

Mestrado Integrado em Engenharia Química

***Optimização da instalação de Água recuperada
e seus consumos***

Tese de Mestrado

desenvolvida no âmbito da disciplina de

Projecto de Desenvolvimento em Ambiente Empresarial

Maria Rita Queirós Soares Alves



Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia

FEUP

Departamento de Engenharia Química

Orientador na FEUP: Prof. Adélio Mendes

Orientador na empresa: Eng. José Aleixo

Fevereiro de 2008

Agradecimentos

Queria dedicar este espaço a todos aqueles que contribuíram para este trabalho, de forma directa ou indirecta, sem os quais este trabalho não teria sido possível.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer aos meus orientadores, Prof. Doutor Adélio Mentos da parte da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e ao Eng. José Aleixo da parte da Unicer Cervejas, pela orientação, apoio e liberdade de decisão que me foi concedida ao longo do projecto.

Seguidamente gostaria de agradecer a todos os que lidaram directamente comigo do Serviço de Manutenção Energia e Fluidos pelo apoio e convívio diários ao longo destes meses de trabalho.

Gostaria ainda de agradecer à Eng. Margarida Catarino pelo apoio laboratorial de membranas e filtração e ao Prof. Doutor Rui Boaventura pelos esclarecimentos e conhecimentos na área de ambiente em especial no tratamento de águas.

Para finalizar queria deixar um agradecimento para todos aqueles que contribuíram com motivação, atenção e apoio ao longo deste projecto e de toda a minha vida académica, em especial ao Hélder, à Maria e ao Júlio pela preocupação e presença constantes.

Resumo

O presente projecto tem como objectivo a melhoria do funcionamento da instalação de recuperação de água da ETAR da UNICER - Leça, para que seja obtida uma água com qualidade superior à actual. Na primeira fase foram determinados os consumidores da água recuperada para que se pudesse definir a qualidade e quantidade necessária da mesma. Numa segunda fase foram optimizadas as condições de operação da instalação actual. Finalmente foi estudada a implementação de novos equipamentos. Foram analisadas algumas propostas de empresas e realizados teste piloto com uma unidade de filtração multimédia pressurizada e uma unidade de nanofiltração.

Os testes à unidade de filtração multimédia pressurizada permitiram determinar que a sua implementação seria uma mais valia na instalação, retirando a cor da água em cerca de 50 % e a turvação em cerca de 75 % diminuindo assim a sobrecarga da unidade de ultrafiltração.

Os testes à unidade de nanofiltração permitiram concluir que a água obtida, tendo por alimentação água vinda da unidade de filtração multimédia pressurizada, respeita os valores para os parâmetros inicialmente definidos como de qualidade mínima aceitável para a água final.

Mais testes são necessários, assim como uma análise económica mais pormenorizada, a fim de determinar qual a solução mais apropriada.

Palavras-chave (Tema):

Tratamento de água recuperada, sistema de filtração multimédia pressurizado, nanofiltração.

Abstract

The purpose of the project was the improvement of the water treatment facility in order to obtain water with higher quality that could be used in not noble processes inside Unicer. We began by determining the internal consumers of the recovered water, as well as the quantity and quality of the water needed. On a second stage of the project the working conditions of the present installation were optimized. Finally the implementation of new equipment was studied. Proposes of some suppliers were analysed and some pilot tests were made on a multimedia pressure filtration and a nanofiltration unit.

The test performed to the multimedia pressure filtration determined that its implementation would improve the water quality considerably, removing 50 % of its initial colour and 75 % of the turbidity improving the operation of the existing ultrafiltration unit.

The test performed to the nanofiltration unit with water from the multimedia pressure filtration determined the water obtained has minimum quality determined in the beginning of the project.

Further tests will be necessary, as well as a detailed economical analysis to determine which solution is more appropriate to solve the problem definitively.

Índice

Índice	i
Notação e Glossário	ii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento do projecto - a indústria cervejeira	1
1.1.1 <i>As matérias-primas</i>	1
1.1.2 <i>O processo de produção</i>	2
1.1.3 <i>A água na indústria cervejeira</i>	3
1.2 Instalação de água recuperada original	4
2 Melhorias do sistema de tratamento de água recuperada	8
2.1 Optimização da instalação actual	8
2.1.1 <i>Optimização da correcção de pH</i>	8
2.1.2 <i>Optimização do funcionamento do filtro de areia</i>	9
2.1.3 <i>Optimização do coagulante</i>	10
2.2 Propostas de alteração do <i>lay-out</i> e introdução novos processos	12
2.3 Testes de membranas de nanofiltração	19
2.4 Testes ao sistema de filtração multimédia pressurizado - OFSY's	24
3 Conclusões	29
4 Avaliação do trabalho realizado	30
4.1 Objectivos Realizados	30
4.2 Outros Trabalhos Realizados	30
4.3 Limitações e Trabalho Futuro	30
4.4 Apreciação final	31
5 Bibliografia	32
A. Apêndice A	i
B. Apêndice B	vii

Notação e Glossário

Lista de Siglas

UV	Ultra-Violeta
SST	Sólidos Suspensos Totais
CQO	Carência Química em Oxigênio
CBO	Carência Bioquímica em Oxigênio
VMA	Valor máximo admissível
TA	Torres de Arrefecimento
CE	Condensadores Evaporativos
TOC	Total Oxygen Content
SDI	Silt Density Index
GFD	gallons per foot square of membrane area per day
T	Temperatura
P	Pressão
u	Velocidade superficial
UF	Ultrafiltração
RO	Reverse Osmosis

1 Introdução

1.1 Enquadramento do projecto - a indústria cervejeira

O projecto desenvolvido, embora não directamente ligado à indústria em que se insere, foi realizado numa empresa de produção de cerveja. Será importante enquadrar o mesmo e descrever brevemente o processo de produção de cerveja.

1.1.1 As matérias-primas

A cerveja é constituída pelo seguinte conjunto de matérias-primas:

- Malte
- Outros cereais não maltados
- Lúpulo
- Levedura
- Água

O malte é obtido da cevada, após um processo de germinação controlado (a maltagem), e de um processo de torrefacção. As condições da maltagem - temperatura, duração, etc. - levam à produção de diferentes tipos de malte, que por sua vez, originam diferentes tipos de cerveja. O malte tem grande influência na cor e no aroma da cerveja.

São usados outros cereais não maltados na produção de cerveja; é frequentemente usado o milho, o arroz, o trigo e a cevada não maltada. O milho é normalmente introduzido no processo sobre a forma de *gritz*, ou seja, após lhe ser removida a gordura e sofrer um processo de moagem. Estes cereais são utilizados com o objectivo de diminuir a quantidade de proteínas existentes no mosto. A influência a nível aromático na cerveja será diferente consoante o cereal que é usado.

O lúpulo é outro dos ingredientes essenciais no processo de produção de cerveja. É esta planta aromática a responsável pelo sabor amargo tão característico da cerveja. Também tem como função ajudar na produção de uma boa espuma e na protecção da cerveja contra contaminações microbiológicas.

As leveduras são as responsáveis pela fermentação da cerveja, ou seja, pela produção do álcool, dióxido de carbono e aromas presentes na cerveja final.

A água utilizada ao longo da produção tem de possuir uma composição em sais minerais adequada a cada fase do processo. Diferentes qualidades de água são usadas em diferentes passos da produção de cerveja conforme o objectivo desta.

1.1.2 O processo de produção

O processo de produção pode ser dividido em três partes distintas:

- Fabrico
- Fermentação, maturação, estabilização e clarificação
- Enchimento

O fabrico engloba os passos essenciais à fabricação do mosto e pode ser subdividido em quatro fases. No início do processo temos a moagem dos cereais. Esta moagem vai facilitar a extracção dos componentes dos cereais. Alguns dos cereais podem ser comprados e aprovisionados já com uma moagem adequada.

A fase que se segue à moagem é a brassagem. A brassagem é o que origina o mosto que resulta da mistura de água com a farinha dos cereais previamente seleccionados para a cerveja. As condições operatórias a que se processa a brassagem, como a temperatura, o pH e mesmo o tempo de duração, dependem do tipo de cerveja a produzir. Esta fase da produção tem uma duração que pode variar entre 2 horas e 4 horas e termina a uma temperatura que ronda normalmente os 75 °C.

No final da brassagem o mosto produzido é sujeito a um processo de filtração para se separar a parte insolúvel, denominada drêche, do mosto. Esta filtração é feita num filtro prensa com a introdução de água à mesma temperatura do mosto. Esta diluição ajuda à filtração que tem uma duração de 2 a 3 horas à temperatura média de 75°C. O drêche é utilizado para a alimentação de gado.

A última fase do fabrico é a ebulição do mosto previamente filtrado e diluído. Nesta fase o mosto é levado á ebulição durante cerca de 2 horas, após a adição de lúpulo. Isto vai permitir a eliminação de composto voláteis indesejados, a esterilização do mosto, a precipitação de proteínas de alto peso molecular e a fixação da concentração final do mosto.

Antes do mosto seguir para outra fase da produção é-lhe retirado o precipitado proteico por acção da gravidade ou centrifugação. O mosto é ainda arrefecido a 9°C e arejado em condições estéreis.

Após o fabrico temos a fase de fermentação. Ao mosto que vem da ebulição é adicionada a levedura que varia conforme o tipo de cerveja que se quer produzir. Nesta fase os açúcares

do mosto são transformados em álcool e dióxido de carbono. Esta operação processa-se a temperatura controlada durante cerca de 7 dias. No final, a levedura encontra-se depositada no tanque de fermentação por acção da gravidade.

A maturação é a fase do processo seguinte á fermentação, onde se dá a libertação de componentes voláteis indesejáveis.

Seguidamente temos a estabilização. Nesta fase deixa-se estabilizar a cerveja a uma temperatura entre os 0 °C e os 2 °C para que esta se equilibre coloidalmente.

A cerveja é então filtrada uma última vez para retirar alguma turvação que se encontre ainda em suspensão, é chamada a clarificação da cerveja. A cerveja é finalmente armazenada em cubas para posteriormente passar à fase de enchimento que se pode dar em garrafas de tara perdida, garrafas de tara retornável ou barril. (portal da Unicer na Internet, 2008).

1.1.3 A água na indústria cervejeira

A água é a principal matéria-prima e utilidade na indústria cervejeira. No entanto, a qualidade mínima necessária desta varia conforme a função para a qual vai ser usada. Existem assim, vários tipos de água presentes na fábrica, que se distinguem pela sua origem, tratamento e qualidade:

- Água da rede geral
- Água do processo
- Água descalcificada
- Água de diluição/desarejada
- Água desmineralizada
- Água recuperada

A água utilizada por ser proveniente da rede municipal (SMAS) - cerca de 55 % - ou de furos de captação-cerca de 45 %. No entanto, para que possa ser usada, a água captada tem de sofrer um processo de tratamento. Esta água é clorada, seguidamente sofre um processo de arejamento/oxidação e finalmente é filtrada por 6 filtros de areia, os filtros OFSY, que funcionam em dois estágios - 3 filtros em paralelo em cada estágio.

A água de rede geral é uma água de qualidade média e com poucas especificações. A água da rede geral é constituída por água de furos e por alguma água proveniente do rejeitado da osmose inversa. Os principais consumidores desta água são as adegas (nome dado ao local onde se dá a produção pós fabrico), os edifícios, as centrais - na recuperação de CO₂, instalação de frio e torres de arrefecimento - a minifábrica e enchimento.

A água do processo é uma água com uma qualidade superior à água de rede geral. Esta água é proveniente dos furos e sofre um tratamento num filtro de carvão activado. Segue então para os diferentes consumidores: minifábrica, adegas, fabrico, arrefecimento do mosto e instalação piloto.

A água descalcificada é uma água que já tem algumas restrições apertadas em relação ao limite de sais presentes. É uma água que é usada para as centrifugas e é proveniente da água do processo que sofre um tratamento adicional. Esse tratamento consiste num descalcificador seguido de um filtro de carvão.

A água de diluição/desarejada é, possivelmente, a água com especificações mais apertadas usada nesta indústria. É uma água usada nas adegas para diluição da cerveja pelo que não pode trazer nenhum componente que altere a sua composição, sabor ou aroma. Esta água é produzida a partir da água descalcificada e sujeita a um tratamento posterior que consiste em: osmose inversa, filtro de carvão activado, um polidor (filtro de segurança que impede o arrastamento de partículas de carvão), uma torre de arejamento e uma lâmpada de UV (ultravioleta).

A água desmineralizada é uma água com bastantes restrições no que toca ao teor em sais uma vez que é a água usada nas caldeiras. Para evitar problemas de corrosão e encrustamento esta água deve ter uma quantidade de sais mínima. Na produção desta água é usada água do SMAS que é passada por um filtro de carvão activado, uma osmose inversa, um leito misto e um desgasificador.

Finalmente temos a água recuperada, sobre a qual incide directamente este projecto. É uma água que é usada para vários fins: regas, lavagem de pavimentos, linhas de enchimento e pasteurizadores. Esta água é produzida a partir da água da ETAR e sofre um tratamento que passa actualmente por um filtro de areia, ultrafiltração, correcção de pH e um descarbonatador.

1.2 Instalação de água recuperada original

Este capítulo é dedicado à descrição e análise da instalação que se pretendia otimizar, assim como os problemas encontrados.

