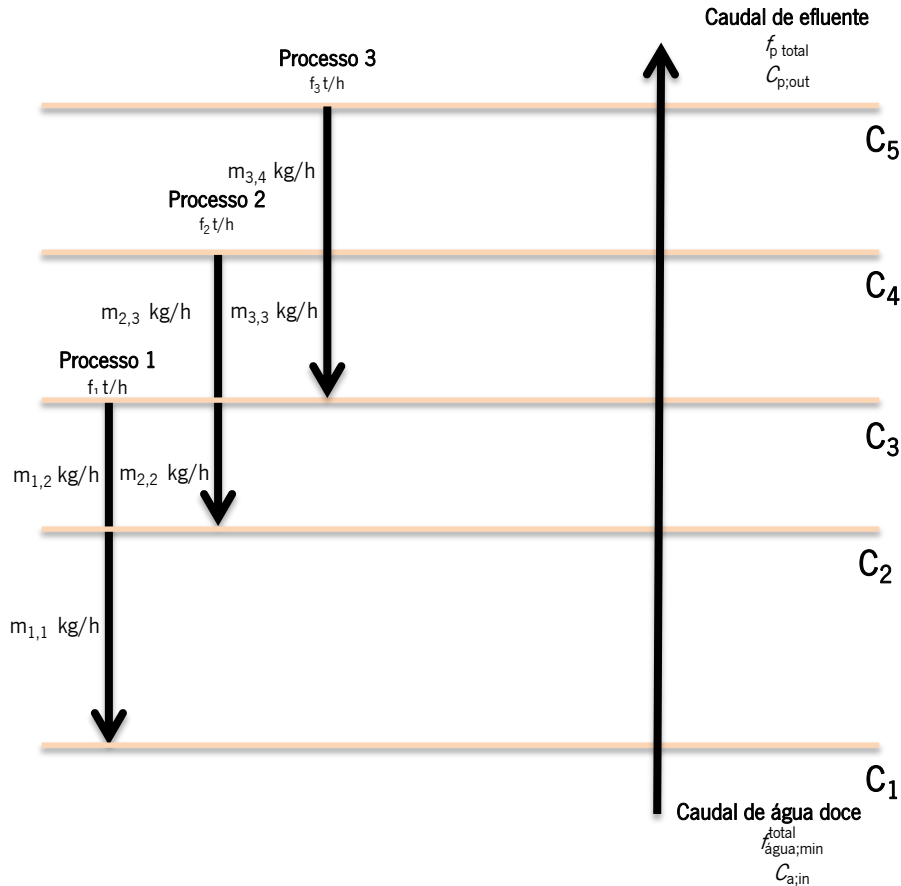


Figura 15 - Diagrama de rede com intervalos de concentração, correntes dos processos e caudal de água.

Em cada intervalo de concentração  $k$  é determinada a quantidade de contaminante transferido por cada corrente do processo  $p$ , através de:

$$m_{p,k}(\text{kg/h}) = \Delta m_{p,\text{total}}(\text{kg/h}) \times \left[ \frac{C_{k+1} - C_k}{C_{p,\text{out}} - C_{p,\text{in}}} \right] \quad (12)$$

A equação 12 é derivada da 8 representada anteriormente, tendo ambas o mesmo significado.

Tal como anteriormente,  $C_{k+1}$  e  $C_k$  representam os limites de concentração de cada intervalo  $k$ , enquanto  $C_{p,\text{out}}$  e  $C_{p,\text{in}}$  dizem respeito às concentrações limite da corrente do processo

no global. Esta determinação da massa transferida ( $m_{p,k}$ ) deve ser feita para cada corrente e em cada intervalo de concentração. Como se pode observar na figura 16, primeiro é determinada a massa de contaminante transferida pela corrente do processo 1 dentro dos limites de concentração do intervalo 1 ( $m_{1,1}$ ), representado na figura 16a. De seguida é feito o mesmo às correntes que são englobadas no intervalo de concentração 2 ( $m_{p,2}$ ), tal como na figura 16b (Mann & Liu, 1999).

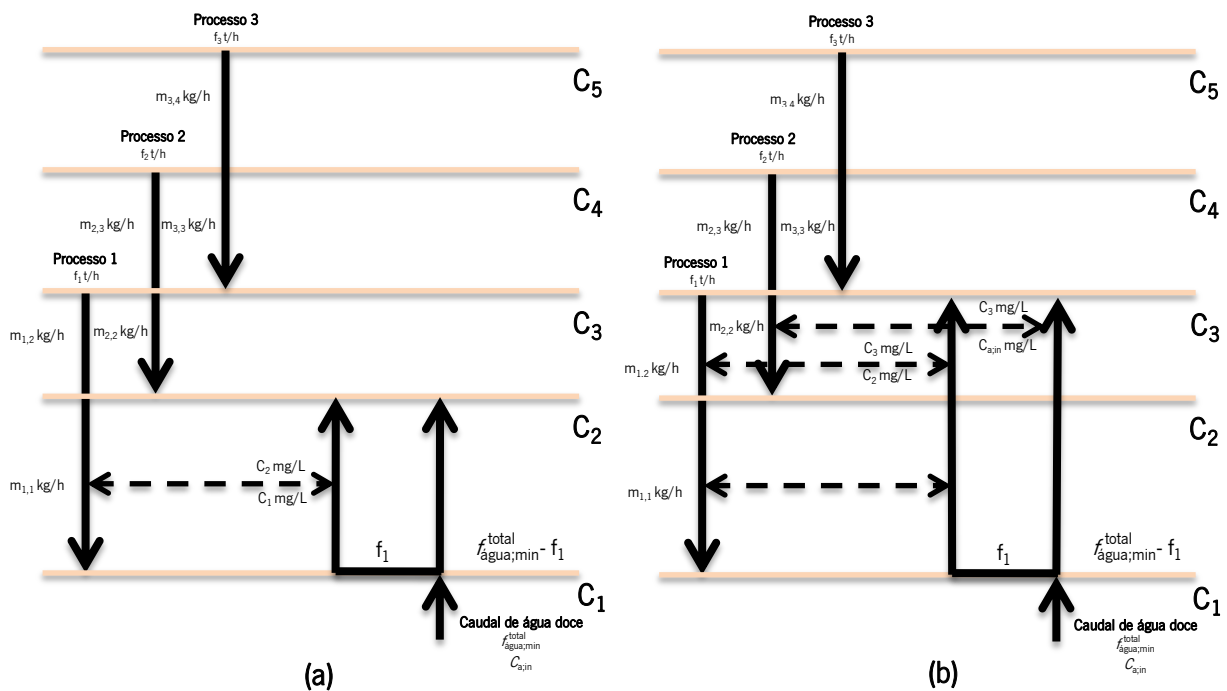


Figura 16 - (a) Diagrama de rede com a corrente de água do intervalo de concentração 1, (b) Diagrama de rede com as correntes de água dos intervalos de concentração 1 e 2.

Há ainda a acrescentar que para cada operação  $p$  contida num intervalo de concentração  $k$  é determinado o caudal de água necessário para ser possível transferir  $m_{p,k}$ , dividindo o caudal de água fornecido ao sistema inicialmente por cada corrente de operação:

$$f_{p,k}(\text{t/h}) = \frac{m_{p,k}(\text{kg/h})}{m_k(\text{kg/h})} \times f_{\text{água,min}}^{\text{total}}(\text{t/h}) \quad (13)$$

A utilização de água doce no processo apenas é considerada no início ( $f_{\text{água,min}}^{\text{total}}$ ), sendo depois dividida entre processos, consoante a necessidade ( $f_1$ ,  $f_2$  e  $f_3$ ).

Representadas todas as correntes do sistema integrado no segundo intervalo de concentração, é feito o mesmo procedimento para as correntes englobadas no terceiro intervalo de concentração (figura 17) (Mann & Liu, 1999).

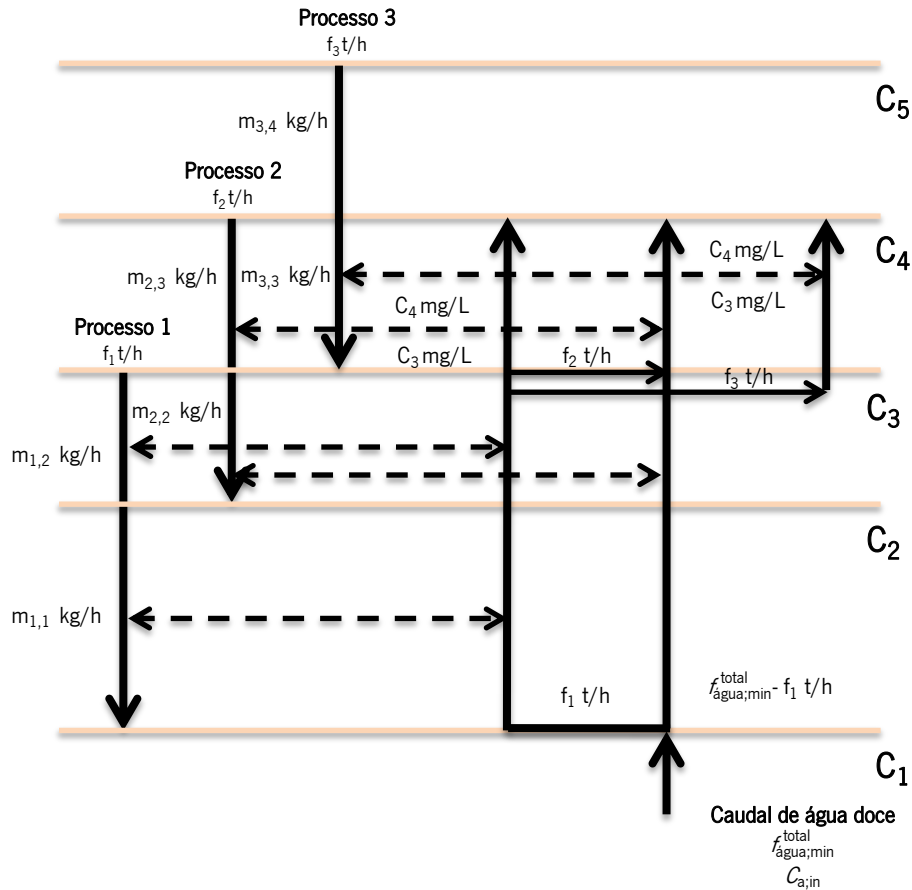


Figura 17 - Diagrama de rede com as correntes de água dos intervalos de concentração 1, 2 e 3.

Em cada processo é utilizada parte do efluente proveniente de outras operações, fornecendo o máximo possível, para que a água doce a entrar no sistema atinja o valor mais alto de cada intervalo de concentração ( $C_{k+1}$ ). Na figura 17, os caudais de efluente reutilizado estão representados como  $f_2$  e  $f_3$ , utilizados nos processos 2 e 3 respetivamente.

Uma vez que no sistema já foi introduzido o caudal de água mínimo para o processo 1 ( $f_1$ ), fica ainda parte do caudal de água exigido para o sistema no global por utilizar ( $f_{\text{água,min}}^{\text{total}} - f_1$ ). Esse caudal de água que ainda não foi utilizado entra no sistema, sendo que a água residual do processo 1 é utilizada para complementar o que falta. O excesso de água do processo 1 que não é necessário é enviado para tratamento (Kim, 2013). O mesmo raciocínio é feito para o intervalo de concentração seguinte.

No caso do exemplo utilizado, o quarto intervalo de concentração será o último, onde a determinação do caudal de água necessário é feita da mesma forma, e segundo a equação 13.

A figura 18 apresenta o aspeto final do diagrama de rede para um sistema integrado de processos, constituído por 3 operações unitárias, tal como o exemplo evocado.

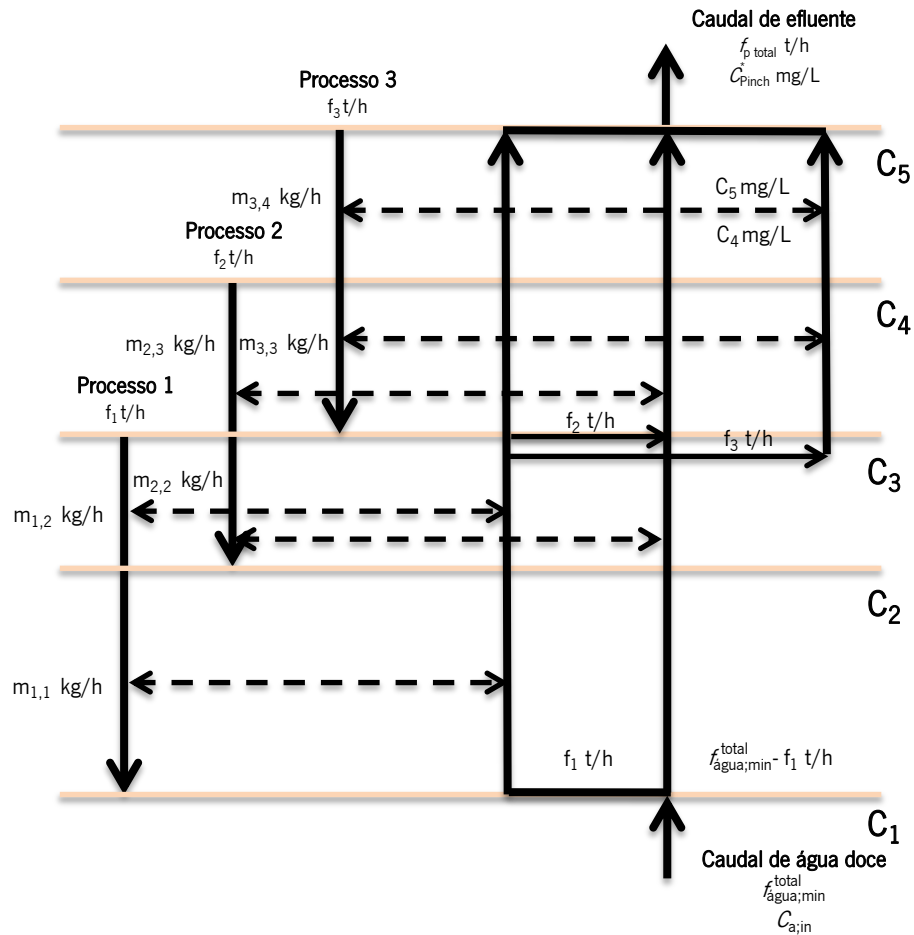


Figura 18 - Diagrama de rede com as correntes de água do processo global.

Concluído o diagrama de rede e determinadas todas as condições (concentrações de contaminantes entre intervalos de concentração, e caudal de água utilizado para cada processo), é tempo de redesenhar o sistema de água. O resultado da análise de Pinch, e consequente alteração dos circuitos de água, é apresentado sob a forma de um diagrama de blocos, tal como o apresentado na figura 19 (Mann & Liu, 1999).

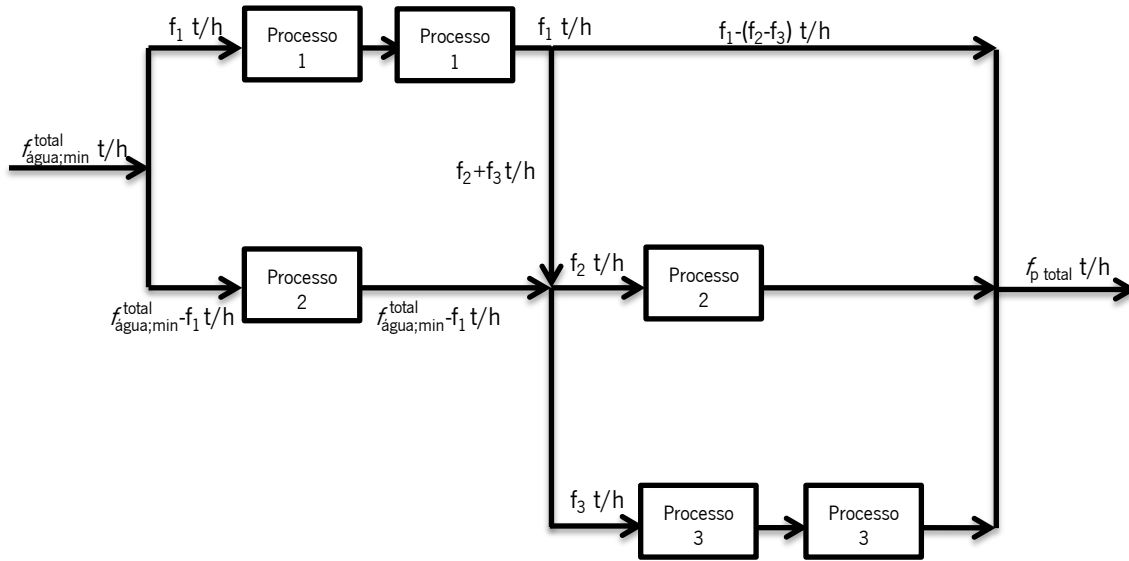


Figura 19 - Diagrama de blocos.

No momento da construção do diagrama de blocos é importante ter a noção das possíveis fontes de água, assim como da hierarquia que estas podem representar sob o ponto de vista de minimização dos consumos. A primeira escolha deverá recair, sempre que possível, na reutilização de água do mesmo processo, e só depois na reutilização de água de outros processos, isto porque as características (concentrações de entrada e saída de contaminantes) estarão mais facilmente em conformidade em efluentes do mesmo processo do que os de processos diferentes. A utilização de água doce deve ser sempre a última opção.

O último passo do *Water Pinch* passará por averiguar se as alterações a operar no sistema integrado de processos são economicamente sustentáveis.





## 5. A salinidade como contaminante em efluentes têxteis

### 5.1. Salinidade

O termo salinidade refere-se à presença de sais minerais dissolvidos na água. Cátions como  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , e aniões como  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$  ou  $\text{CO}_3^{2-}$ , são os mais comuns, existindo ainda quantidades vestigiais de elementos como B, Se, Sr, Li, SiO, Rb, F, Mo, Mn, Ba e Al (Hillel, 2000). Dando a água do mar como exemplo, os constituintes mais abundantes são os iões cloro (55 %), sódio (30,6 %), sulfato (7,7 %) e magnésio (1,1 %) (Talley *et al.*, 2011). É um parâmetro de avaliação físico-químico (Mamaev, 1975), e muitas das vezes relevado para segundo plano na caracterização de efluentes. Apesar de serem essencialmente inorgânicos, os sais presentes na água podem também, em minoria, ter origem orgânica.

Representa a quantidade total de sólidos, expressa em gramas, por quilograma de água (Sharma *et al.*, 2014). Por vezes é apresentada em % (Talley *et al.*, 2011), ou ainda como grandeza adimensional apelidada de *Practical Salinity Units* (psu) (Wu *et al.*, 2013) em algumas ciências específicas, como a oceanografia. A salinidade média da água do mar é de 35 g/kg, podendo ser representada como 35 %, ou apresentada de modo adimensional, isto é,  $S=35$  (Talley *et al.*, 2011).

No que toca ao processamento de efluentes, a salinidade pode limitar as opções de tratamento de várias formas. Tem influência no tratamento biológico (Yan *et al.*, 2008), limita a possibilidade de reutilizar água entre processos diferentes, e pode ainda resultar em contraordenações no que toca à descarga de efluentes (Filsinger *et al.*, 2006).

Uma elevada concentração de sais (superior a 1 g/L) (Linaric *et al.*, 2013) no efluente leva as células a um estado de *stress* osmótico, resultando na desidratação celular, plasmólise ou diminuição da atividade biológica, comprometendo a elevada eficiência verificada, normalmente, numa etapa de tratamento biológico otimizada (Nguyen, 2001). Há ainda a juntar a tudo isto a incapacidade dos organismos biológicos sobreviverem em condições atípicas (Linaric *et al.*, 2013).

A presença de sais inorgânicos nos efluentes tem influência na diminuição do rendimento substrato/biomassa, revelando-se ainda prejudiciais na floculação das lamas, aumentando a concentração de sólidos nos efluentes tratados. Estas dificuldades resultam numa

diminuição da redução da  $CBO_5$  e num aumento da turbidez do efluente após tratamento secundário e decantação de lamas (Nguyen, 2001).

Importa ainda referir que o excesso de salinidade não prejudica apenas a eficácia do tratamento, mas também o equipamento, contribuindo para a corrosão de juntas, tubos, caldeiras, bombas, etc.

Em relação aos efluentes têxteis (nomeadamente os resultantes da produção de atoalhados de felpo), estes apresentam elevados valores de salinidade, fruto do processo de tingimento onde é utilizado NaCl como eletrólito, e ainda da etapa de engomagem, também caracterizado pela salinidade e carga orgânica elevada (Qing *et al.*, 2013).

## **5.2. Métodos de medição**

Para a medição do teor em sais de uma amostra são utilizados vários métodos de medição. Neste projeto foram testados dois métodos alternativos para determinação da salinidade: os Sólidos Totais Dissolvidos e a *Practical Salinity Scale-1978*.

### **5.2.1. Sólidos Totais Dissolvidos**

O método mais primitivo passa pela evaporação total (a 105 °C) de um volume de água conhecido e posterior pesagem do resíduo sólido, de modo a conseguir estabelecer uma relação entre a quantidade de sais (g) por volume de água (L) (Clesceri *et al.*, 1998). O resíduo seco corresponde aos sais presentes na água, e diz respeito aos “Sólidos Totais Dissolvidos” (STD).

Antes de evaporada, a água deve ser filtrada para retirar sólidos suspensos que possam interferir no cálculo final, diminuindo a exatidão do método.

Utilizando este método, os resultados são expressos em g/L (ou em outras subunidades destas duas grandezas) ou em g/kg (considerando a massa volúmica da água 1000 kg/m<sup>3</sup>).

