

Mestrado Integrado em Engenharia Química

***Optimização do Tratamento Químico de Água e sua
Reutilização usando Nanofiltração***

Tese de Mestrado

desenvolvida no âmbito da disciplina de

Projecto de Desenvolvimento em Ambiente Empresarial

Mafalda Maria Castro Monteiro da Silva Pereira

Unicer



Universidade do Porto

Faculdade de Engenharia

FEUP

Departamento de Engenharia Química

Orientador na FEUP: Prof. Adélio Mendes

Orientador na empresa: Eng. Vasco Carvalho

Julho de 2009

Agradecimentos

Gostaria de referir neste espaço todos aqueles que contribuíram para o desenvolvimento deste projecto. Uns de uma forma indirecta, outros de uma forma mais directa, mas sem os quais o trabalho não teria sido possível.

Em primeiro lugar quero agradecer aos meus orientadores, Prof. Doutor Adélio Mendes da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e Eng. Vasco Carvalho da Unicer cervejas por todo o apoio, orientação, liberdade de decisão e confiança que me deram no decorrer do projecto.

A seguir gostaria de agradecer a todos aqueles que lidaram comigo directamente no trabalho, pela ajuda e tempo perdido para o desenvolvimento do meu projecto, em especial ao Hélder Cerqueira pelo seu acompanhamento e preocupação.

Tive um grande apoio da Ashland (empresa fornecedora dos químicos), por parte do Eng. Pedro Henriques, que sempre se disponibilizou a ajudar-me e a facultar-me toda a informação necessária.

Gostaria ainda de agradecer à Eng. Margarida Catarino pelo apoio laboratorial e conhecimento transmitido sobre membranas.

Por último queria deixar um agradecimento a todos aqueles, familiares e amigos, que me apoiaram e motivaram durante toda a minha vida académica.

Resumo

O presente projecto tem como objectivo a optimização do consumo de produtos químicos no SMEF (serviço de manutenção energia e fluidos) na empresa Unicer - Leça do Balio, e a recuperação de água das purgas das caldeiras usando um processo de Nanofiltração.

Os produtos químicos estudados correspondem a anti-incrustantes, anti-corrosivos e biocidas usados no tratamento da água de alimentação das caldeiras e circuitos de refrigeração. Foi feito o inventário dos reagentes usados, a sua funcionalidade e as correspondentes doses recomendadas, tendo-se concluído que a adição dos reagentes seguida pela fábrica era a recomenda.

A autora, depois de analisar o circuito de água de alimentação às caldeiras e aos sistemas de refrigeração, concluiu que talvez fosse possível recuperar a água das purgas das caldeiras. A água de purga das caldeiras tem uma elevada qualidade, tendo uma muito baixa concentração em cálcio e magnésio, catiões divalentes que originam incrustações. A autora propôs assim o uso da Nanofiltração para o tratamento e consequente reutilização da água de purga.

Foram consideradas várias membranas de Nanofiltração tendo-se caracterizado experimentalmente a que mais se adequava à separação em causa. A caracterização experimental permitiu proceder à optimização das condições operatórias de forma a obter a maior permeabilidade e selectividade.

Por último, é apresentada uma proposta para optimizar o funcionamento e melhorar a eficiência dos condensadores evaporativos. Foi proposto que a água utilizada nos condensadores, actualmente com origem na rede pública, fosse substituída pela água filtrada das purgas das caldeiras e foi sugerida a unificação do circuito de água dos condensadores para que o tratamento microbiológico por biocidas possa ser feito através de ultra-sons, com vantagens ambientais evidentes.

Palavras-chave (Tema): Tratamento de água industrial, nanofiltração, ultra-sons.

Abstract

The main purpose of this project is to optimize the consumption of chemical products in SMEF (service of maintenance energy and fluids) in UNICER company - Leça do Balio and recovery of water from the purges of the boiler by nanofiltration process. The chemicals studied are the anti-fouling, anti-corrosive and biocides used for the treatment of the water feed for boilers and power circuits of refrigeration. The inventory was made of the reagents used, their functionality and the corresponding desirable doses and it was concluded that the addition of reagents have followed the methodology.

The author, after analyzing the circuit of the feed water to boilers and refrigeration systems, concluded that it might be possible to recover the water from the purges of boilers. The purge water from the boiler is a high quality, with a very low concentration of calcium and magnesium, divalent cations which cause fouling. Therefore, the author proposed the use of nanofiltration for the treatment and subsequent reuse of purge water.

The Author considered several of nanofiltration membranes has been characterized experimentally to be more suited to the separation in question. The experimental characterization has allowed to optimize the operative conditions for obtaining the highest permeability and selectivity.

Finally, a proposal is presented to optimize the operation and improve the efficiency of evaporative condensers. It was proposed that the water in semi-open circuit is the filtered water from the purges of the boilers and it is suggested the unification of the circuit for microbiological treatment that can be done through ultrasound.

Índice

1.	Introdução: Enquadramento da Empresa - A Indústria Cervejeira	1
1.1.	O Processo de Produção da Cerveja	1
1.2.	Enquadramento do Projecto	2
1.2.1.	Caldeiras	3
1.2.2.	Torres de Arrefecimento	5
1.2.3.	Condensadores Evaporativos	6
1.2.4.	Águas Industriais	7
1.2.4.1.	Água para Sistemas de Refrigeração	8
1.2.4.2.	Água para as caldeiras	10
2.	Tratamento de Água Industrial	13
2.1.	Produtos Químicos para Água das Caldeiras	13
2.2.	Produtos Químicos para Águas de Refrigeração.....	14
2.3.	Análise dos Consumos e Custos dos Produtos Químicos	15
2.4.	Estudo da Optimização do Consumo de Produtos Químicos	16
2.4.1.	Optimização do doseamento de Enviroplus	16
2.4.2.	Melhor Método de Adição de Biosperse.....	20
3.	Recuperação por Nanofiltração da Água das Purgas das Caldeiras.....	22
3.1.	Análise das Perdas de Água através de Purgas	22
3.2.	Iões Presentes na Água das Caldeiras.....	23
3.3.	Nanofiltração.....	25
3.3.1.	Teste da Membrana de Nanofiltração	25
4.	Optimização do Circuito de Água dos Condensadores Evaporativos	32
4.1.	Tratamento de Água por Ultra-sons	33
4.2.	Unificação do Circuito Semi-aberto para o Tratamento Microbiológico.....	34
4.3.	Proposta para Optimização do Circuito de Água dos Condensadores Evaporativos	36
5.	Conclusões.....	40
6.	Avaliação do Trabalho Realizado.....	41
6.1.	Objectivos Realizados.....	41
6.2.	Trabalho Futuro	41
6.3.	Apreciação Final	42
7.	Referências Bibliográficas.....	43
	Anexo 1	44

1. Introdução: Enquadramento da Empresa - A Indústria

Cervejeira

O presente projecto foi desenvolvido na unidade de energia e fluidos da fábrica de cerveja da Unicer em Leça do Balio. Não tendo o projecto directamente a ver com a produção de cerveja, entendeu-se como importante fazer uma breve exposição do processo de produção da cerveja.

A cerveja é uma bebida obtida por fermentação alcoólica usando leveduras do género *Scharomyces*. A levedura é um fungo unicelular e adiciona-se ao mosto lupado depois de arrefecido. Além da fermentação alcoólica também origina produtos secundários responsáveis pelas características da cerveja, álcoois superiores aromáticos, ésteres, etc.

1.1. O Processo de Produção da Cerveja

O processo de produção divide-se nas seguintes etapas:

- Fabricação do mosto
- Fermentação, Maturação e Estabilização
- Clarificação
- Enchimento

A fabricação do mosto envolve quatro processos. O primeiro corresponde à moagem de modo a obter-se uma farinha grosseira que possibilita uma rápida extracção e conversão dos componentes do malte. Os outros cereais não maltados podem ser comprados e aprovisionados já com uma moagem adequada. Depois segue-se a brassagem que é o que origina o mosto. Resulta da mistura da farinha dos cereais com água e dependendo das condições operatórias (temperatura, pH e tempo de duração) obtêm-se mostos para diferentes tipos de cerveja. Esta fase de produção tem uma duração entre 2 a 4 horas e acaba a uma temperatura que ronda normalmente os 75 °C. No final da brassagem o mosto produzido sofre um processo de filtração para separar a parte insolúvel denominada *drêche*. São utilizados para o efeito filtros prensa com introdução de água à mesma temperatura do mosto para

diluir e ajudar a filtração. A filtração tem a duração de 2 a 3 horas à temperatura média de 75 °C. O *drêche* é depois utilizado para alimentação de gado. A última fase do fabrico é a ebulição do mosto durante cerca de 2 horas. Nesta fase é adicionado o *lúpulo*. É necessário a operação de ebulição para: solubilizar a transformar as substâncias amargas do *lúpulo*; eliminar substâncias voláteis indesejáveis; esterilizar o mosto; precipitar as proteínas de peso molecular elevado e fixar a concentração final do mosto. Após a ebulição é necessário retirar o precipitado proteico, os componentes do *lúpulo* não solubilizado, do mosto quente. Segue-se o arrefecimento até 9 °C em condições estéreis.

Depois de produzido o mosto, a próxima etapa é a fermentação. É na etapa de fermentação que os açúcares do mosto, pela acção das leveduras, se transformam em álcool e dióxido de carbono. A fermentação é conduzida a temperaturas controladas e com uma duração de cerca de 20 dias.

A maturação é a fase subsequente à da fermentação e corresponde ao período de estacionamento da cerveja a temperaturas adequadas com o fim de permitir a libertação dos componentes voláteis indesejáveis.

Segue-se a estabilização que consiste em deixar a cerveja estabilizar entre 0 °C e 2 °C de forma a permitir que esta se equilibre coloidalmente.

O próximo passo é a clarificação da cerveja que lhe dá limpidez eliminando os últimos elementos de turvação ainda em suspensão através de um meio filtrante.

A cerveja filtrada é finalmente armazenada em cubas estando assim pronta para ser enviada para o enchimento.

O enchimento é a etapa final podendo a cerveja ser acondicionada em diferentes embalagens (garrafa, lata, barril...). Após o enchimento é necessário preceder à estabilização biológica da cerveja recorrendo-se à pasteurização.

1.2. Enquadramento do Projecto

Este projecto visa o estudo do tratamento químico da água de alimentação utilizada em alguns equipamentos da unidade de energia e fluidos da UNICER de Leça do Balio.