A instalação existente tinha por objectivo recuperar a água vinda da ETAR, sujeitando-a a um processo que a tornasse passível de ser utilizada como água secundária no processo. Para isso foi definida a qualidade e quantidade de água necessária sendo o projecto inicial desenhado para produzir $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ de água com os parâmetros dentro dos limites legais do que é considerada uma água potável - no apêndice A encontra-se o decreto-lei nº 243/2001 de 5 de Setembro que define os parâmetros de qualidade de água potável.

Para tal finalidade foi projectada uma instalação constituída pelos seguintes equipamentos principais de tratamento:

- Um filtro de areia
- Uma ultrafiltração
- Um descarbonatador
- Uma lâmpada de ultravioleta (UV)

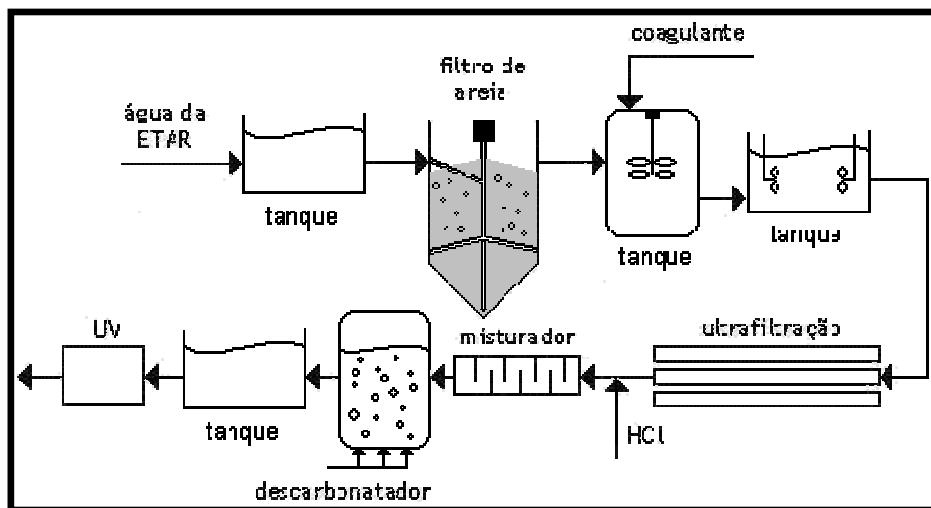
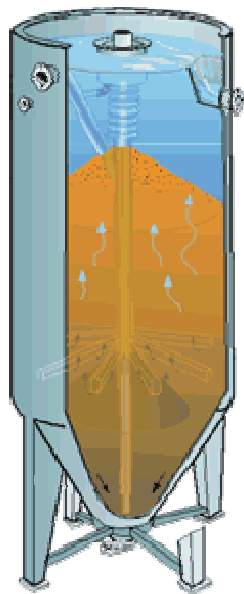


Figura 1-1- representação esquemática da instalação

Na figura 1.1 é possível ter uma visão geral da instalação. A água que é recolhida da ETAR é armazenada num tanque que envia a água, sem qualquer tipo de tratamento adicional, ao filtro de areia.

O filtro de areia está projectado para diminuir a turvação, a quantidade de sólidos suspensos totais (SST), a carência química em oxigénio (CQO), a carência biológica em oxigénio (CBO) e a quantidade de amónia. Este filtro é de funcionamento contínuo, ou seja, tem lavagem contínua da areia e não tem necessidade de paragem. A água é alimentada através de um tudo até aos distribuidores, que se encontram após a zona de afunilamento do filtro, como se pode ver na figura 1.2. A água sai dos distribuidores, atravessa a cama de areia até ao topo do filtro onde se encontra a saída de água tratada. Na base do filtro é injectado ar comprimido com duas funções distintas: parte desse ar circula com a água e a areia para arejamento e o restante circula num tubo central para a lavagem da areia.

O arejamento é essencial para o bom desenvolvimento da biomassa presente na cama de areia, que faz a decomposição dos compostos orgânicos e amónia. A lavagem é feita, como referido anteriormente, num tubo central, que através de injeção no fundo com ar



comprimido faz o arrastamento da areia do fundo do filtro até ao topo, para uma câmara de lavagem. Essa areia é separada das partículas e flocos e volta a entrar na cama de areia, fazendo assim uma constante adição de areia limpa ao topo do filtro. O caudal de ar que faz o arejamento, assim como o caudal de limpeza da areia podem ser otimizados para uma melhor limpeza e decomposição biológica.

Seguidamente a água segue para um tanque agitado onde se dá a injeção de um coagulante e segue depois para um tanque de armazenamento com agitação.

Figura 1-2 - representação esquemática do filtro de areia contínuo

O passo seguinte é uma ultrafiltração projectada para a redução da turvação para níveis nunca superiores a 0,1 NTU e redução dos sólidos suspensos totais para níveis abaixo dos 0,3 mg.dm⁻³.

Após a ultrafiltração há uma correcção de pH com injeção de ácido clorídrico, que segue dióxido de carbono. Finalmente a água é passada numa lâmpada de ultravioleta como segurança para eliminação de bactérias e vírus.

Embora a instalação tenha sido projectada para produzir uma água potável tal não se verificava no início deste projecto de desenvolvimento. As análises apontavam para uma água com alto teor de sais, com uma alta alcalinidade e condutividade.

Sentiu-se necessidade de redefinir a qualidade de água que se queria obter no final do processo baseada na sua utilização. Assim, foram definidos três tipos de água que se queriam obter:

- água para ser utilizada no sistema de rega;
- água para ser utilizada em pasteurizadores, torres de arrefecimento e condensadores evaporativos;
- água para ser utilizada na alimentação à instalação de tratamento de água para as caldeiras.

A água para o sistema de rega é uma água sem especificações que pode inclusive ser utilizada conforme chega da ETAR, sem tratamento adicional.

Os limites para os parâmetros de qualidade da água para os pasteurizadores e torres de arrefecimento e condensadores evaporativos foram definidos em conjunto com os fornecedores e empresas que operam directamente com os equipamentos e obtiveram-se os seguintes valores máximos admissíveis - resumo dos valores na tabela 1.1.

A água de alimentação à instalação de tratamento de água para as caldeiras deve ser uma água com qualidade suficiente para alimentar uma membrana de osmose inversa mas valores máximos admissíveis não foram definidos. Admite-se que uma água com a qualidade definida para as TA e CE pode ser alimentada directamente a um sistema de osmose inversa.

Tabela 1.1- valores máximos admissíveis (VMA) para determinados parâmetros chave para a água de alimentação a pasteurizadores e torres de arrefecimento & condensadores evaporativos (TA & CE)

Parâmetro	Unidades	VMA pasteurizadores	VMA TA & CE
pH	escala de sorensen	7,5	-
condutividade	mS.cm ⁻¹	1200	1200
cloretos	mg(Cl ⁻).dm ⁻³	250	200
sulfatos	mg(SO ₄ ²⁻).dm ⁻³	250	100
sílica	mg(SiO ₂).dm ⁻³	-	6
cálcio	mg(Ca ²⁺).dm ⁻³	-	100
magnésio	mg(Mg ²⁺).dm ⁻³	-	20
dureza total	mg(CaCO ₃).dm ⁻³	-	100

2 Melhorias do sistema de tratamento de água recuperada

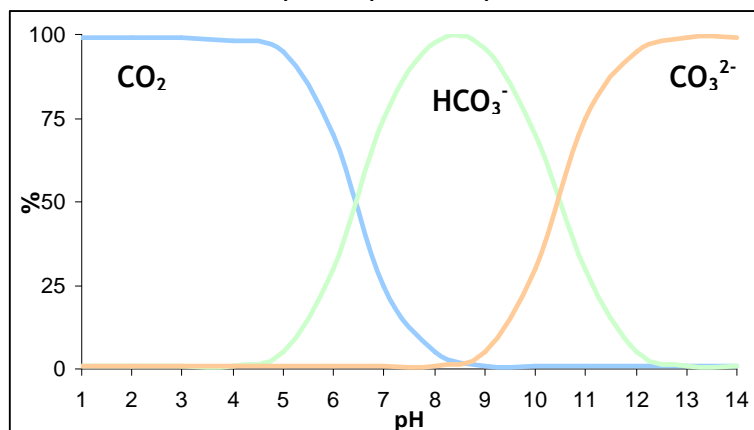
2.1 Optimização da instalação actual

Depois de cuidadosamente analisadas as falhas da instalação foram definidas três formas de optimização da instalação existente:

- optimização da correcção de pH
- optimização do funcionamento do filtro de areia
- optimização do coagulante

2.1.1 Optimização da correcção de pH

A instalação inicial apresentava alguns problemas na correcção do pH. É essencial ao funcionamento correcto do descarbonatador que o pH da água de entrada seja inferior, sensivelmente, a 6 para que o equilíbrio de carbonatos seja deslocado no sentido da



formação de dióxido de carbono que será posteriormente retirado da água sobre a forma de gás. Na figura ao lado temos a representação do sistema de equilíbrio dos carbonatos, ou seja, a sua forma química em função do pH.

Figura 2-1 - sistema de equilíbrio dos carbonatos

O ajuste de pH é feito através da injeção de ácido clorídrico após a ultrafiltração. Após a injeção a corrente passa num misturador estático para se obter uma mistura homogênea antes de entrar no descarbonatador. A quantidade de ácido injectado na corrente é determinada por um controlador proporcional - integral - derivativo (normalmente conhecido por controlador PID) programado de forma a ser mantido um pH de 6 á entrada do descarbonatador.

A quando do inicio do projecto verificou-se que a representação do pH á entrada do descarbonatador em função do tempo apresentava uma resposta oscilatória, alternando periodicamente entre os valores de 4 e 9. Esta oscilação tinha implicações directas na

remoção de carbonatos da água uma vez que quando a água entra no descarbonatador com pH superior a 7 não há remoção destes.

Para resolução deste problema procedeu-se a uma nova sintonização do controlador. Uma vez que o controlador não era físico mas sim parte integrante do programa informático esta sintonização foi feita pelo informático responsável pela programação do mesmo. A nova sintonização foi feita numa base de tentativa-erro.

2.1.2 Optimização do funcionamento do filtro de areia

O filtro de areia da instalação actual é, como já foi dito anteriormente, um filtro de areia de lavagem continua. O projecto inicial admite que este filtro tem como função reduzir:

- a turvação de 50 NTU para 20 NTU
- os SST de 50 para 20 mg.dm⁻³
- a CBO de 20 mg(O₂).dm⁻³ para 10 mg(O₂).dm⁻³
- a CQO de 75 mg(O₂).dm⁻³ para 50/20 mg(O₂).dm⁻³
- a amónia de 5 mg(N).dm⁻³ para 0,5 mg(N).dm⁻³

No início do projecto ao contrário do que era esperado verificou-se que havia um aumento de turvação na água após passar no filtro de areia. Por forma a compreender o motivo desse aumento procedeu-se a uma análise mais cuidadosa e a uma série de testes ao filtro de areia que permitiriam calcular o caudal de recirculação da areia, o caudal de lavagem da areia e determinar se haviam zonas preferenciais no leito de areia. O resumo dos resultados obtidos encontra-se na tabela 2.1 que mostram que os parâmetros de funcionamento do filtro de areia se encontram próximos do óptimo.

Tabela 2.1- resultados obtidos nos ensaios para a determinação do caudal de recirculação de areia e caudal de lavagem de areia

caudal de recirculação de areia			caudal de lavagem de areia		
quadrante	mm.min ⁻¹	desvio (%)	ensaio	m ³ .h ⁻¹	desvio (%)
1º	6,7	14	1	3,9	16
2º	5,5	6	2	3,5	22
3º	5,8	0	3	3,8	6
4º	5,4	8			
média	5,8		média	3,7	
Valor de projecto	[5-6]		Valor de projecto	4,5	

No entanto, ao analisar o modo de funcionamento do filtro de areia verificou-se que se estivesse parado durante umas horas, durante o arranque havia a libertação de quantidades significativas de biofilme. Uma vez que este filtro de areia funciona de forma a haver uma fina cama de biofilme presente no leito - que consome a amónia diminuindo a CBO e a quantidade de amónia total - a paragem deste filtro leva ao seu desenvolvimento exagerado. Assim, é crucial para o bom funcionamento do filtro que este tenha um funcionamento sem paragens.

Uma vez que a água obtida actualmente não cumpre os requisitos mínimos de qualidade que os consumidores internos necessitam os consumos são abaixo do esperado e muitas vezes a produção de água é parada por se atingir o nível máximo na cisterna de saída. Uma vez que o filtro de areia necessita de funcionamento contínuo propõe-se que seja implementada uma forma de reciclo que funcione no caso de paragem dos restantes equipamentos da instalação. Um simples reciclo à saída do filtro de areia, que retorne à cisterna de entrada no caso de não poder avançar para o equipamento seguinte - neste caso para o misturador devido ao elevado nível atingido na cisterna intermédia - será suficiente para garantir a máxima eficiência do filtro.