### **5.2.2. Practical Salinity Scale-1978**

Desde 1980 que a salinidade é determinada através da medição da condutividade elétrica em comparação com uma solução padrão de Cloreto de Potássio (KCl). É utilizada uma escala internacional, conhecida como *Practical Salinity Scale 1978* (PSS-78), e baseia-se na proporcionalidade existente entre o teor em sais de uma solução (salinidade) e a condutividade

existente na solução aquosa que se pretende medir. A condutividade é expressa, normalmente, em  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Talley *et al.*, 2011).

O facto de se basear numa comparação faz com que a PSS-78 seja uma unidade adimensional, razão pela qual a salinidade medida por este método vem acompanhada da sigla psu (Practical Salinity Units), utilizada apenas como medida de proporcionalidade e não como unidade de grandeza física (IOR, SCOR & IAPSO, 2010).

É um método particularmente utilizado em oceanografia, mas atualmente a sua utilização já se expande a outras áreas científicas (Talley *et al.*, 2011).

Utilizando este método, a salinidade é definida em função do ratio  $K_{15}$ , que representa a relação entre a condutividade elétrica medida numa amostra de água (a  $15\text{ }^\circ\text{C}$  e à pressão atmosférica) e numa solução aquosa (utilizando a amostra a medir como solvente) de Cloreto de Potássio, com uma concentração igual a  $32,4356\text{ g}/\text{kg}$ , e à mesma pressão e temperatura (Salinometry, 2014).

A salinidade prática relaciona-se com  $K_{15}$  como demonstra a equação 14:

$$S=0,0080+0,1692K_{15}^{1/2}+25,3851K_{15}+14,0941K_{15}^{3/2}-7,0261K_{15}^2+2,7081K_{15}^{5/2} \quad (14)$$

O resultado obtido para a salinidade prática depende da temperatura e da pressão, e deve ser representado apenas com o seu valor (exemplo: Salinidade do mar ( $S$ ) =35) (Brown *et al.*, 1989).

Se a medição da condutividade elétrica não for realizada a  $15\text{ }^\circ\text{C}$ , o ratio entre as duas condutividades medidas tem outro significado, assim como a sua relação com a salinidade prática. O anexo D apresenta a alternativa de cálculo de salinidade a temperatura diferente de  $15\text{ }^\circ\text{C}$ .

### 5.2.3. Comparação entre métodos

A utilização de cada um dos métodos depende muito da área de estudo. Em oceanografia, por exemplo, é utilizado o método da PSS-78, enquanto na caracterização de efluentes é utilizado o termo de STD para representar a salinidade de uma solução. Apesar disso, atualmente verifica-se já uma utilização mais universal da PSS-78 como forma de medição da salinidade (Talley *et al.*, 2011).

Ao utilizar os STD para representar a salinidade, assume-se que todos os sólidos dissolvidos são sais, incluído material orgânico, o que contribui para diminuir a exatidão do método.

É, ainda, um método que apesar de utilizar material simples (filtro, uma fonte de calor com capacidade para atingir os 105 °C, gobelés e balança), deve ser realizado utilizando o melhor material disponível, dada a menor exatidão natural. Realizado num espaço fechado (laboratório, por exemplo), para reduzir possíveis fontes de contaminação externa; utilizar filtros com maior porosidade, para permitir uma maior remoção de sólidos suspensos; ou ainda utilizar uma estufa, garantindo que a temperatura se mantém constante, não perturbando o processo, são algumas medidas que podem ser tomadas a fim de otimizar a medição.

Há ainda a acrescentar o tempo gasto na evaporação da água que, consoante o volume, pode demorar algumas horas.

Em comparação com método dos STD, o facto de se basear na condutividade elétrica faz com que a PSS-78 se foque apenas nos sais (ou iões dissolvidos na água), uma vez que são estes os condutores da corrente elétrica, tornando o método em certa parte mais exato (Katznelson, 2004).

A condutividade é medida utilizando uma sonda, ao mesmo tempo que é controlada a temperatura pelas razões referidas no ponto 5.2.2. Atualmente a maioria dos equipamentos de medição de condutividade vêm já munidos com a capacidade de medir a temperatura.

É mais rápido quando comparado com o método anterior, uma vez que ao tempo utilizado para calcular a salinidade prática usando a equação 14, existe apenas o tempo gasto na leitura pelo equipamento, que consoante a sua qualidade pode demorar apenas alguns segundos. Há ainda a considerar, em alguns casos, a necessidade de aquecer ou arrefecer a solução até aos 15 °C sob pena de ter de seguir outros caminhos matemáticos (Katznelson, 2004).

No que toca ao material envolvido, é tão complicado como o método dos STD, exigindo, além das sondas de medição de condutividade/temperatura, uma balança, uma espátula, gobelés de volumes variados e ainda uma vareta, material disponível em qualquer laboratório. Na lista de materiais é ainda necessário acrescentar KCl como reagente, além de outros equipamentos para aquecer/arrefecer a solução caso necessário.

A melhor maneira de determinar a salinidade de uma solução aquosa seria a de combinar estes dois métodos já de si relacionados, uma vez que a condutividade está relacionada com a concentração de sais presentes numa amostra, que por sua vez se correlaciona com o valor de STD, traduzindo-se isso em salinidade. Em efluentes têxteis, os STD apresentam uma relação linear com a condutividade, com um coeficiente de correlação de 88,37 % (Sampaio *et al.*, 2007).

O facto de uma amostra conter uma variedade de sais, além da atividade dos iões ser diferente, faz com que seja difícil estabelecer um coeficiente de correlação universal entre a condutividade e os STD para determinação da salinidade. Ainda assim existem alguns equipamentos que utilizam fatores de correlação, determinados através de uma série de soluções padrão, cujo teor em sais é conhecido, para traduzir a condutividade medida em salinidade (Katznelson, 2004).

#### 5.2.4. Resultados obtidos

Foi medido o valor da salinidade em quatro amostras de diferentes origens (água bruta, tinturaria de fio, tinturaria de felpo e engomagem) utilizando os dois métodos descritos anteriormente.

Foram recolhidas amostras simples do tanque de água bruta e do processo de engomagem, e amostras compostas dos processos de tingimento (fio e felpo) de modo a tornar os resultados o mais real possível.

Após recolha, as amostras foram filtradas utilizando a mesma fibra que o filtro de mangas da central de recuperação térmica.

Em seguida foi evaporada a amostra filtrada, com recurso a uma placa de aquecimento, para obter um resíduo seco (figura 20). A etapa seguinte passa pela pesagem do resíduo seco e consequente determinação da salinidade.

A tabela 9 apresenta os resultados obtidos utilizando como método de medição da salinidade os STD.



**Figura 20** - Resíduo seco de uma amostra de efluente da Mundotêxtil.

Tabela 9 - Salinidade de diferentes amostras através dos STD.

Amostra	Salinidade (mg/L)
Água bruta	867 ± 42
Tinturaria de fio	9620 ± 87
Tinturaria de felpo	12027 ± 46
Engomagem	25120 ± 53

O anexo B apresenta todos os valores obtidos e que permitiram determinar as médias presentes na tabela 9.

Como se pode observar na tabela 9, utilizando o método dos STD para determinar a salinidade, obtém-se um valor mais elevado para o efluente resultante do processo de engomagem.

A análise à água antes da sua utilização no processo permite concluir que esta se encontra em condições (no que à salinidade diz respeito) para ser utilizada, uma vez que o valor obtido é inferior a 1000 mg/L (Linaric *et al.*, 2013).

Em paralelo, foi medida a salinidade recorrendo à PSS-78 para comparação com os resultados obtidos através dos STD.

Após recolha das amostras, a temperatura foi estabilizada nos 15 °C, aquecendo a amostra retirada do tanque de água bruta, e arrefecendo as retiradas dos processos “quentes” (engomagem e tingimentos). A temperatura foi medida com o mesmo equipamento de medição da condutividade.

Estabilizada a temperatura nos 15 °C, foi medida a condutividade de 1 L de amostra pura antes de adicionar 32,4356 g de KCl. Após preparação desta solução foi medida a condutividade para determinação do ratio  $K_{15}$ .

Recorrendo à equação 14 foi determinada a salinidade prática das amostras recolhidas.

A PSS-78 apresenta os resultados em g/kg, isto é, g de sal por kg de água. Considerando a densidade da água 1000 kg/m<sup>3</sup>, os resultados foram convertidos em mg/L, para facilitar as conclusões a tirar.

Os resultados estão presentes na tabela 10:

**Tabela 10** - Salinidade de diferentes amostras através da PSS-78.

<b>Amostra</b>	<b>Salinidade (mg/L)</b>
Água bruta	667 ± 64
Tinturaria de fio	9340 ± 12
Tinturaria de felpo	12000 ± 129
Engomagem	9070 ± 99

O anexo C apresenta todos os valores obtidos e que permitiram determinar as médias presentes na tabela 10.

Ao contrário do que se conclui com a análise aos STD, a utilização da PSS-78 como método de medição de salinidade determinou que os efluentes do processo de tingimento têm um maior teor em sais, em detrimento da engomagem. A utilização da condutividade para determinação da salinidade permitiu restringir a medição apenas aos sais ativos em detrimento de todos os sólidos dissolvidos.

Excetuando a engomagem, as outras amostras demonstraram seguir a mesma tendência independentemente do método, tal como demonstra a tabela 11:

**Tabela 11** - Variação entre o método dos STD e a PSS-78.

<b>Amostra</b>	<b>Salinidade (mg/L)</b>		<b><math>\Delta_{1,2}</math></b>
	<b>STD (1)</b>	<b>PSS-78 (2)</b>	
Água bruta	867	667	23 %
Tinturaria de fio	9620	9340	3 %
Tinturaria de felpo	12027	12000	0,2 %
Engomagem	25120	9070	64 %

A variação dos resultados obtidos com os STD quando comparados com os da PSS-78 ( $\Delta_{1,2}$ ) é positiva em todos os casos, uma vez que a salinidade medida recorrendo aos STD é superior à medida através da PSS-78. Estes são resultados normais uma vez que nem todos os STD correspondem a sais, enquanto a utilização da PSS-78 prevê a determinação de uma salinidade prática.

A variação entre os métodos de medição para os processos de tingimento foi mínima, verificando-se uma diminuição 3 % no tingimento do fio e de 0,2 % no tingimento de felpo. No processo de tingimento, são utilizadas grandes quantidades de NaCl como reagente no

processo, sendo este (ou os seus iões dissolvidos) o principal responsável pelos resultados obtidos pelos dois métodos.

O processo de engomagem é caracterizado pela utilização de compostos dissolvidos de origem orgânica, como derivados de amido ou enzimas, que não influenciam a salinidade prática mas apenas o teor em STD. Este facto faz com que a PSS-78 seja um método mais exato na análise de algumas amostras e daí a diferença entre os métodos ser de 64 %.



## 6. Caso de estudo

Como já referido, o objetivo do projeto passou por aplicar os conceitos da análise de Pinch ao processo produtivo desenvolvido na Mundotêxtil.

É importante referir de antemão que o facto do processo industrial de produção de atoalhados de felpo ser bastante diversificado faz com que as características dos efluentes dos processos não sejam uniformes ao longo do tempo. Os resultados obtidos na análise de Pinch devem ser observados sob o ponto de vista académico, uma vez que verificam a aplicabilidade da integração de processos na indústria têxtil, e não do ponto de vista industrial, já que a sua aplicação é limitada.

Na análise foi apenas considerada a salinidade como contaminante principal. Existem contaminantes com maior peso na caracterização de efluentes (carga orgânica, por exemplo), mas a simplicidade dos métodos utilizados fez com que o teor em sais fosse o contaminante considerado. Ainda na medição da salinidade foram utilizados os métodos descritos anteriormente (ponto 5.2.4.).

Para a análise de Pinch foram levados em conta os valores obtidos através da PSS-78, já que acabaram por se revelar mais fidedignos pelas razões apresentadas no ponto 5.2.3. Na tentativa de aumentar a realidade dos valores obtidos foi utilizado, em paralelo, um fator de correção (obtido na bibliografia) que relaciona a condutividade com o STD, tentando aproximar os dois métodos de medição.

O facto de a análise de Pinch estar a ser utilizada como ferramenta de otimização faz com que os resultados obtidos sejam inferiores aos possivelmente alcançados se a análise fosse feita no planeamento do projeto.

### 6.1. Caracterização do processo

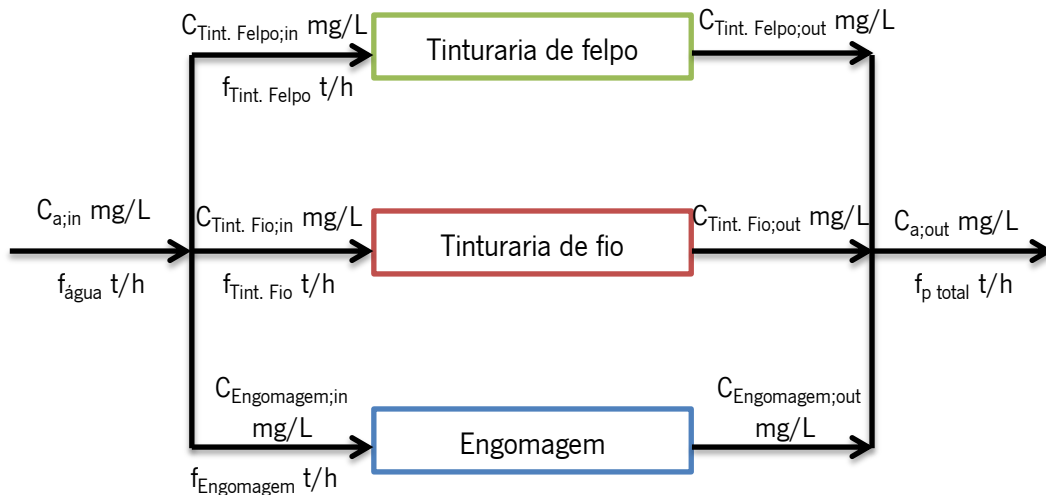
Tal como todos os autores sugerem, serão seguidos os passos para uma correta aplicação do *Water Pinch*, descritos no ponto 4.1.1.

O método inicia-se com a representação do sistema integrado do consumo de água.

No caso da Mundotêxtil foram considerados os processos de tingimento (fio e felpo) e de engomagem, já que representam 98 % dos consumos da empresa. O restante consumo divide-se entre atividades laboratoriais e consumo doméstico (no caso da Mundotêxtil corresponde aos balneários), mas uma vez que os caudais são mínimos, a juntar ao facto de não poderem ser

consideradas como etapas do processo produtivo, não foram consideradas na análise. A engomagem apesar de utilizar menos água (quando comparada com os processos de tingimento), foi incluída no projeto, dadas as características do efluente gerado.

A figura 21 apresenta um fluxograma simplista do circuito de água utilizado atualmente na Mundotêxtil.



**Figura 21** - Diagrama de blocos dos processos húmidos da Mundotêxtil.

Após a seleção e representação dos processos húmidos é necessário recolher todo o tipo de dados característicos dos processos, necessários para a análise de Pinch.

A tabela 12 apresenta os resultados obtidos na caracterização dos processos em relação aos caudais de água/efluente, assim como as concentrações de sais à entrada e à saída, em conjunto com a massa transferida por cada corrente de processo.

**Tabela 12** - Caracterização dos processos húmidos da Mundotêxtil.

Processo	$f_{\text{água}}$ (t/h)	$C_{\text{entrada}}$ (mg/L)	$C_{\text{saída}}$ (mg/L)	$\Delta m_{\text{total}}$ (kg/h)
Tinturaria de felpo	73,314	667	12000	830,867
Tinturaria de fio	14,990	667	9340	129,989
Engomagem	1,800	0	9070	16,326
<b>Total</b>	<b>90,102</b>			

A  $C_{\text{entrada}}$  diz respeito à concentração de sais presentes na água utilizada em cada um dos processos. A Mundotêxtil conta já atualmente com uma complexa rede de água, que tenta tirar o máximo proveito da reutilização, estando neste momento a reaproveitar água proveniente do arrefecimento da maquinaria. A verdade é que são verificadas continuamente situações de

brechas nas tubagens e/ou permutadores, o que faz com que parte do efluente se misture, aumentando a concentração de sais. Para servir de controlo, a empresa possui um sistema de monitorização de condutividade com um *set-point* estabelecido nos 0,5 mS/cm. Testes efetuados permitiram determinar que 0,5 mS/cm correspondem, na água utilizada nos processos, a 667 mg/L de sais. Esse valor é então considerado como concentração limite de entrada para os processos de tingimento.

No processo de engomagem deve ser utilizada água doce, uma vez que os sais presentes na água interferem na ação dos polímeros utilizados nos processos (Arjmand *et al.*, 2012).

A seleção dos dados é um passo importante da análise e que deve ser realizada com o maior rigor possível, sob pena de ser mais uma agravante a acrescentar às restrições impostas anteriormente.

Uma vez recolhidos todos os dados necessários, é então possível determinar o menor caudal possível de água para os dois casos pertinentes: sem e com reutilização de água.

## 6.2. Caudal mínimo de água sem reutilização

Apesar do foco da análise de Pinch recair sobre a reutilização de água, em primeiro lugar deve ser feita uma análise levantando a hipótese de não ser possível reutilizar água entre processos.

Para isso é considerada a utilização de água doce em todos os processos, isto é,  $C_{\text{entrada}} = 0$ . A tabela 13 dá conta disso mesmo:

**Tabela 13** - Caracterização dos processos húmidos sem reutilização de água.

Processo	$f_{\text{água}}$ (t/h)	$C_{\text{entrada}}$ (mg/L)	$C_{\text{saída}}$ (mg/L)	$\Delta m_{\text{total}}$ (kg/h)
Tinturaria de felpo	69,239	0	12000	830,867
Tinturaria de fio	13,917	0	9340	129,989
Engomagem	1,800	0	9070	16,326
<b>Total</b>	<b>84,956</b>			

A comparação entre as tabelas 12 e 13 permite verificar que, para cada processo, o caudal de água utilizada é minimizado quando é utilizada água doce em cada operação unitária.

O facto de  $C_{\text{entrada}}=0$ , maximiza o declive da linha de fornecimento de água traduzindo-se isso numa diminuição do caudal de água utilizado.

As figuras 22, 23 e 24, apresentam o limite do perfil de água de cada processo (a preto), assim como a linha de fornecimento de água ótima (a vermelho).

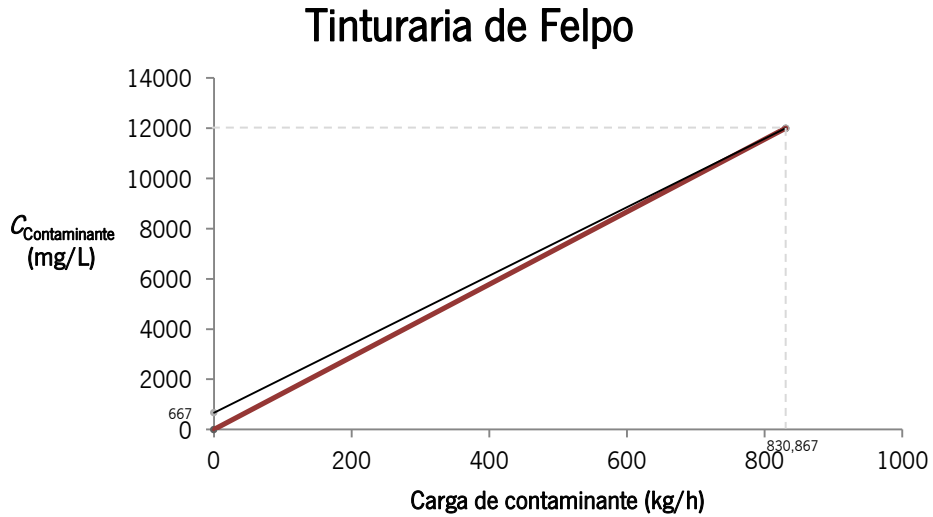


Figura 22 - Limite do perfil de água e linha de fornecimento de água ótima para o processo de tinturaria de felpo.

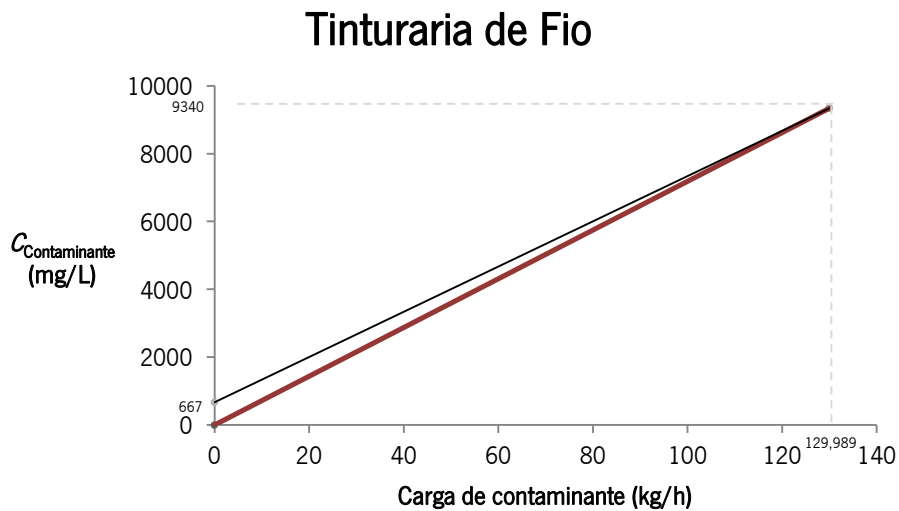
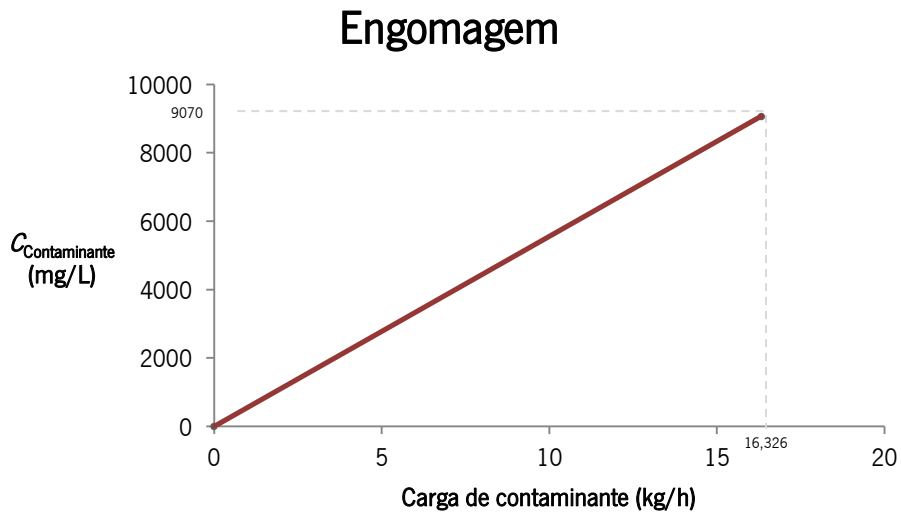


Figura 23 - Limite do perfil de água e linha de fornecimento de água ótima para o processo de tinturaria de fio.