Os produtos utilizados dividem-se em anti-corrosivos, anti-incrustantes e biocidas. São adicionados nos circuitos de água de refrigeração e de água para produção de vapor. Seguidamente é feito um pequeno resumo dos equipamentos relevantes para o trabalho, caldeiras, torres de arrefecimento e condensadores evaporativos, bem como dos tratamentos normalmente realizados à água de alimentação a estes equipamentos.

1.2.1. Caldeiras [2, 8]

As caldeiras são os equipamentos que produzem o vapor de água sobre-aquecido. O vapor é utilizado como agente transportador de energia. Em geral, o vapor é utilizado para aquecimento e para a produção de trabalho mecânico. O vapor pode ainda ser usado para processos de esterilização como por exemplo a lavagem de garrafas.

O corpo principal de uma caldeira é constituído pela fornalha e pelo permutador de calor (feixes tubulares). Pode ainda existir um economizador que aproveita o calor dos gases de combustão para um pré-aquecimento do ar (comburente).

Existem dois tipos de caldeiras, as gás-tubulares e as aquo-tubulares.

As caldeiras gás-tubulares, Figura 1.1, caracterizam-se pela circulação dos gases de combustão no interior dos tubos do permutador de calor; os gases de combustão permutam calor com a água que circula na carcaça.

As caldeiras aquo-tubulares, Figura 1.2, caracterizam-se pela circulação externa dos gases de combustão, conduzindo os tubos do permutador água e vapor de água. A produção de vapor neste tipo de caldeiras é maior do que nas gás-tubulares.

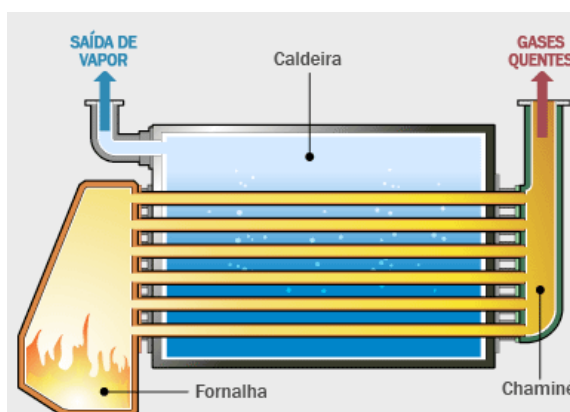


Figura 1.1 - Caldeira gás-tubular [7].

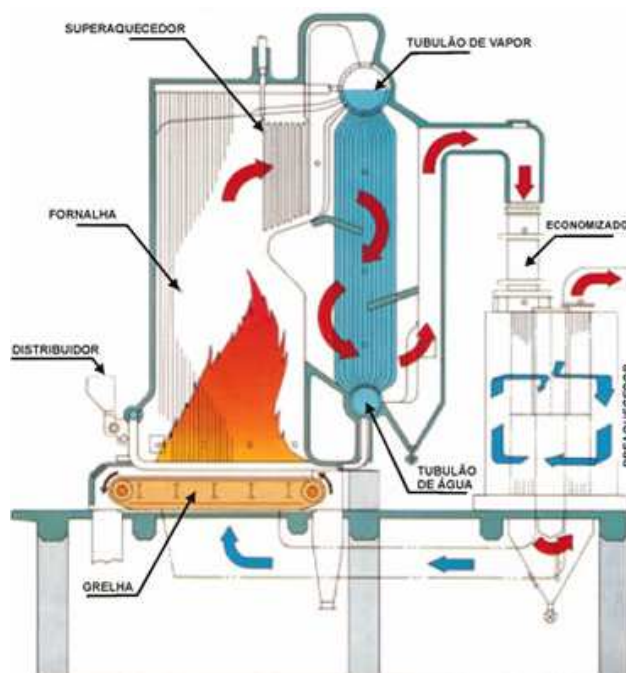


Figura 1.2 - Caldeira aquo-tubular [7].

A Unicer tem 4 caldeiras, necessárias para alimentar com vapor todos os sistemas que dele necessitam.

Caldeira 1:

Esta caldeira é a maior das quatro e a que possui maior capacidade de produção. É uma caldeira aquo-tubular que trabalha com um caudal médio de alimentação de $17 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ e a uma pressão de 30 bar. Esta caldeira possui ainda um aquecedor de ar e um economizador. Existe também um sobre-aquecedor para secar o vapor quando este se destina a alimentar a turbina. Esta caldeira trabalha quando a fábrica tem mais do que uma sala de fabrico em funcionamento.

Caldeira 2:

A caldeira 2 é uma caldeira gás-tubular com um caudal médio de água de $9 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ e trabalha a uma pressão de 10 bar. Nesta caldeira não existe qualquer aproveitamento dos gases de combustão, pois também os gases não saem a uma temperatura tão alta como os da caldeira 1. Esta caldeira trabalha diariamente mas não de forma contínua.

Caldeira 3:

A caldeira 3 é do tipo aquo-tubular. O caudal de alimentação de água médio é de $13 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ e a pressão de funcionamento é de 6 bar. A caldeira possui um economizador. Esta caldeira trabalha em alternância com a caldeira 1, sempre que as necessidades de vapor assim o justifiquem.

Caldeira da Cogeração:

A cogeração refere-se à produção combinada de electricidade e calor num mesmo equipamento. O grande aproveitamento térmico da cogeração está quase todo no calor cedido à água para produção de água quente ($90 \text{ }^\circ\text{C}$).

Os gases de combustão do motor são aproveitados numa pequena caldeira para se produzir vapor.

A Unicer tem na unidade de cogeração uma pequena caldeira aqua-tubular a funcionar a 6 bar e um caudal de alimentação de $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

1.2.2. Torres de Arrefecimento [8, 9]

As torres de arrefecimento são equipamentos que promovem o arrefecimento da água em serpentinas por transferência de calor com o ar, com evaporação de água.

Princípio de funcionamento:

As torres funcionam com um circuito de água fechado no interior dos tubos e outro semi-aberto na parte exterior onde ocorre evaporação.

O fluído que se pretende arrefecer circula dentro da serpentina. O ar forçado por um ventilador origina a evaporação da água exterior à serpentina. Esta evaporação retira calor da serpentina. O esquema de uma torre de arrefecimento está representado na Figura 1.3. A quantidade de água evaporada tem de ser continuamente reposta ao longo do processo.

A Unicer possui duas torres para arrefecer a água que serve como líquido refrigerador de algumas máquinas, nomeadamente das máquinas de produção de CO_2 líquido, compressores etc.

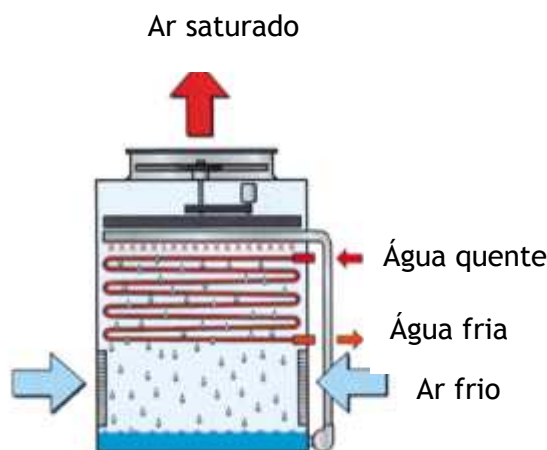


Figura 1.3 - Torre de arrefecimento (adaptado de [10]).

1.2.3. Condensadores Evaporativos

Os condensadores evaporativos são sistemas muito semelhantes às torres de arrefecimento. A única diferença é que o fluído que está dentro dos tubos, em circuito fechado, é amoníaco que entra gasoso e sai no estado líquido.

Sistema de frio:

Na Unicer, o sistema que arrefece a água glicolada a $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ utiliza amoníaco como líquido arrefecedor. A água glicolada é o fluído usado para o arrefecimento das cubas. O papel dos compressores é fornecer energia potencial, de pressão, ao amoníaco que está sob a forma de gás. Como resultado da compressão, a temperatura do gás sobe até cerca dos $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Depois este gás é arrefecido nos condensadores, passando ao estado líquido. Seguidamente, o amoníaco liquefeito passa por válvulas de expansão que causam abaixamento de temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ para $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. O amoníaco a $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ irá permutar com a água glicolada onde irá aquecer e devido a este aquecimento vaporiza. De seguida o amoníaco é de novo enviado aos compressores para ser comprimido e o ciclo repete-se. O circuito descrito está esquematizado na Figura 1.4.

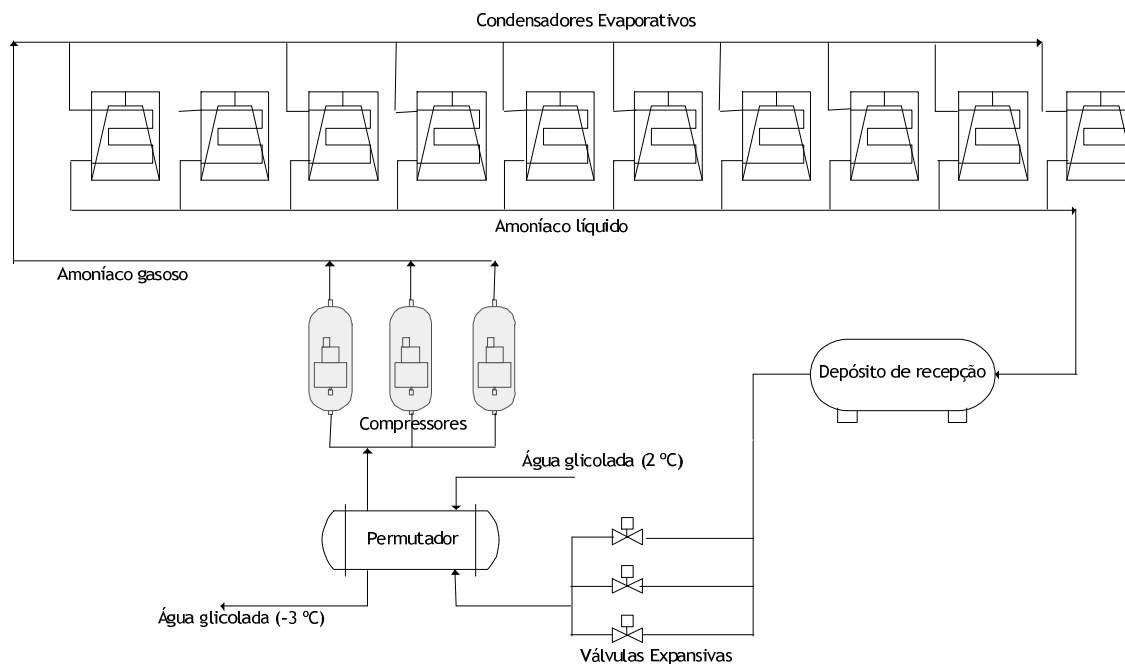


Figura 1.4 - Sistema de frio.