2.1.3 Optimização do coagulante

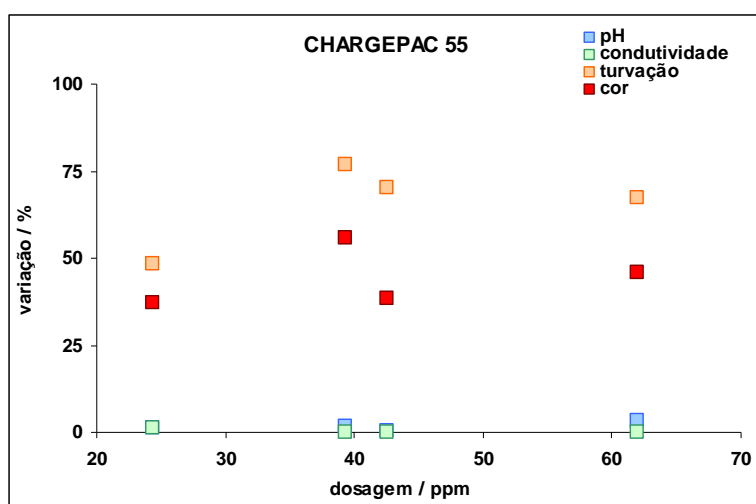
Os coagulantes são usados no tratamento de águas para remoção de metais, contaminantes e matéria orgânica. Inicialmente era usado nesta instalação o cloreto de ferro como coagulante mas para combater os problemas elevados níveis de ferro e a cor amarelada da água final foi alterado, no início do projecto, para um coagulante à base de alumínio - policloreto de alumínio, sulfato de alumínio, entre outros - Chargepac 55.

Durante este projecto foi importante otimizar a dosagem do novo coagulante. Para isso foram feitos vários ensaios de várias dosagens de coagulante e analisando o impacto numa série de parâmetros da qualidade da água. Inicialmente tentou fazer-se a optimização da dosagem na instalação de tratamento de água recuperada. No entanto os resultados estavam a mostrar-se inconclusivos uma vez que a qualidade de água tratada sofria demasiadas variações e era impossível determinar a qualidade de água concreta que estava a ser tratada devido à grande capacidade de tratamento da instalação. Para facilitar esta optimização optou-se por fazê-la enquanto se testava um sistema de filtração multimédia pressurizada OFSY (testes deste sistema em pormenor no capítulo 2.4) uma vez que era um sistema mais pequeno (com um caudal de tratamento máximo de $2500 \text{ dm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ de água)

tornando-se mais simples e precisa a dosagem e o impacto desta na qualidade de água, assim como a qualidade de água introduzida ao sistema.

Como acontecia com a instalação, a variação de dosagem foi feita de acordo com o caudal debitado pela bomba de adição de coagulante e, uma vez que estávamos a trabalhar com um sistema de muito menor dimensão, com um factor de diluição deste. Adicionalmente aproveitou-se a oportunidade para testar um coagulante com uma percentagem de orgânico - Chargepac 12 - sem o risco de danificação das membranas em caso de sobre dosagem, para além do coagulante já usado na instalação actual. Para se controlar a variação da qualidade de água monitorizaram-se quatro parâmetros: o pH, a condutividade, a turvação e a cor. Em cada ensaio foi recolhida uma amostra de água de alimentação ao piloto e três amostras ao longo de 3 horas (uma amostra por hora). Os resultados, para ambos os coagulantes são apresentados em variação relativa de cada um dos parâmetros relativamente ao valor inicial, ou seja, a diminuição relativa de cada um dos parâmetros de qualidade da água ao ser tratada pelo filtro com a dada dosagem de coagulante.

Seguidamente são apresentados os gráficos dos resultados obtidos, análise destes e algumas conclusões. Na figura 2.2 temos a representação gráfica dos resultados da remoção do pH, da condutividade, da turvação e da cor para o coagulante usado actualmente, Chargepac 55. Facilmente se verifica que o coagulante não tem influência sobre o pH e a condutividade da água, mas tem uma influência significativa sobre a turvação e a cor,



apresentando uma dosagem óptima próxima dos 40 ppm. Com esta dosagem de coagulante é possível retirar (em conjunto com o sistema de filtração multimédia pressurizado) cerca de 75 % da turvação da água inicial e 50 % da cor.

Figura 2-2 - representação gráfica dos resultados da remoção do pH, da condutividade, da turvação e da cor para o Chargepac 55

Na figura 2.3 apresentam-se os resultados para o coagulante Chargepac 12. Como acontecia com o coagulante anterior, não se verificaram alterações no pH e na condutividade. Em relação à cor e turvação verificou-se que os resultados são melhores do que os obtidos com

o Chargepac 55, havendo uma remoção que pode ir até aos 100 % de turvação e de mais de 75 % na cor. Outro facto interessante que se verifica é a sua eficácia mesmo para dosagens tão baixas como 15 ppm, o que pode representar uma grande poupança a nível de custos de produto químico.

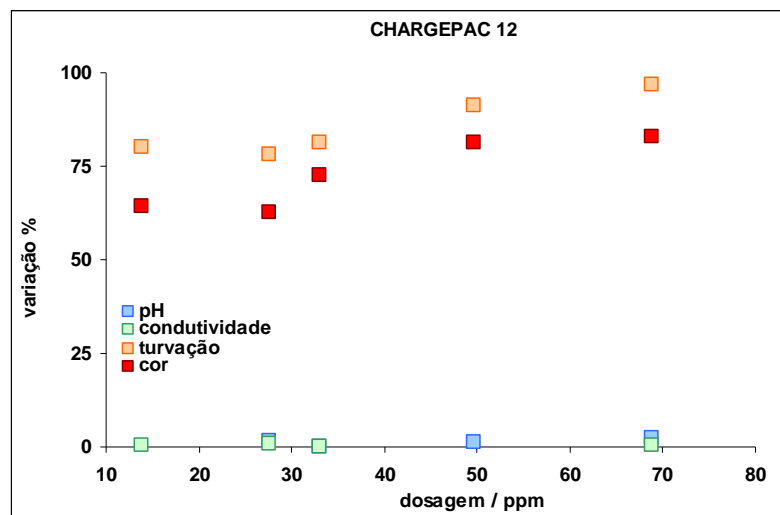


Figura 2-3 - representação gráfica dos resultados para o Chargepac 12

Embora tenha sido obtidos bons resultados com este coagulante que contem uma pequena quantidade de orgânico, seria interessante testar um coagulante com maior percentagem ou até totalmente orgânico e analisar a água para se tentar detectar coagulante que possa ser prejudicial à ultrafiltração que se encontra em funcionamento da instalação actual.

2.2 Propostas de alteração do *lay-out* e introdução novos processos

Após ter sido estudada a instalação existente e se ter concluído que não era possível atingir, com aquela instalação, a qualidade de água necessária foram contactadas algumas empresas para que apresentassem soluções para a resolução desses para que pudessem ser analisadas e se pudesse determinar a melhor solução.

Proposta da GE Infrastructure - Water & Process Technologies

Uma das empresas contactadas para apresentar proposta para a resolução dos problemas foi a GE Infrastructure - Water & Process Technologies. Esta empresa apresentou como solução o seguinte equipamento: estação de tratamento ZeeWeed® 500 seguido de uma unidade de electrodiálise. A estação de tratamento ZeeWeed® 500 encontra-se

representada esquematicamente na figura 2.4 e tem como objectivo a preparação da água para que possa ser usada na electrodiálise.

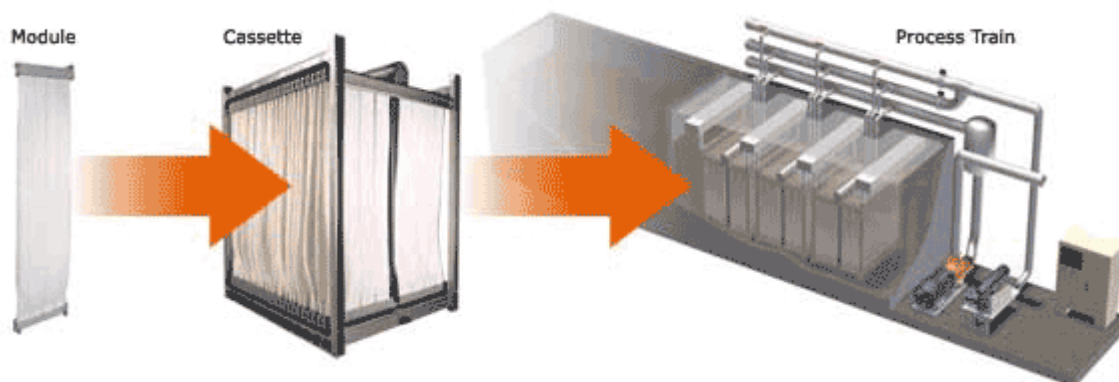


Figura 2-4 - representação esquemática da estação de tratamento ZeeWeed® 500

A estação de tratamento ZeeWeed® 500 é constituída por módulos de membranas. Os módulos são constituídos por centenas de fibras de membranas porosas horizontais. Na figura 2.5 podemos ver o aspecto destas fibras - à esquerda temos um conjunto de fibras e à direita temos a representação esquemática de uma única fibra.

A água é filtrada pela aplicação de uma ligeira sucção na ponta de cada fibra fazendo com que a água passe pelos poros até ao interior da fibra. A fibra actua assim como barreira física para sólidos suspensos, bactérias, agente patogénicas e alguns vírus. Estes módulos são depois usados em conjuntos e formam aquilo que se denomina por *cassette*, que é a unidade de filtração que é inserida no tanque de água a tratar. Uma instalação tem normalmente vários destes conjuntos para produzir o caudal de água necessário.



A produção faz-se aplicando o vácuo e sugando a água através das fibras e o tanque é constantemente alimentado com água a tratar de forma a manter o nível do tanque constante.

Figura 2-5 - representação esquemática das fibras constituintes da membrana.

O rejeitado permanece no tanque e é removido com um processo que se denomina de retrolavagem. Durante este processo a água filtrada é forçada através da fibra no sentido oposto ao da produção de forma a libertar da parede exterior da fibra alguma sujidade acumulada durante a produção.

Este equipamento necessita de limpeza de manutenção para evitar a colmatação da membrana (*fouling*)-depósito de partículas que diminuem a eficiência desta. Durante essa limpeza o tanque é vazado e as membranas são mergulhadas durante alguns minutos numa solução de lavagem.

As principais vantagens deste equipamento são:

- o seu design e operação simples
- poupança de espaço uma vez que as membranas são instaladas no interior dos tanques
- performance praticamente inalterada por variações na qualidade da água a tratar
- alta resistência a elevado teor de sólidos na água

Esta estação de tratamento apresenta os seguintes valores para limites de uma série de parâmetros de qualidade no tratamento de água de uma estação de tratamento de águas residuais - tabela 2.2(Portal da GE Water & Process Technologies, 2008).

Tabela 2.2 - parâmetros e respectivos limites admissíveis para uma água de uma ETAR tratada pelo sistema ZeeWeed® 500

Parâmetro	Limite
BOD 5	n. a.
TSS	< 1 mg.dm ⁻³
Turvação	< 1 NTU
Silt Density Index	< 3

Para este sistema foram apresentadas duas propostas distintas, diferentes apenas no caudal de tratamento da unidade. Uma unidade de tratamento com a mesma capacidade da instalação actual, 30 m³.h⁻¹ e uma de capacidade superior 50 m³.h⁻¹. Os valores das propostas para estes dois sistemas foram respectivamente 260 062 € e 318 215 € (preços de equipamento, sem cisterna incluída).

Para a unidade de electrodiálise foi apresentado o valor aproximado de 200 000€ mas o equipamento não foi especificado. Sabe-se que por norma estes sistemas são de baixo custo de operação e manutenção que a cada passo removem cerca de 50 % dos sais dissolvidos na água.

Uma vez que o sistema ZeeWeed® 500 tem um custo de investimento elevado e apenas se obteria uma água de qualidade semelhante àquela que se produz na actual instalação, a GE admitiu fazer a instalação do sistema de electrodiálise apenas se fossem garantidos os seguintes limites para os parâmetros de qualidade da água de alimentação à electrodiálise que se encontram na tabela 2.3.

Tabela 2.3 - parâmetros e respectivos limites para a água de alimentação à electrodiálise.

Parâmetro	Limite
TDS	200 - 3000 mg.dm ⁻³
Ferro dissolvido	< 0,3 ppm
Manganês dissolvido	< 0,1 ppm
H ₂ S	< 0,1 ppm
Alumínio	< 0,1 ppm
COD	< 50 ppm O ₂
TOC	< 15 ppm
Óleos e Gorduras	< 2 ppm
Cloro livre - contínuo	< 0,5 ppm
Cloro livre - intermitente (limpeza)	< 30 ppm
Turvação	< 2 NTU
SDI15	< 15

Durante o desenvolvimento do projecto achou-se importante fazer um estudo, mesmo que simplificado do investimento implicado no projecto de instalação dos equipamentos propostos e análise de poupanças associadas a esse investimento.

Para determinar as poupanças calculou-se o dinheiro que se poupa ao usar água recuperada da ETAR em vez de água do SMAS. O valor da água recuperada foi calculando somando o valor da instalação amortizado a 3 anos (o já gasto a somar ao que é necessário ainda gastar em novo equipamento), valor de electricidade (para bombagens e equipamento eléctrico), valor de químicos de manutenção e funcionamento da instalação - os valores de consumo são médios por m³ de água tratada gastos o ano passado na empresa (exemplo de cálculo no apêndice B). No caso de equipamento novo fez-se uma estimativa de consumos baseada nos equipamentos existentes actualmente (preços de bombagens e químicos de manutenção).