**Figura 24** - Limite do perfil de água e linha de fornecimento de água ótima para o processo de engomagem.

Verifica-se que a utilização de água doce no processo só tem influência nas etapas de tingimento, uma vez que no processo de engomagem a linha de perfil de água e de fornecimento de água ótima são iguais (sobrepostas), estando por isso o processo a consumir o menor caudal de água possível quando observado individualmente.

A determinação do caudal mínimo de água é feita utilizando a equação 6.

O fornecimento de água doce no sistema, mantendo a massa transferida (característica do processo) e a  $C_{\text{saída}}$ , faz com que a poupança global de água no processo de água sem reutilização seja de 6 %.

Determinados os caudais mínimos para cada processo é tempo de redesenhar o circuito de água, que no caso do modelo de não reutilização não sofre alterações na estrutura, apenas nas características. A figura 25 representa o sistema de água dos processos húmidos da Mundotêxtil sem reutilização.

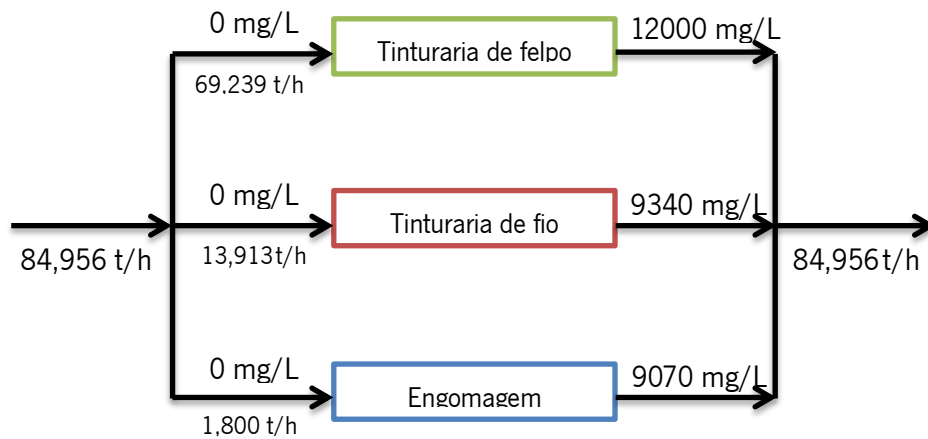


Figura 25 - Diagrama de blocos caracterizado dos processos húmidos da Mundotêxtil, sem reutilização de água.

### 6.3. Caudal mínimo de água com reutilização

A determinação do menor caudal de água contemplando a reutilização será a maior aplicação da análise de Pinch.

#### 6.3.1. Modelo gráfico

O método inicia-se com a representação gráfica dos dados da tabela 12, nomeadamente as concentrações de entrada e saída, e a massa transferida. A figura 26 apresenta o modelo gráfico utilizado.

### $\Delta C_p$ vs. $\Delta m_{total}$

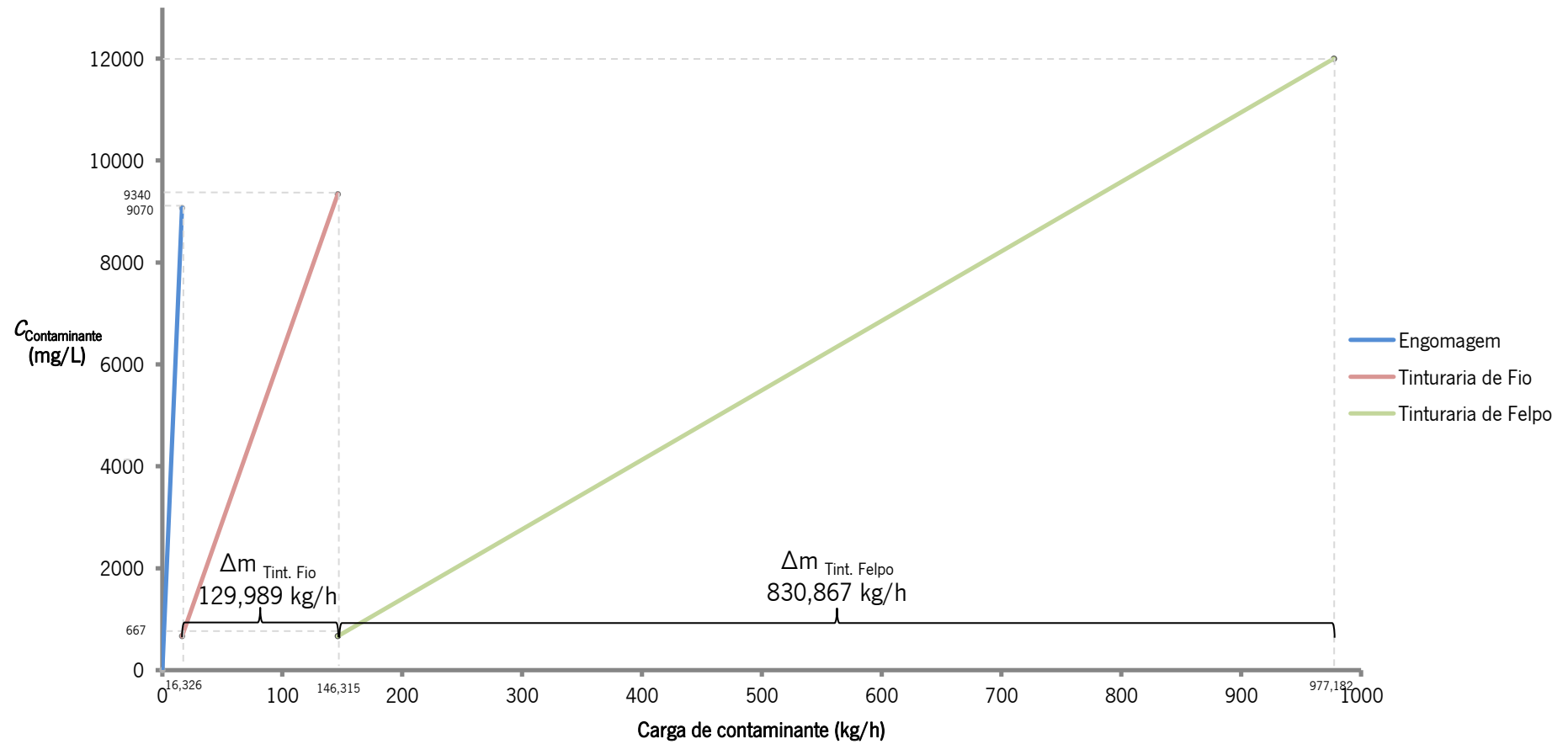


Figura 26 - Representação simultânea de todas as correntes de processo da Mundotêxtil.

É a partir do gráfico anterior que se inicia a construção da CCC. Antes, é necessário dividir o eixo das ordenadas em intervalos de concentração  $k$ , tal como apresentado na figura 27.

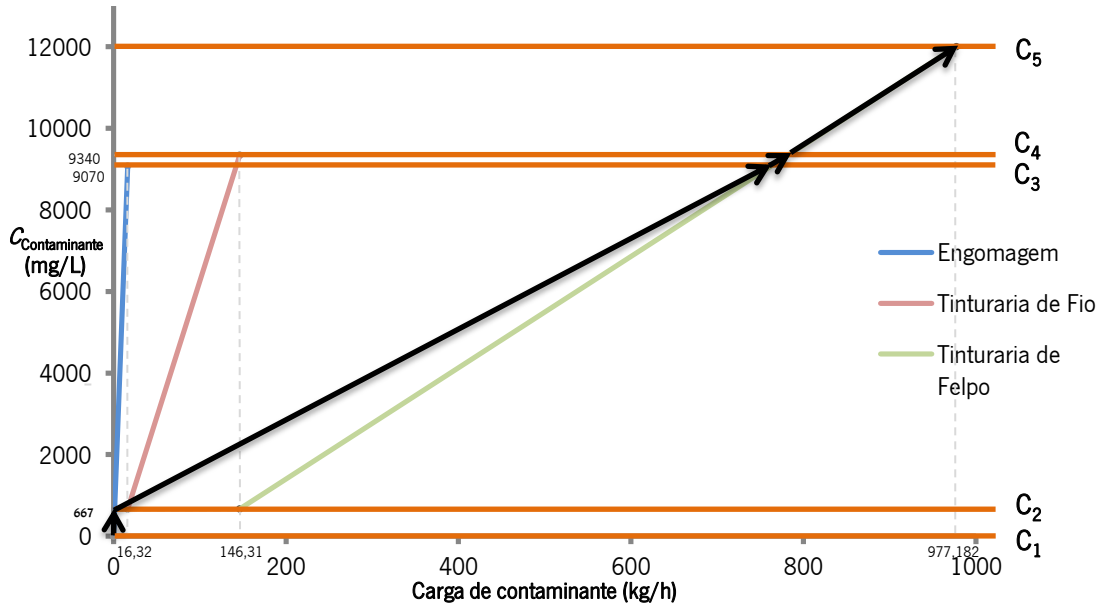


Figura 27 - Divisão da concentração de contaminante dos processos húmidos da Mundotêxtil em intervalos de concentração  $k$ .

As características dos processos fazem com que sejam criados 4 intervalos de concentração.

Para cada intervalo, são combinados os limites do perfil de água de cada processo no sentido crescendo da carga de contaminante. No intervalo de concentração 1 (delimitado por  $C_1$  e  $C_2$ ) apenas está inserido o processo de engomagem, e como tal será apenas a linha do perfil de água desse processo contemplada neste intervalo de concentração. No intervalo de concentração 2 (delimitado por  $C_2$  e  $C_3$ ), estão incluídos todos os processos, por isso a linha desenhada deverá ter início no primeiro processo que faz parte desse intervalo (no caso, a engomagem), terminando no limite de concentração superior ( $C_3$ ) do último processo (tinturaria de felpo).

A figura 28 apresenta a CCC para o processo produtivo da Mundo têxtil, tal como a linha representativa do caudal mínimo de água doce.



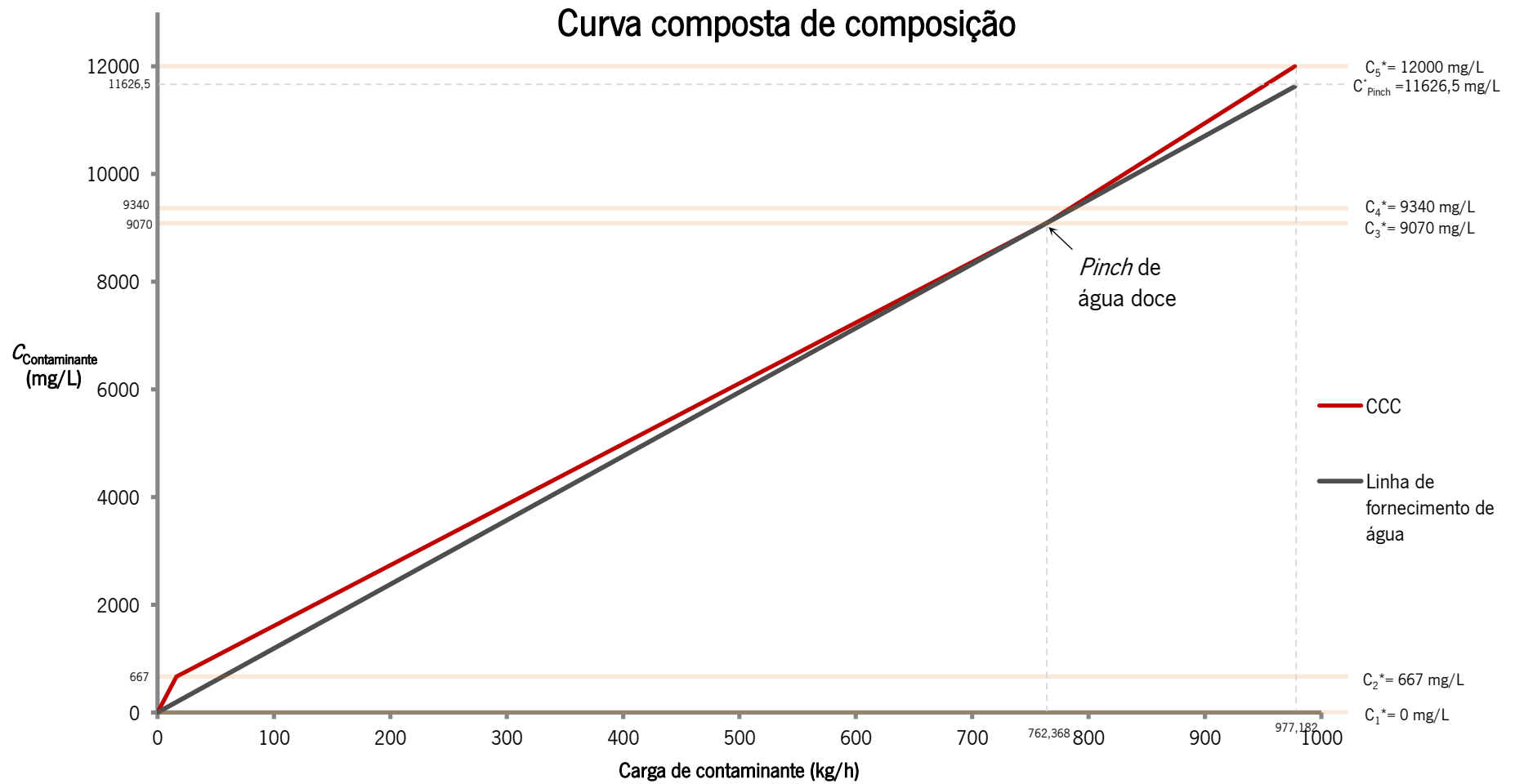


Figura 28 - CCC do processo produtivo da Mundotêxtil e a respetiva linha de fornecimento de água ótima.

A aproximação da linha de água à CCC traduz-se num aumento de declive, que por sua vez simboliza o menor caudal possível de água doce. Esse ponto que maximiza o declive está representado na figura 28 como “Pinch de água doce”.

A esse caudal mínimo está associada uma concentração de contaminante à saída do sistema ( $C_{\text{Pinch}}^*$ ), que no caso do processo da Mundotêxtil corresponde a 11626,5 mg/L de sais.

A figura 27 permite verificar que a linha de perfil de água do processo de tinturaria de felpo é responsável por caracterizar o “Pinch de água doce”. Desta forma, conhecendo a equação da reta característica do processo, bem como o valor limite de concentração do intervalo onde está incluído (no caso, corresponde ao intervalo número 3 e ao seu limite inferior de 9070 mg/L), é possível caracterizar o “Pinch de água doce” em relação à carga transferida (762,368 kg/h) e à concentração (9070 mg/L). O gráfico apresenta esses valores.

Conhecendo as características do “Pinch de água doce” é possível determinar a reta que representa o caudal mínimo de água, uma vez que são conhecidos dois pontos. A equação 15 apresenta a equação da linha de perfil de água ótima do processo produtivo da Mundotêxtil.

$$C_{\text{Contaminante}}(\text{mg/L})=11,898 \times \Delta m_{\text{total}}(\text{kg/h}) \quad (15)$$

Trata-se de uma reta com ordenada na origem e com declive igual a 11,898. A partir daqui a determinação do caudal de água pode ser direta, uma vez que, como já referido, o caudal de água mínimo é inverso ao declive da linha de fornecimento de água ótima (equação 4). É possível ainda utilizar uma abordagem mais matemática, utilizando a equação da linha de fornecimento ótima e sabendo que os valores limites são características do processo (logo,  $\Delta m_{\text{total}}=977,182$  kg/h), determinando a concentração de sais no final do processo ( $C_{\text{Pinch}}^*$ ), é possível utilizar a equação 7 uma vez que são conhecidas todas as variáveis.

A tabela 14 apresenta o valor do caudal mínimo, assim como a poupança de água que este representa.

Tabela 14 - Resultados da análise de Pinch considerando a reutilização de água.

Consumo de água inicial (t/h)	Consumo de água mínimo (t/h)	Poupança
90,102	84,048	7 %

A aplicação de um sistema integrado de processos na Mundotêxtil permitiria uma poupança de 7 % nos consumos de água, utilizando um método gráfico.

### 6.3.2. Modelo tabelar

Além do método gráfico foi utilizado o modelo tabelar, discutido no ponto 4.2.2. A tabela 15 apresenta de que forma foi dividida a concentração de contaminante em intervalos de concentração.

**Tabela 15** - Dados necessários para a utilização do modelo tabelar.

Intervalo de Concentração	Limites de Concentração (mg/L)	$m_k$ (kg/h)	Carga mássica acumulada $\Delta m_k$ (kg/h)
1	0 - 667	1,201	1,201
2	667 - 9070	757,125	758,326
3	9070 - 9340	23,841	782,167
4	9340-12000	195,015	977,182

A massa de contaminante transferida foi determinada calculando a carga transferida por cada processo em cada intervalo ( $m_{p,k}$ ) (tabela 16).

**Tabela 16** - Carga transferida por cada corrente de processo  $p$  em cada intervalo  $k$ .

$m_{p,k}$ (kg/h)	
$m_{\text{Engomagem},1}$	1,201
$m_{\text{Engomagem},2}$	15,125
$m_{\text{Tint. Fio},2}$	125,943
$m_{\text{Tint. Felpo},2}$	616,057
$m_{\text{Tint. Fio},3}$	4,0467
$m_{\text{Tint. Felpo},3}$	19,795
$m_{\text{Tint. Felpo},4}$	195,015

Determinada a carga correspondente a cada processo, fazendo o somatório de  $m_{p,k}$  para cada intervalo, é possível determinar a massa total de contaminante transferida em cada intervalo  $k$  ( $m_k$ ), através da equação 10.

Uma vez recolhidos e determinados todos os dados, é possível construir o diagrama de concentrações relativo ao processo industrial da Mundotêxtil (tabela 17).

**Tabela 17** - Diagrama de intervalos de concentração dos processos húmidos da Mundotêxtil.

Concentração , $C_{k+1}^{lim}$ (mg/L)	Engomagem (16,326 kg/h)	Tint. Fio (129,989 kg/h)	Tint. Felpo (830,867 kg/h)	Carga Mássica, $m_k$ (kg/h)	Carga mássica acumulada, $\Delta m_k$ (kg/h)	Caudal, $f_k$ (t/h)
0	↑					
				1,201		
667		↑	↑		1,201	1,8
					757,125	
9070					758,326	83,608
				23,841		
9340					782,167	<b>83,744</b>
				195,015		
12000					977,182	81,432

O caudal de água é determinado para cada intervalo, utilizando a carga mássica acumulada ( $\Delta m_k$ ) e o limite de concentração inferior do intervalo  $k$ , tal como na equação 11.

O caudal mínimo de água corresponde ao valor máximo obtido para o caudal de água em cada intervalo, uma vez que é o único que garante as exigências do processo.

A utilização de um modelo tabelar determinou o caudal mínimo de água de 83,744 t/h. Em comparação com a CCC, é exigido uma quantidade menor de água, mas que o global simboliza a mesma percentagem de água poupada (7 %).

#### 6.4. Diagrama de rede

Determinado o menor caudal de água, é necessário verificar quais as alterações a efetuar no sistema de consumo de água de modo a poder atingir os valores representados nas tabelas 14 e 17.

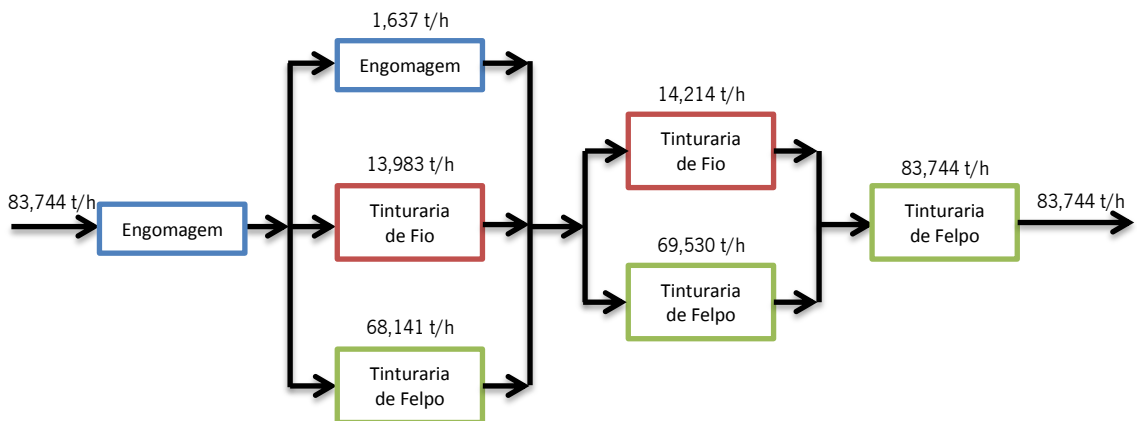
Para a construção do diagrama de rede foram utilizados os valores determinados no modelo tabelar, já que este também contempla a determinação da carga de contaminante transferida por cada processo em cada intervalo (equação 8), além de que representa o menor caudal obtido utilizando os dois métodos.