Neste momento, a Unicer possui dez condensadores evaporativos para arrefecer o amon cio gasoso e conseqentemente promover a sua condensação. O seu funcionamento   igual ao das torres de arrefecimento.

1.2.4.  guas Industriais

A qualidade da água exigida depende do equipamento a que ela se destina. Um gerador de vapor requer água com elevada pureza enquanto que os sistemas de refrigeração não são tão exigentes.

As impurezas presentes na água podem dar origem a graves problemas operacionais causados pela formação de depósitos, corrosão dos materiais, espuma nos reebulidores das caldeiras e ainda por lodo microbiológico em circuitos arejados [12].

Existem dois tipos de tratamento de águas industriais. O tratamento interno consiste na adição de produtos químicos que alteram a qualidade da água no local do processo. O outro tratamento, designado vulgarmente de tratamento externo, consiste num tratamento recorrendo a métodos de purificação como membranas e filtros de modo a obter água com melhor qualidade.

A maior parte da água utilizada na empresa prov m de captações subterrâneas (furos). Quando a água dos furos não   suficiente   usada ainda água da rede

pública (SMAS). Seguidamente apresenta-se um breve resumo da central de tratamento externo.

Qualquer que seja a origem da água adiciona-se cloro para desinfectar. Se a origem for dos furos, antes da cloragem a água ainda passa por filtros *OFYSY (Omnifiltration System)* para reduzir o teor em ferro e matéria orgânica oxidada. Nesta fase, a qualidade desta água já é adequada para sistemas de refrigeração e para a rede geral, não necessitando de mais nenhum tratamento. Na empresa é necessário ainda haver água de fabrico e água para diluir a cerveja, neste caso a água é posteriormente tratada com filtros de carvão e por osmose. A água de alimentação das caldeiras requer maior pureza. O primeiro passo deste tratamento secundário é a remoção do cloro com filtros de carvão activado, seguido de osmose inversa e permuta iónica para remoção de sais, para remoção mais completa dos sais passa ainda por um leito misto. O último passo deste tratamento secundário envolve a desgasificação da corrente de água.

1.2.4.1. Água para Sistemas de Refrigeração

A necessidade de remover calor é comum em quase todos os processos industriais. Grandes quantidades de água são usadas na refrigeração.

É importante destacar que a corrosão, a formação de depósitos e incrustações e ainda o desenvolvimento microbiológico nestas águas podem reduzir a eficiência operacional, deteriorar os equipamentos e aumentar os custos de manutenção.

Apesar de levar um tratamento externo, a água não deixa de necessitar de um tratamento interno para reduzir os problemas anteriormente referidos.

Como já foi explicado, existem dois circuitos de água em sistemas de refrigeração. Um circuito semi-aberto e um completamente fechado. O circuito semi-aberto existe tanto nas torres como nos condensadores. Esta água por estar em contacto com o ar atmosférico está mais sujeita a contaminações. O circuito fechado não apresenta tantos problemas e por isso tem um tratamento mais simplificado.

Principais problemas em circuitos de refrigeração [13]:

- **Corrosão**

Os produtos de corrosão são a maior causa de depósitos em sistemas de água de refrigeração. Além de deteriorar o material dos equipamentos também baixa a eficiência do processo. Devem ser adicionados produtos químicos para evitar esses problemas.

Os inibidores de corrosão são classificados como anódicos, catódicos ou mistos, dependendo da reacção de corrosão que cada um controla. A escolha do inibidor adequado é determinada pelos parâmetros do projecto do sistema de refrigeração e pela composição da água.

Os inibidores catódicos são em geral menos eficientes que os do tipo anódico.

Normalmente, para o tratamento anti-corrosivo, utilizam-se misturas sinérgicas que são a combinação de inibidores catódicos com anódicos para dar melhor protecção total ao metal. Alguns exemplos são: zinco-cromatos, cromato-polifosfato e zinco-polifosfato [4, 12].

- **Incrustações**

Durante o normal funcionamento destes equipamentos, devido à evaporação, a concentração de sais aumenta. Quando essa concentração supera o ponto de solubilidade ocorre a formação de crostas. Para combater esse problema utilizam-se anti-incrustantes e ainda se fazem purgas de modo a manter os níveis de condutividade dentro do limite recomendado.

A introdução de agentes para o controlo de depósitos em sistemas de águas de refrigeração é hoje uma prática tão comum quanto a adição de inibidores de corrosão. A grande maioria dos anti-incrustantes reage com as impurezas da água formando lamas. Alguns exemplos destes compostos são os quelatos, poliacrilatos, fosfanatos e anidrido polimaneico [4, 12].

- **Microrganismos [12, 13]**

Existem microrganismos em toda a parte da natureza. Alguns são benéficos enquanto outros, chamados patogénicos, causam doenças. Os microrganismos habitantes de sistemas de refrigeração podem afectar a eficiência do processo, seja pela sua quantidade, pelos seus resíduos metabólicos ou pela formação de depósitos. A água já entrar no sistema contaminada ou então a contaminação poderá ser feita a partir do ar. Uma única célula não causa qualquer problema, no entanto os sistemas de refrigeração têm um ambiente muito favorável (temperatura, pH, luz solar e nutrientes) ao crescimento ilimitado destes seres. Existem três tipos de microrganismos que normalmente povoam estes sistemas: algas, bactérias e fungos. Para conseguir prevenir a contaminação das torres de arrefecimento e dos condensadores evaporativos utilizam-se biocidas. Os biocidas são compostos tóxicos que eliminam ou inibem o crescimento microbiológico.

O método mais convencional para o tratamento microbiológico é o uso de biocidas. Uma tecnologia mais avançada, que não requer o manuseamento de produtos químicos, é o tratamento da água por Ultra-sons. Apesar de ser mais eficaz e seguro, em Portugal não é um método ainda muito usado. Ao contrário, em países tecnologicamente mais avançados, o tratamento por Ultra-sons já começa a ser bastante utilizado em indústrias estrangeiras.

Os biocidas são químicos tóxicos e são classificados como oxidantes e não-oxidantes.

A água do circuito fechado não está sujeita a quaisquer contaminações microbiológicas. Só necessita da adição de anti-incrustantes e anti-corrosivos; enquanto que a água do circuito semi-aberto, necessita ainda de tratamento microbiológico.

1.2.4.2. Água para as caldeiras

A água de alimentação de um gerador de vapor não deve possuir compostos incrustantes nem corroentes.

Além de todo o tratamento externo também é necessário um tratamento interno. As caldeiras são os equipamentos mais exigentes, mais dispendiosos e requerem muito controlo.

Principais problemas em caldeiras [4]

- **Corrosão**

No caso em apreço, a corrosão refere-se essencialmente à oxidação dos metais que compõe o sistema gerador de vapor. Este processo ocorre em função da pressão e temperatura de trabalho, do tipo de contaminação e do tratamento químico. Existem vários tipos de corrosão em caldeiras, mas a mais preocupante é a corrosão devida ao oxigénio dissolvido.

Para se combater este tipo de corrosão utiliza-se um sequestrador de oxigénio. O sequestrador ao reagir com o O_2 origina compostos solúveis em água. No entanto, o tratamento da corrosão aumenta a probabilidade de incrustações e depósitos. Todas as caldeiras têm que ter uma purga contínua para permitir controlar os níveis de condutividade originados pelo anti-corrosivo assim como por outros aditivos.

A adição de um agente químico redutor, sequestrador, que reage com o oxigénio residual, é a prática normalmente utilizada. Os produtos químicos usados para essa finalidade são quase exclusivamente à base de sulfitos de sódio ou de hidrazina. Cada um destes produtos pode ser combinado com um catalisador para aumentar a sua reactividade. Em caldeiras de alta pressão, pode ocorrer a oxidação do sulfito de sódio com a água originando SO_2 e H_2S que podem provocar corrosão na pós-caldeira. Por várias razões, o sequestrador químico de oxigénio escolhido, principalmente em unidade de geração de vapor de alta pressão, é quase invariavelmente a hidrazina (N_2H_4) [4, 5].

- **Incrustações [4]**

As incrustações são depósitos ou precipitações sólidas, de natureza alcalina, que ocorrem nas superfícies internas das caldeiras. Provocam a redução de transferência de calor, aumentando o consumo de combustível, elevação da temperatura da superfície dos metais por sobreaquecimento e eventuais rupturas da estrutura.

O metal sob depósito está particularmente sujeito a corrosão, sendo mais um inconveniente da formação de incrustações. Os depósitos podem ainda causar a interrupção de circulação da água na caldeira.

Existem duas causas básicas da formação de depósitos em caldeiras:

- 1) As temperaturas elevadas dentro das caldeiras provocam a precipitação de alguns compostos;
- 2) A concentração de sais na água da caldeira faz com que certos compostos ultrapassem a solubilidade máxima.

Um tratamento químico adequado visa obter sólidos insolúveis na água sob a forma de lama não aderente à tubagem em vez de incrustações.

Para se combater os problemas de incrustação, utilizam-se químicos que inibem a formação de crostas dando prioridade à formação de lamas com os mesmos compostos que originariam as incrustações. Estas lamas não são aderentes e são facilmente removidas através de uma purga de fundo. Para que a concentração de sais na caldeira não atinja valores acima dos pontos de solubilidade, tem também de existir uma purga contínua como já foi explicado quando se falou da corrosão.

Os anti-incrustantes usados nas caldeiras podem ser divididos em duas categorias: aqueles que reagem estequiometricamente com as impurezas da água de alimentação de modo a alterar a sua estrutura química; e aqueles que alteram a acção das impurezas. Os produtos geralmente utilizados para reagir com as impurezas são os carbonatos, os fosfatos e os quelatos. Os que alteram o comportamento das impurezas são substâncias orgânicas seleccionadas, polímeros e sequestradores não-estequiométricos.

Dos três reagentes, o mais antigo e menos eficiente são os compostos à base de carbonatos. Os reagentes deste tipo podem formar dióxido de carbono que provoca corrosão. Em alternativa aos carbonatos existem fosfatos que também reagem com os iões Ca^{2+} formando um precipitado de $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \downarrow$. O terceiro agente estequiométrico é à base de quelatos. Os quelatos reagem com os catiões divalentes e trivalentes formando complexos solúveis e estáveis ao calor. Os quelatos mais usados são o EDTA e NTA. A utilização de quelatos não provoca precipitação dos produtos da reacção do sequestrador, sendo por este motivo, o reagente mais eficaz dos três produtos.