Na figura 2.6 encontra-se representada a expectativa de poupança no caso de ser implementando apenas a electrodiálise:

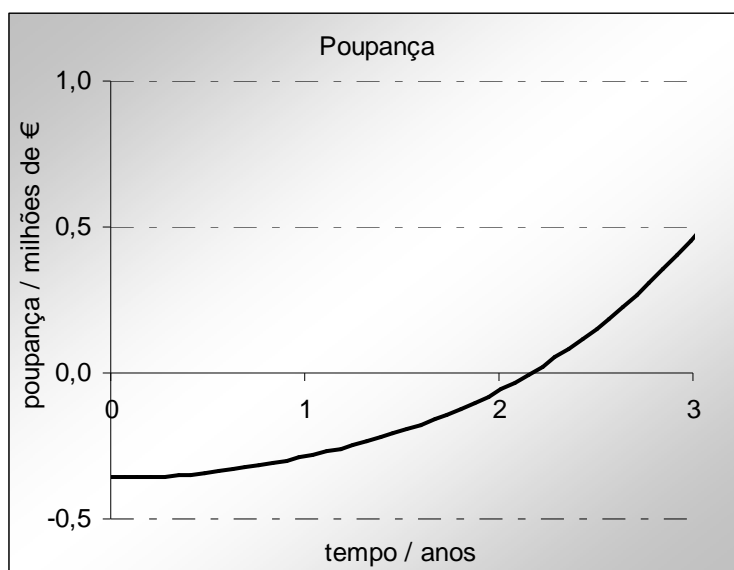


Figura 2-6 - representação esquemática das poupanças da proposta da GE

Ao fim dos 3 anos de amortização da instalação espera ter-se alcançado já uma poupança de 300 000 €, quase o dobro do investimento inicial.

Proposta da Enkrott

O projecto da Enkrott encontra-se representado pela figura 2.7.

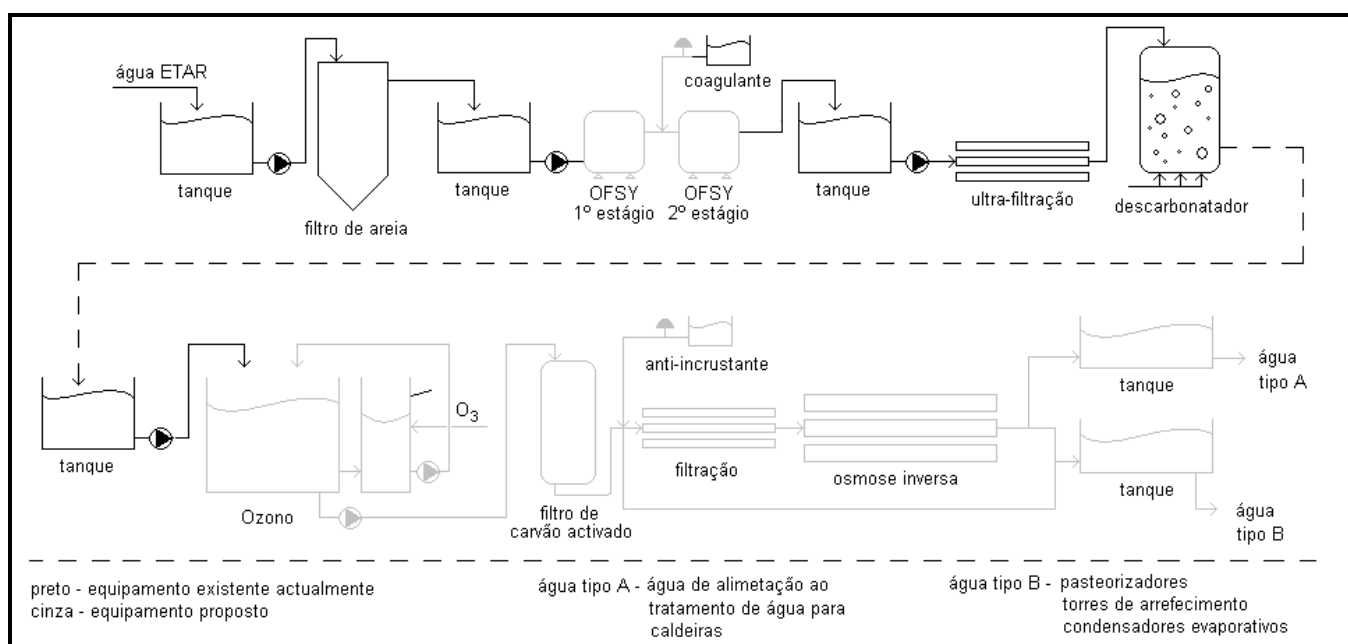


Figura 2-7 - representação esquemática de uma possível alteração à instalação

Durante a apresentação do problema à empresa foram estruturadas as seguintes alterações à instalação actual:

- introdução de um sistema de filtração multimédia pressurizada com introdução de coagulante em linha
- sistema de ozonização com filtro de carvão para remoção de eventuais impurezas
- sistema de filtração para garantir a qualidade de água necessária à alimentação de um sistema de osmose inversa
- um sistema de osmose inversa

A Enkrott, no desenvolvimento deste projecto apostou maioritariamente na reabilitação de equipamento que haveria disponível para uso, como é o caso dos OFSYs, onde é apenas necessário adquirir o enchimento, e a osmose inversa que se encontra disponível. É esse aspecto que neste momento o torna tão atractivo, embora o primeiro valor a ser apontado seja de 210 892 €.

As poupanças esperadas com esta instalação encontram-se representadas na figura 2.8, onde se espera alcançar os 400 mil euros no período de amortização.

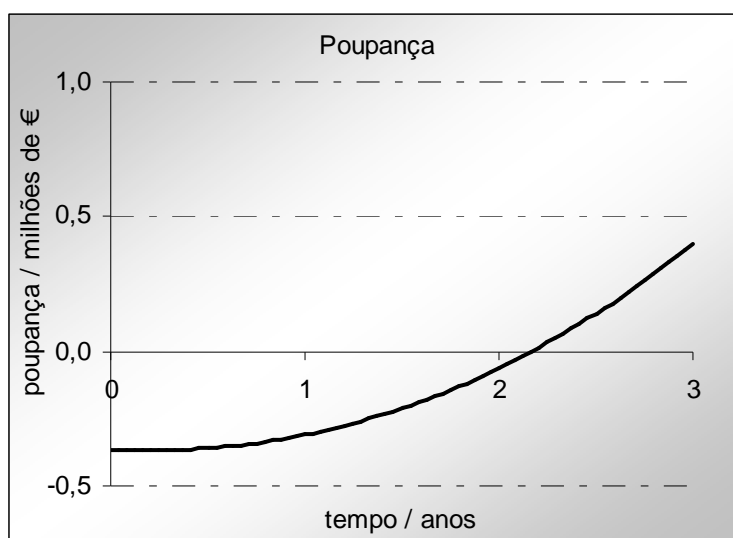


Figura 2-8 - representação esquemática das poupanças da proposta da Enkrott

Sugestão do Prof. Adélio Mendes

A quando do início do projecto a sugestão do Prof. Adélio Mendes era que o sistema sofresse as seguintes alterações (também representadas na figura 2.9):

- utilização de um sedimentador após a adição de coagulante (equipamento disponível)

- instalação de um sistema de nanofiltração no final da instalação actual

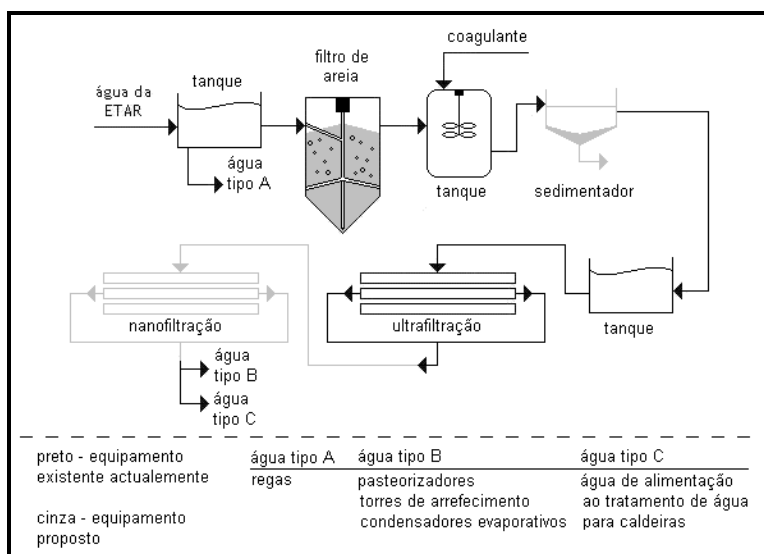


Figura 2-9 - representação esquemática de uma possível alteração à instalação

A vantagem da implementação de um sistema de nanofiltração passa pelo seu baixo custo, uma vez que opera a pressões significativamente mais baixas que uma osmose inversa, devendo, no entanto, atingir-se os valores para os parâmetros de água necessários. Para testar a validade deste projecto foram realizados alguns testes com membranas de nanofiltração, os resultados encontram-se no capítulo seguinte.

Após a realização dos testes de nanofiltração, assim como os testes com o sistema de filtração multimédia pressurizada, e dados os resultados obtidos a solução parece apontar no sentido da instalação representada na figura 2.10.

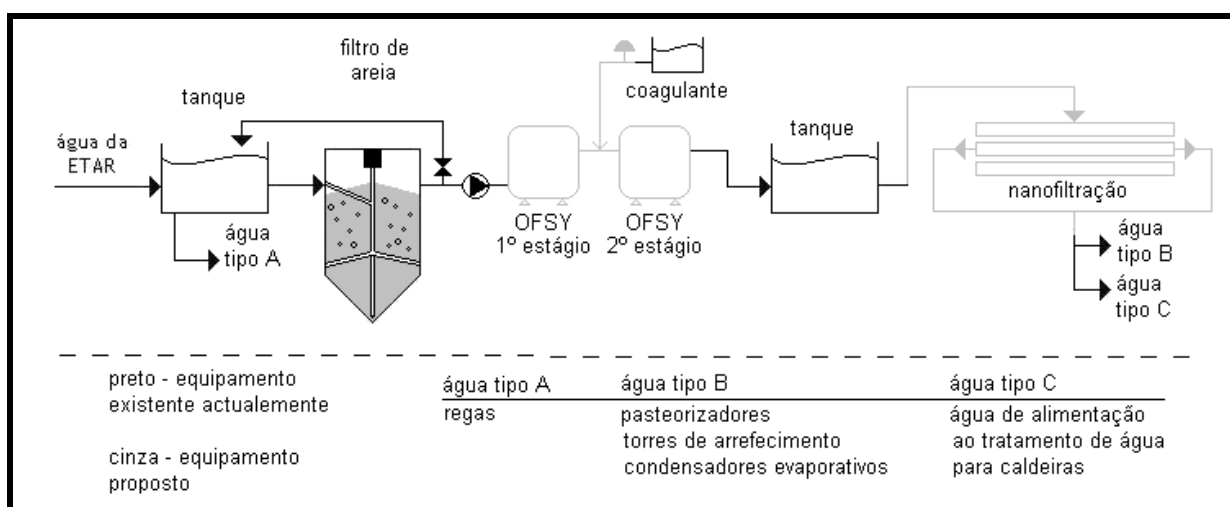


Figura 2-10 - representação esquemática de uma possível solução para a instalação actual

Embora ainda seja necessário realizar alguns testes importantes de forma a determinar se é viável usar coagulante orgânico nesta instalação sem danificar as membranas e até para se determinar se a água consegue atingir uma qualidade mínima necessária para alimentação directa à nanofiltração sem danos ou elevados custos de manutenção.

Se fosse possível apenas o reaproveitamento dos OSFYs (cuja estrutura já existe) e substituição das membranas de ultrafiltração por umas de nanofiltração, embora não hajam valores concretos, supõe-se que o valor da reestruturação não ultrapassasse os 100 000 €. Assim sendo, esperar-se-ia uma poupança de 700 000 € ao final do período de amortização, como se pode ver na figura 2.11.

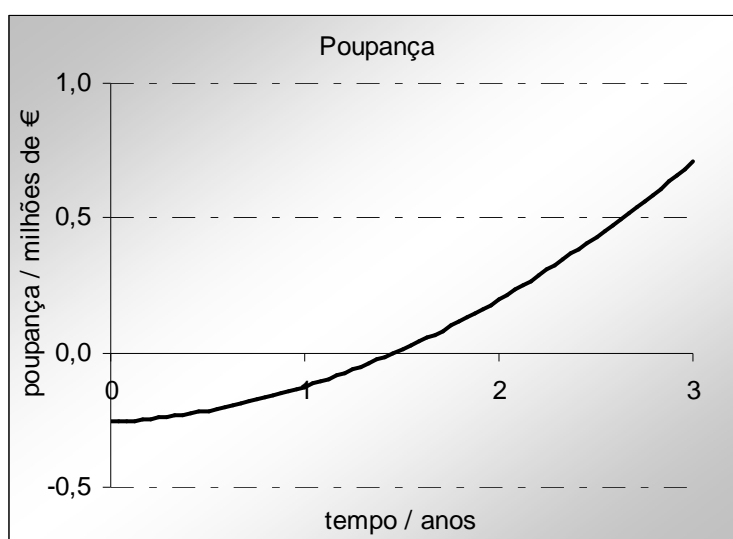


Figura 2-11 - representação esquemática das poupanças da proposta final

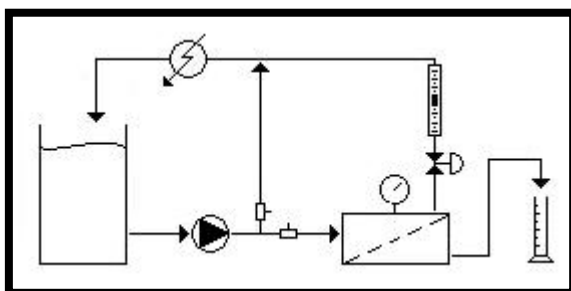
2.3 Testes de membranas de nanofiltração

No seguimento do projecto de desenvolvimento achou-se útil realizar algumas experiências de filtração para testar a viabilidade da sua implementação no tratamento da água recuperada da ETAR. Para tal começou por se testar uma membrana de nanofiltração de filme fino (*thin-film*) da GE Osmonics com as seguintes características: rejeição de 98 % de $MgSO_4$, pH entre 3-9, fluxo de $17 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ (39 GFD) e uma pressão máxima de 0,69 MPa (100 psi).