Os caudais de água necessários para cada processo foram determinados segundo a equação 13, e os resultados são apresentados na tabela 18.

**Tabela 18** - Caudal mínimo de água para cada processo, com reutilização.

Intervalo de Concentração	Processo	$f_{\text{água,min}}$ (t/h)
1	Engomagem	83,744
2	Engomagem	1,673
	Tint.Fio	13,930
	Tint.Felpe	68,141
3	Tint.Fio	14,214
	Tint.Felpe	69,530
4	Tint.Felpe	83,744

A figura 29 representa o novo circuito de água, obtido a partir do diagrama de rede, para o processo de produção da Mundotêxtil e que permitiria obter a redução dos consumos de água já propostos.



**Figura 29** - Circuito de água redesenhado para o processo de produção da Mundotêxtil considerando a reutilização de água.

## 6.5. Fator de correção

A utilização de dois métodos diferentes para medir a salinidade pode originar divergência de resultados. Na tentativa de reduzir este erro foi utilizado um fator de correção de 0,8837, que corresponde à relação entre a condutividade e os STD em efluentes têxteis (Sampaio *et al.*, 2007).

O fator de correção utilizado tem influência na concentração de contaminante à saída, e conseqüentemente na carga transferida. Na concentração à entrada não foi utilizado o fator, uma vez que os 667 mg/L de sais correspondem ao *set-point* definido como limite (no caso, correspondem a 0,5 mS/cm).

A tabela 19 apresenta os resultados com o fator de correção.

Tabela 19 - Utilização de um fator de correção nos valores de concentração à saída de cada processo.

Processo	$f_{\text{água}}$ (t/h)	$C_{\text{entrada}}$ (mg/L)	$C_{\text{saída}}$ (mg/L)	$\Delta m_{\text{total}}$ (kg/h)
Tinturaria de felpo	73,313934	667,000	10604,4	728,550
Tinturaria de fio	14,99	667,000	8253,758	113,709
Engomagem	1,8	0,000	8015,159	14,427
<b>Total</b>	<b>90,102</b>			

A partir daqui foi determinado o caudal de água mínimo construindo uma nova CCC, para de seguida ser desenhada a reta correspondente ao perfil de água ótimo (equação 16):

$$C_{\text{contaminante}} \text{ (mg/L)} = 12,020 \times \Delta m_{\text{total}} \text{ (kg/h)} \quad (16)$$

O inverso do declive do perfil de água ótimo corresponde ao caudal mínimo de água. A utilização do fator de correção resulta num caudal mínimo de água de 83,195 t/h, correspondendo isso a uma poupança de água de 8 %.

## 6.6. Discussão de resultados

Os resultados obtidos demonstram a aplicabilidade da análise de Pinch em processos de indústria têxtil, mais especificamente aos de produção de atalhados de felpo.

Independentemente do modelo utilizado (gráfico ou tabelar), ou da contemplação da reutilização ou não de água, o *Water Pinch* provou ser uma ferramenta de grande valia para a diminuição dos consumos de água.

A tabela 20 resume os resultados obtidos.

**Tabela 20** - Resumo dos resultados obtidos na análise de Pinch aos consumos de água.

Consumo de água inicial (t/h)	Consumo de água mínimo sem reutilização (t/h)	Consumo de água mínimo com reutilização (t/h)		
		Método gráfico	Método tabelar	Fator de correção
90,102	84,956	84,048	83,744	83,195
Poupança	6 %	7 %	7 %	8 %

A primeira conclusão a tirar é de que a poupança permitida pela simples reutilização de água (7 %) é superior quando comparada com a não reutilização (6 %). O facto desta diferença ser de apenas um ponto percentual dá conta da autonomia dos processos considerados. Como já explicado no ponto 3.2, o processo de produção de atalhados de felpo apesar de dever ser visto como um processo completo (figura 1), pode ser fragmentado em operações unitárias, isto é, consoante o objetivo do produtor, o tingimento pode passar pelo fio, pelo felpo, ou pelo fio e felpo (caso do felpo *jacquard*). Esta autonomia dos processos faz com que a reutilização de água possa vir a ser desvalorizada nos processos de produção de atalhados, já que o investimento a efetuar para as alterações na rede de água pode não ser compensado pela poupança que este permite. Este é de resto um dos fatores negativos da IP: a dificuldade de, por vezes, recuperar o investimento a curto/médio prazo.

A proximidade dos resultados obtidos para a reutilização de água, utilizando modelos diferentes (gráfico e tabelar), permitiu obter o mesmo valor de poupança de água (7 %), atestando a validade de ambos os modelos para a determinação do menor caudal de água.

Outra conclusão a retirar passa pela aplicação de um fator de correção (0,8837), cujo objetivo passou por maximizar a realidade dos resultados obtidos. O fator utilizado diz respeito à relação entre a condutividade e os STD observados em efluentes têxteis. A utilização deste fator

de correção permitiu obter a maior poupança de água possível, (8 %) quando comparado com os outros casos.

As limitações já citadas no ponto 6 fazem com que esta abordagem da análise de Pinch deva apenas ser observada do ponto de vista académico, uma vez que a sua aplicação é limitada ao caso real, pelos seguintes motivos:

- O facto do processo de produção de atalhados de felpo ser descontínuo e variável faz com que os valores recolhidos para os caudais de água em cada operação unitária sejam também variáveis, limitando as opções de reutilização, uma vez que em certas ocasiões o sistema criado pode não responder às necessidades;
- A variabilidade de processos afeta não só os caudais, mas também as características das correntes, logo as concentrações de contaminantes à entrada e à saída em cada processo são oscilantes;
- Apesar da salinidade ser um contaminante com peso na caracterização de efluentes (apesar de muitas vezes ser relevado para segundo plano), principalmente quando caracterizada como STD, existem outros contaminantes com maior relevância e que deveriam ser tidos em conta para uma análise de Pinch mais coerente;

Os resultados obtidos demonstram que a otimização dos consumos de água visando a redução e maximizando a reutilização, pode ser alcançada com recursos a técnicas matemáticas e utilizando vários modelos.

Ainda assim os resultados obtidos encontram-se longe dos 25 % de redução dos consumos sugeridos na bibliografia (Linnhoff *et al.*, 1998) como o valor limite para a redução na indústria de fibras.



## 7. Gestão de recursos hídricos disponíveis

A utilização de todos os recursos hídricos disponíveis deve fazer parte do ciclo da água para qualquer tipo de empresa, especialmente naquelas caracterizadas por grandes consumos hídricos.

É obrigação de qualquer instituição fazer um levantamento das hipóteses existentes para captar água, assim como conseguir identificar quais as fontes a utilizar e em que momentos.

Como já referenciado no capítulo 3, a Mundotêxtil tem atualmente vários pontos de captação. A água é captada em poços existentes nas instalações, sendo também feito um aproveitamento da água da chuva, completando a captação com a água proveniente do rio Vizela e do ribeiro de Sá.

### 7.1. Localização e identificação de recursos hídricos disponíveis

Uma inspeção mais detalhada nas instalações da empresa permitiu identificar mais duas possíveis fontes de água, assim como três reservatórios inativos. A figura 30 apresenta a disposição tanto das fontes como dos reservatórios no espaço da empresa.



Figura 30 - Planta das instalações da Mundotêxtil e sinalização de novas fontes e reservatórios de água.

As fontes de água encontradas dizem respeito a minas existentes no local antes da construção da empresa, e as obras efetuadas foram apenas no sentido de impedir que estas massas de água prejudicassem as estruturas e não no aproveitamento das mesmas. A figura 31 mostra o aspeto da fonte de água número 1.



Figura 31 - Fonte de água número 1.

O facto desta se encontrar perto do parque de resíduos da empresa torna imperativo fazer uma análise à qualidade da água. Foram realizados testes para determinar pH, cloro, ferro e condutividade, de modo a averiguar se a água estaria em condições para ser utilizada no processo, e ainda o caudal para verificar qual a massa de água que poderia ser captada.

Para o cálculo do caudal de água foram utilizados um cronómetro e um balde de 20 L para a recolha de água, sendo usado posteriormente um gobelé de 1 L para uma medida mais precisa do volume

O pH foi medido com recurso a um eletródo de pH *Combo* da HANNA. O mesmo equipamento foi utilizado para a medição da condutividade. A determinação do ferro e cloro foi feita utilizando o *kit* de medição “*Ion Specific Meter*” da HANNA Instruments. Os resultados foram condicionados pela gama de medição do aparelho, que no caso do ferro estende-se dos 0 aos 400 µg/L, enquanto para o cloro tem um valor máximo de medição de 3,50 mg/L.

As amostras foram recolhidas ao longo de cinco dias e em dois períodos diferentes: Março e Julho. Em Julho ambas as fontes estavam secas. Nos dois primeiros dias de recolha do mês de Março choveu, facto que não se verificou nos restantes três dias. Esta variação climática terá influência nos resultados observados.

A tabela 21 apresenta os resultados obtidos para a água da fonte nº1.

**Tabela 21** - Caracterização da água da fonte número 1.

	1		
	Sol	Chuva	Total
Caudal (L/s)	0,303 ± 0,011	0,482 ± 0,007	0,411 ± 0,098
pH	5,28 ± 0,198	5,367 ± 0,136	5,332 ± 0,146
Condutividade (mS/cm)	0,24 ± 0	0,233 ± 0,006	0,236 ± 0,005
Ferro (µg/L)	255,5 ± 14,849	>400	—
Cloro	0,045 ± 0,049	0,063 ± 0,006	0,068 ± 0,026

Existe uma diferença entre a água, não só no caudal mas também nas características, captada em dias de sol e em dias de chuva.

As figuras presentes nos anexos E.1 e E.2 demonstram de que forma ocorre essa variação nas amostras recolhidas da fonte de água número 1 e 2, respetivamente. Como esperado, o caudal de água verificou-se superior nos dias de chuva, facto que também está relacionado com a variação dos resultados obtidos para os outros parâmetros. Foi obtida uma maior concentração de ferro na água captada em dias de chuva, tendo sido mesmo ultrapassado o limite da gama de medição do aparelho utilizado, e como tal não é possível quantificar essa concentração.

Tal como o ferro, a concentração de cloro na água foi superior nos dias de chuva. A condutividade e o pH mantiveram-se constantes.

A figura 2 apresenta a fonte de captação n.º2.

Diz respeito a uma mina de água presente nas instalações, e ao contrário da fonte n.º1 que se encontra a céu aberto, esta encontra-se dentro de um armazém, que por um lado pode significar uma vantagem no que às condições da água diz respeito, uma vez que está resguardada em relação a possíveis contaminações externas, mas pode também revelar-se prejudicial para a estrutura da empresa, uma vez que a sua origem não é conhecida.

A tabela 22 apresenta os resultados obtidos para os parâmetros medidos.



Figura 32 - Fonte de água número 2.

Tabela 22 - Caracterização da água da fonte número 2.

	2		
	Sol	Chuva	Total
Caudal (L/s)	1,672 ± 0,457	2,299 ± 0,091	1,923 ± 0,474
pH	4,877 ± 0,119	5,22 ± 0,014	5,014 ± 5,014
Condutividade (mS/cm)	0,213 ± 0,213	0,215 ± 0,007	0,214 ± 0,005
Ferro (µg/L)	12 ± 19,079	50 ± 12,728	27,2 ± 25,607
Cloro	0,053 ± 0,015	0,13 ± 0	0,084 ± 0,043

Em comparação com a fonte de água n.º 1, a fonte de água n.º 2 apresenta um caudal bastante superior tanto para dias de chuva como para dias de sol, verificando-se ainda o mesmo comportamento em relação às variações atmosféricas, ou seja, o caudal de água registado foi superior nos dias de chuva.

A concentração de ferro foi mais alta em dias de chuva mas quando comparada com a fonte n.º1 verificou-se que regista valores mais baixos, indicador de que pode não ter origem mineral como a outra fonte de água. O mesmo comportamento se verificou para o caso do cloro.

A condutividade e o pH, tal como no caso anterior, mantiveram-se constantes.

Como se pode verificar para ambos os casos, o facto de chover influencia diretamente a quantidade captada mas também as características da água. A água da chuva faz a drenagem

dos solos, diluindo sais minerais como o ferro, ou ainda quantidades vestigiais de cloro, presente naturalmente no solo mas não reativo.

A presença de ferro está associada a uma diminuição do pH do solo, tornando-o mais ácido. Uma análise às tabelas demonstra que em dias de chuva o pH da água captada é mais ácido do que em dias de sol, e que a quantidade de compostos ferrosos diminui nos dias de sol, confirmando a relação existente entre os sais presentes no solo e a variação de pH (GMC, 2011).

O facto da condutividade se manter praticamente indiferente às condições atmosféricas leva a concluir que a baixa concentração de ferro faz com que esta quase não tenha impacto na condutividade verificada, contrariando desta forma a teoria de que um aumento do teor de ferro levará a uma diminuição da condutividade (Santos, 2004).

A maior quantidade de cloro presente na água deveria também ser responsável pelo aumento da condutividade de água, mas o facto do cloro presente naturalmente no solo ser não reativo faz com que este não tenha qualquer influência na condutividade da água (Jennings, 2014).

Pode-se concluir que as características da água destes dois novos pontos de captação propostos fazem com que esta possa ser utilizada no processo, podendo ser encaminhada para a ETA antes da sua utilização.

Aproveitar esta massa de água que aparece naturalmente nas instalações da empresa significa uma poupança ao nível dos outros pontos de captação, não só ao nível da quantidade de água (contribuindo para a saúde do planeta), mas também em tarifas a pagar, assim como em energia para a captar. A disposição das instalações da empresa e ainda mais especificamente dos novos pontos de captação representa uma vantagem uma vez que a instalação de um sistema de descarga por gravidade é suficiente para direccionar a massa de água para a ETA.

Além destas duas novas fontes de água descobertas, existe ainda a possibilidade de aproveitar água da chuva proveniente dos telhados de empresas vizinhas, uma vez que o desvio de água desses telhados está a ser feito para os terrenos da Mundotêxtil, não fazendo sentido não aproveitar esse facto.

Ao mesmo tempo que foram descobertas estas novas fontes de água, foram encontrados três reservatórios de água inativos nas instalações da empresa, tal como mostra a figura 30.

A utilização destes reservatórios permitirá à empresa gerir melhor os gastos de água, nomeadamente a quantidade captada, uma vez que enquanto estes reservatórios estiverem cheios, a captação de água de outras fontes revela-se desnecessária.

O reservatório nº1 encontra-se em pleno armazém de felpo, o que terá contribuído para o seu esquecimento, já que inúmeras vezes se encontrava tapado por grandes quantidades de felpo. Foi desde logo alvo de uma intervenção, uma vez que a bomba submersível utilizada para captar água se encontrava danificada. A colocação de uma nova bomba permitiu a utilização deste reservatório, assim como da água que sumia para o seu interior. Foi estimado um volume de 23 m<sup>3</sup> e um tempo de enchimento inferior a 24 h.

O reservatório nº2 apresenta características semelhantes ao nº1, uma vez que se encontra num outro armazém e possui ainda uma bomba submersível danificada. Verificou-se que, ao contrário do reservatório nº1, a água se encontrava contaminada, principalmente com óleos e gorduras. Este facto está relacionado com uma antiga serralharia que funcionava no local. Assim sendo, antes de se poder utilizar este reservatório será necessário retirar toda a água contaminada e proceder-se a uma lavagem do mesmo. A contaminação não permitiu um cálculo do volume útil deste reservatório.

Em relação ao reservatório nº3, importa referir que se encontra no espaço exterior da empresa (relativamente perto da fonte de água nº1), numa zona verde. Verificou-se que está inutilizado há bastante tempo dada a quantidade de detritos que se encontram a bloquear a passagem, impedindo a sua inspeção.

## 8. Sistema de tratamento de águas e águas residuais

### 8.1. Descrição da ETA



Figura 33 - Estação de tratamento de água da Mundotêxtil.

No caso da Mundotêxtil, a água é captada em poços existentes nas instalações da empresa e encaminhada, em conjunto com a água da chuva, para um tanque de água bruta secundário. Essa massa de água irá combinar com a água captada em dois pontos naturais distintos: um principal, o rio Vizela, e um secundário, o ribeiro de Sá. Toda esta água captada está armazenada num tanque de água bruta primário.

Após a mistura dos 4 pontos de origem no tanque, procede-se à regularização do pH por adição de hidróxido de sódio (NaOH). Este reajuste de pH tem como objetivo tornar o pH da água o mais próximo possível de 7 (pH neutro).

Neutralizado o pH, procede-se a uma pré-oxidação para facilitar a etapa de floculação. Como agente oxidante é utilizado hipoclorito de sódio (NaClO), sendo por isso possível chamar a esta etapa uma pré-cloragem, dada a natureza química do produto utilizado. A função da pré-cloragem será a de oxidar a matéria orgânica, assim como ferro presente, facilitando a sua precipitação (Pires, 2013).

Logo após a etapa de pré-cloragem é adicionado um agente floculante de origem química, para promover a agregação de partículas poluentes na água, facilitando a sua sedimentação (Correia, 2012).

Terminado o tratamento pré-primário é feita uma decantação com o objetivo de clarificar a água, melhorando a sua qualidade. No final desta etapa, designada como tratamento primário, a água apresenta já algumas características desejáveis como o pH neutro ou a ausência de cor. Ainda assim o processo não está terminado.

São feitas algumas etapas de afinação, incluídas no grupo do tratamento terciário, onde a água, após a decantação, é filtrada inicialmente em areia sílica, passando de seguida por um

processo de filtração por carvão ativado. Neste tipo de unidades de tratamento são utilizadas substâncias adsorventes (no caso, carvão ativado) para que, de maneira seletiva, ocorra a remoção, principalmente, de compostos orgânicos, mas também de outros contaminantes comuns na água, como ferro (Dantas *et al.*, 2011) e cloro (Schmidt, 2011). A filtração em carvão ativado pode ser definida como um processo de acumulação de substâncias na superfície de um composto adsorvente. A utilização de carvão ativado como adsorvente é muito vantajosa já que se trata de uma substância porosa, com uma área superficial interna superior a  $1000 \text{ m}^2/\text{g}$  (Balanay *et al.*, 2011). Ainda assim é uma unidade de tratamento que, quando mal dimensionada, pode colocar o processo de tratamento em risco, e como tal deve estar devidamente otimizada. Fatores como o sentido do fluxo da água (ascendente ou descendente), o tempo de contacto da água com o carvão, a altura e o diâmetro da coluna de adsorção, assim como o caudal de água a tratar (Metcalf & Eddy, 2003) devem ser tidos em conta para um correto dimensionamento do filtro de carvão ativado, de modo a tornar a unidade não só funcional mas também economicamente vantajosa.

Terminado o processo de adsorção a água está em condições para ser utilizada tanto no processo produtivo como em necessidades domésticas da empresa. A figura 34 esquematiza o processo de tratamento que ocorre na ETA da Mundotêxtil.

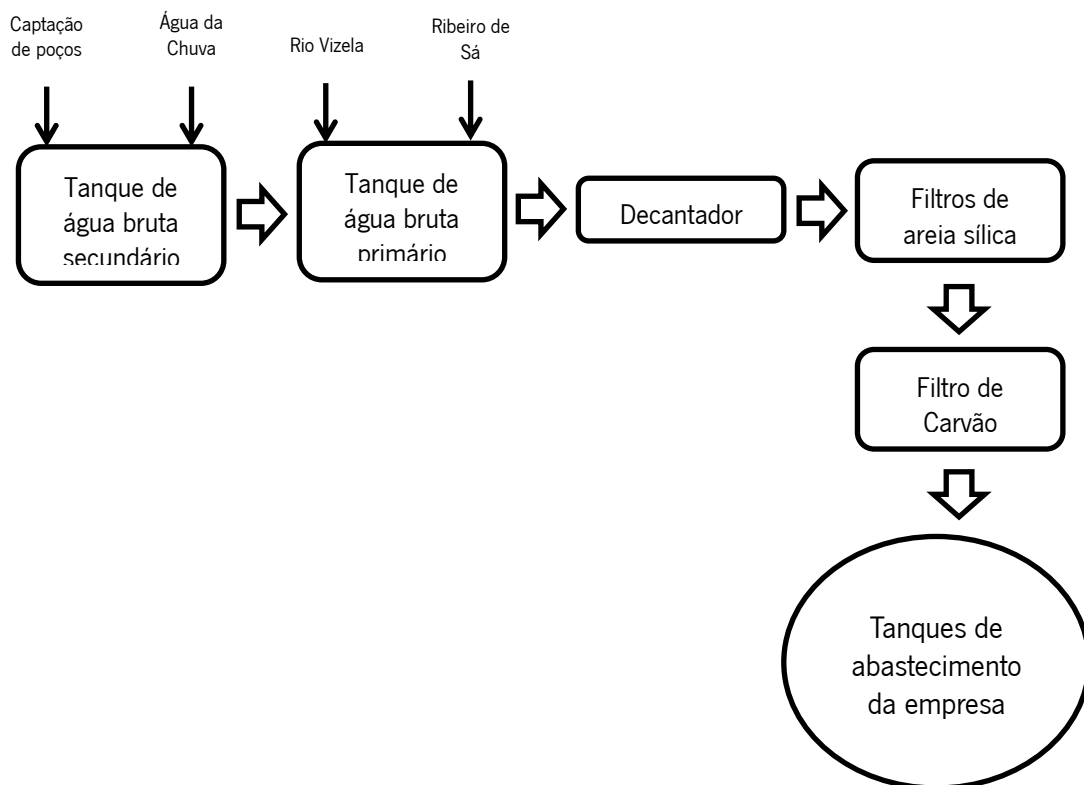


Figura 34 - Processo de tratamento de água.