O outro tipo de tratamento usando reagentes não-estequiométricos inclui o uso de agentes orgânicos naturais ou polímeros [4, 12].

2. Tratamento de Água Industrial

Nas centrais da Unicer - Leça do Balio são utilizados vários produtos químicos para prevenir os problemas anteriormente mencionados. O grupo de químicos estudado pode ser dividido de acordo com o equipamento destinado e a sua respectiva função.

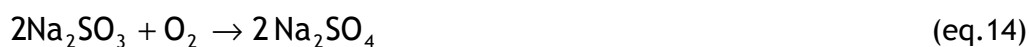
2.1. Produtos Químicos para Água das Caldeiras

Nas caldeiras utilizam-se dois produtos, um anti-incrustante e um anti-corrosivo. Ambos são adicionados com uma bomba doseadora à água de alimentação da caldeira. Para garantir que a dosagem efectuada é eficiente, fazem-se análises periódicas à água para ver se esta possui o valor residual de químico recomendado pelo fornecedor. Assim se faz o controlo destes dois produtos. O anti-incrustante é o Dewtroll 9000 e o sequestrador de oxigénio é o Amersite 10L.

Amersite 10L

O Amersite 10L é um composto à base de sulfito de sódio. O sulfito é o sequestrador de oxigénio recomendado em indústrias onde ocorre contacto entre o vapor e produtos alimentícios.

O sulfito reage prontamente com o oxigénio a pH e temperaturas elevadas formando sulfato de sódio, segundo a reacção [6]:



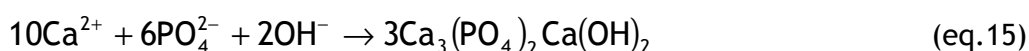
O sulfato de sódio tem grande solubilidade na água. Desta forma, a concentração de sólidos dissolvidos aumenta, sendo muito importante a eficiência da purga contínua.

A quantidade recomendada de sulfito de sódio é 10 g de produto por 1 ppm de oxigénio dissolvido. No entanto para garantir que a dosagem é suficiente para remover todo o oxigénio existente, adiciona-se um pouco mais, um excesso, por isso deve existir sempre um valor residual de sulfito na água.

Dewtroll 9000

Para controlar a formação de crostas usa-se o Dewtroll 9000 constituído por fosfatos. A função dos fosfatos é evitar incrustações devidas a iões de Ca^{2+} e Mg^{2+} formando com estes iões lamas. É necessário manter o pH alcalino dentro da caldeira para que os fosfatos possam desempenhar a sua função com sucesso.

Os iões de cálcio são removidos na forma de hidroxiapatita. A formação de hidroxiapatita é descrita segundo a reacção [12]:



O mesmo pode acontecer com o magnésio formando $\text{Mg}(\text{PO}_4)_2\text{Mg}(\text{OH})_2$.

Tal como com os sulfitos, também se tem de manter um valor residual de fosfatos para se garantir que todo o Mg^{2+} e o Ca^{2+} reagiram.

2.2. Produtos Químicos para Águas de Refrigeração

A seguir são apresentados nas tabelas 1 e 2 os produtos usados no circuito de água para os sistemas de refrigeração.

Tabela 1: Produtos usados no circuito semi-aberto (Condensadores e Torres)

<i>Circuito semi-aberto</i>	
Produto	Função
Biosperse 250	Biocida
Enviroplus 2506	Anti-incrustante

Tabela 2: Produtos usados no circuito fechado (Torres)

<i>Circuito fechado</i>	
Produto	Função
Drew 11-539	Anti-corrosivo
Maxigard	Anti-incrustante

Biosperse 250

A adição de Biosperse 250 tem o propósito de evitar o crescimento microbiológico no circuito semi-aberto das torres de arrefecimento e condensadores evaporativos. Este produto não pode ser adicionado com uma bomba em contínuo. Tem de ser uma adição em choque. Se for adicionado continuamente em pequenas quantidades não se proporciona uma concentração suficientemente elevada, capaz de matar os

microrganismos. Para que o tratamento seja eficaz, a adição deste produto tem de ser feita em grandes quantidades com determinada frequência. Actualmente a sua adição é feita à mão. Os técnicos das centrais levam os bidões até aos condensadores e às torres e adicionam uma vez por semana cerca de 2 litros. Esta adição é pouco rigorosa, pouco controlada e feita por várias pessoas diferentes.

Enviroplus 2506

Este produto que tem como função evita formação de depósitos nas tubagens e nas tinas dos equipamentos.

Está a ser adicionado com uma bomba em contínuo à água de alimentação. A quantidade de produto é independente da quantidade de água consumida porque a bomba não é doseadora. A água que entra nas torres e condensadores deve possuir uma concentração de 25 ppm de Enviroplus.

Drew 11-539 e Maxigard

São os produtos adicionados ao circuito fechado das torres de arrefecimento. Depois da primeira dosagem para o arranque do circuito raramente se adiciona mais produto, só se houver alguma fuga. São feitas análises periódicas à água para ver se a concentração está adequada.

2.3. Análise dos Consumos e Custos dos Produtos Químicos

No ponto anterior foram apresentados seis produtos químicos com diferentes funções usados nas centrais. A seguir apresenta-se a Tabela 3 referente aos consumos em 2008 desses produtos e o respectivo custo.

Tabela 3: Consumo de produtos químicos em 2008

	CONSUMO (2008) Kg	CUSTO €
AMERSITE 10L	6850	10 960,00
DEWTROL 9500	2000	5300,00
MAXIGARD	400	1596,00
DREW 539	180	790,20
ENVIROPLUS 2506	1750	10 080,00
BIOSPERES 250	1675	7755,25
TOTAL:		36 481,45

Como se pode ver, em 2008, houve uma despesa de 36481 euros em produtos químicos. Os produtos mais dispendiosos foram o Amersite 10L e o Envirolus seguindo-se do Biosperse.

2.4. Estudo da Optimização do Consumo de Produtos Químicos

Os produtos utilizados para o circuito fechado de refrigeração estão a ser adicionados de maneira correcta e única possível para este tipo de circuitos. Não necessita portanto de qualquer modificação no procedimento ou na instalação.

Os produtos usados nas caldeiras têm somente que ser ajustados diariamente, se necessário, de acordo com o valor residual que as análises indicarem. Foi o que foi feito durante o tempo que estive na empresa e que alguém deve continuar a fazer.

Relativamente à água de refrigeração do circuito semi-aberto pode-se dizer que a adição do anti-incrustante (Enviroplus) não está a ser feita de modo correcto. O biocida é adicionado da melhor maneira possível dentro das condições de trabalho. No entanto, nunca se pode esquecer que é um produto altamente perigoso para a saúde humana e para o ambiente. Por este motivo, deve-se tentar manter o menor contacto possível com o produto. Uma modificação na instalação de modo a ser necessária somente uma única adição de produto seria uma boa opção de segurança.

2.4.1. Optimização do doseamento de Enviroplus

No presente momento, o Enviroplus está a ser adicionado em linha na tubagem de alimentação através de uma bomba. A bomba está a funcionar em contínuo, adicionando sempre a mesma quantidade mesmo quando o caudal de água varia.

A água que circula nesta tubagem alimenta as torres de arrefecimento e os condensadores evaporativos. É utilizada tanto no início, quando se pretende encher as torres, como durante o processo para repor a água que se perde por evaporação e purgas. Sendo assim, o caudal de água necessário não é sempre igual, pois todos os dias e mesmo com espaço de horas, estas perdas variam. O caudal de purga depende do valor da condutividade da água e a evaporação das condições meteorológicas e da eficiência do equipamento. A evaporação interferirá, como é óbvio, no valor da condutividade, pois acumulam-se sais na água quando a esta evapora.

Depois, desta breve explicação, percebe-se que não faz sentido que a quantidade de produto químico não seja doseado consoante o caudal de água consumido. Caso contrário, existem alturas em que a concentração de produto químico é excessiva e outras em que deve estar em défice.

A alteração proposta proporciona a correcta dosagem de produto químico. A bomba deverá estar ligada a um contador volumétrico com cabeça geradora de impulsos. À medida que a água passa no contador, são gerados impulsos, os quais são transmitidos à bomba doseadora e esta introduzirá o produto químico. Assim, a dosagem será proporcional ao consumo de água. A Figura 2.1 esquematiza a instalação necessária.

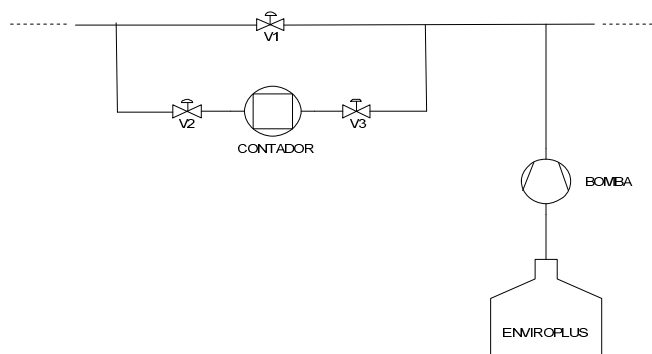


Figura 2.1 - Esquema da instalação de adição de Enviroplus.

Assim, consoante o caudal de água, a bomba doseia a quantidade indicada de Enviroplus.

O fornecedor do Enviroplus é a Ashland e de acordo com as especificações deste produto, a água deverá ter uma concentração média de 25 ppm de Enviroplus.

Análise do Consumo de Enviroplus em 2008:

Analisou-se, o consumo de água e de Enviroplus, em 2008. A Tabela 4 apresenta os valores obtidos e a Figura 2.2 demonstra a relação entre o consumo de água e de produto.

Tabela 4: Consumo de Enviroplus relativamente ao consumo de água, em 2008.