Esta membrana foi escolhida devido à combinação de alto fluxo com altos índices de retenção de sais. Estas membranas têm uma maior retenção de sais bivalentes do que monovalentes, sendo que neste caso a retenção de bivalentes é de 98 %.

Na figura 2.12 está representada esquematização da instalação piloto para testes de membranas. Esta consiste num tanque de armazenamento com um volume

aproximadamente de 5 dm³, uma bomba de alimentação ao módulo de membranas, o



módulo onde se encontra a membrana, duas válvulas para controlo de fluxo através do módulo, um rotâmetro para medição do caudal e um permutador de calor para retirar do sistema o calor introduzido pelo funcionamento da bomba. A instalação tem ainda dois

termopares para controlo da temperatura, um no tanque de alimentação e outro imediatamente após o módulo de membranas.

Figura 2-12 - representação esquemática da instalação piloto para testes de membranas

Foi delineada a seguinte ordem de ensaios para determinar a influência da temperatura, pressão e velocidade superficial na alteração dos parâmetros monitorizados de modo a determinar as condições óptimas de operação. Com os ensaios 2, 3 e 4 é possível determinar a influência do caudal de rejeitado (com o qual se pode calcular a velocidade); com os ensaios 5, 6 e 7 é possível determinar a influência da pressão e com os ensaios 4, 5 e 8 servem para determinar a influência da temperatura. O primeiro e último ensaios foram realizados com água ultra pura para que se pudesse verificar se não havia alterações na membrana no final das experiências realizadas.

Tabela 2.4 - ensaios planeados para os testes de membranas

Ensaio	T (°C)	P (bar)	Q (dm ³ .min ⁻¹)
2	10	3,6	2,1
3	10	3,6	1,3
4	10	3,6	2,8
5	20	3,6	2,8
6	20	5	2,8
7	20	6,5	2,8
8	30	3,6	2,8

Seguidamente são apresentados os resultados obtidos nos ensaios acima mencionados. Estes resultados são apresentados sobre a forma da variação percentual relativa de cada um dos parâmetros em função de cada uma das variáveis, ou seja, valor na alimentação subtraído do valor no permeado sobre a alimentação.

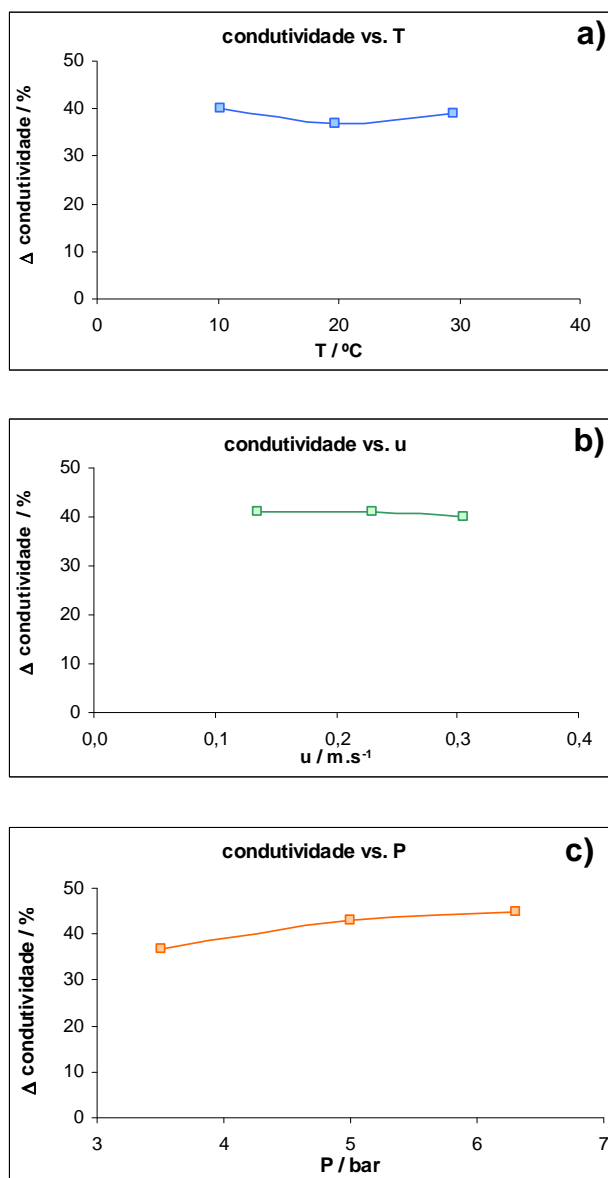


Figura 2-13 - influência da temperatura (°C) a), velocidade superficial ($m.s^{-1}$) b) e pressão (bar) c) na condutividade (%)

Na figura 2.13 está representada a influência da temperatura a), velocidade superficial b) e pressão c) na condutividade. Verificamos pela análise dos gráficos que a condutividade é sensivelmente independente da temperatura, velocidade superficial e pressão nas gamas de valor estudadas. No gráfico c), onde se vê a variação da condutividade com a pressão, embora se note uma pequena subida, uma vez que é inferior a 10 % não pode concluir-se que se deva à pressão, pode ser apenas fruto de erros de medição.

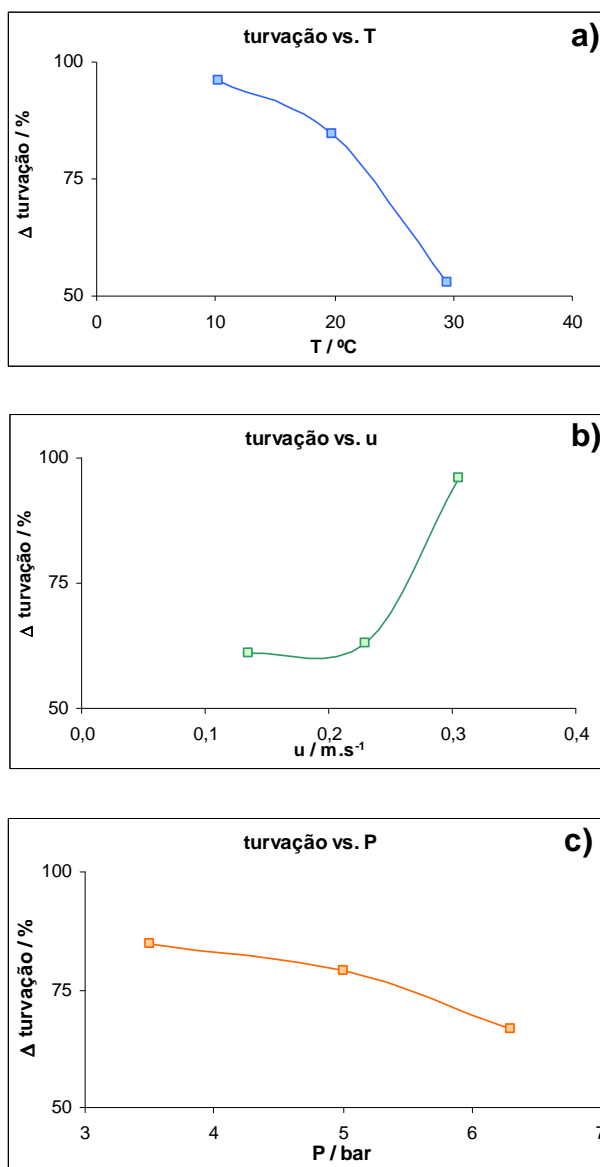


Figura 2-14 - influência da temperatura (°C) a), velocidade superficial (m.s⁻¹) b) e pressão (bar) c) na turvação (%)

Na figura 2.14 podemos verificar a influência da temperatura a), velocidade superficial b) e pressão c) na turvação. Como era de esperar, e facilmente se verifica na figura 2.14 a), para temperaturas mais elevadas a remoção da turvação é menor uma vez que a membrana se torna mais permeável ao soluto. Na figura 2.14 b), ao contrário do que era esperado, podemos ver um aumento da remoção de turvação com o aumento da velocidade superficial. O ponto que apresenta uma remoção da ordem dos 95% foi repetido mas um valor equivalente foi obtido. Na figura 2.14 c) como era esperado a remoção de turvação diminui com o aumento da pressão uma vez que o aumento de pressão torna a membrana mais permeável.

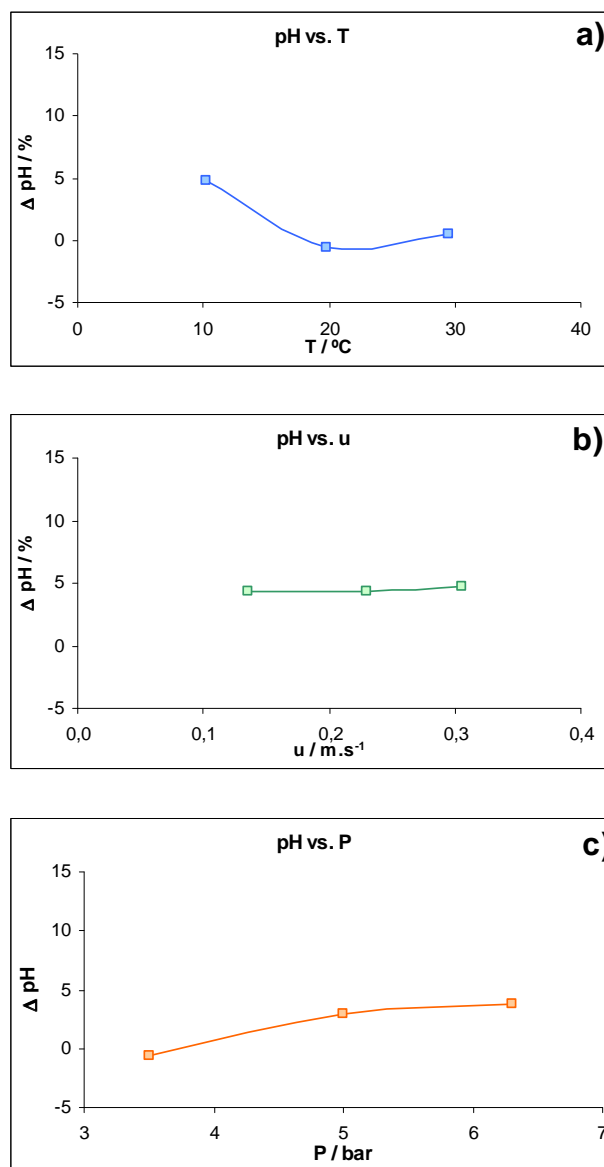


Figura 2-15 - influência da temperatura ($^\circ\text{C}$) a) , velocidade superficial (m.s^{-1}) [II] e pressão (bar) c) no pH (%).

Na figura 2.15 encontra-se representada a variação do pH em função da temperatura a), velocidade superficial b) e pressão c). Como acontece com a condutividade, nenhum dos parâmetros, nas gamas estudadas, parece ser directamente influenciado pelas condições.

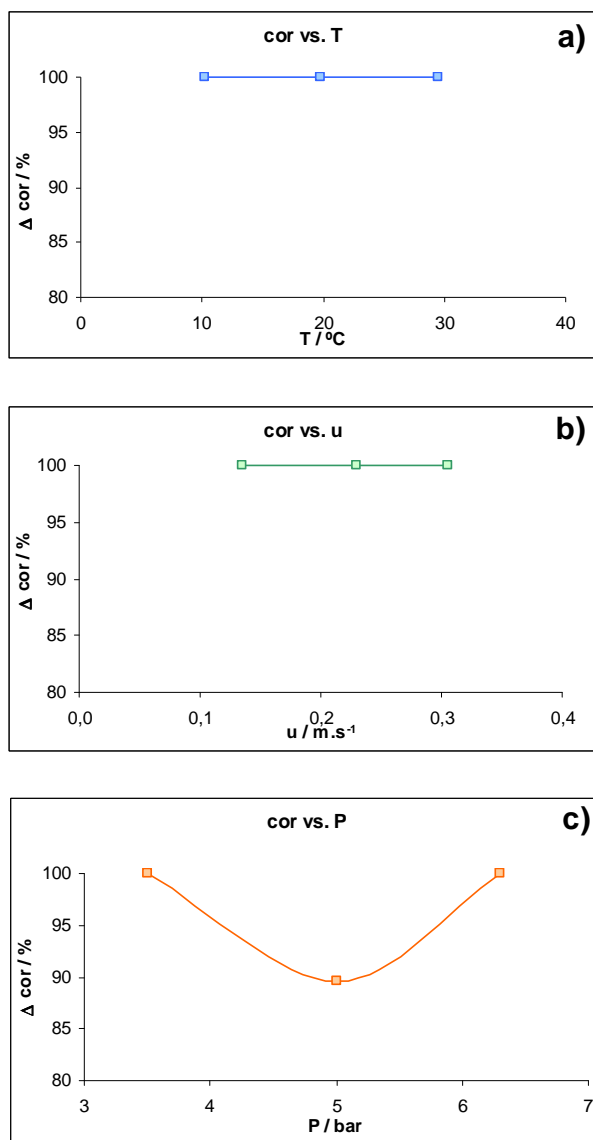


Figura 2-16 - influência da temperatura ($^\circ\text{C}$) a) , velocidade superficial (m.s^{-1}) b) e pressão (bar) c) na cor (%)

Finalmente na figura 2.16 temos a representação da remoção da cor em função da temperatura a), velocidade superficial b) e pressão c). Neste caso verificou-se que em todos os ensaios (com excepção do ensaio 6 - tabela 2.4 - que se supõe que o valor vem afectado de erro de medição.) a cor era removida na totalidade.