## 8.2. Descrição da ETAR



Figura 35 - Estação de tratamento de águas residuais da Mundotêxtil.

Associado a um elevado consumo de água está a produção de quantidades semelhantes de efluente. Esse efluente resultante do processo de produção é encaminhado para dois locais diferentes de tratamento.

Parte do efluente gerado é descarregado no SIDVA, após um pré-tratamento físico, que envolve etapas como a gradagem e tamização (figura 36), em que o objetivo passa pela remoção de sólidos suspensos, não só como parte de tratamento mas também para prevenir a danificação de algum equipamento a jusante (Coelho, 2008). Após estas etapas, o efluente é homogeneizado num tanque de equalização. Na tabela 3 pode-se observar a quantidade de efluente descarregado no SIDVA.

Ainda assim, grande parte do efluente é tratado nas próprias instalações, uma vez que a empresa está dotada de uma estação de tratamento de águas residuais.

Importa ainda referir que a empresa faz a seleção e separação de dois tipos de efluentes: os quentes e os frios. Esta separação permite recuperar a energia contida sob a forma de calor no efluente de temperaturas mais elevadas, antes que ocorra o arrefecimento por mistura com efluentes menos quentes. Para isto a empresa conta nas suas instalações, além da ETA e ETAR, com uma central de recuperação térmica. O aproveitamento do calor contribui para uma melhor e mais segura sustentabilidade energética da Mundotêxtil.



Figura 36 - Gradagem e tamização.

O tratamento inicia-se da mesma forma para os dois tipos de efluentes (quentes e frios) e para o efluente descarregado no SIDVA, ou seja, é feita uma gradagem seguida de tamização antes do efluente ser encaminhado para o tanque de equalização (figura 37), onde serão homogeneizadas as características do efluente (Hilsdorf, 2008), uma vez que a empresa opera não só a ritmos diferentes, mas também com produtos de



**Figura 37** - Tanque de equalização.

características diferentes, o que se traduz numa imensa variedade de efluentes gerados. A esta variedade não é alheio o facto do processo de tingimento (principal responsável pela produção de efluentes) ser um processo descontínuo, onde consoante a etapa de tingimento, o efluente descarregado possui determinadas características. No tanque de homogeneização, o efluente é sujeito a agitação constante para facilitar a sua equalização.

Após as etapas de tratamento pré-primário, o efluente é encaminhado para o tratamento biológico (tratamento secundário). São utilizadas lamas ativadas num tratamento aeróbio, com oxigénio puro como forma de arejamento do tanque. O objetivo desta etapa passa por remover sólidos dissolvidos orgânicos biodegradáveis e sais inorgânicos (Pinheiro & Lourenço, 2007).

As lamas são compostas por uma cultura microbiana mista (bactérias, leveduras, microalgas, fungos, protistas unicelulares e organismos multicelulares) que rapidamente se adaptam às condições e características do efluente a tratar. É na adaptação dos microrganismos que está a chave do sucesso do tratamento biológico. O balanço desta operação pode ser resumido através da conversão de matéria orgânica dissolvida e coloidal em gases, compostos inorgânicos e biomassa (Pinheiro & Lourenço, 2007). Esse excesso de biomassa resultante do crescimento, em conjunto com o efluente tratado, é decantado permitindo a sedimentação das lamas por gravidade. Parte das lamas sedimentadas é reciclada novamente para o tanque (purga de lamas), enquanto outra parte é adensada e prensada antes de enviada para aterro. O escorrimento resultante da prensagem das lamas é enviado para o tanque de homogeneização.

Ainda no tanque biológico é adicionado um coagulante de origem química, em que o objetivo passa por auxiliar na remoção da cor.

O processo de tratamento do efluente só termina após o tratamento terciário (também chamado de tratamento de afinação). As etapas deste tipo de tratamento têm como objetivo melhorar algumas características do efluente, permitindo que este cumpra os requisitos legais, podendo mesmo a água ser reutilizada (Filho, 2007). O efluente, após decantação, é sujeito a uma ozonização para que ocorra não só uma descoloração suplementar, mas também a remoção/desinfecção de microrganismos provenientes do tratamento biológico (Almeida *et al.*, 2004). Após a ozonização, o efluente atravessa uma câmara de desgaseificação de ozono antes de se efetuar a sua descarga no rio Vizela.

A figura 38 esquematiza de forma simples o processo de tratamento operado na ETAR da Mundotêxtil.

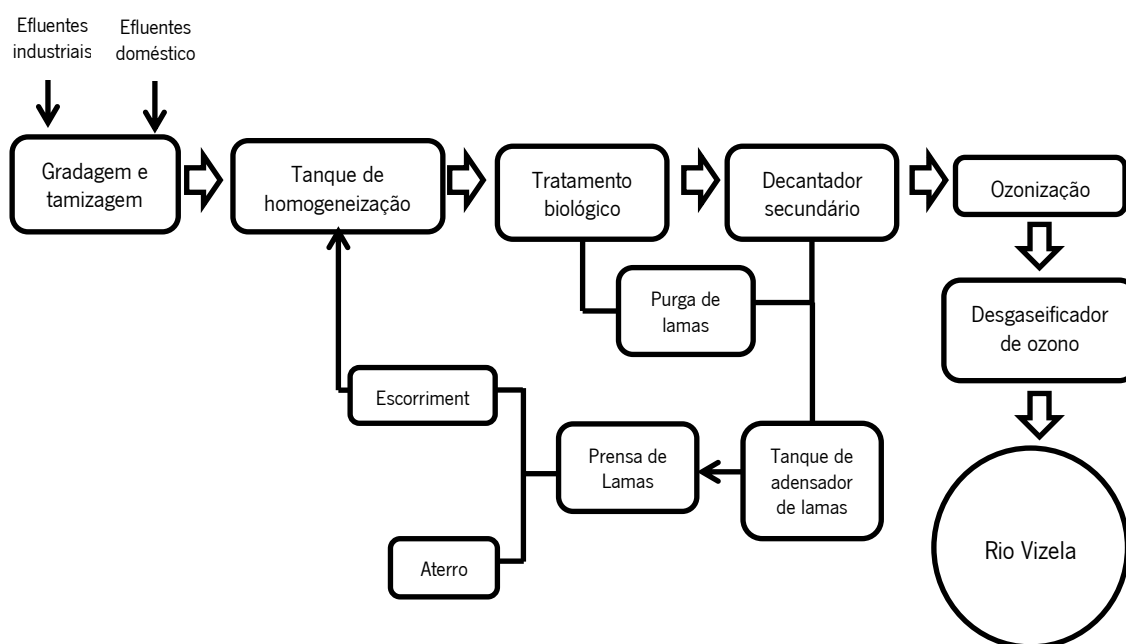


Figura 38 - Processo de tratamento de água residual.

A otimização de todas estas unidades de tratamento, assim como a avaliação das suas necessidades, são um ponto importante para uma correta gestão da água em qualquer processo, mas ainda mais para aqueles caracterizados pelas grandes quantidades de água que utilizam.

### 8.3. Medidas propostas para otimizar o tratamento

Um processo de tratamento de água para ser eficaz deve ser otimizado. A otimização de qualquer tipo de processo deverá ser vista como a tomada de decisões/ações com vista a melhorar o desempenho de um dado processo, que se revelará numa maior eficiência.

A grande diversidade de unidades de tratamento existentes para cada fase de tratamento faz com que, atualmente, a otimização de uma ETA/ETAR seja já uma obrigação para qualquer empresa que possua estas estações nas suas instalações.

A otimização de uma estação não deve ser centrada em apenas algumas unidades de tratamento. Esta deverá estar focada no tratamento como um todo, uma vez que, por vezes, a otimização de uma única unidade pode não contribuir para o melhoramento do processo de tratamento global. Desta forma é imperativo que o responsável pelo processo esteja atento a toda a linha de tratamento, de modo a que todas as medidas tomadas possam efetivamente contribuir para a otimização do mesmo.

Antes de qualquer medida tomada é também importante estar ciente de todas as opções disponíveis. Atualmente existem várias opções de tratamento para o mesmo fim, e cabe ao responsável fazer um levantamento correto dos dados de que dispõem para poder tomar a melhor decisão.

Um dos objetivos do projeto passa pela sugestão de medidas a tomar de modo a tornar o processo de tratamento de água mais eficiente.

#### 8.3.1. ETA

Uma primeira medida proposta passa pela implementação de sondas de nível no tanque de abastecimento primário. Esta medida permitirá evitar situações de transbordo de água simplesmente porque esta está a ser captada quando o tanque já se encontra cheio (figura 39). Esta medida permitiria estabilizar o tratamento, principalmente etapas como a regularização do pH, a pré-cloragem e a floculação, uma vez que o nível do tanque se manteria mais ou



Figura 39 - Excesso de captação.

menos estável. O facto do nível se manter constante é importante, já que faz com que sejam utilizados produtos no tratamento apenas quando necessário e em quantidades regulares, poupando aquela quantidade gasta em situações de transbordo. Seria ainda possível poupar nos gastos energéticos com as bombas de captação, assim como nos valores pagos às entidades pela quantidade de água captada. Resta referir que o excesso de água captada é reencaminhado para o ponto de origem, uma vez que o subsolo da ETA foi construído de maneira a estar preparado para situações de transbordo do tanque, fazendo com que estas situações não sejam vistas como um desperdício de água ou um consumo excessivo da mesma.

Seguindo esta linha de pensamento, uma outra medida a tomar seria a do aumento do tanque de água bruta primário e, conseqüentemente, do decantador. Permitiria resolver de um modo imediato as situações de transbordo do tanque e ainda oferecer maior margem de manobra à empresa para poder captar água em horários específicos, nomeadamente alturas do dia em que as tarifas de electricidade se encontram mais baratas. Como desvantagens para esta proposta surge, naturalmente, o investimento que teria de ser feito, a juntar à possível limitação de espaço existente nas instalações da ETA.

Uma outra medida para otimizar o tratamento passa pela revisão do estado do filtro de carvão ativado, avaliando até que ponto este é necessário. Há mais de uma década que o leito de carvão não é substituído, e apesar de não existir um valor referência sobre o tempo máximo de vida de um leito (este depende de fatores já comentados no ponto 8.1), é possível afirmar que este foi já ultrapassado, tal como demonstram os valores referido na tabela 23.

**Tabela 23** - Caracterização da água à entrada e à saída do filtro de carvão ativado.

Amostra	Entrada			Amostra	Saída		
	Ferro (µg/L)	Condutividade (mS/cm)	Cloro (mg/L)		Ferro (µg/L)	Condutividade (mS/cm)	Cloro (mg/L)
1	0	0,09	0,08	1	5	0,08	0,14
2	2	0,07	0,08	2	0	0,08	0,14
3	0	0,07	0,07	3	2	0,1	0,13
<b>Média</b>	<b>0,667</b>	<b>0,077</b>	<b>0,077</b>	<b>Média</b>	<b>2,333</b>	<b>0,087</b>	<b>0,137</b>
±	<b>1,155</b>	<b>0,012</b>	<b>0,006</b>	±	<b>2,517</b>	<b>0,012</b>	<b>0,006</b>

É possível constatar que, após a medição dos três parâmetros (ferro, cloro e condutividade) à entrada e à saída, verificou-se um aumento da quantidade de contaminante, traduzindo-se isso numa variação negativa, representada na tabela 24.

**Tabela 24** – Variação, em percentagem, das concentrações de ferro e cloro, e da condutividade, à entrada e saída do filtro de carvão ativado.

	Ferro ( $\mu\text{g/L}$ )	Condutividade ( $\text{mS/cm}$ )	Cloro ( $\text{mg/L}$ )
Variação (%)	-250 %	-13 %	-78 %

Este aumento de contaminantes à saída pode ser explicado pelo facto de ter ocorrido a colmatação dos poros do carvão. Quando o filtro é utilizado para tratar a água, parte dos contaminantes são libertados à saída do filtro. Desta forma, a solução passa pela substituição do leito de carvão ativado ou pela desativação efetiva da unidade, uma vez que um dimensionamento errado do filtro pode colocar em risco todo o tratamento. Aquando da tomada de decisão é importante ter em conta o investimento que terá de ser feito, já que esta é uma unidade de tratamento com elevados custos associados, não só de investimento inicial mas também de manutenção.

Uma vez que as várias etapas de tratamento a que a água é submetida na ETA são relativamente simples (à base de processos físico-químicos), estas propostas tornariam o processo de tratamento não só mais eficiente, como também permitiriam à empresa uma maior margem de manobra para a gestão dos recursos hídricos disponíveis, traduzindo-se isso em vantagens económicas. Fazendo um levantamento, seria possível à empresa poupar em produtos químicos, tarifas de captação (tanto da água como de eletricidade) ou em material de captação e respetiva manutenção.

É importante também ter em conta de que a simplicidade fará parte integrante de qualquer processo eficiente.

### 8.3.2. ETAR

Tal como para a estação de tratamento de água, existem medidas que podem ser tomadas para tentar melhor o tratamento do efluente, e os aspetos referidos para a otimização de uma ETA aplicam-se à ETAR. No caso especial de uma ETAR, e uma vez que o tratamento é mais complexo (o que contribui para que as opções de tratamento aumentem), qualquer medida

de otimização tem um investimento associado e por vezes esse é mesmo o principal motivo para estas não serem tomadas.

A primeira medida a sugerir prende-se com a importância da temperatura do efluente para o tratamento biológico. Os microrganismos são os intervenientes principais numa etapa que se caracteriza por ser apenas biológica, e a temperatura, associada a outras condicionantes ambientais (pH, oxigénio dissolvido, nutrientes, etc) (Ribeiro & Ferreira, 2007), é um dos principais fatores que contribui para uma melhor eficiência na remoção de matéria orgânica. É dos mais importantes, uma vez que afeta o tratamento biológico de diferentes maneiras, tendo influência na cinética de crescimento da biomassa. À medida que aumenta a temperatura, aumenta também a taxa específica de crescimento até atingir um valor máximo, correspondente à temperatura ótima de crescimento. Atingida essa temperatura, um aumento traduzir-se-á numa diminuição da taxa específica de crescimento de qualquer microrganismo (Fonseca, 2007).

Consoante a temperatura ótima de crescimento, os microrganismos são classificados em diferentes classes, tal como demonstra a tabela 25.

**Tabela 25** – Classificação de microrganismos em função da temperatura ótima de crescimento. (Adaptado de Silva, 2013)

Classe	Amplitude (°C)	Intervalo ótimo (°C)
Psicrófilos	[10,30]	[12,18]
Mesófilos	[20,50]	[25,45]
Termófilos	[35,75]	[55,65]

O facto do efluente não se encontrar com uma temperatura uniforme ao longo do tempo faz com que seja um fator prejudicial no comportamento microbiológico do tanque aeróbio. A temperatura do efluente varia, uma vez que para cada banho existe uma temperatura ótima de funcionamento, tal como para qualquer outro processo. O tanque de equalização minimiza a variação da temperatura do efluente mas pode não ser suficiente. Há ainda a considerar o fator sazonalidade, uma vez que no Verão as temperaturas registadas no tanque são superiores às do Inverno.

Para tomar uma medida seria necessário fazer uma caracterização microbiológica das lamas ativadas para conhecer as espécies e a respetiva classe que representam, de modo a tentar ajustar a temperatura do efluente à temperatura ótima dos microrganismos.

Caracterizados os microrganismos, a instalação de permutadores de calor utilizando água quente dos processos para aquecer, ou água captada para arrefecer são soluções simples que podem ajudar a resolver um problema. Existem ainda outros equipamentos que podem ajudar na solução deste problema como torres de arrefecimento, por exemplo.

A substituição do modo de fornecimento de oxigénio no tanque aeróbio também pode ser discutida, ainda mais quando a Mundotêxtil utiliza um sistema de oxigénio puro.

A utilização de oxigénio puro como fonte de oxigénio, em detrimento de ar comprimido, permite aumentar até 4 vezes a transferência de oxigénio verificando-se taxas de remoção mais eficazes. Nos sistemas de oxigénio puro é feita ainda a recirculação da corrente gasosa de modo a maximizar a sua utilização (Pinheiro & Lourenço, 2007).

A alternativa passa por utilizar ar comprimido, apesar de menos eficaz do ponto de vista do processo metabólico, uma vez que a percentagem de oxigénio existente no ar atmosférico é de cerca de 21 %. A sua utilização, em detrimento de oxigénio puro, deve ser vista apenas como uma melhoria do processo olhando simplesmente para a vertente financeira (considerando que a empresa conta já com sistema de ar comprimido), já que a utilização de oxigénio puro tem maiores custos associados, principalmente o preço da matéria-prima (oxigénio) (Gomes, 2010).

Ainda na tentativa de evitar a utilização de oxigénio no tanque biológico, pode ser levantada a hipótese de se optar por um tratamento anaeróbio em detrimento do aeróbio utilizado atualmente.

O tratamento anaeróbio caracteriza-se por, em comparação com o aeróbio, não utilizar o oxigénio na reação de decomposição, onde a matéria orgânica do efluente a tratar é transformada em metano e dióxido de carbono. São utilizados diferentes grupos tróficos de microrganismos e tem evoluído nos últimos anos (Alves & Mota, 2010).

O processo de digestão anaeróbia pode ainda ser sequenciado em quatro etapas: hidrólise, acidogénese, acetogénese e metanogénese. A figura 40 mostra os produtos e subprodutos de cada etapa (Alves & Mota, 2010).



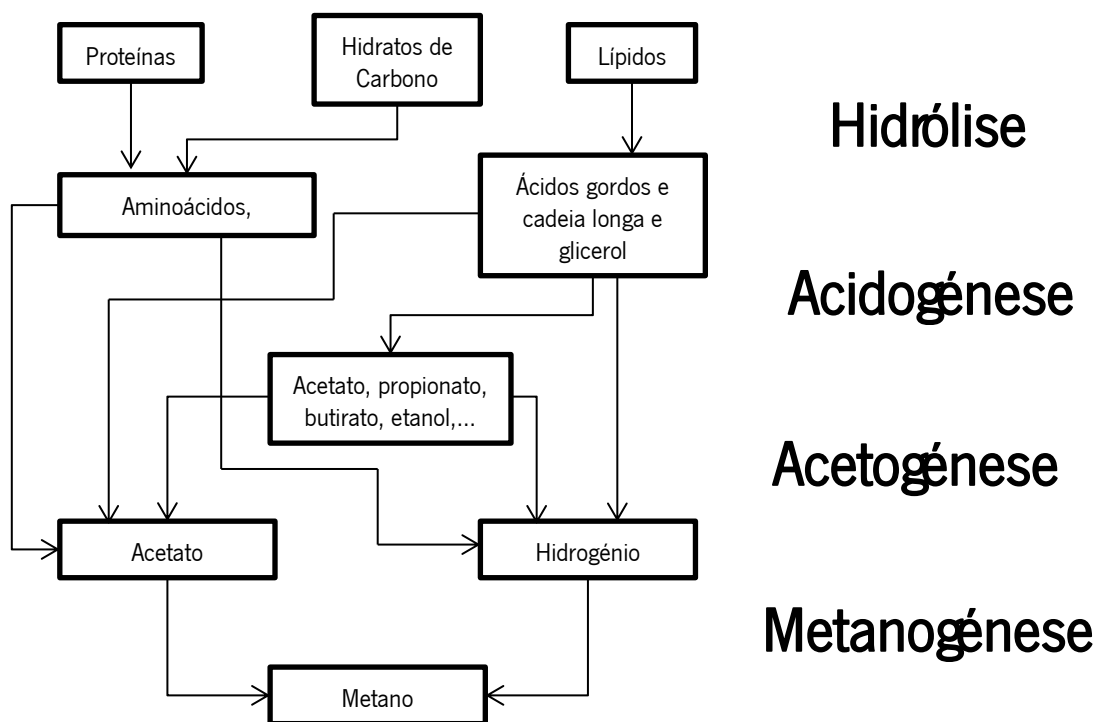


Figura 40 - Etapas da digestão anaeróbia.

Do processo de digestão anaeróbia é obtido biogás, constituído por metano (55-70 %), dióxido de carbono (30-45 %) e uma pequena fração de sulfeto de hidrogénio (200-4000 mg/L), dependendo a sua qualidade da composição e biodegradabilidade do efluente a tratar. Poderá ser utilizada como fonte de energia, já que possui um conteúdo energético variável entre os 20 e 25 MJ/m<sup>3</sup> (Alves & Mota, 2010).

Tal como no processo aeróbio, a temperatura é um fator importante devendo ser regularizada para valores ótimos. O facto de operar preferencialmente em situações mesófilicas ou termófilicas pode ser encarado como vantajoso, uma vez que a gama de temperaturas ótimas destas duas classes cobre a média de temperaturas do efluente descarregado.

Em comparação com o tratamento aeróbio, o processo anaeróbio apresenta vantagens a nível energético (não necessita de gastos no que toca a arejadores e conta ainda com a vantagem de produzir biogás, que poderá ser utilizado como fonte de energia), e apresenta uma menor quantidade de lama produzida (resultante do menor rendimento ao nível biomassa/substrato) (Alves & Mota, 2010).