Mês	Consumo de água (m ³)	Consumo de Produto (m ³)
Janeiro	1751	0,307
Fevereiro	2009	0,066
Março	3130	0,132
Abril	2784	0,132
Maió	2683	0,110
Junho	3942	0,132
Julho	5588	0,088
Agosto	5772	0,132
Setembro	4068	0,110
Outubro	3628	0,132
Novembro	3059	0,066
Dezembro	2679	0,132

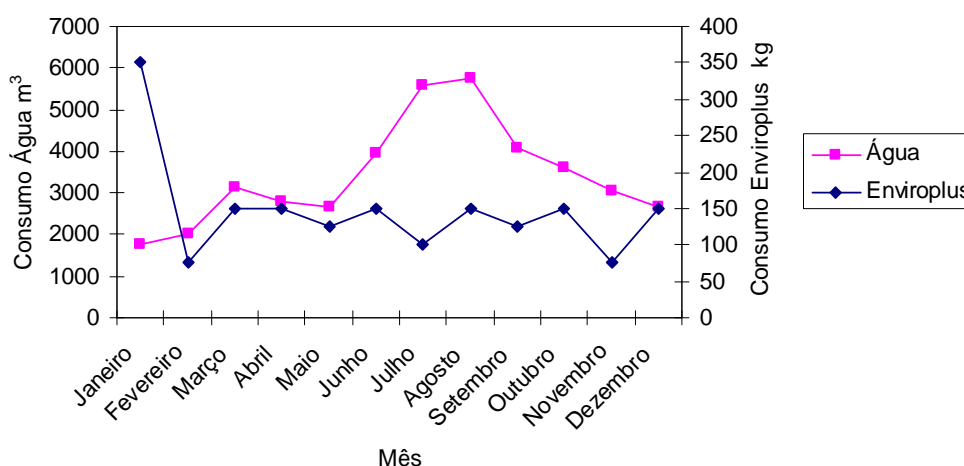


Figura 2.2 - Gráfico com o consumo de Enviroplus relativamente ao consumo de água em 2008.

O consumo de água varia com os meses do ano, sendo os meses mais quentes aqueles que tiveram maiores consumos, como já era de esperar.

A adição de Enviroplus manteve-se praticamente constante ao longo do ano. Se analisarmos a concentração média em dois meses diferentes, por exemplo Março e Julho, podemos verificar que a concentração difere bastante. Em Março a concentração foi de 48 ppm, que é um valor excessivo comparando com o valor de concentração recomendado. Em Julho a concentração de produto foi de 18 ppm, que é uma concentração baixa para um tratamento eficiente.

No ano de 2008 foram necessários 70 bidões de 25 kg e gastou-se 10 080 euros em Enviroplus.

Correcção para o Consumo Ideal:

Para se conseguir uma concentração de 25 ppm de Enviroplus a bomba doseadora deveria adicionar $2,19 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ de produto químico por cada metro cúbico de água. Assim, os consumos de produto químico deveriam ter sido conforme mostra a seguinte Tabela 5 e a Figura 2.3:

Tabela 5: Consumo correcto de Enviroplus em relação ao consumo de água em 2008.

Mês	Consumo de água (m ³)	Consumo de Produto (m ³)
Janeiro	1751	0,038
Fevereiro	2009	0,044
Março	3130	0,069
Abril	2784	0,061
Mai	2683	0,059
Junho	3942	0,086
Julho	5588	0,123
Agosto	5772	0,127
Setembro	4068	0,089
Outubro	3628	0,080
Novembro	3059	0,067
Dezembro	2679	0,059

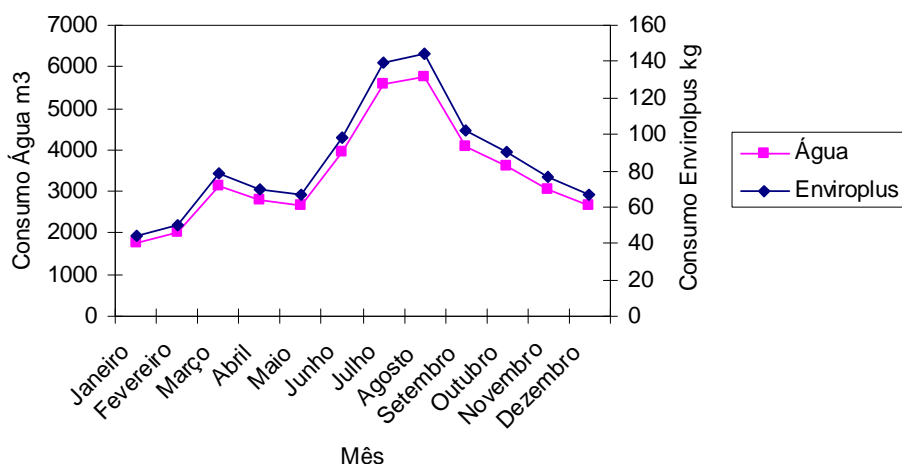


Figura 2.3 - Gráfico com o consumo correcto de Enviroplus relativamente ao consumo de água.

Desta forma, o consumo de Enviroplus tinha sido reduzido aproximadamente para metade. Teriam sido somente necessários 41 bidões de 25 kg e ter-se-ia poupado 4163 euros. Neste ano só deviam ter sido gastos 5917 euros em Enviroplus.

2.4.2. Melhor Método de Adição de Biosperse

A proposta a seguir apresentada tem como objectivo o melhor funcionamento das torres de arrefecimento e dos condensadores evaporativos melhorando a adição de biocida, sendo esta mais controlada e eficiente. Será ainda apresentado outro biocida mais eficaz que previne a contaminação com *Legionella*.

O que se sugere é criar uma tina de recolha comum a todos os condensadores e às torres, sendo só necessário fazer-se uma adição de biocida.

Para isso, os equipamentos terão de ter uma ligação ao reservatório comum, à tina de recolha. É necessário recolher num local a água destes processos como mostra a Figura 2.4.

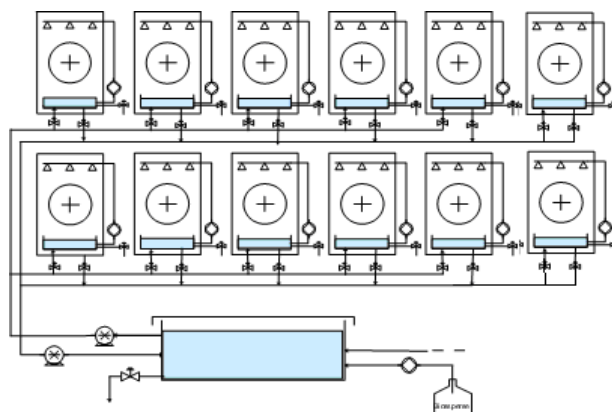


Figura 2.4 - Unifica o do circuito das torres de arrefecimento e condensadores evaporativos.

S  será necessário existir uma única purga contínuo que fica no tanque de recolha e que controla o nível de condutividade.

O biocida será adicionado neste tanque através de uma bomba doseadora em choque que pode ainda ter um controlo temporizado. A actua o de biocidas s    eficaz se for proporcionar uma concentra o acima da qual os microrganismos não conseguem resistir. A dosagem terá de ser o equivalente aos doze equipamentos, que, de acordo com o fornecedor do produto, a Ashland, d  cerca de 24 litros de biocida (2 litros por cada equipamento).

Alteração do Biocida:

O biocida utilizado no momento   o Biosperse 250 que mata os organismos presentes na água mas não tem a capacidade de destruir o biofilme formado pelos microrganismos. Ele não quebra as liga es que unem o biofilme e portanto este permanece intacto. Existe outro produto, também da mesma gama, que além de actuar como biocida também   dispersante, principalmente para as bactérias do tipo da *Legionella* que tem grande probabilidade de crescer em meios como este. Esse outro produto   o Biosperse 535 EMD.

3. Recuperação por Nanofiltração da Água das Purgas das Caldeiras

A água alimentada às caldeiras tem um bom tratamento externo. É uma água quase pura com condutividade muito baixa.

Durante o funcionamento da caldeira, a produção de vapor provoca a acumulação sais na água do gerador. O tratamento interno também contribui para esses aumento de concentração e consequentemente para a elevada condutividade.

A condutividade das caldeiras é controlada diariamente. Existe uma purga contínua para que a condutividade não atinja valores acima dos permitidos. Para se manter o valor da condutividade dentro dos limites, tem de se perder água através de purgas.

No gerador 1 e 2 a purga contínua é automática. Está ligada a um condutímetro que controla a abertura da válvula. No gerador 3 e cogeração a purga é manual e ajustada de acordo com as análises à condutividade.

Pode assim dizer-se que a água das purgas contínuas das caldeiras não tem qualquer contaminação. Esta água só possui grande teor de sais devido aos aditivos e à evaporação.

O objectivo desta proposta é recuperar a água das purgas recorrendo a uma filtração capaz de remover os sais e consequentemente diminuir a condutividade.

3.1. Análise das Perdas de Água através de Purgas

Para se poder estimar as perdas de purga nas caldeiras, analisou-se a quantidade de vapor produzido por volume de água alimentado durante o ano de 2008. Esta diferença equivale às perdas de purga. O volume obtido de purgas nas quatro caldeiras, assim como o seu valor monetário, é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6: Volume e custo de purgas das caldeiras (2008).

Mês	Purga das Caldeiras (m ³)	Custo (€)
Janeiro	3521	5633,60
Fevereiro	3624	5798,40
Março	4893	7828,80
Abril	4734	7574,40
Maio	3062	4899,20
Junho	1764	2822,40
Julho	1724	2758,40
Agosto	1973	3156,80
Setembro	2362	3779,20
Outubro	2492	3987,20
Novembro	2343	3748,80
Dezembro	1343	2148,80
Total:	33835	54 136,00

Para o cálculo do custo da água perdida considerou-se o preço do metro cúbico de água da rede pública (SMAS) 1,60 €·m⁻³.

Em termos económicos, em 2008, perderam-se 54 136,00 euros em purgas.

3.2. Iões Presentes na Água das Caldeiras

A água de alimentação das caldeiras tem uma condutividade bastante baixa, menos de 5 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Já a água das purgas pode apresentar condutividade muito elevada, dependendo da caldeira e das condições operatórias, pode variar entre $\approx 300 - 2500 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

Quase todos os iões presentes na água das caldeiras são devidos aos aditivos (anti-incrustante e anti-corrosivo) e à concentração devido à evaporação.

Os sais da água dos geradores de vapor são apresentados na Tabela 7 com a respectiva condutividade específica. Também é apresentada a condutividade do ião cálcio (Ca²⁺) e magnésio (Mg²⁺) por serem os iões mais prejudiciais para a formação de incrustações.

Tabela 7: Condutividade iónica específica.

Ião	Condutividade específica ($S \cdot cm^2 \cdot mol^{-1}$)
Ca^{2+}	119,0
Mg^{2+}	106,0
K^+	73,5
Na^+	50,1
H^+	349,8
HCO_3^-	45,0
Cl^-	76,4
SO_4^{2-}	160,0
PO_4^{3-}	210,0
OH^-	198,6

Foi medida a condutividade e a dureza total da água e constatou-se que não existe praticamente iões Ca^{2+} e Mg^{2+} , como se previa devido ao tratamento externo já mencionado. Os valores da dureza, assim como os da condutividade, obtidos para a caldeira 1, 2 e 3 são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Dureza total e condutividade da água da caldeira 1, 2 e 3.