2.4 Testes ao sistema de filtração multimédia pressurizado - OFSY's

Um dos equipamentos propostos pela Enkrott para melhoria da instalação é um sistema de Filtração Multimédia Pressurizada vulgarmente conhecida como filtros OFSY. Foi

disponibilizado pela mesma empresa uma instalação piloto com capacidade até $2500 \text{ dm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ para testes com a finalidade de se determinar as melhorias nos parâmetros de água obtidas com a sua utilização.

Planeou-se a sua instalação de forma a captar água após o filtro de areia de funcionamento contínuo uma vez que se concluiu que a desactivação desse filtro não seria proveitosa. A instalação piloto seria utilizada com vários objectivos:

- determinar a qualidade de água obtida após os filtros OFSY
- testar vários coagulantes e otimizar a sua dosagem
- armazenar água suficiente de forma a alimentar a ultrafiltração e se determinar a qualidade da água obtida

Foram testados neste equipamento dois coagulantes distintos do mesmo fornecedor: Chargepac 55 e Chargepac 12 da Ashland. O Chargepac 55 é um coagulante constituído maioritariamente por poloclóreto de alumínio enquanto que o Chargepac 12 é um coagulante com uma pequena percentagem de um orgânico.

Começou por se testar a unidade com o coagulante que tinha sido escolhido para a nossa instalação a quando do início do projecto - chargepac 55. Foram realizados 4 ensaios para 4 dosagens diferentes de coagulante e foram monitorizados os seguintes parâmetros: pH, turvação, condutividade e cor. Com os dados obtidos foram representados nas figuras 2.17 e 2.2 (capítulo 2.1.3).

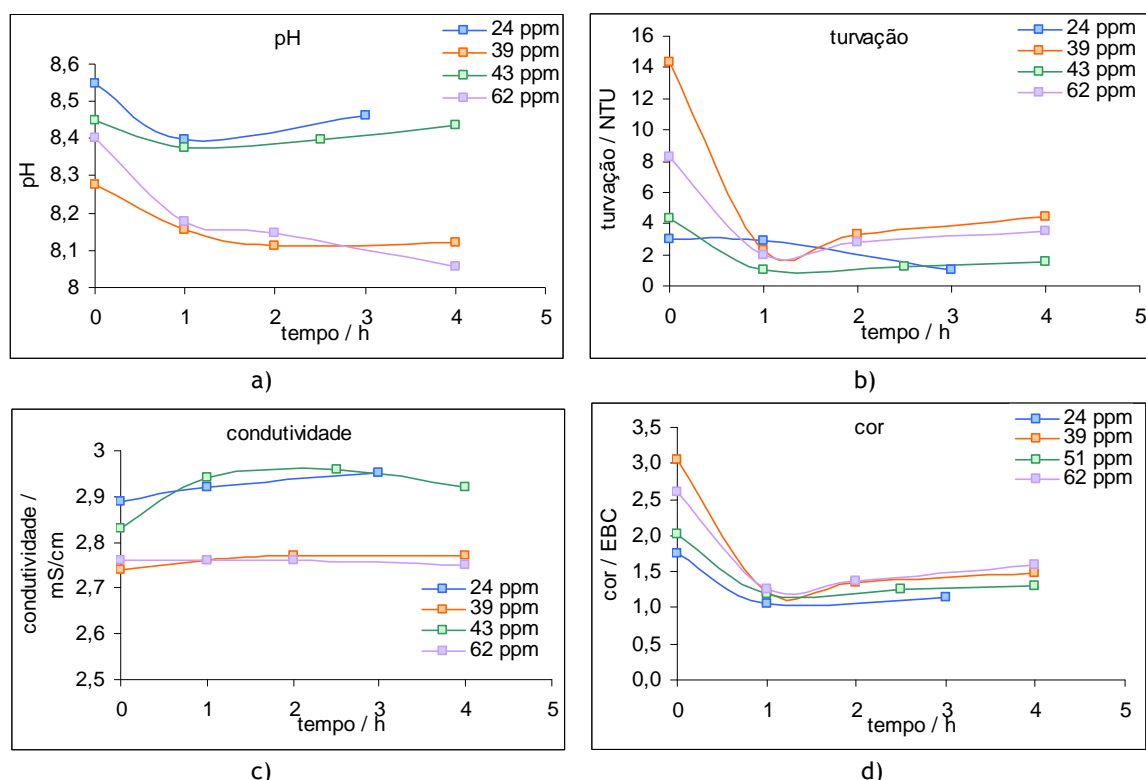


Figura 2-17 - representação gráfica da variação dos quatro parâmetros: pH a), turvação b), condutividade c) e cor d), em função do tempo, para várias dosagens do coagulante chargepac 55. Os pontos representados como tempo zero representam os valores da alimentação ao sistema.

Na figura 2.17 encontram-se representados 4 gráficos com a variação do pH, variação da turvação, variação da condutividade e variação da cor em função do tempo que decorreu cada ensaio. Na figura 2.2 encontra-se representada a variação relativa de cada uma das propriedades em relação   água de alimentação em função da dosagem.

Através da análise da figura 2.17   possível verificar que não se d o grandes altera es a nível do pH e da condutividade em relação   água de entrada - propriedades do ponto de tempo zero. O mesmo pode ser verificado ainda com maior evidência na figura 2.2 onde se encontra representada a variação de cada uma das propriedades, ou seja, foi calculada a diferenç a entre a propriedade na água de alimentação e a média das medições ao longo do tempo. Esta representação só faz sentido uma vez que se verificou que as propriedades se mant m constantes ao longo do tempo dos ensaios. Assim sendo, e após análise cuidadosa da figura 2.2 pode concluir-se que a dosagem óptima será próxima de 40 ppm para o coagulante em análise. Conclui-se ainda que este sistema de filtração em conjunto com o coagulante utilizado será responsável pela diminuição em cerca de 50 % da cor e em cerca de 75 % da turvação presentes na água de alimentação.

Seguidamente foi testado o coagulante com orgânico - Chargepac 12, para o qual foram realizados cinco ensaios de dosagens diferentes para os quais foram monitorizados os mesmos parâmetros. Os resultados são apresentados na figura 2.18 e 2.3 (capítulo 2.1.3).

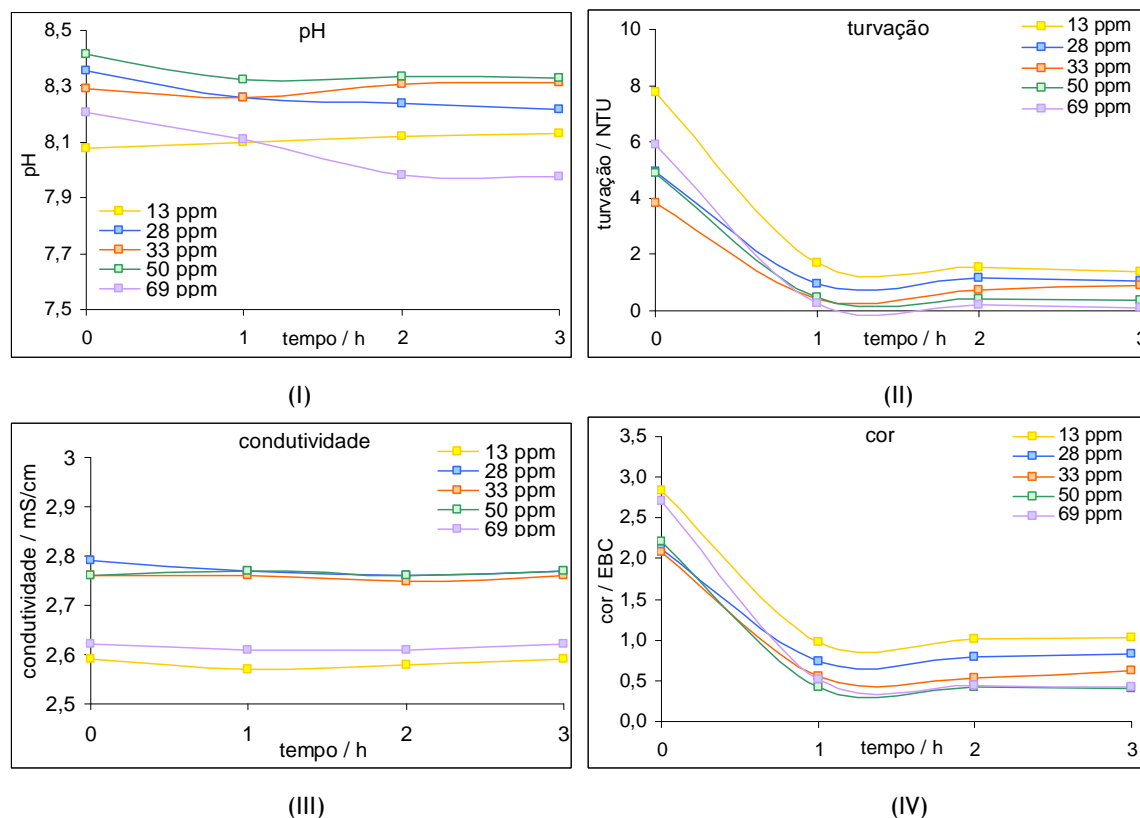


Figura 2-18 - representação gráfica da variação dos quatro parâmetros: pH a), turvação b), condutividade c) e cor d), em função do tempo, para várias dosagens do coagulante chargepac 12. Os pontos representados como tempo zero representam os valores da alimentação ao sistema.

Como acontecia com o coagulante anterior, não se verificou alterações significativas no pH e na condutividade. Em relação à cor e turvação verifica-se que os resultados são melhores do que os obtidos com o Chargepac 55, havendo uma remoção que pode ir de quase até aos 100 % de turvação e de mais de 75 % na cor. Outro facto interessante que se verifica é a sua eficácia mesmo para dosagens tão baixas como 15 ppm, o que pode representar uma grande poupança a nível de custos de produto químico.

Das figuras 2.17 e 2.18 pode concluir-se ainda que ao longo de 3 h de funcionamento não se verificam alterações significativas na água obtida com o sistema de filtração multimédia pressurizada.

3 Conclusões

O primeiro objectivo deste trabalho era determinar os consumidores da água recuperada e a qualidade desta que foi atingido na totalidade - resumo da qualidade encontra-se na tabela 1-1.

O segundo do trabalho era otimizar a instalação actual que também foi atingido na totalidade, embora não tenham sido ainda implementados todos os procedimentos. Concluiu-se que o filtro de areia se encontra a funcionar nas condições óptimas (tabela 2-1) mas é essencial a implementação do reciclo à alimentação no caso de paragem da restante instalação para que este se encontre sempre em funcionamento contínuo. Foi também otimizada a dosagem de coagulante - Chargepac 55 da Ashland que havia sido previamente escolhido - que se determinou ter o seu valor óptimo próximo dos 40 ppm.

Durante o projecto foram realizados alguns trabalhos paralelos que ajudaram a chegar às conclusões obtidas em relação ao equipamento a implementar: realização de experiências piloto a um sistema de filtração multimédia pressurizado - em pormenor no capítulo 2.4 - que se provou uma mais valia ao sistema na remoção de cor e turvação da água em conjunto com um coagulante; realização de experiências a um piloto de nanofiltração - em pormenor no capítulo 2.3 - que provou que estas têm a capacidade de atingir uma água com a qualidade final exigida se alimentadas com água tratada pelos OFSYs.

Finalmente, depois de se verificar que a instalação actual não permitia obter a qualidade de água necessária procedeu-se à pesquisa de novos equipamentos que pudessem melhorar a qualidade até aos limites necessários. Embora não se possa ainda tirar uma conclusão definitiva, os ensaios com sistemas piloto realizadas parecem apontar para que a solução mais acertada seja a implementação de um sistema de filtração multimédia pressurizado com injeção de coagulante orgânico em linha após o existe filtro de areia em continuo e a substituição da ultrafiltração por uma nanofiltração.

4 Avaliação do trabalho realizado

4.1 Objectivos Realizados

No final do projecto estava perfeitamente definida a qualidade da água que era necessário obter para satisfazer as necessidades dos nossos consumidores.

Foi optimizado o funcionamento da instalação existente - corrigido o funcionamento da injeção de ácido para correcção de pH, optimizados os caudais de lavagem e arejamento do filtro de areia (tabela 2.1) , optimizada a dosagem de coagulante (40 ppm para o Chargepac 55) e determinada a necessidade de criar uma forma de reciclo no filtro de areia para que ele funcione sempre em continuo.

Os ensaios paralelos realizados a pilotos apontam para que a solução final para se obter a qualidade de água desejada passe pela implementação de um sistema de filtração multimédia pressurizada com injeção de coagulante orgânico em linha e substituição das membranas de ultrafiltração do sistema de filtração por umas membranas de nanofiltração.