Uma outra vantagem do tratamento anaeróbio está relacionada com o facto dos microrganismos utilizados no processo terem a capacidade de manter a sua atividade mesmo após vários períodos de inatividade (Alves & Mota, 2010). No caso da Mundotêxtil é um fator

importante, já que a produção de efluente para na totalidade durante o período de férias, seja ele no Verão ou não, e é reduzida ao fim de semana. Ainda sobre a redução da produção de efluente ao fim de semana, os reatores anaeróbios apresentam a vantagem de operarem com menores necessidades em nutrientes, logo a eficácia do processo manter-se-ia semelhante nestes períodos de menor atividade.

Tem ainda a vantagem do processo de digestão não estar limitada pela capacidade de fornecer oxigénio ao sistema. No caso dos processos anaeróbios, o passo limitante está relacionado com as limitações das bactérias metanogénicas em degradar um número reduzido de substratos.

Apesar de tudo, a utilização de um processo anaeróbio em detrimento de um tratamento aeróbio traz desvantagens importantes. Regra geral, o tratamento aeróbio é mais eficiente do que o anaeróbio, resultado da maior afinidade com o substrato dos microrganismos utilizados no processo aeróbio. Ainda assim, este fator pode ser contornado com a utilização de um tratamento terciário eficaz (Alves & Mota, 2010).

O tratamento anaeróbio pode ainda ser mais eficaz quando são asseguradas certas condições específicas, como uma elevada concentração de biomassa ativa no reator, maximização da área superficial de contato entre a biomassa e o substrato (vantagem da utilização de biofiltros), adaptar a biomassa ao substrato e garantir a existência de condições ambientais favoráveis para todos os microrganismos intervenientes no processo (Alves & Mota, 2010).

O tratamento pode-se tornar ainda mais vantajoso no ponto de vista da empresa, já que recentemente adquiriu um sistema de cogeração que opera a gás.

Ainda em relação ao oxigénio, atualmente a Mundotêxtil utiliza um sistema de ozonização na etapa de tratamento de terciário. Tem a vantagem de, além de remover microrganismos, permitir uma diminuição da carga orgânica do efluente tratado, contribuindo ainda para uma diminuição da cor uma vez que quebra as ligações entre as moléculas de corante (Almeida *et al.*, 2004).

O ozono é formado quando uma corrente elétrica de alta voltagem é descarregada na presença de oxigénio (da Silva, 2004). É um processo natural que ocorre nos dias de tempestade, em que se verifica a formação de ozono na atmosfera por descargas elétricas

naturais (relâmpagos). O equipamento industrial usado para produção de ozono baseia-se neste fundamento.

O ozonizador, em conjunto com os gastos de oxigénio para produção de ozono e para arejamento do tanque biológico, representam grande parte das despesas mensais de funcionamento da ETAR.

Como alternativa ao ozono em etapas de desinfeção temos o cloro ou a radiação ultravioleta. O cloro é desaconselhado para tratamento de água residual pois reage com a matéria orgânica presente, formando poluentes prioritários (trialometanos), considerados cancerígenos. Desta forma para o tratamento de águas residuais, a utilização de radiação UV é mesmo a mais utilizada, uma vez que é eficiente e não tem tantos custos associados como a ozonização (Oliveira, 2003).

Um outro fator que pode influenciar o funcionamento do reator biológico passa pela utilização de um produto químico (coagulante) numa etapa que se pretende exclusivamente biológica. A presença de um composto estranho aos microrganismos poderá influenciar negativamente o seu metabolismo.

A utilização do coagulante em etapas subsequentes poderá revelar-se mais vantajosa, por mais pequena que seja a quantidade deste produto adicionada no tanque aeróbio.

A separação das correntes de efluente de acordo com as suas características pode também ser vantajosa para o processo de tratamento. Atualmente a empresa faz uma distinção das correntes de acordo com a temperatura, classificando-as como correntes quentes e correntes frias. Esta separação permite que o calor dos efluentes quentes seja reaproveitado antes de juntar estas correntes às frias.

Uma proposta de melhoria passaria por catalogar as correntes em relação à temperatura (quentes ou frias) e à carga de contaminantes (ricas ou pobres). Isto permitiria à empresa condicionar as características do efluente de maneira a otimizar o tratamento. Seria possível separar as massas de água de acordo com as características desejadas para o efluente, manipulando a temperatura (jogando com a temperatura ótima de crescimento da biomassa do tanque aeróbio) e a carga de poluentes que permitisse maximizar a eficiência do tratamento biológico, uma vez que o tratamento das correntes pobres pode ser mais eficaz do que as mais carregadas com contaminantes.

O excesso de água residual, que alteraria drasticamente as características do efluente desejado seria despejado no SIDVA, sempre tendo em conta os limites de carga a descarregar.

## 9. Conclusões e perspectivas de trabalho futuro

O presente trabalho centrou-se na aplicação de técnicas de gestão da água ao processo de produção de uma indústria têxtil, e avaliação dos seus resultados. Iniciou-se com a caracterização dos consumos de água, bem como do efluente produzido, de modo a compreender de que forma variam as captações e descargas, para avaliar se existem medidas que podem ser tomadas.

Após caracterização, foi investigada a aplicação de uma análise de Pinch aos consumos de água, contemplando individualmente a reutilização e a não reutilização de água. Para isso, a salinidade foi considerada como contaminante principal em efluentes têxteis.

Reduzidos os consumos de água, o foco recaiu sobre a produção de efluentes, tendo sido propostas medidas de otimização em toda a linha dos processos de tratamento, olhando a todas as áreas (inclusive a financeira).

O trabalho realizado apresenta algumas conclusões principais:

- A modernização da tecnologia utilizada em processos de tingimento, com uma relação de banho ( $L_{\text{água}}/kg_{\text{felpo}}$ ) mais baixa, faz com que seja utilizada menos água para o processo, e por isso o aumento da discrepância entre a captação e a descarga pode ser justificado como uma melhoria processual.
- O facto da PSS-78 se basear apenas nos sais/iões dissolvidos para medir a salinidade torna o método mais fiável (ou pelo menos os resultados mais reais), quando comparado com a medição da salinidade através da determinação dos STD.
- A diminuição dos consumos de água, independentemente da reutilização, prova a aplicabilidade da análise de Pinch para a redução dos consumos de água na indústria têxtil, nomeadamente na produção de atoalhados de felpo.
- O facto dos resultados obtidos para a redução dos consumos nas situações estudadas (reutilização e não reutilização) serem tão próximos indica que os processos são independentes.
- A semelhança dos resultados obtidos na redução dos consumos, para o caso da reutilização de água, utilizando dois modelos diferentes é um comprovativo de que os métodos, apesar de distintos, permitem obter o mesmo resultado.

### Conclusões e perspetivas de trabalho futuro

- A melhoria dos resultados através da utilização de um fator de correção alerta para a importância de uma correta caracterização das correntes (água e efluente), sob pena do resultado final poder não corresponder à realidade.
- A diferença entre os resultados obtidos e os sugeridos na bibliografia atesta para a vantagem da utilização da análise de Pinch no projeto inicial em detrimento da otimização de processos.
- A redução dos consumos de água só será considerada eficiente se for possível dar resposta ao efluente produzido, recorrendo a operações de tratamento otimizadas.

Ainda que os principais objetivos do trabalho tenham sido alcançados (pelo menos na sua maioria), existem outros aspetos que podem ser abordados no âmbito da gestão da água, de modo a tornar o processo ainda mais eficiente. Assim sendo, sugere-se:

- A instalação de mecanismos de controlo dos níveis dos tanques e reservatórios, de modo a otimizar os consumos de água.
- A utilização dos vários modelos existentes para a execução de uma correta análise de Pinch, de maneira a averiguar qual representa o menor caudal de água possível.
- Aplicar os conceitos da análise de Pinch, mas considerando contaminantes de maior relevo (caso da matéria orgânica).
- Da mesma forma, aplicar os conceitos da análise de Pinch considerando mais do que um contaminante.
- A procura contínua de novas fontes de água, independentemente da origem.
- A aplicação de medidas de otimização de tratamento da ETA e ETAR, de modo a tornar o processo de tratamento cada vez mais eficiente.

## Bibliografia

- Agência Portuguesa do Ambiente. *Licenciamento das utilizações dos recursos hídricos*. Consultado em 02/04/2014, disponível em: <http://www.apambiente.pt/index.php>
- Águas de Portugal. (2013). *Como funciona uma ETAR*. Consultado em 20/03/2014, disponível em: <http://www.aguasdocentro.pt/etar.asp>
- Aires-Barros, M., Gama, M., & Fonseca, L. (2003). Aplicações de enzimas. In M. Gama, M. Aires-Barros, & J. Cabral, *Engenharia Enzimática* (pp. 209-224). LIDEL.
- Almeida, E., Assalin, M., Rosa, M., & Durán, N. (2004). Tratamento de efluentes industriais por processos oxidativos na presença de ozônio, *Química Nova*, 27 (5), 818-824
- Alva-Argáez, A., Kokossis, A. C., & Smith, R. (1998). WasteWater minimization on industrial systems using an integrated approach, *Computers & Chemical Engineering*, 22, 741-744
- Alves, M., & Mota, M. (2007). Reatores para Tratamento Anaeróbio. In M. Da Fonseca, & J. Teixeira, *Reatores Biológicos* (pp. 373-392). LIDEL.
- Alwi, S., & Manan, Z. (2013). Water Pinch Analysis for water management and minimisation: an introduction. In J. J. Klemes, *Handbook of Process Integration (PI): Minimization of energy and water use, waste and emissions* (pp. 553-582). Veszprém: Woodhead Publishing.
- Arjmand, O., Izadi, S., Mousavi, M., & Rahmanian, V. (2012). Polyvinyl Alcohol with Superior Flooding Properties to Enhance Oil Recovery Process. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 4(17), 3062-3064
- Bagajewics, M., & Savelski, M. (2001). On the use of linear models for design of water utilization systems in process plants with a single contaminant, *Chemical Engineering Research and Design*, 79 (5), 600-610
- Balanay, J., Crawford, S., & Lungu, C. (2011). Comparison of toluene adsorption among granular activated carbon and different types of activated carbon fibers (ACFs). *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 8(10), 537-579.

**Bibliografia**

- Bastian, E., *et al.* (2009). *Guia técnico ambiental da indústria têxtil*. São Paulo: Gráfica Ideal, (Capítulo 4)
- Branco, A. (2007). *Novos paradigmas para a gestão da água e dos serviços de água e saneamento: o caso de Portugal*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Lisboa: Lisboa, 228 pgs.
- Brown, J., Colling, A., Park, D., Phillips, J., Rothery, D., & Wright, J. (1989). *Seawater: its composition, properties and behaviour*. (2<sup>nd</sup> ed.). New York: Pergamon, (Capítulo 3)
- CEFIC. *Interview about "Water Management in chemical production plants"*. Consultado em 08/03/2014 8 de março de 2014, disponível em <http://www.cefic.org/sustainability/Flagship-initiatives/Water-management-interview/>
- Clesceri, L., Greenberg, A., & Eaton, A. (1998). *Standard Methods for the examination of water and wastewater*. (20th ed.). Washington, D.C: American Public Health Association.
- Coelho, B. (2008). *Estudo do tratamento de águas residuais urbanas*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto, 125 pgs.
- Correia, J. (2012). *Tratamento de efluentes de suinicultura por coagulação/floculação*. Dissertação de Mestrado, Universidade técnica de Lisboa: Lisboa, 51 pgs.
- Costa, Francisco da Silva: *Geopatrimónio ligado à água: o caso do património industrial na bacia hidrográfica do rio Ave*. In Seminário Latino-Americano de Geografia Física, (4<sup>o</sup> : 2010 : Coimbra). Universidade de Coimbra: 2010, (pp.1-12)
- Costa, Francisco da Silva: *O património industrial no Vale do Ave: o têxtil como chave de leitura territorial*. In Jornadas Internacionais de Turismo: Dinâmicas de rede no turismo cultural e religioso, (2<sup>o</sup> : 2009 : Maia). ISMAI: 2013, (pp.349-368)
- Dantas, A., Paschoalato, C., Figueiredo, J., & Ramos, M. (2011). Remoção de cor, de ferro e de manganês em água com matéria orgânica dissolvida por meio da pré-oxidação, coagulação, filtração e adsorção em carvão ativado granular. *Revista DAE*, 186, 46-55.



- da Silva, L. (2004). *Investigação da tecnologia eletroquímica para a produção de ozônio: aspectos fundamentais e aplicados*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo: São Paulo, 203 pgs.
- Dhole, V. R., Ramchandani, N., Tainsh, R.A., & Wasilewski, M. (1996). Make your process water pay for itself. *Chemical Engineering*, 103 (1), 100-103
- El-Halwagi, M. M., & Manousiouthakis, V. (1989). Synthesis of Mass Exchange Networks. *AIChE Journal*, 35 (8), pp 1233-1244
- El-Halwagi, M. M. (1997). Introduction. In El-Halwagi, *Polution Prevention through Process Integration* (pp. 1-15). California: Elsevier.
- Ferrari, R. (2007). *Reuso de efluente de mercerização no tingimento de malha de algodão*. Dissertação de Mestrado, Universidade Regional de Blumenau: Blumenau, 123 pgs
- Ferreira, R. (2010). *Otimização do tratamento por lamas ativadas do efluente líquido da Mundotêxtil*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, 145 pgs
- Filho, A. (2009). *Tratamento terciário de efluente de uma indústria de refrigerantes visando ao reuso*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, 112 pgs
- Filsinger, E., *et al.* (2006). *Central Arizona Salinity Study: Phase II – Salinity Control in Waste Water Treatment Plants*. Arizona.
- Fonseca, M. (2007). Estequiometria e Cinética dos Processos Microbianos. In M. Da Fonseca, & J. Teixeira, *Reatores Biológicos* (pp. 1-26). LIDEL.
- Fragoso, R., & Marques, C. (2006). A gestão económica da água na agricultura: perspetivas de utilização no alentejo. *Economia e sociologia*, 81, 131-152
- Gasi, T., *et al.* (2003). *Compilação de técnicas à prevenção à poluição para a indústria têxtil*. CETESB: São Paulo.
- Gomes, J. (2010). *Custos de construção de infra-estrutura de abastecimento de água e saneamento*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro: Aveiro, 74 pgs.

**Bibliografia**

- Gunderson, J. (2010). *Water Treatment in the Pulp and Paper Industry*. Consultado em 12/03/2014, disponível em <http://www.waterworld.com/index.html>
- Hallale, N. (2002). A new graphical targeting method for water minimisation. *Advances in Environmental Research*, 6(3), 377-390.
- Hamaguchi, M. (2007). *Análise do circuito de água do processo de fabricação de papel impresa integrada com produção de pastas termomecânicas*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo: São Paulo, 164 pgs.
- Hillel, D. (2000). The Nature of salinity. In D. Hillel, *Salinity Management for Sustainable Irrigation* (pp. 5-14). Washington D.C: The World Bank.
- Hilsdorf, A. (2008). *Tratabilidade de águas residuárias de indústrias petroquímicas: Estudo de caso*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo: São Paulo, 164 pgs.
- IOC, SCOR, & IAPSO. (2010). The International thermodynamic equation of seawater: Calculation and use of thermodynamic properties. *Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides No. 56*, UNESCO, 196 pgs
- Jennings, E. (2014). *De que forma o cloro pode danificar as plantas?* Consultado em 25/05/2014, disponível em <http://www.ehow.com.br/>
- Katznelson, R. (2004). Conductivity/Salinity Measurement Principles and Methods. In Clean Water Team, *Guidance compendium for watershed monitoring and assessment* (Capítulo 3). Califórnia.
- Kaye, L. (2013). Clothing to dye for: the textile sector must confront water risks. *The Guardian*, página 15
- Kim, J. K. (2013). Using systematic design methods to minimise water use in process industries. In J. J. Klemes, *Handbook of Process Integration (PI): Minimization of energy and water use, waste and emissions* (pp. 383-400). Veszprém: Woodhead Publishing.

- Klimes, J. J. (2013). Process Integration (PI): An Introduction. In J. J. Klimes, *Handbook of Process Integration (PI): Minimization of energy and water use, waste and emissions* (pp. 1-27). Veszprém: Woodhead Publishing.
- Lima, J. (2001). Recursos hídricos no Brasil e no Mundo. (1st ed). Planaltina: EMBRAPA.
- Linaric, M., Markic, N., & Sipos, L. (2013). High salinity wastewater treatment. *Water Science and Technology*, 68 (6), 1400-1405
- Linnhoff, *et al.* (1998), Intelligent Networking of Process Waste Water Streams in the Chemical Industry, *Linnhoff March*, 11 pgs.
- MAERSK. *The drilling industry* . Consultado em 12/03/2014, disponível em <http://www.maerskdrilling.com/pages/default.aspx>
- Mamaev, O. I. (1975). Temperature-Salinity Analysis of World Ocean Waters. (11st ed.). Amesterdão: Elsevier, (Capítulo 2)
- Manan, Z. A., Tan, Y. L., & Foo, D. C. Y. (2004). Targeting the minimum water flowrate using water cascade analysis technique. *AIChE Journal*, 50(12), 3169-3183.
- Mann, J. G., & Liu, Y. A. (1999). *Industrial Water Reuse and Wastewater Minimization*. New York: MacGraw-Hill, (Capítulos 2-3).
- Menon, R., Ravagnani, M., & Módenes, A. (2001). Minimização da emissão de poluentes utilizando a análise de Pinch em conjunto com técnicas de programação matemática. *Maringá*, 23(6), 1341-1349.
- Metcalf, & Eddy., Tchobanoglous, G., Burton, F., & Stensel, H. D. (2003). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*. Boston: McGraw-Hill, pp 146-160
- Mohammadnejad, S., Bidhendi, G. R., & Mehrdadi, N. (2010). A new algorithm for water and wastewater optimization in multiple contaminats network using Water Pinch Technology. *Research Journal of Environmental Sciences*, 4(3), 193-208

**Bibliografia**

- Mohammadnejad, S., Bidhendi, G. R., & Mehrdadi, N. (2011). water and wastewater minimization in petroleum refinery through Water Pinch analysis- Single and Double contaminants. *Research Journal of Environmental Sciences*, 5(1), 88-104.
- Natural Resources Canada. (2008). Pinch analysis: for the efficient use of energy, water & hydrogen. Canada.
- Nguyen, D. (2001). *Biological treatment of high salinity wastewater using yeast and bacterial systems*. Dissertação de Doutoramento, Asian Institute of Technology: Bangkok, 170 pgs.
- Olesen, S. G., & Polley, G. T. (1997). A simple methodology for the design of water Network Handling Single Contaminants. *Institution of Chemical Engineers*, 75, 420-426.
- Oliveira, E. (2003). *Desinfecção de efluentes sanitários tratados através da radiação ultravioleta*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina: Santa Catarina, 110 pgs.
- Oliveira, N. (2006). Consumo de água em Lisboa está acima da média Europeia. *Diário de Notícias*, pp. 1-2.
- Pinheiro, H., Lourenço, N. (2007). Reatores de Tratamento Aeróbio. In M. Da Fonseca, J. Teixeira, *Reatores Biológicos* (pp. 343-371). LIDEL.
- Pires, V. (2013). *Avaliação da pré-oxidação e da clarificação em escala de bancada na remoção de arsénio e manganês em águas de abastecimento*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federam de Ouro Preto: Minas Gerais, 96 pgs.
- Qing, P., Hui, C., Zhou, G., Qin, L., & Qiang, M. (2013). Improvement on Filterability in the aerobic treatment of Carboxymethyl Cellulose (CMC) Wastewater. Donghua: College of Environmental Science and Engineering.
- Renewable Energy. *Hydropower*. Consultado em 12/03/2014, disponível em <http://www.renewableenergyworld.com/rea/home>
- Ribeiro, M., & Ferreira, B. (2007). Medição das variáveis principiis. In M. Da Fonseca, & J. Teixeira, *Reatores Biológicos* (pp. 153-172). LIDEL.

- Salinometry. (2014). *Practical Salinity Scale - 1978*. Consultado em 25/05/2014, disponível em <http://salinometry.com/>
- Sampaio, S. C., Silvestro, M. G., Frigo, E. P., & Borges, C. M. (2007). Relação entre série de sólidos e condutividade elétrica em diferentes águas residuárias. *Irriga*, 12(4), pp 557-562.
- Santos, A. (2004). *Influência do teor de ferro na condutividade hidráulica saturada de um rejeito de minério de ferro*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto: Ouro Preto, 213 pgs
- Schmidt, C. (2011). *Desenvolvimento de filtros de carvão ativado para remoção do cloro da água potável*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do rio Grande do Sul: Porto Alegre, 90 pgs.
- Sharma.S., Singh, A., Mathur, N., & Verma, A. (2014). Studies on characterization of textile industrial Waste Water in Jaipur City. *International Journal of Current Chemical Sciences*, 3, 01-03.
- Silva, P. (2013). *Capacidade de nitrificação e desnitrificação da ETAR Sul da SIMRIA*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro: Aveiro, 82 pgs.
- Talley, L., Pickard, G., Emery, W., & Swift, J. (2011). *Descriptive physical oceanography: an introduction*. (6<sup>th</sup> ed.). New York: Elsevier, (Capítulo 3).
- The Engeneering ToolBox. *Pressure and Boiling Points of Water*. Consultado em 12/03/2014, disponível em <http://www.engineeringtoolbox.com/>
- TRATAVE. (2012). *O que é o SIDVA?* Consultado em 04/04/2014, disponível em <http://www.tratave.pt/main.html>
- Ujang, Z., Wong, C. L., & Manan, Z. A. (2002). Industrial Wastewater minimization using Water Pinch Analysis: a case study on an old textile plant. *Water Science and Technology*, 46(11-12), 77-84.
- Waldburg, A. (1997). *Diaphragm Control in inflated Tool Forming of Composites*. Dissertação de doutoramento, Massachusetts Institution of Technology: Massachusetts, 51 pgs

**Bibliografia**

- Wang, Y. P., & Smith, R. (1994). WasteWater Minimization. *Chemical Engineering Science*, 49, 981-1006.
- Whiting, D., Card, A., Wilson, C., & Reeder, J. (2001). *Soil pH*. Consultado em 03/05/2014, disponível em <http://www.ext.colostate.edu/>
- Wu, Y. J., Whang, L. M., Fukushima, & T., Chang, S. H. (2013). Responses of ammonia-oxidizing archaeal and betaproteobacterial populations to wastewater salinity in a full-scale municipal wastewater treatment plant. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 115, 424-432.
- Yan, W., Tan, N. F. Y., Mathur, N., & Wong, M. H. (2008). Effects of salinity on treatment of municipal wastewater by constructed mangrove wetland microcosms. *Marine Pollution Bulletin*, 57, 727-734.