	Caldeira 1	Caldeira 2	Caldeira 3
Dureza total (ppm)	0,68	2,6	0,4
Condutividade ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	239	1120	1210

Como se sabe a dureza total refere-se à concentração de cálcio e magnésio na água. Com a análise efectuada pode-se ver que estes dois iões encontram-se em pequeníssima quantidade nas três caldeiras. Porque a água tem um pré-tratamento para retirar estes iões e nenhum dos aditivos é constituído por Ca^{2+} e Mg^{2+} .

A contribuição total que cada ião numa solução é calculada multiplicando o factor de condutividade específica do respectivo ião pela sua concentração em solução. Como a concentração destes iões é muito pequena, a sua contribuição para a condutividade total da água é desprezável.

Mesmo antes de qualquer tratamento posterior a concentração de Mg^{2+} e Ca^{2+} , iões responsáveis pela maior parte de incrustações, é praticamente nula. Os restantes iões, principalmente os bivalentes, podem ser facilmente captados através de processos de Nanofiltração.

Deve referir-se que a caldeira 1 apresenta uma condutividade de ordem de grandeza inferior à das outras duas caldeiras devido ao facto de a purga contínua da caldeira 1 não estar a funcionar de modo automático no momento de recolha das amostras. Isto quer dizer que o caudal desta purga não estava a ser regulado pelo condutímetro. A purga estava em manual e com um caudal demasiado elevado, estava-se a perder demasiada água e a manter níveis de condutividade bem mais baixos do que o limite máximo permitido. Quando a purga estiver a funcionar de modo automático, a quantidade de sólidos dissolvidos nesta caldeira será maior e por isso apresentará uma condutividade semelhante às outras duas caldeiras.

3.3. Nanofiltração

Tal como na Osmose Inversa, o mecanismo de transferência de massa na Nanofiltração é por difusão-sorção. As membranas de Osmose Inversa são densas, enquanto as membranas de Nanofiltração têm poros próximos de 1 nm ou de décimas de nanometro. A Nanofiltração permite assim permeabilidades mais elevadas que a Osmose Inversa com rejeições aceitáveis, dependendo das aplicações e das espécies químicas consideradas. Por exemplo, as membranas de Nanofiltração têm normalmente rejeições muito elevadas de iões multivalentes, e rejeições moderadas de iões mono-valentes [17].

Uma vez que os iões monovalentes difundem-se através da membrana de Nanofiltração juntamente com água, a diferença da pressão osmótica entre as soluções de cada lado da membrana não é tão grande quanto no caso da Osmose Inversa. São efectivamente os iões com menor massa que originam pressões osmóticas mais elevadas.

3.3.1. Teste da Membrana de Nanofiltração

Foram feitos testes laboratoriais à membrana de Nanofiltração seleccionada de maneira a concluir que era possível reduzir o valor da condutividade da água das purgas para ser depois reaproveitada no circuito semi-aberto do sistema de frio.

A membrana utilizada era da GE Osmonics, com ref. 1221923 e com as seguintes características: rejeição de 98 % de $MgSO_4$, pH entre 3-9, fluxo máximo de $17 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ e pressão máxima de 0,69 MPa (100 psi). Esta é a membrana de

Nanofiltração da GE Osmonics que apresenta maior rejeição e permeabilidade, exibindo ainda tolerância às características da água a tratar. A membrana tem uma área efectiva de permeação de 155 cm².

A Figura 3.1 esquematiza a instalação piloto utilizada para os ensaios da membrana. Esta consiste basicamente num módulo onde se coloca a membrana que suporta a pressão, um tanque de alimentação e simultaneamente de retorno com um volume aproximadamente de 3 litros. Entre o tanque e o módulo existe a bomba que fornece pressão à operação. Na tubagem de retorno existe um permutador que retira à água o calor introduzido no sistema pelo funcionamento da bomba. A instalação possui ainda termopares para controlar a temperatura e válvulas para regular o caudal.

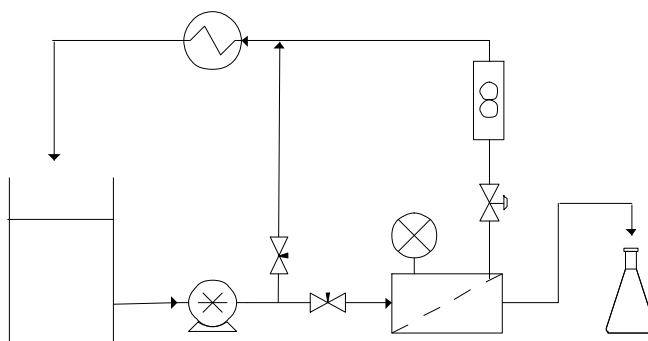


Figura 3.1 - Esquema da instalação piloto de Nanofiltração.

Para se analisar o comportamento da membrana a diferentes condições de operação foram realizados os ensaios apresentados na Tabela 9:

Tabela 9: Ensaios laboratoriais efectuados ao sistema de Nanofiltração.

Ensaio	T (°C)	P (bar)	Q (dm ³ ·min ⁻¹)
1	5	5	4,3
2	5	8,5	4,3
3	5	10	4,3
4	5	12	4,3
5	5	12	2,8
6	5	12	1,3
7	10	12	4,3
8	15	12	4,3
9	20	12	4,3

Com os ensaios 1, 2, 3 e 4   possível analisar a influência da pressão, com os ensaios 4, 5 e 6   possível analisar a influência do caudal de rejeitados e com os ensaios 4, 7, 8 e 9   possível analisar a influência da temperatura. Foram ainda feitos um ensaio com água destilada no início e outro no fim das experiências, nas mesmas condi es, para verificar que não houve qualquer altera o da membrana no decorrer dos ensaios.

Os resultados obtidos estão sobre a forma percentual de rejei o da membrana e de caudal de permeado. Seguidamente são apresentados nas Figuras 3.2 e 3.3 os resultados para diferentes pressões.

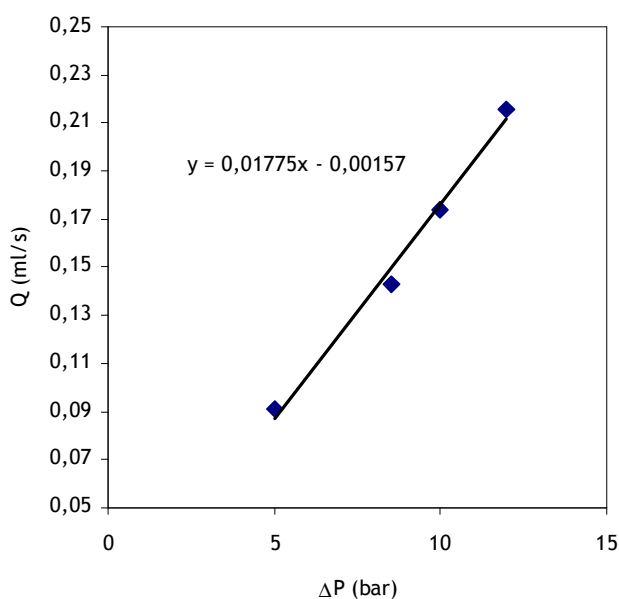


Figura 3.2 - Caudal de permeado em fun o da diferença de pressão.

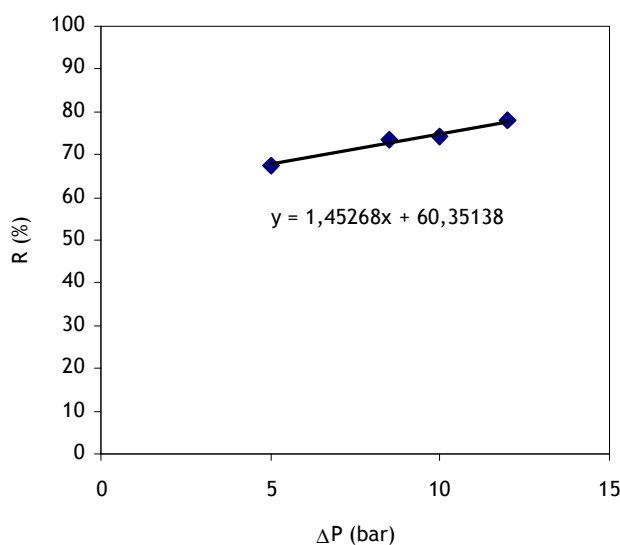


Figura 3.3 - Percentagem de rejei o em fun o da diferença de pressão.

Verifica-se que quanto maior a diferença de pressão, maior é o caudal de permeado e a rejeição da membrana.

Seguidamente é apresentada, nas Figuras 3.4 e 3.5, a influência da temperatura.

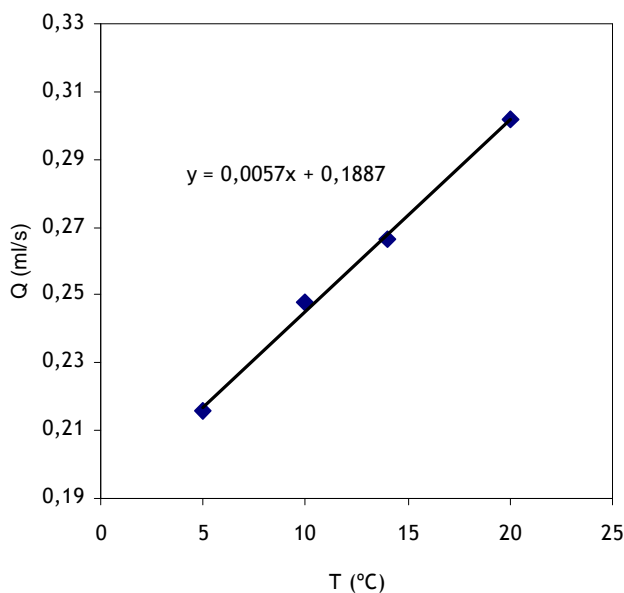


Figura 3.4 - Influência da temperatura no caudal de permeado.