4.2 Outros Trabalhos Realizados

Durante o projecto foram realizados alguns trabalhos paralelos que ajudaram a chegar às conclusões obtidas em relação ao equipamento a implementar: realização de experiências piloto a um sistema de filtração multimédia pressurizado - em pormenor no capítulo 2.4 - que se provou uma mais valia ao sistema na remoção de cor e turvação da água em conjunto com um coagulante; realização de experiências a um piloto de nanofiltração - em pormenor no capítulo 2.3 - que provou que estas têm a capacidade de atingir uma água com a qualidade final exigida se alimentadas com água tratada pelos OFSYs.

4.3 Limitações e Trabalho Futuro

Seria interessante realizar testes ao sistema de filtração multimédia pressurizado ao longo de várias horas de modo a determinar quando se começa a verificar uma diminuição na remoção de cor e turvação da água como resultado da saturação do leito que marcará o ponto em que o sistema necessitará de entrar em retrolavagem.

Será necessário continuar a realizar testes de membranas de nanofiltração a fim de determinar se realmente se obtinha uma água com a qualidade necessária. Embora os

resultados até agora obtidos sejam promissores é necessário determinar as consequências para a membrana a longo prazo:

- Determinar se há danos permanentes à membrana;
- Fazer ensaios para determinar o *fouling* da membrana;
- Testes um sistema semi-industrial de forma a determinar os custos de operação, nomeadamente a necessidade de retrolavagens.

Após determinar se a introdução de um sistema de nanofiltração é viável cada uma das propostas deveria ser analisada cuidadosamente a nível económico, determinando-se valores de investimento e custos de operação associados.

Deveria ser estudada a hipótese se substituição da ultrafiltração existente por um sistema de nanofiltração se fosse obtida uma qualidade de água suficientemente boa para fazer a alimentação a uma nanofiltração sem danos para a membrana ou elevados custos de operação devido a elevada necessidade de retrolavagens.

4.4 Apreciação final

De uma forma geral penso que o projecto teve uma apreciação positiva.

Durante todo o projecto predominou a independência e liberdade para tomar as iniciativas que achasse mais adequadas para atingir os objectivos do trabalho. Fiquei no entanto com a ideia de que o trabalho era demasiado ambicioso para ficar completamente terminado no tempo do projecto uma vez que no terreno, por vezes, a velocidade de desenvolvimento de cada um dos planos ou alterações levam o seu tempo.

5 Bibliografia

- Portal da Unicer na internet consultado em Novembro de 2007 (www.unicer.pt)
- Portal da GE Water & Process Technologies consultado em Fevereiro de 2008 (<http://www.gewater.com/products/index.jsp>)
- Sawyer, C.N., McCarty, P.L. e Parkin, G. F. “Chemistry for the Environmental Engineering”, 4ª edição, McGraw-Hill International Editions, 1994
- Eckenfelder, W.W. “Industrial Water Pollution Control”, 3ª edição, McGraw-Hill International Editions, 2000
- Metcalf & Eddy, inc, “Wastewater Engineering - Treatment, Disposal and Reuse”, 3ª edição, Tata McGraw-Hill Editions, 1995
- European Brewery Convention, “Water in Brewing - Manual of Good Practice”, 2001, EBC Technology and Engineering Forum, Getränke-Fachverlang Hans Carl
- G.E. Üstün, S.K.A. Solmaz, A. Birgül, “Regeneration of industrial district wastewater using a combination of Fenton process and ion exchange”, Resources, Conservation and Recycling 52 (2007) 425-440
- R. Zhang, S. Vigneswaran, H. Ngo, H. Nguyen, “A submerged membrane hybrid system coupled with magnetic ion exchange (MIEX®) and flocculation in wastewater treatment”, Desalination 216 (2007) 325-333
- M. Sadrzadeh, A. Razmi, T. Mohammadi, “Separation of different ions from wastewater at various operating conditions using electrodialysis”, Separation and Purification Technology 54 (2007) 147-156
- L. Liu, Z. Xu, C. Song, Q. Gu, Y. Sang, G. Lu, H. Hu, F. Li, “Adsorption-filtration characteristics of melt-blown polypropylene fiber in purification of reclaimed water”, Desalination 201 (2006) 198-206

- L. Ben Mansour, I. Ksentini, B. Elleuch, “Treatment of wastewater of paper industry by coagulation-electroflotation”, *Desalination* 208 (2007) 34-41
- G. Chen, “Electrochemical technologies in wastewater treatment”, *Separation and Purification Technology*, 38 (2004) 11-41
- Q.Y. Yue, B.Y. Gao, Y.Zhang, X. Sun, S.G. Wang, R.R. Gu, “Synthesis of polyamine flocculants and their potential use in treating dye wastewater”, *Journal of Hazardous Materials* (2007)
- X. Feng, Z. Wu, X. Chen, “Removal of metal ions from electroplating effluent by EDI process and recycle of purified water”, *Separation and Purification Technology* 57 (2007) 257-263
- Rousseau, Ronald W. “Handbook of Separation Process Technology”, John Wiley & Sons, 1987
- Cheremisinoff, Nicholas P. “Handbook of Water and Wastewater Treatment Technologies” Elsevier, 2002

A. Apêndice

ANEXO I

Qualidade das águas doces superficiais destinadas à produção de água para consumo humano

Parâmetros	Expressão dos resultados	A1		A2		A3	
		VMR	VMA	VMR	VMA	VMR	VMA
pH, 25°C	Escala de Sorensen	6,5-8,5	-	5,5-9,0	-	5,5-9,0	-
Cor (após filtração simples)	mg/l, escala Pt-Co	10	(O) 20	50	(O) 100	50	(O) 200
Sólidos suspensos totais	mg/l	25	-	-	-	-	-
Temperatura	°C	22	(O) 25	22	(O) 25	22	(O) 25
Condutividade	µS/cm, 20°C	1 000	-	1 000	-	1 000	-
Cheiro	Factor de diluição, a 25°C	3	-	10	-	20	-
Nitratos (*)	mg/l NO ₃	25	(O) 50	-	(O) 50	-	(O) 50
Fluoretos (1)	mg/l F	0,7-1,0	1,5	0,7-1,7	-	0,7-1,7	-
Cloro orgânico total extraível	mg/l Cl	-	-	-	-	-	-
Ferro dissolvido (*)	mg/l Fe	0,1	0,3	1,0	2,0	1,0	-
Manganês (*)	mg/l Mn	0,05	-	0,10	-	1,00	-
Cobre	mg/l Cu	0,02	(O) 0,05	0,05	-	1,00	-
Zinco	mg/l Zn	0,5	3,0	1,0	5,0	1,0	5,0
Boro	mg/l B	1,0	-	1,0	-	1,0	-
Berílio	mg/l Be	-	-	-	-	-	-
Cobalto	mg/l Co	-	-	-	-	-	-
Níquel	mg/l Ni	-	-	-	-	-	-
Vanádio	mg/l V	-	-	-	-	-	-
Arsénio	mg/l As	0,01	0,05	-	0,05	0,05	0,10
Cádmio	mg/l Cd	0,001	0,005	0,001	0,005	0,001	0,005
Crómio total	mg/l Cr	-	0,05	-	0,05	-	0,05
Chumbo	mg/l Pb	-	0,05	-	0,05	-	0,05
Selénio	mg/l Se	-	0,01	-	0,01	-	0,01
Mercúrio	mg/l Hg	0,0005	0,0010	0,0005	0,0010	0,0005	0,0010
Bário	mg/l Ba	-	0,1	-	1,0	-	1,0
Cianetos	mg/l CN	-	0,05	-	0,05	-	0,05
Sulfatos	mg/l SO ₄	150	250	150	(O) 250	150	(O) 250
Cloretos	mg/l Cl	200	-	200	-	200	-
Substâncias tensoactivas (que reagem com o azul-de-metileno).	mg/l, sulfato de lauril e sódio	0,2	-	0,2	-	0,5	-
Fosfatos (*) (2)	mg/l P ₂ O ₅	0,4	-	0,7	-	0,7	-
Fenóis	mg/l C ₆ H ₅ OH	-	0,001	0,001	0,005	0,010	0,100
Hidrocarbonetos dissolvidos ou emulsionados	mg/l	-	0,05	-	0,20	0,50	1,00
Hidrocarbonetos aromáticos polinucleares	µg/l	-	0,2	-	0,2	-	1,0
Pesticidas totais (paratião, hexaclorociclo-hexano, dieldrina e outros).	µg/l	-	1,0	-	2,5	-	5,0
Carência química de oxigénio (CQO) (*)	mg/l O ₂	-	-	-	-	30	-
Oxigénio dissolvido (*) (3)	% saturação de O ₂	70	-	50	-	30	-
Carência bioquímica de oxigénio a (CBO ₅ , 20°C) (*)	mg/l O ₂	3	-	5	-	7	-
Azoto Kjeldahl (excluindo o azoto de NO ₂ e NO ₃)	mg/l N	1	-	2	-	3	-
Azoto amoniacal	mg/l NH ₄	0,05	-	1,00	1,50	2,00	(O) 4,00
Substâncias extraíveis com clorofórmio	mg/l	0,1	-	0,2	-	0,5	-
Carbono orgânico total (COT)	mg/l C	-	-	-	-	-	-

Parâmetros	Expressão dos resultados	A1		A2		A3	
		VMR	VMA	VMR	VMA	VMR	VMA
Carbono orgânico residual após floculação e filtração através de membrana ($5\mu\text{m}$).	mg/l C	-	-	-	-	-	-
Coliformes totais	/100 ml	50	-	5 000	-	50 000	-
Coliformes fecais	/100 ml	20	-	2 000	-	20 000	-
Estreptococos fecais	/100 ml	20	-	1 000	-	10 000	-
Salmonelas		Ausência em 5 000 ml	-	Ausência em 1 000 ml	-	-	-

(0) Os limites podem ser excedidos em caso de condições geográficas ou meteorológicas excepcionais (n.º 1 do artigo 10.º).

(*) Os limites podem ser excedidos para os parâmetros marcados com * em lagos de pouca profundidade e baixa taxa de renovação.

(1) Os valores indicados constituem os limites inferior e superior das concentrações, determinados em função da média anual das temperaturas máximas diárias.

(2) Este parâmetro é incluído para satisfazer as exigências ecológicas de certos meios.

(3) Refere-se a um VmR.

VMR — valor máximo recomendado.

VMA — valor máximo admissível.

ANEXO II

Esquemas tipo de tratamento referentes às classes A1, A2 e A3 das águas superficiais

Classe A1 — tratamento físico e desinfecção.

Classe A2 — tratamento físico e químico e desinfecção.

Classe A3 — tratamento físico, químico de afinação e desinfecção.

ANEXO III

Métodos analíticos de referência para águas superficiais

Parâmetros	Expressão dos resultados	Limite de detecção	Precisão (\pm)	Exactidão (\pm)	Métodos analíticos de referência (1)
pH, 25°C	Escala de Sorensen	-	0,1	0,2	Electrometria.
Cor (após filtração simples)	mg/l, escala Pt-Co	5	10 %	20 %	Método fotométrico, após filtração simples, com padrões da escala platina-cobalto.
Sólidos suspensos totais	mg/l	-	5 %	10 %	Centrifugação (tempo mínimo de cinco minutos; aceleração média de 2800 g a 3200 g), secagem a 105°C e pesagem. Filtração através de membrana filtrante de 0,45 μm , secagem a 105°C e pesagem.
Temperatura	°C		0,5	1,0	Termometria.
Condutividade	$\mu\text{S/cm}$, 20°C	-	5 %	10 %	Electrometria.
Cheiro	Factor de diluição, a 25°C	-	-	-	Diluição sucessiva®.
Nitratos	mg/l NO_3	2	10 %	20 %	Espectrometria de absorção molecular.
Fluoretos	mg/l F	0,05	10 %	20 %	Espectrometria de absorção molecular. Eléctrodos específicos.
Cloro orgânico total extraível	mg/l Cl				
Ferro dissolvido	mg/l Fe	0,02	10 %	20 %	Espectrometria atómica após filtração sobre membrana filtrante (0,45 μm). Espectrometria de absorção molecular após filtração sobre membrana filtrante (0,45 μm).
Manganês	mg/l Mn	(2) 0,01	10 %	20 %	Espectrometria atómica.
		(3) 0,02	10 %	20 %	Espectrometria atómica. Espectrometria de absorção molecular.