# Anexos

---



# Anexo A – Fichas Técnicas

---

No sentido de caracterizar o efluente do processo de engomagem, foram utilizadas as fichas técnicas dos produtos utilizados para compreender a diferença de resultados obtidos na medição da salinidade. As fichas técnicas apresentadas em seguida servem também de referência para justificar as diferenças verificadas.



## EMS-TEXTILWACHS

**EMS-TEXTILWACHS é usado como aditivo nos banhos de encolagem**

### PROPRIEDADES

Composição	-	Mistura gorda com emulsionantes especiais
Aspecto	-	Grânulos branco-amarelados
Mistura	-	Max. 1%
pH	-	Aprox. 7
Carácter iónico	-	Aniónico
Pureza	-	Isento de água, silicone e parafina
Mudança de estado físico	-	56 - 60°C
Compatibilidade	-	Compatível com todos os agentes encolantes

### CARACTERÍSTICAS

Excelente efeito amaciante. Bom efeito anti-estático. Reduz o efeito de abrasão. Menor quebra de teia. Não faz formação de espuma nos banhos de encolagem. Fácil remoção por lavagem (ver recomendação).

### PROCESSO DE REMOÇÃO

**EMS-TEXTILWACHS** é perfeitamente eliminado por um simples processo de lavagem com um detergente aniónico ou não iónico a temperaturas entre 65 - 95 °C, ou na aeração de pré-tratamento. O tempo de tratamento e temperatura dependem da máquina de lavagem, velocidade e tipo de artigo.

## EMSIZE E 18

**Agente de encolagem especialmente desenvolvido para fios de algodão e misturas com PES. EMSIZE E 18 pode ser usado, nestes artigos, na sua forma pura sem usar qualquer produto sintético.**

### PROPRIEDADES

Composição	-	Derivado de amido
Aspecto	-	Pó branco
Humidade	-	Aprox. 13%
pH (10% conc.)	-	Aprox. 6
Viscosidade	-	Ver gráfico

### CARACTERÍSTICAS

- Aumenta a adesividade em fios de PES.
- Excelente efeito de encolagem.
- Filme transparente flexível.
- Compatível com outros agentes de encolagem.
- Possibilidade da lavagem sem utilização de enzimas.
- Boa biodegradabilidade.

### APLICAÇÕES

#### **Preparação da solução:**

À necessária quantidade de produto é adicionada água fria. Sob agitação o amido deve ser aquecido a 95 °C e mantido a essa temperatura pelo menos durante 20 minutos.

A preparação em auto-clave tem de ser aquecida até 110 °C e mantida a esta temperatura pelo menos 10 minutos.

**Viscosidade:**

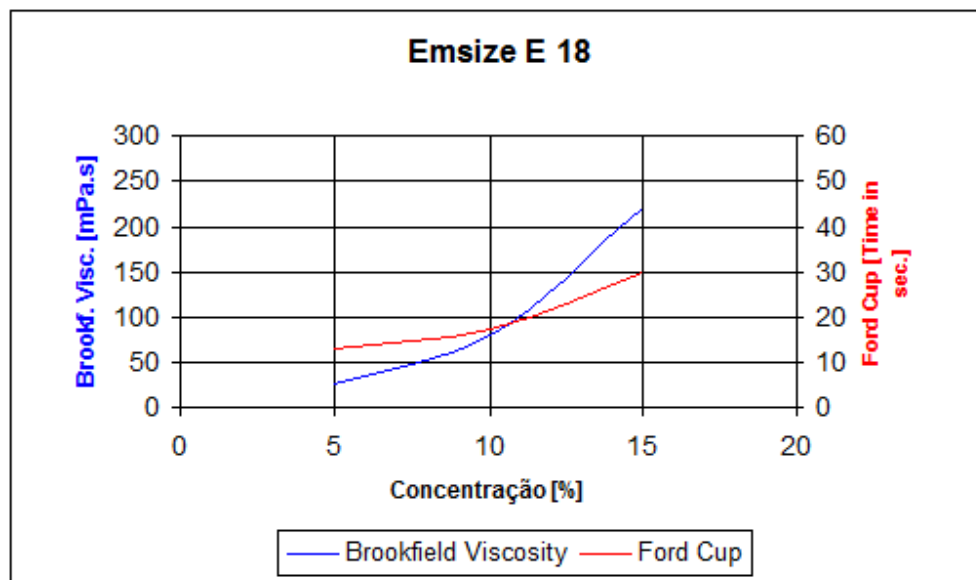
O gráfico apresenta:

Uma amostra típica de **EMSIZE E 18**

A indicação da viscosidade da solução em função da concentração

A viscosidade é medida com um viscosímetro Brookfield, tipo RVT, 20 rpm, 85°C e com Copo Ford,

4 mm, 85°C



(Preparação da solução: cozinhada com vapor directo durante 20 minutos a 500 rpm)

# BI TOUCH CAT

O **BI TOUCH CAT** é uma preparação à base da enzima catalase, que é produzida usando uma estirpe geneticamente modificada de um fungo não patogénico.

Este produto transforma o peróxido de hidrogénio em oxigénio e água, sendo tal situação possível devido às formulações enzimáticas aplicáveis, que são usadas para a remoção do peróxido de hidrogénio residual após o branqueamento. O produto não tem qualquer efeito negativo nas fibras têxteis ou outras.

## PROPRIEDADES

- |                              |   |                        |
|------------------------------|---|------------------------|
| • Actividade da Catalase     | - | min. 7 000 CAU/ g      |
| • Aspecto                    | - | Líquido castanho claro |
| • Solubilidade               | - | Miscível com água      |
| • pH                         | - | 6.2 - 6.8              |
| • Densidade (massa volúmica) | - | 1.0 - 1.1 g/ml         |

## APLICAÇÕES

- O **BI TOUCH CAT** é usado para a decomposição de peróxido de hidrogénio do material têxtil, antes do tingimento.

A utilização do **BI TOUCH CAT** permite um processo amigo do ambiente, pois há um decréscimo no consumo de água e de tempo de processo.

Este processo de limpeza enzimática, pode ser realizado em branqueios e efectuado em equipamento como "jets", "jiggers" e "barcas"



**CONDIÇÕES DE TRABALHO PARA O BIOTOUCH CAT:**

- Dosagem da enzima: 0,3 - 1,0 g/ Litro
- pH do banho: 6,0 - 8,0
- Temperatura: 40 - 50 °C
- Tempo de tratamento: 10 - 20 minutos

Solta-se o banho de branqueio. Em seguida, enche-se a máquina para a relação de banho desejada, ajusta-se o pH e temperatura, adiciona-se o **BIOTOUCH CAT** e inicia-se o tratamento. A decomposição do peróxido de hidrogénio é testada após 10-15 minutos de tratamento, através de tiras de teste de peróxido (ex.: Mercoquant). Após a eliminação do peróxido de hidrogénio o processo de tingimento pode ser continuado no mesmo banho.

**MANUSEAMENTO**

- A repetida inalação do aerossol ou pó da enzima pode causar sensibilização e reacções alérgicas em pessoas sensíveis.

**ARMAZENAMENTO**

- À temperatura ambiente a actividade do **BIOTOUCH CAT** não decrescerá abaixo dos 90% da actividade declarada, entre os primeiros 2 meses após a entrega.
- A armazenagem do produto entre 5-10 °C poderá evitar, por mais tempo, o decréscimo da actividade declarada.
- O produto deve ser protegido do gelo.



# Anexo B – Sólidos Totais Dissolvidos

---

Na determinação da salinidade foi adotada a metodologia de determinação dos Sólidos Totais Dissolvidos. Os testes foram realizados em triplicado de modo a que o resultado obtido fosse o mais real possível, podendo ainda determinar um erro padrão a cada medida.

A tabela B.1 apresenta os resultados obtidos.

**Tabela B.1** - Valores obtidos de Salinidade através dos STD.

Amostra	Resíduo seco (mg)	STD (mg/L)	Média (mg/L)	±
Água bruta	410	820	866,667	41,633
	440	880		
	450	900		
Engomagem	12540	25080	25120	52,915
	12590	25180		
	12550	25100		
Tinturaria de Fio	4790	9580	9620	87,178
	4860	9720		
	4780	9560		
Tinturaria de Felpo	6000	12000	12026,7	46,188
	6000	12000		
	6040	12080		

Para a determinação dos STD foi utilizado um volume de 0,5L de cada amostra, perfazendo um total de 1,5 L, uma vez que os testes foram realizados em triplicado.

A equação B.1.1 representa a determinação dos STD relacionando o resíduo seco com o volume da amostra:

$$\text{STD (mg/L)} = \frac{\text{Resíduo seco (mg)}}{\text{Volume de amostra (L)}} \quad (\text{B.1.1})$$

## Anexo C – PSS-78

---

Além dos STD foi utilizada a PSS-78 como alternativa de medição da salinidade prática das mesmas 4 amostras. De igual modo, os testes foram realizados em triplicado pelos mesmos motivos referenciados no anexo B.

A tabela C.1 apresenta os resultados obtidos

**Tabela C.1** - Valores obtidos de Salinidade através da PSS-78.

<b>Amostra</b>	<b><math>k_{15}</math></b>	<b><math>S</math></b>	<b>Média</b>	<b><math>\pm</math></b>
Água bruta	0,0273	732	667,000	64,023
	0,0227	604		
	0,0249	665		
Engomagem	0,2951	9183	9070,000	99,081
	0,2896	8998		
	0,2905	9029		
Tinturaria de Fio	0,3001	9351	9340,33	11,590
	0,2998	9342		
	0,2994	9328		
Tinturaria de Felpo	0,3804	12093	11999,7	129,361
	0,3793	12054		
	0,3734	11852		

Na determinação da salinidade  $S$  foi considerado o fator  $k_{15}$  e utilizada a equação 14.

Importa ainda referir que tal como citado anteriormente a determinação de  $S$  por este métodos resulta num valor adimensional tal como presente na tabela 26. Ainda assim este valor pode ser interpretado de diferentes formas tal como referido no ponto 5.2.2., e demonstrado na tabela 10.

## **Anexo D – PSS-78 com $T \neq 15 \text{ }^\circ\text{C}$**

A determinação da salinidade prática recorrendo ao método da PSS-78 segue diferentes caminhos matemáticos quando não é feita a  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ao contrário do sucedido neste projeto, quando se pretende determinar a salinidade de uma amostra a uma temperatura diferente de  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  é determinada uma razão  $R_T$ , que simboliza a relação entre a condutividade de uma amostra a  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  e à temperatura a que esta se encontra, e a partir da qual é possível determinar a salinidade.

A conversão da razão  $R_T$  em salinidade  $S$  é feita de acordo com a equação D.1:

$$S = a_0 + a_1 R_T^{1/2} + a_2 R_T + a_3 R_T^{3/2} + a_4 R_T^2 + a_5 R_T^{5/2} + \left[ \left( \frac{T-15}{1+K(T-15)} \right) \times (b_0 + b_1 R_T^{1/2} + b_2 R_T + b_3 R_T^{3/2} + b_4 R_T^2 + b_5 R_T^{5/2}) \right] \quad (D.1)$$

Os coeficientes  $a$  e  $b$  foram determinados através de testes laboratoriais, utilizando a água do mar como objeto de estudo, onde:

$a_0$	0,008	$b_0$	0,0005
$a_1$	-0,1692	$b_1$	-0,0056
$a_2$	25,3851	$b_2$	-0,0066
$a_3$	14,0941	$b_3$	-0,0375
$a_4$	-7,0261	$b_4$	0,0636
$a_5$	2,7081	$b_5$	-0,0144

$$K \quad 0,0162 \quad -2 \text{ }^\circ\text{C} < T < 35 \text{ }^\circ\text{C}$$

A razão  $R_T$  é definida pela equação D.2:

$$R_T = \frac{R}{r_T R_P} \quad (D.2)$$

Onde  $R$  representa o ratio de conversão de condutividades medidas a uma pressão superior a 1 pressão atmosférica:

$$R = \frac{C(S, T_{68}, P)}{C(35, T_{68}, 0)} \quad (D.3)$$

Em que:

$C(S, T_{68}, P)$  42.914 mS/cm

$T_{68}$  Representa a Escala Internacional de temperatura (ITS) representado "68", o ano em que foi revista (1968)



Ainda na equação D.2,  $R_p$  é definido através da equação D.4:

$$R_p = 1 + \frac{A_1 P + A_2 P^2 + A_3 P^3}{1 + B_1 T + B_2 T^2 + B_3 R + B_4 TR} \quad (D.4)$$

Em que  $P$  representa a pressão e  $T$  a temperatura, e os coeficientes  $A$  e  $B$ :

$A_1$	$2.070 \times 10^{-5}$	$B_1$	$3.426 \times 10^{-2}$
$A_2$	$-6.370 \times 10^{-10}$	$B_2$	$4.464 \times 10^{-4}$
$A_3$	$3.989 \times 10^{-15}$	$B_3$	$4.215 \times 10^{-1}$
		$B_5$	$-3.107 \times 10^{-3}$

Uma vez que este método alternativo foi determinado através de testes laboratoriais, tem um desvio de 1,3 mg/L associados. Sabendo  $R$ ,  $T$  e  $P$  é possível determinar  $r_T$ , relativo ao coeficiente de temperatura de uma amostra standard de água do mar, através da equação D.5:

$$r_T = c_0 + c_1 T + c_2 T^2 + c_3 T^3 + c_4 T^4 \quad (D.5)$$

Onde:

$c_0$	$6,766097 \times 10^{-1}$
$c_1$	$2,00564 \times 10^{-2}$
$c_2$	$1,104259 \times 10^{-4}$
$c_3$	$-6,9698 \times 10^{-7}$
$c_4$	$1,0031 \times 10^{-9}$

A utilização deste modelo matemática para a medição da salinidade é feita para valores de salinidade entre 2 e 42, medindo a condutividade  $C$  de uma amostra a temperatura  $T$  e pressão  $P$ .



# Anexo E – Caracterização de fontes de água

---

As características da água das fontes número 1 e número 2 sofrem alterações consoante as alterações atmosféricas, o que ajuda a compreender qual a origem da água. As figuras representadas têm o objetivo de facilitar o entendimento da relação entre as condições atmosféricas e as características da água.

## E.1 - Fonte de água nº1

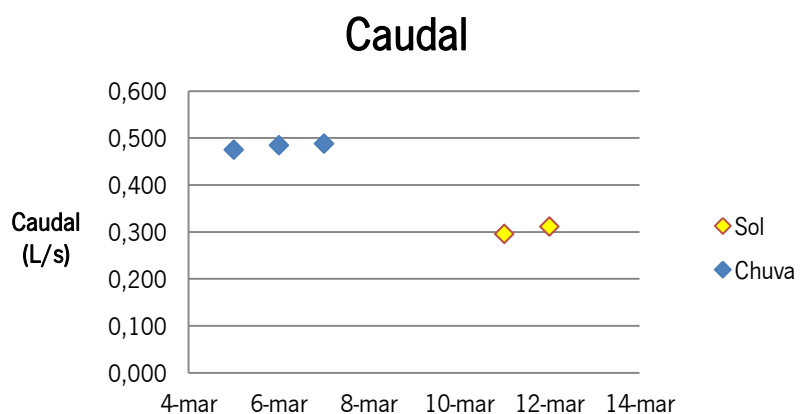


Figura E.1.1 - Variação do caudal da fonte de água número 1.

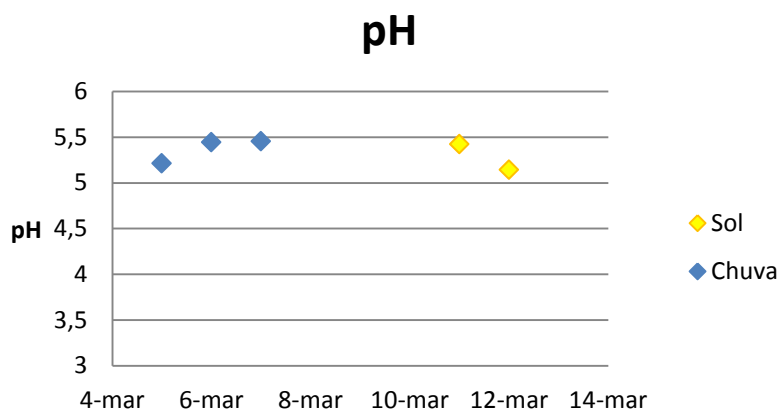


Figura E.1.2 - Variação do pH da fonte de água número 1.

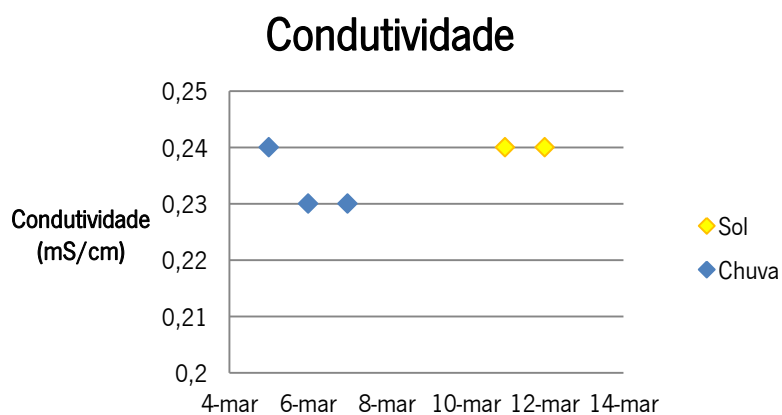
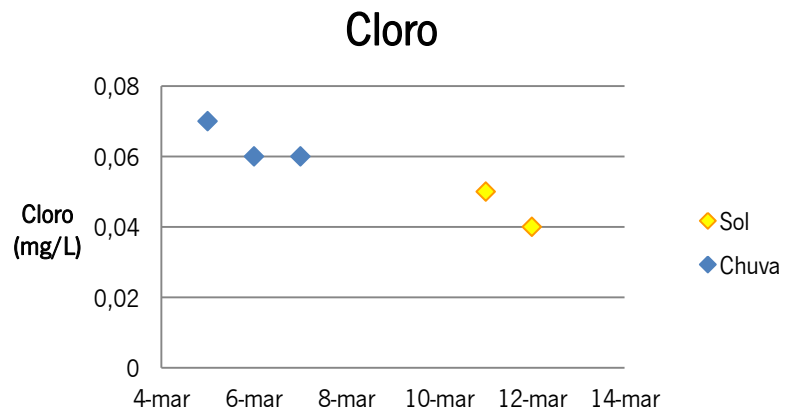


Figura E.1.3 - Variação da condutividade da fonte de água número 1.



**Figura E.1.4** - Variação do teor de cloro da fonte de água número 1.

## E.2 – Fonte de água nº2

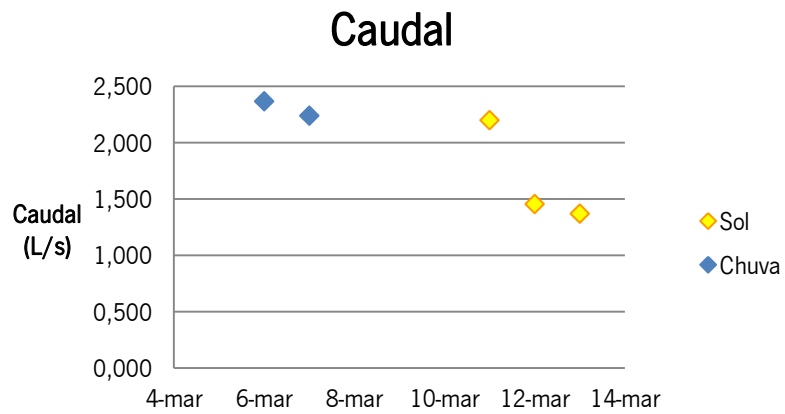


Figura E.2.1 - Variação do caudal da fonte de água número 2.

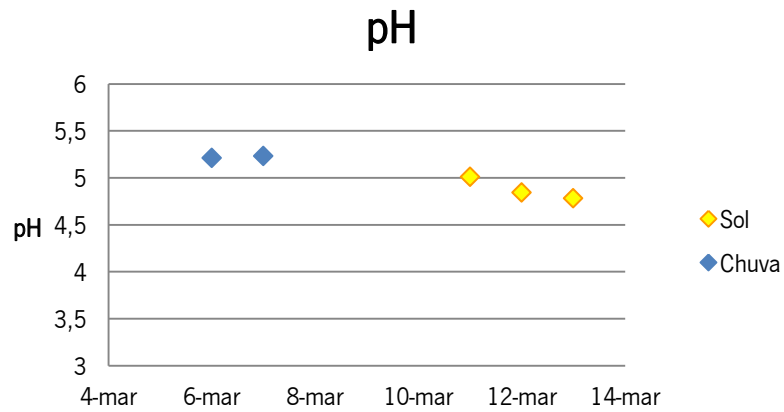


Figura E.2.2 - Variação do pH da fonte de água número 2.