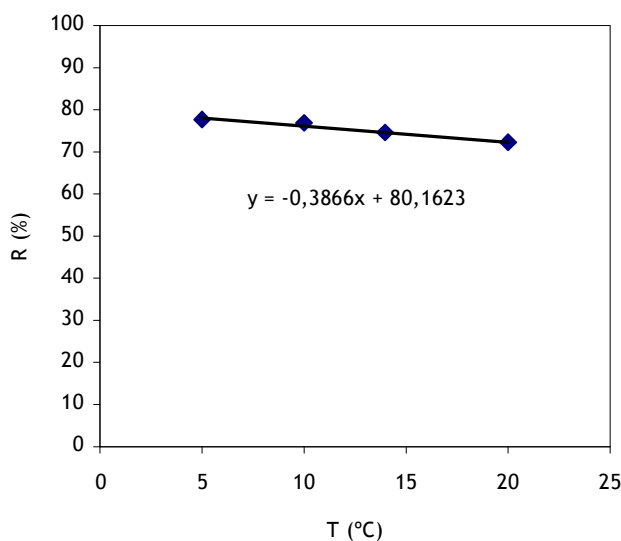


Figura 3.5 - Influência da temperatura na percentagem de rejeição.

O aumento da temperatura aumenta o caudal de permeado, mas diminui a rejeição da membrana.

As Figuras 3.6 e 3.7 mostram a influência do caudal de retido na percentagem de rejeição e no caudal de permeado.

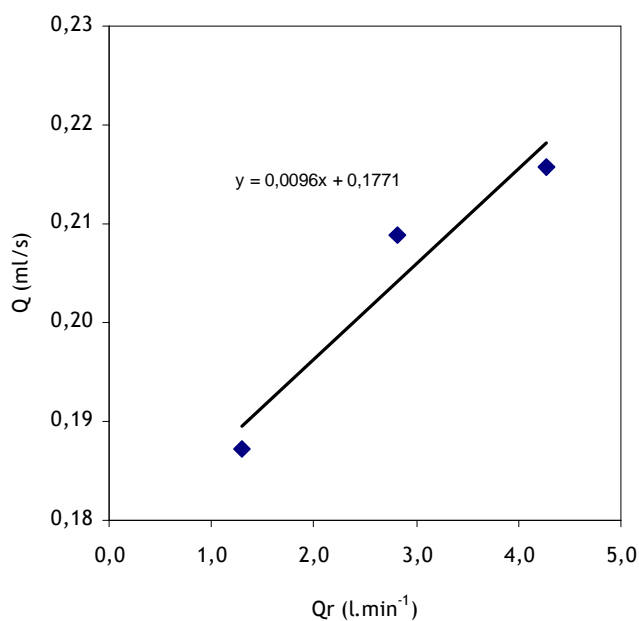


Figura 3.6 - Caudal de permeado em função do caudal de retido.

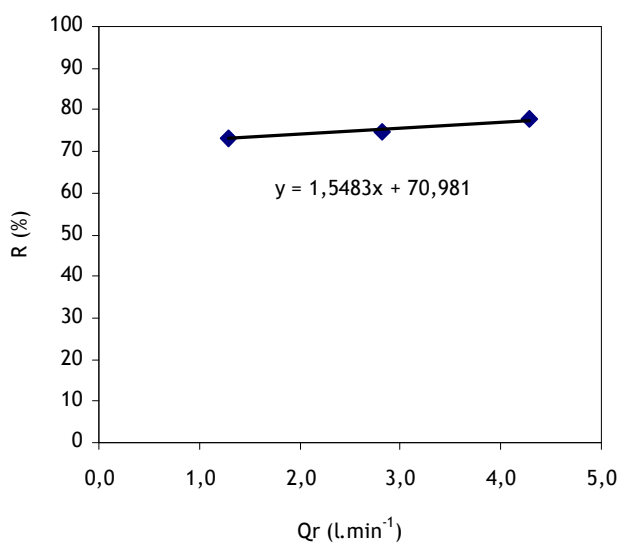


Figura 3.7 - Percentagem de rejeição em função do caudal de retido.

Para a variação do caudal de retido verifica-se, tal como para a diferença de pressão, que o aumento destas variáveis favorece a filtração. O caudal de permeado é maior para maiores diferenças de pressão e a percentagem de rejeição da membrana também aumenta.

Resumindo, o aumento das três variáveis favorece o caudal de permeado, o que significa que se consegue tratar uma maior quantidade de água no mesmo espaço de

tempo. No entanto a percentagem de rejeição da membrana aumenta com maiores diferenças de pressão e com maiores caudais, mas diminui com o aumento da temperatura. A diminuição da rejeição com a temperatura não é muito significativa, uma vez que esta variação é pequena.

Variando qualquer uma das três variáveis obtém-se uma rejeição entre 60 - 80 %.

A variável que tem uma maior influência é a pressão, a recta apresenta um declive maior. Sendo portanto bastante significativo operar com grandes diferenças de pressão. Assim, consegue-se obter maior caudal de permeado e melhor rejeição.

Foram ainda feitos outros ensaios para analisar a resposta da membrana a soluções com condutividade ainda maior, mantendo-se a temperatura, a pressão e o caudal constantes. As amostras de água recolhida para este fim foram das caldeiras, dos condensadores evaporativos e das torres de arrefecimento. Só assim é que foi possível, naquele momento, conseguir água com condutividade mais elevada. No entanto, os resultados obtidos com base nas soluções com diferentes origens têm de ser vistos de forma mais qualitativa, dado o tipo de sais poder estar a variar de solução para solução. Nas Figuras 3.8 e 3.9 apresentam-se os resultados obtidos em termos de caudal de permeado e de rejeição em função da concentração salina da água.

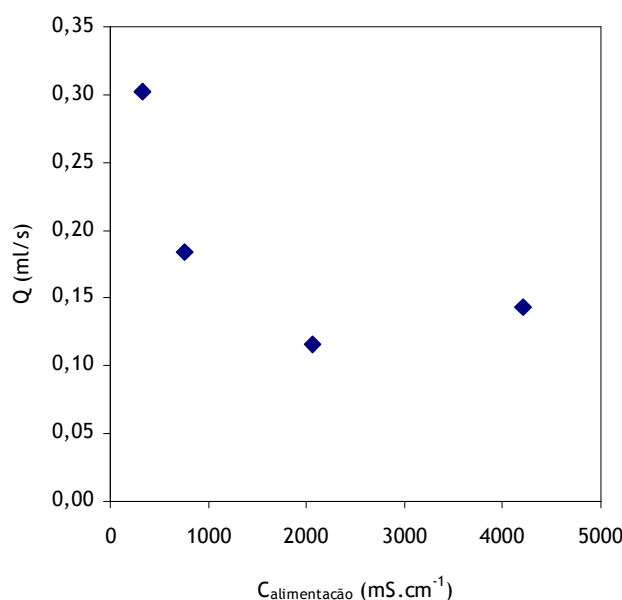


Figura 3.8 - Caudal de permeado em função da concentração.

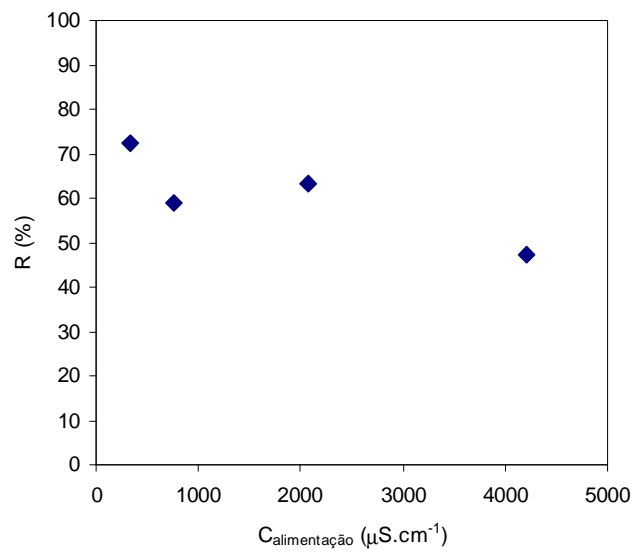


Figura 3.9 - Percentagem de rejeição em função da concentração.

Como resultado destes ensaios, pode-se concluir que a membrana poderá trabalhar a 20 °C, 12 bar e com um caudal de retido de 4,3 dm³.min⁻¹. A condutividade da água a tratar, se estiver entre 500 - 3000 μS.cm⁻¹, será reduzida entre 55 a 70 %.

4. Optimização do Circuito de Água dos Condensadores

Evaporativos

Anteriormente, foi referido e explicado que o tratamento microbiológico dos condensadores evaporativos e das torres de arrefecimento não é feito da maneira mais adequada. Num capítulo anterior foi sugerido a unificação do circuito de água de forma a fazer-se um tratamento mais controlado.

A proposta que se segue proporciona uma maior eficiência somente dos condensadores evaporativos. O projecto não abrangeu as duas torres de arrefecimento, pois pensa-se num futuro muito próximo desactivar estes dois equipamentos.

A água das purgas das caldeiras, tratada por Nanofiltração, será utilizada no circuito de água dos condensadores. Esta água possui perfeita qualidade para uso nestes equipamentos devido à sua baixa concentração em iões Ca^{2+} e Mg^{2+} . Assim poupar-se-á ainda água do SMAS. Além de alterar a origem da água também o tratamento microbiológico será diferente. Deixa-se de utilizar produtos químicos, altamente prejudiciais ao ambiente, e adopta-se um tratamento mais inovador e sofisticado, um tratamento por Ultra-sons.

Diminuição dos Principais Problemas Identificados nos Condensadores Evaporativos:

Nos condensadores evaporativos verifica-se a existência de um elevado nível de incrustações por todo o equipamento o que provoca a diminuição da sua eficiência térmica. O principal factor de formação de crostas é a presença de iões de cálcio e magnésio na água de alimentação. Por este motivo é que a água perdida nas purgas das caldeiras é especialmente adequada para se utilizar nestes equipamentos, pois é uma água com dureza praticamente nula.

Outro problema identificado é a adição dos produtos químicos. O Enviroplus não está a ser adicionado adequadamente, a sua quantidade não é proporcional à quantidade de água tratada, mas a alteração necessária para corrigir este pequeno problema já foi descrita anteriormente. Quanto ao Biosperse, o biocida que está a ser adicionado de uma maneira muito rudimentar, e como qualquer biocida é altamente prejudicial para o ambiente, será substituído pela tecnologia de Ultra-sons.

Com o projecto apresentado a dimensão destes problemas será bem menor.

4.1. Tratamento de Água por Ultra-sons [14, 16]

Em resposta às crescentes preocupações de segurança e ambiente, bem como a importância de medidas eficazes de controlo microbiológico foram desenvolvidos programas de controlo microbiano para o tratamento de águas industriais.