Optimização da instalação de água recuperada e seus recursos

Parâmetros	Expressão dos resultados	Limite de detecção	Precisão (\pm)	Exactidão (\pm)	Métodos analíticos de referência (1)
Cobre (10)	mg/l Cu	0,005	10 %	20 %	Espectrometria atómica.
		(4) 0,02	10 %	20 %	Espectrometria de absorção molecular.
Zinco (10)	mg/l Zn	(2) 0,01	10 %	20 %	Espectrometria atómica.
		0,02	10 %	20 %	Espectrometria de absorção molecular.
Boro (10)	mg/l B	0,1	10 %	20 %	Espectrometria atómica. Espectrometria de absorção molecular ®.
Berílio	mg/l Be	-	-	-	
Cobalto	mg/l Co	-	-	-	
Níquel	mg/l Ni	-	-	-	Espectrometria atómica.
Vanádio	mg/l V	-	-	-	
Arsénio (10)	mg/l As	(2) 0,002	20 %	20 %	Espectrometria atómica.
		(5) 0,01			Espectrometria atómica. Espectrometria de absorção molecular.
Cádmio (10)	mg/l Cd	0,0002 (5) 0,001	30 %	30 %	Espectrometria atómica. Polarografia.
Crómio total (10)	mg/l Cr	0,01	20 %	30 %	Espectrometria atómica. Espectrometria de absorção molecular.
Chumbo (10)	mg/l Pb	0,01	20 %	30 %	Espectrometria atómica. Polarografia.
Selénio (10)	mg/l Se	0,005	-	-	Espectrometria atómica.
Mercúrio (10)	mg/l Hg	0,001 (5) 0,0002	30 %	30 %	Espectrometria atómica sem chama (vaporização a frio).
Bário (10)	mg/l Ba	0,02	15 %	30 %	Espectrometria atómica.
Cianetos	mg/l CN	0,01	20 %	30 %	Espectrometria de absorção molecular.
Sulfatos	mg/l SO ₄	10	10 %	10 %	Análise gravimétrica. Complexometria com EDTA. Espectrometria de absorção molecular.
Cloretos	mg/l Cl	10	10 %	10 %	Titulação (método de Mohr). Espectrometria de absorção molecular.
Substâncias tensoactivas (que reagem com o azul-de-metileno).	mg/l, sulfato de laurilo e sódio	0,05	20 %		Espectrometria de absorção molecular.
Fosfatos	mg/l P ₂ O ₅	0,02	10 %	20 %	Espectrometria de absorção molecular.
Fenóis	mg/l C ₆ H ₅ OH	0,0005 (6) 0,001	0,0005 30 %	0,0005 50 %	Espectrometria de absorção molecular ®. Método de 4-aminoantipirina ®. Método da paranitranilina ®.
Hidrocarbonetos dissolvidos ou emulsionados.	mg/l	0,01	20 %	30 %	Espectrometria no infravermelho após extracção pelo tetracloreto de carbono ®.
		(3) 0,04			Gravimetria após extracção por meio de éter de petróleo ®.

Optimização da instalação de água recuperada e seus recursos

Parâmetros	Expressão dos resultados	Limite de detecção	Precisão (\pm)	Exactidão (\pm)	Métodos analíticos de referência (1)
Hidrocarbonetos aromáticos polinucleares (10).	$\mu\text{g/l}$	0,04	50 %	50 %	Medição da fluorescência por ultravioleta após cromatografia em camada fina. Medição comparativa em relação a uma mistura de controlo constituída por seis substâncias padrão com a mesma concentração (6) □.
Pesticidas totais (paratião, hexaclo-rociclo-hexano, dieldrina e outros) (10).	$\mu\text{g/l}$	0,1	50 %	50 %	Cromatografia em fase gasosa ou líquida após extracção por solventes adequados e purificação. Identificação dos constituintes da mistura. Determinação quantitativa (9) ⊗.
Carência química de oxigénio (CQO)	$\text{mg/l } O_2$	15	20 %	20 %	Método do dicromato de potássio.
Oxigénio dissolvido	% saturação de O_2	5	10 %	10 %	Método de Winkler ⊗. Método electroquímico ⊗.
Carência bioquímica de oxigénio (CBO ₅ , 20°C).	$\text{mg/l } O_2$	2	1,5	2	Determinação de O_2 dissolvido antes e após cinco dias de incubação a $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ ao abrigo da luz, com adição de um inibidor da nitrificação.
Azoto Kjeldahl (não inclui o azoto de NO_2 e NO_3).	$\text{mg/l } N$	0,5	0,5	0,5	Mineralização, destilação segundo o método Kjeldahl e determinação do amónio por espectrometria de absorção molecular ou titulação.
Azoto amoniacal	$\text{mg/l } Nh_4$	(2) 0,01 (3) 0,1	(2) 0,03 (3) 10 %	(2) 0,03 (3) 20 %	Espectrometria de absorção molecular.
Substâncias extraíveis com clorofórmio.	mg/l	(11)	-	-	Extracção a <i>pH</i> neutro com clorofórmio purificado, evaporação no vácuo à temperatura ambiente e pesagem do resíduo ⊗.
Carbono orgânico total (COT)	$\text{mg/l } C$	-	-	-	
Carbono orgânico residual após flocculação e filtração através de membrana (5 μm).	$\text{mg/l } C$	-	-	-	
Coliformes totais	/100 ml	(2) 5 (7) 500			Cultura a 37°C em meio sólido específico adequado para o efeito com (2) ou sem (7) filtração e contagem das colónias. As amostras devem ser diluídas ou, quando apropriado, concentradas a fim de que o número de colónias fique compreendido entre 10 e 100. Identificação por detecção de gás, se necessária*. Método de diluição com fermentação em substratos líquidos em pelo menos três tubos em três diluições. Subcultura dos tubos positivos em meios de confirmação. Contagem em número mais provável (NMP). Temperatura de incubação $37^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ *.
Coliformes fecais	/100 ml	(2) 2 (7) 200			Cultura a 44°C em meio sólido específico adequado com (2) ou sem (7) filtração e contagem das colónias. As amostras devem ser diluídas ou, quando apropriado, concentradas a fim de que o número de colónias fique compreendido entre 10 e 100. Se necessário, identificação por gás*. Método de diluição com fermentação em substratos líquidos em pelo menos três tubos em três diluições. Subculturas dos tubos positivos como meios de confirmação. Contagem em número mais provável (NMP). Temperatura de incubação $44^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$ *.

Parâmetros	Expressão dos resultados	Limite de detecção	Precisão (±)	Exactidão (±)	Métodos analíticos de referência (1)
Estreptococos fecais	/100 ml	(2) 2 (7) 200 (2) 2 (7) 200			Cultura a 37°C em meio sólido específico adequado com (2) ou sem (7) filtração e contagem de colónias. As amostras devem ser diluídas ou concentradas a fim de que o número de colónias fique compreendido entre 10 e 100*. Método de diluição em caldo de azoteto de sódio em pelo menos três tubos para cada uma das três diluições. Contagem segundo NMP*.
Salmonelas (12)		1/5000 ml 1/1000 ml			Concentração por filtração (através de membrana ou filtro apropriado). Sementeira em meio de pré-enriquecimento. Enriquecimento, subcultura em meio de isolamento. Identificação*.

(1) As amostras das águas superficiais são analisadas e medidas após sofrerem uma tamisação com rede metálica, a fim de eliminar os resíduos flutuantes, tais como partículas de madeira e plástico.

(2) Para VMR das águas de classe A1.

(7) Para as águas de classes A2 e A3.

(2) Para as águas de classe A3.

(7) Para o VMA das águas de classes A1, A2 e A3.

(2) Para o VMA das águas de classe A2 e para as águas de classe A3.

(7) Para o VMR das águas de classes A2 e A3.

(8) Mistura de seis substâncias padrão a tomar em consideração e que têm a mesma concentração: fluoranteno, benzo [3,4] fluoranteno; benzo [1,12] fluoranteno; benzo [3,4] pireno; benzo [1,12] perileno; indeno [1,2,3-cd] pireno.

(9) Mistura de três substâncias a tomar em consideração e tendo a mesma concentração: paratíolo, hexaclorociclo-hexano, dieldrina.

(10) Se a concentração das amostras em sólidos em suspensão for tão elevada que elas necessitem de um tratamento prévio especial, poderão excepcionalmente ser ultrapassados os valores de exactidão que constam do presente anexo, e estes constituirão um objectivo. Estas amostras devem ser tratadas de modo a garantir que a maior parte das substâncias a determinar seja analisada.

(11) No caso de não ser este o método utilizado, poderá não ser possível garantir o limite de detecção necessário para controlo dos valores constantes do anexo II.

(12) Ausência em 5000 ml (A1, VMR) e ausência em 1000 ml (A2, VMR).

Material recomendado para o recipiente:

- ⊗ — vidro;
- * — vidro esterilizado;
- — vidro ou alumínio;
- ⊗ — sem quantidades significativas de boro.

ANEXO IV

Frequência mínima de amostragem e de análise de águas superficiais (*)

	Classe de água								
	A1			A2			A3		
	Grupo de parâmetros								
	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3
Frequência mínima (número/ano)	4	2	1	8	4	2	12	6	3

(*) A determinação dos parâmetros correspondentes ao grupo G2 implica, em simultâneo, a determinação dos parâmetros contidos em G1 e, identicamente para G3, implica G2 e G1.

ANEXO V

Classificação dos parâmetros de qualidade de águas superficiais em grupos (G1, G2 e G3) segundo a frequência de amostragem e de análise

G1	G2	G3
pH Cor Sólidos suspensos totais Temperatura Condutividade eléctrica Cheiro Nitratos Cloretos Fosfatos Carência química de oxigénio (CQO) Oxigénio dissolvido Carência bioquímica de oxigénio (CBO ₅) Azoto amoniacal Coliformes totais Coliformes fecais	Ferro dissolvido Manganês Cobre Zinco Sulfatos Substâncias tensoactivas Fenóis Azoto Kjeldahl Estreptococos fecais	Fluoretos Boro Arsénio Cádmio Crómio total Chumbo Selénio Mercúrio Bário Cianetos Hidrocarbonetos dissolvidos e emulsionados Hidrocarbonetos aromáticos polinucleares Pesticidas totais Substâncias extraíveis com clorofórmio Salmonelas

B. Apêndice B

Cálculos de investimento

Os valores que são apresentados neste exemplo são para a instalação actual mais instalação da proposta da GE.

Para se realizarem os cálculos de investimento e poupança partiu-se do pressuposto que haveria consumo suficiente para a instalação funcionar 365 dias por ano, 18h por dia, a um caudal de produção de 25 m³/h. Considerou-se uma TIR de 15%.

Tabela B-1 - valores anuais gastos em utilidades na instalação actual

parcela	consumo	consumo anual	preço da utilidade	€/ano
bombagem da ETAR	13 kW	85410	0,08 €/kWh	6406
bombagem para o filtro de areia	4 kW	26280	0,08 €/kWh	1971
Tanque agitação	2,2 kW	14454	0,08 €/kWh	1084
Agitadores cisterna	1,5 kW	9855	0,08 €/kWh	739
bombagem UF	5,5 kW	36135	0,08 €/kWh	2710
UF - retrolavagem	22 kW	9034	0,08 €/kWh	678
descarbonatador	0,37 kW	2431	0,08 €/kWh	182
bombagem para consumidores	11 kW	72270	0,08 €/kWh	5420
coagulante	1000 L/mês	9000	1,42 €/L	12761
NaOh	18 L/dia	5	81,97 €/ton	404
NaOCl	6 L/dia	2	102,07 €/ton	168
HCl	18 L/dia	5	64,66 €/ton	319

Tabela B-2 - valores estimados para o gasto no equipamento extra proposto pela Enkrott

parcela	€/ano
UF - retrolavagem	650
RO - retrolavagem	650
bombagem UF	2500
bombagem RO	5000
OFSYs	1500
ozonização	2000
filtros carvão	2500

Com estes valores estimados foi necessário fazer o cálculo da amortização do equipamento. Supôs-se que tinha sido já pago 50% do equipamento instalado (a instalação tem 1 ano e meio e amortização foi feita a 3 anos) e amortização do novo a 3 anos.

Assumindo que se produz 164250 m³/ano (25 m³/h x 18h/dia x 365 dia/ano) basta dividir o valor do investimento pela produção para se obter o preço por m³ que nos permitirá calcular o *cash-flow*. O *cash-flow* acumulado subtraindo o investimento dá-nos a poupança que se obtém ao longo do tempo que posteriormente é representado como se mostra na figura seguinte.

Tabela B-3 - cálculo da poupança ao longo dos anos para o caso da proposta da Enkrott

anos	<i>cash-flow</i>	<i>cash-flow</i> - investimento	milhões €
0	0,0E+00	-3,7E+05	-0,4
0,5	2,4E+04	-3,5E+05	-0,3
1	4,4E+04	-3,0E+05	-0,3
1,5	6,1E+04	-2,4E+05	-0,2
2	1,8E+05	-5,8E+04	-0,1
2,5	2,1E+05	1,6E+05	0,2
3	2,4E+05	3,9E+05	0,4

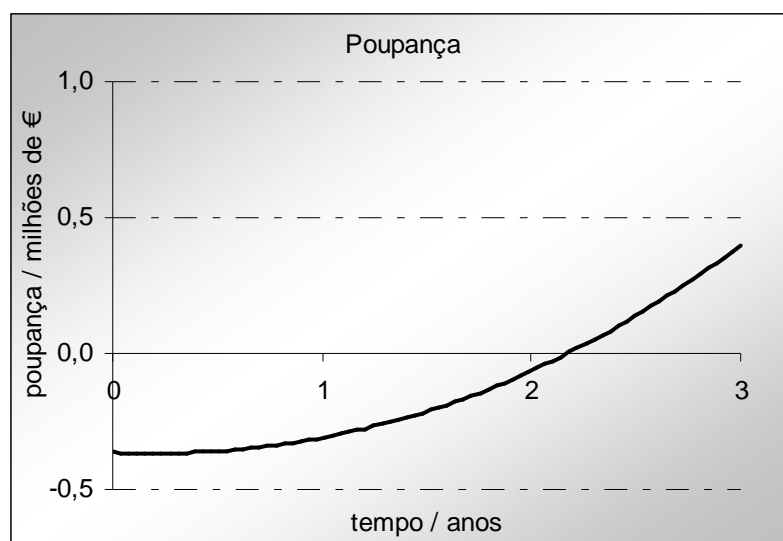


Ilustração B-1 - representação da poupança ao longo dos anos para o caso da proposta da Enkrott