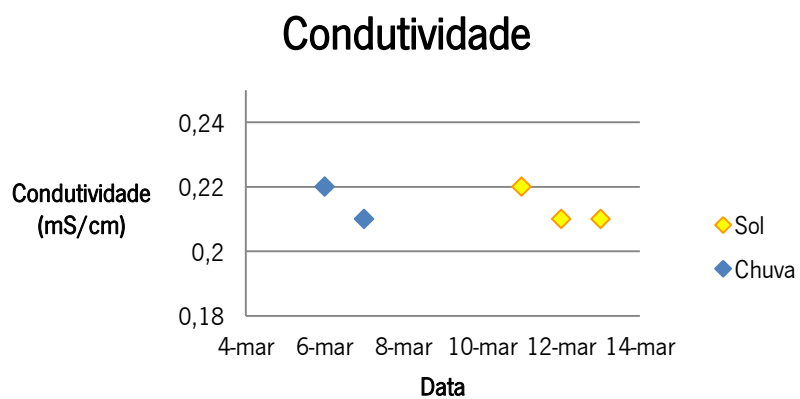


Figura E.2.3 - Variação da condutividade da fonte de água número 2.

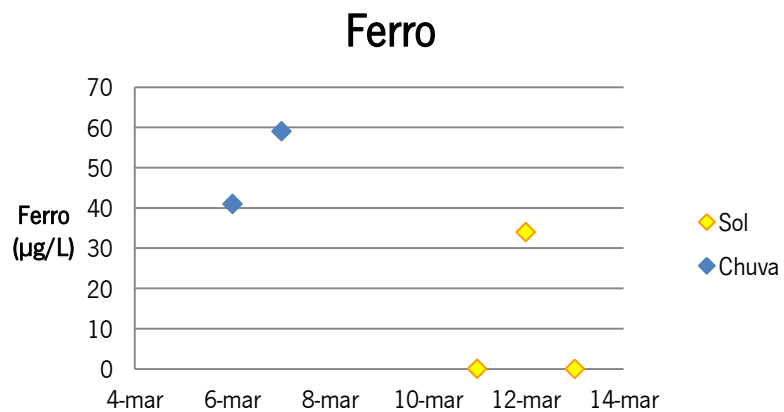


Figura E.2.4 - Variação do teor em ferro da fonte de água número 2.

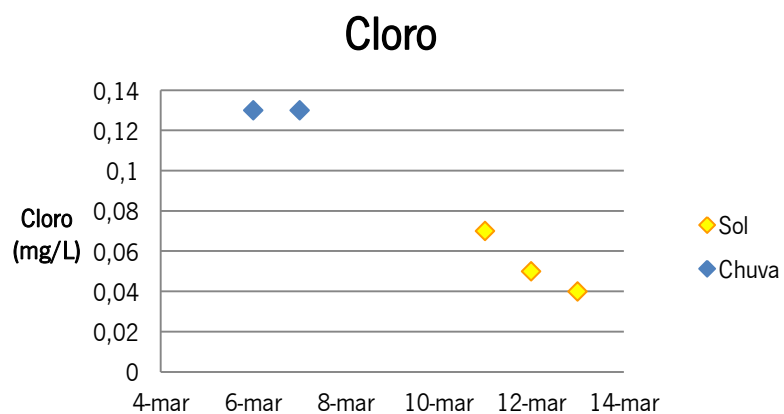


Figura E.2.5 - Variação do teor de cloro da fonte de água número 2.





# Anexo F – Exemplos de cálculo

A diversidade de cálculos efetuados obriga à exemplificação de cada equação utilizada neste projeto. Para o efeito são exemplificados os cálculos de variáveis na determinação dos gastos de água, da salinidade de amostras, e da análise de Pinch aos consumos de água.

## F.1 – Captações e descargas de água

A análise às captações e descargas foi feita por análise direta, isto é, comparação entre valores para igual período. Dessa comparação faz parte “Variação de captação/descarga no primeiro semestre de 2014 em comparação com o de 2013”, presente na tabela 4.

A variação de captação foi determinada através da diferença entre volume captada no primeiro semestre de cada ano, sendo apresentado em percentagem, tal como mostra a equação F.1.1:

$$\begin{array}{l|l} \text{Volume captado em 2014 (m}^3\text{)} & 363651 \\ \text{Volume captado em 2013 (m}^3\text{)} & 370675 \end{array}$$

$$\text{Variação captação (2014;2013)} = \frac{\text{Volume captado}_{2014} - \text{Volume captado}_{2013}}{\text{Volume captado}_{2014}} \times 100 \Leftrightarrow \quad (\text{F.1.1})$$

$$\Leftrightarrow \text{Variação captação (2013;2014)} = \frac{363651 - 370675}{363651} \times 100 = -2 \%$$

A equação F.1.2 representa o mesmo cálculo mas para a descarga:

$$\begin{array}{l|l} \text{Volume descarregado em 2014 (m}^3\text{)} & 310824 \\ \text{Volume descarregado em 2013 (m}^3\text{)} & 345061 \end{array}$$

$$\text{Variação descarga (2013;2014)} = \frac{\text{Volume descarregado}_{2014} - \text{Volume descarregado}_{2013}}{\text{Volume descarregado}_{2014}} \times 100 \Leftrightarrow \quad (\text{F.1.2})$$

$$\Leftrightarrow \text{Variação descarga (2013;2014)} = \frac{310824 - 345061}{310824} \times 100 = -10 \%$$

## F.2 – Salinidade

Para a determinação dos STD presentes numa amostra foi utilizada a equação F.2.1. Serve como exemplo a determinação dos STD de uma amostra de água bruta:

$$\begin{array}{l|l} \text{Residuo Seco (mg)} & 410 \\ \text{Volume (L)} & 0,5 \end{array}$$

$$\text{STD (mg/L)} = \frac{\text{Residuo seco (mg)}}{\text{Volume de amostra (L)}} \Leftrightarrow \text{STD (mg/L)} = \frac{410 \text{ mg}}{0,5 \text{ L}} = 820 \text{ mg/L} \quad (\text{F.2.1})$$

Após efetuado o cálculo anterior para cada amostra foi determinado um valor médio, assim como o respetivo desvio padrão, para representar a salinidade.

A salinidade prática foi calculada com recurso à PSS-78 e à equação que a caracteriza representada pela equação 14.

Serve como exemplo a determinação da salinidade prática de uma amostra de água bruta.

Inicialmente foi determinado a razão  $k_{15}$  (15°C e à pressão atmosférica):

$$\begin{array}{l|l} \text{Condutividade elétrica da amostra (mS/cm)} & 0,5 \\ \text{Condutividade elétrica da solução de KCl (mS/cm)} & 18,3 \end{array}$$

$$k_{15} = \frac{\text{Condutividade elétrica da amostra (mS/cm)}}{\text{Condutividade elétrica da solução de KCl (mS/cm)}} \Leftrightarrow k_{15} = \frac{0,5 \text{ mS/cm}}{18,3 \text{ mS/cm}} = 0,0273 \quad (\text{F.2.2})$$

Uma vez determinado  $m^3$ , recorrendo à equação 14, é possível determinar a salinidade prática de uma amostra

$$S = 0,0080 + 0,1692 K_{15}^{1/2} + 25,3851 K_{15} + 14,0941 K_{15}^{3/2} - 7,0261 K_{15}^2 + 2,7081 K_{15}^{5/2} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow S = 732$$

Após efetuado o cálculo anterior para cada amostra foi determinado um valor médio, assim como o respetivo desvio padrão, para representar a salinidade.

Ainda no domínio da salinidade foi determinado um fator de variação  $\Delta_{1,2}$ , que representa a razão entre os dois métodos utilizados e é apresentado em percentagem.

Como exemplo são utilizados os valores obtidos na medição da salinidade da água bruta:

Salinidade média da água bruta (PSS-78)	667
Salinidade média da água bruta (STD)	867

$$\Delta_{1,2} (\%) = \frac{\text{Salinidade (PSS-78)}}{\text{Salinidade (STD)}} \times 100 \Leftrightarrow \Delta_{1,2} (\%) = \frac{667}{867} = 23 \% \quad (\text{F.2.3})$$

### F.3 – Análise de Pinch

Como referido no ponto 4.1, um dos passos importantes na análise de Pinch passa pela correta recolha de dados. Para tal foram inicialmente recolhidos dados sobre o consumo de água em cada processo para que de seguida fosse determinado  $\Delta m_{total}$ , tal como representa a equação 2. Serve como exemplo a determinação da carga de contaminante transferida no processo de tinturaria de felpo:

$$\begin{array}{l|l} f_{\text{água}} \text{ (t/h)} & 73,314 \\ C_{\text{entrada}} \text{ (mg/L)} & 667 \\ C_{\text{saída}} \text{ (mg/L)} & 12000 \end{array}$$

$$f_{\text{água}} \text{ (t/h)} = \frac{\Delta m_{\text{total}} \text{ (kg/h)}}{[C_{\text{a,out}} - C_{\text{a,in}}] \text{ (mg/L)}} \times 10^3 \Leftrightarrow$$
$$\Leftrightarrow 73,314 \text{ t/h} = \frac{\Delta m_{\text{total}}}{(12000 - 667) \text{ mg/L}} = 830,867 \text{ kg/h}$$

#### F.4 – Caudal mínimo de água sem reutilização

A diminuição dos consumos de água iniciou-se com a determinação do caudal mínimo de água excluindo a hipótese de reutilizar correntes. Para isso é considerada a utilização de água doce no processo, pelas razões referidas no ponto 4.2.1.

Uma vez que as concentrações de saída e a carga transferida são características do processo, a utilização de água doce à entrada terá influência no caudal de água necessário. Considerando a equação 5, foi determinado o caudal de água mínimo para cada processo. Serve de exemplo a tinturaria de felpo:

$$\begin{array}{l|l} \Delta m_{\text{total}} \text{ (kg/h)} & 830,867 \\ C_{\text{saída}} \text{ (mg/L)} & 12000 \end{array}$$

$$f_{\text{água}} \text{ (t/h)} = \frac{\Delta m_{\text{total}} \text{ (kg/h)}}{C_{\text{a,out}} \text{ (mg/L)}} \times 10^3 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow f_{\text{água}} \text{ (t/h)} = \frac{830,867 \text{ kg/h}}{12000 \text{ mg/L}} = 69,239 \text{ t/h}$$

Determinado o caudal de água mínimo para cada operação unitária, é necessário calcular o caudal mínimo de água para satisfazer as necessidades do sistema global. A equação 6 determina o caudal de água total:

$$\begin{array}{l|l} f_{\text{água}} \text{ Tint. Felpo (t/h)} & 69,239 \\ f_{\text{água}} \text{ Tint. Fio (t/h)} & 13,917 \\ f_{\text{água}} \text{ Engomagem (t/h)} & 1,800 \end{array}$$

$$f_{\text{água,min}}^{\text{total}} \text{ (t/h)} = \sum \frac{\Delta m_{\text{total}} \text{ (kg/h)}}{C_{\text{a,out}} \text{ (mg/L)}} \times 10^3 = \sum f_{\text{água}} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow f_{\text{água,min}}^{\text{total}} \text{ (t/h)} = (69,239 + 13,917 + 1,800) \text{ t/h} = 84,956 \text{ t/h}$$

Conhecendo o caudal mínimo necessário é possível determinar a poupança de água:

$$\% \text{ Poupança} = \frac{f_{\text{água incial}} - f_{\text{água,min}}}{f_{\text{água incial}}} \times 100 = \frac{90,102 - 84,956}{90,102} \times 100 = 6 \% \quad (\text{F.4.1})$$

## F.5 – Caudal mínimo de água com reutilização

### Modelo gráfico

O principal objetivo do projeto passou por maximizar a poupança de água, baseando-se numa ideologia de reutilização de correntes. O ponto 4.2.2 explica os fundamentos teórico-práticos aplicados.

O modelo gráfico utilizado é caracterizado por representar a carga mássica transferida acumulada entre processos ( $\Delta m_{total}$ ). A equação F.5.1 representa o cálculo efetuado, tendo como base o exemplo da Tinturaria de Fio:

$$\begin{array}{l|l} \Delta m_{Engomagem, total} \text{ (kg/h)} & 16,326 \\ \Delta m_{Tint. fio, total} \text{ (kg/h)} & 129,989 \end{array}$$

$$\Delta m_{total}(\text{Engomagem;Tint. Fio}) \text{ kg/h} = \Delta m_{Engomagem, total} \text{ kg/h} + \Delta m_{Tint. Fio, total} \text{ kg/h} \Leftrightarrow \text{(F.5.1)}$$

$$\Leftrightarrow \Delta m_{total}(\text{Engomagem;Tint. Fio}) = 16,326 + 129,989 = 146,315 \text{ kg/h}$$

A utilização de um modelo gráfico consistiu na construção da CCC e conseqüentemente na reta característica da linha de consumo de água ótima. A equação 15 representa a equação da reta obtida.

$$C_{\text{Contaminante}} \text{ (mg/L)} = 11,898 \times \Delta m_{total} \text{ (kg/h)}$$

Uma vez que os valores limites são característicos dos processos,  $\Delta m_{total}$  é conhecido sendo dessa forma possível determinar a  $C_{\text{contaminante}}$  na saída que corresponde a  $C_{\text{Pinch}}^*$ :

$$\Delta m_{total} \text{ (kg/h)} \quad | \quad 977,182$$

$$C_{\text{Contaminante}} \text{ (mg/L)} = 11,898 \times \Delta m_{total} \text{ (kg/h)} = 11,898 \times 977,182 \text{ kg/h} \Leftrightarrow$$

$$C_{\text{Contaminante}} = 11626,5 \text{ mg/L}$$

Conhecendo a concentração de contaminante, recorrendo à equação 2 é possível determinar o menor caudal de água possível:

$$f_{\text{água}}(\text{t/h}) = \frac{\Delta m_{\text{total}}(\text{kg/h})}{[C_{\text{a,out}} - C_{\text{a,in}}](\text{mg/L})} \times 10^3 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow f_{\text{água}}(\text{t/h}) = \frac{977,182 \text{ kg/h}}{(11626,5-0) \text{ mg/L}} \times 10^3 = 84,048 \text{ t/h}$$

A determinação do menor caudal de água é ainda possível ser determinada fazendo o inverso do declive da linha de fornecimento de água ótima, tal como representa a equação 4:

$$f_{\text{água}}(\text{t/h}) = \frac{\Delta m_{\text{total}}(\text{kg/h})}{[C_{\text{a,out}} - C_{\text{a,in}}](\text{mg/L})} \times 10^3 = \frac{1}{\text{Declive}} \times 10^3 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow f_{\text{água}}(\text{t/h}) = \frac{1}{\text{Declive}} \times 10^3 = \frac{1}{11,898} \times 10^3 = 84,048 \text{ t/h}$$

Da mesma forma que para a situação de não reutilização (equação F.4.1), foi determinada a percentagem de água que a análise de Pinch com reutilização permitiria obter:

$$\% \text{ Poupança} = \frac{f_{\text{água inicial}} - f_{\text{água,min}}}{f_{\text{água inicial}}} \times 100 = \frac{90,102 - 84,048}{90,102} \times 100 = 7 \%$$

### Modelo tabelar

O modelo tabelar iniciou-se com a determinação da massa transferida em cada intervalo de concentração  $k$ , considerando as correntes que dele fazem parte, tal como representado na equação 9. Servindo o intervalo de concentração 2 como exemplo:

$C_2$ (mg/L)	667
$C_3$ (mg/L)	9070
$f_{\text{Engomagem}}^{\text{lim}}$ (t/h)	1,800
$f_{\text{Tint. Fio}}^{\text{lim}}$ (t/h)	14,990
$f_{\text{Tint. Felpo}}^{\text{lim}}$ (t/h)	73,314



$$m_k = \frac{[C_{k+1} - C_k](\text{mg/L})}{10^3} \times \sum_p f_p^{\text{lim}} (\text{t/h}) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow m_2 = \frac{[C_{k+1} - C_k](\text{mg/L})}{10^3} \times [(f_{\text{Engomagem}}^{\text{lim}} + f_{\text{Int. Fio}}^{\text{lim}} + f_{\text{Int. Felpo}}^{\text{lim}})](\text{t/h}) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow m_2 = \frac{(9070-667) \text{ mg/L}}{10^3} \times (1,8+14,990+73,314) \text{ t/h} = 756,125 \text{ kg/h}$$

A carga mássica acumulada é determinada fazendo o somatório de toda a carga transferida num intervalo de concentração e em todos os anteriores. Utilizando o intervalo de concentração 2:

$$\begin{array}{l|l} m_1 (\text{kg/h}) & 1,201 \\ m_2 (\text{kg/h}) & 756,125 \end{array}$$

$$\Delta m_2 (\text{kg/h}) = [m_1 + m_2] (\text{kg/h}) = 1,201 + 756,125 \Leftrightarrow \quad (\text{F.5.2})$$

$$\Leftrightarrow \Delta m_2 = 757,326 \text{ kg/h}$$

Para uma correta e mais completa compreensão do que cada intervalo  $k$  representa na análise, assim como o peso que cada corrente de processo tem, é importante determinar a carga transferida por cada corrente em cada intervalo (equação 8). Como exemplo é utilizado o intervalo 2 e a corrente do processo de engomagem ( $m_{\text{Engomagem},2}$ ):

$$m_{p,k} (\text{kg/h}) = \frac{f_p^{\text{lim}} (\text{t/h}) \times [C_{k+1} - C_k] (\text{mg/L})}{10^3} \Leftrightarrow$$

$$m_{\text{Engomagem},2} = \frac{1,800 \text{ t/h} \times (9070-667) \text{ mg/L}}{10^3} = 15,125 \text{ kg/h}$$

O passo seguinte corresponde ao cálculo do menor caudal de água que satisfaça as necessidades do sistema global. Para isso é determinado o caudal de água mínimo para cada intervalo de concentração, segundo a equação 11. Para o efeito, é utilizado como exemplo de cálculo a determinação do caudal de água do intervalo 3 uma vez que é esse que corresponde ao caudal mínimo de água exigido:

$$\begin{array}{l|l} \Delta m_3 \text{ (kg/h)} & 782,167 \\ C_4^{\text{lim}} \text{ (mg/L)} & 9340 \end{array}$$

$$f_{\text{água}, k} \text{ (t/h)} = \frac{\Delta m_k \text{ kg/h}}{C_{k+1}^{\text{lim}} \text{ mg/L}} \times 10^3 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow f_{\text{água}, 3} \text{ (t/h)} = \frac{782,167 \text{ kg/h}}{9340 \text{ mg/L}} \times 10^3 = 83,744 \text{ t/h}$$

Tal como para o modelo gráfico (equação F.4.1), foi determinada a poupança de água que o modelo gráfico permite obter:

$$\% \text{ Poupança} = \frac{f_{\text{água inicial}} - f_{\text{água, min}}}{f_{\text{água inicial}}} \times 100 = \frac{90,102 - 83,744}{90,102} \times 100 = 7 \%$$

## F.6 – Diagrama de rede

Na representação do diagrama de rede relativo às alterações provocadas pela reutilização de água, é determinado o caudal de água a ser distribuído/reutilizado por cada processo em cada intervalo de concentração. Desta forma, serve como exemplo de cálculo (equação 13) o caudal de água utilizado pelo processo de engomagem no intervalo de concentração 2:

$$\begin{array}{l|l} m_{\text{Engomagem},2} \text{ (kg/h)} & 15,124 \\ m_2 \text{ (kg/h)} & 757,125 \\ f_{\text{água};\text{min}}^{\text{total}} \text{ (t/h)} & 83,744 \end{array}$$

$$f_{p,k} \text{ (t/h)} = \frac{m_{p,k} \text{ (kg/h)}}{m_k \text{ (kg/h)}} \times f_{\text{água};\text{min}} \text{ (t/h)} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow f_{\text{Engomagem},2} = \frac{15,125 \text{ kg/h}}{757,125 \text{ kg/h}} \times 83,744 \text{ t/h} = 1,673 \text{ t/h}$$

## F.7 – Fator de correção

Foi utilizado um fator de correção de modo a tornar os resultados o mais real possível. O fator de correção foi utilizado nas concentrações medidas à saída. Serve de exemplo o efluente da tinturaria de felpo:

$$\begin{array}{l|l} \text{Fator de correção} & 0,8837 \\ C_{\text{saída}} \text{ (mg/L)} & 12000 \end{array}$$

$$C_{\text{saída}}^* \text{ (mg/L)} = \text{Fator de correção} \times C_{\text{saída}} \text{ (mg/L)} \Leftrightarrow \quad (\text{F.7.1})$$

$$\Leftrightarrow C_{\text{saída}}^* \text{ (mg/L)} = 0,8837 \times 12000 \text{ mg/L} = 10604,4 \text{ mg/L}$$

O método de determinação do menor caudal de água foi semelhante ao exemplificado no anexo F.5, tendo-se obtido da mesma forma a reta característica da linha de fornecimento de água ótima (equação 16):

$$C_{\text{contaminante}} \text{ (mg/L)} = 12,020 \times \Delta m_{\text{total}} \text{ (kg/h)}$$

Sabendo que o menor caudal de água é inverso do declive, tal como apresentado na equação 3:

$$\Leftrightarrow f_{\text{água}} \text{ (t/h)} = \frac{1}{\text{Declive}} \times 10^3 = \frac{1}{12,020} \times 10^3 = 83,195 \text{ t/h}$$

A utilização do fator de correção provou-se vantajosa uma vez que aumenta a capacidade de reduzir os consumos de água (equação F.4.1):

$$\% \text{ Poupança} = \frac{f_{\text{água inicial}} - f_{\text{água;min}}}{f_{\text{água inicial}}} \times 100 = \frac{90,102 - 83,195}{90,102} \times 100 = 8 \%$$