Este tipo de equipamento fornece um total e eficaz controlo de bactérias, biofilme e algas nos condensadores evaporativos ou equipamentos semelhantes sem recorrer a tratamentos químicos de biocidas altamente perigosos e poluentes. O tratamento por Ultra-sons é totalmente seguro, envolve energia de ondas sonoras que estão fora do alcance da audição humana. Esta energia é gerada a uma potência relativamente baixa e a alta-frequência.

Este controlo eficiente de crescimento microbiano e de incrustações microbiológicas é conseguido através da circulação contínua da água através do sistema de Ultra-sons. Dentro do aparelho produzem-se ondas de Ultra-sons às quais a água é exposta. Várias reacções biológicas são desencadeadas dentro das células que causarão a sua destruição. Seguidamente são apresentadas, na Figura 4.1, duas imagens de aparelhos de Ultra-sons.



Figura 4.1 - Equipamento de Ultra-sons.

Benefícios da aplicação de equipamentos de Ultra-sons:

- Eliminação do uso de biocidas (produtos químicos prejudiciais ao ambiente e à saúde humana);

- Menor impacto ambiental;
- Cumprimento dos regulamentos associados a produtos químicos;
- Maior segurança dos trabalhadores, deixando de estar expostos aos perigos de produtos químicos;
- Tratamento e controlo microbiológico mais eficiente podendo os equipamentos trabalhar à sua máxima eficiência.

4.2. Unificação do Circuito Semi-aberto para o Tratamento Microbiológico

Para melhorar o funcionamento dos condensadores evaporativos é apresentada uma proposta que aumentará a circulação da água mas principalmente modifica e melhora o tratamento microbiológico.

O tratamento microbiológico feito com biocida é substituído por um tratamento de Ultra-sons. Para que não seja necessário dez Ultra-sons, um para cada condensador, o que seria muito caro, surge a necessidade de juntar a água de todos os condensadores num único tanque onde será feito o tratamento microbiológico.

Modificações Propostas à Instalação

Todos os condensadores vão ter de estar ligados ao tanque de recolha. A linha de alimentação pode ser a existente, só que terá de ser feita uma ligação ao tanque de recolha. Para o retorno podem aproveitar-se as tubagens das purgas. Estas tubagens têm só de ser unidas a um colector que levará a água até ao tanque de recolha. As purgas contínuas localizam-se após a bomba de recirculação. As bombas seriam ajustadas de modo a conseguir o caudal estipulado para o retorno e simultaneamente o caudal necessário nos chuveiros.

Cada equipamento tem em média 2,5 m³ de água. No total existem 25 m³ de água no sistema. De modo a garantir que a quantidade de água nos equipamentos se mantenha constante, existe uma bóia de nível que regula a reposição de água. É sugerido que essas bóias sejam reguladas de modo a que o volume de água seja reduzido para metade. Cada equipamento passa a ter só 1,25 m³, fazendo um total de 12,5 m³. Para garantir que não há crescimento bacteriológico, este volume de água deverá recircular todo num espaço de tempo de 15 minutos. O caudal de

retorno ao tanque, em cada condensador, deverá ser então de $0,083 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, sendo o caudal no colector de $0,83 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. A alimentação é feita recorrendo-se a uma bomba. Este caudal será certamente superior ao caudal de retorno. Esta diferença deve-se à água perdida por evaporação e purga. Esta água evaporada é compensada através de entrada de água fresca, controlada pelas bóias individuais de cada condensador.

É fundamental que a purga contínua da caldeira 2 e da cogeração sejam conduzidas para a cisterna que também armazena as purgas das caldeiras 1 e 3. Assim, aproveitar-se-á mais água. Como a água das purgas passa a ser aproveitada, deixando de ser água perdida, as purgas podem estar abertas de modo a garantir os níveis de condutividade das caldeiras no ponto recomendado para o seu bom funcionamento. A Figura 4.2 ilustra um condensador evaporativo.

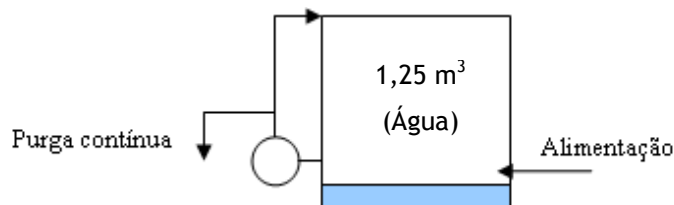


Figura 4.2 - Condensador evaporativo.

Tanque de Recolha

Este tanque tem que ter um volume suficientemente grande; além da água que terá de conter durante a sua operação normal, cerca de 5 m^3 , este deverá dispor de volume para recolher água proveniente dos condensadores quando o funcionamento destes é interrompido, cerca de mais 10 m^3 . Quando um condensador pára, a água pode ser mantida no interior do equipamento, mas essa não é uma boa opção pois a água parada é muito susceptível ao crescimento microbológico.

Na configuração proposta, a água do tanque de recolha segue para o sistema de Ultra-sons; só depois deverá voltar aos condensadores. Este é o principal motivo da unificação do circuito, o possível tratamento microbológico por Ultra-sons.

A maior parte da água de alimentação provém das purgas das caldeiras. A água será tratada num módulo de membranas de Nanofiltração que reduzirá muito significativamente a condutividade. Mesmo sendo esta uma boa água para sistemas de refrigeração, o fenómeno de evaporação provocará um aumento progressivo de concentração de sais na água, aumentado deste modo a sua condutividade. Para que o nível de condutividade nunca ultrapasse o limite, é necessário a existência de uma

purga contínua automática. A condutividade máxima sugerida para o tanque não deverá ultrapassar os $1500 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ para o bom funcionamento do circuito.

Um pormenor importante que este tanque deve ter é um filtro antes da entrada da água de retorno para evitar a entrada de areia e depósitos que possam ser arrastados. As areias ou lamas podem vir a ser muito prejudiciais tanto para a bomba como para o sistema de Ultra-sons.

O valor de 5 m^3 deverá ser mantido sempre constante recorrendo-se a um sensor de nível que regula o caudal de alimentação. Relembro que o caudal que sai do tanque é sempre um pouco superior àquele que entra devido à evaporação à purga contínua. O valor destas correntes será apresentado mais à frente na Figura 4.4.

A principal entrada de água no tanque provém das purgas das caldeiras, mas tem que existir outra entrada com origem na rede pública (SMAS), para o caso de a água das purgas não ser suficiente. A água gasta aquando a lavagem dos condensadores e o seu posterior abastecimento vai ser água do SMAS. Em princípio, o caudal de água das purgas das caldeiras só será suficiente para repor a água que se perde por evaporação e por purga. A Figura 4.3 ilustra o esquema do tanque de recolha.

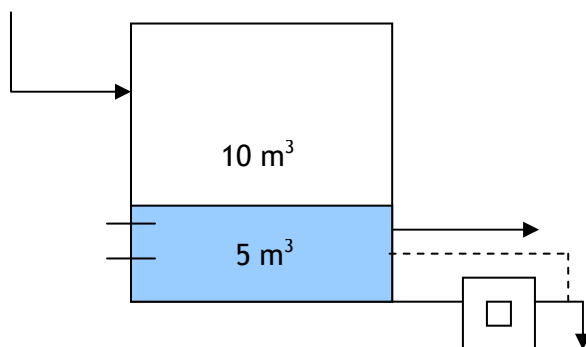


Figura 4.3 - Tanque principal.

4.3. Proposta para Optimização do Circuito de Água dos Condensadores Evaporativos

O projecto que a seguir é apresentado tem como objectivo optimizar o funcionamento, melhorar a manutenção e aumentar o tempo de vida dos condensadores evaporativos. A principal água utilizada provém das purgas das caldeiras por isso, este projecto leva ainda a uma poupança e aproveitamento da mesma.

As purgas das caldeiras têm como destino aquecer o nafta e depois a soda, mas antes vão para uma cisterna de cimento onde ficam armazenadas. Por vezes o aquecimento destas correntes é desnecessário não tendo então esta água qualquer finalidade.

O que se propõe é que depois da cisterna de cimento exista uma tubagem que conduzirá a água ao sistema de Nanofiltração proposto. A água poderá sair directamente da cisterna para a Nanofiltração ou então vir do tanque onde aqueceu a soda, quando necessário. O sistema de Nanofiltração é composto pela válvula de abertura automática, por condutímetro, bomba e módulo de membranas de Nanofiltração. A válvula de abertura terá de ser automática e abrir-se-á quando o sensor de nível do tanque de recolha enviar sinal para ser alimentado. Primeiramente irá abrir para o lado da água do aquecimento da soda e quando esta acabar é que abre para a água que está na cisterna de cimento. O condutímetro vai verificar se a água tem condutividade acima do valor programado. Se assim for, a água tem de ser filtrada. Se estiver abaixo desse valor pode ir directamente para o tanque de recolha. Durante algum tempo verificou-se que a condutividade da água da cisterna não ultrapassava os $500 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, o que não justifica o funcionamento da Nanofiltração. Mas nem sempre isto acontece. Quando o condutímetro medir uma condutividade superior a $1000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, a água em vez de ir directamente para o tanque de recolha é bombeada para o módulo de membranas. A purga contínua do tanque de recolha admite condutividade até os $1500 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, o que significa que a partir deste valor, inclusive, a água terá de ser tratada. O ponto estabelecido (set-point) do condutímetro poderia ser um valor mais próximo de $1500 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, no entanto, é sugerido que seja um valor consideravelmente mais baixo, como $1000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, para que a água de alimentação ao circuito de frio consiga permanecer mais tempo no sistema e ainda diluir um pouco a água que lá se encontra. É necessária uma bomba para que o módulo de membranas trabalhe à pressão indicada. Seguidamente vem o módulo de membranas, o sistema de Nanofiltração propriamente dito. O retido do sistema de nanofiltração será reaproveitado voltando novamente à cisterna. Mas, para isso, tem de existir uma purga na corrente de retido. Assim não haverá concentração de sais na cisterna.

Depois do sistema de Nanofiltração segue-se o tanque de recolha que permite a unificação dos circuitos. Antes do aparelho de Ultra-sons existe uma bomba que proporciona na tubagem de alimentação aos equipamentos o caudal suficiente para os alimentar. Esta alimentação é regulada pela abertura das válvulas que são controladas pelas bóias existentes em cada um dos condensadores. Por fim tem o

tratamento microbiológico com a nova tecnologia que destrói os microrganismos com Ultra-sons.

A Figura 4.4 esquematiza o circuito de optimizado descrito anteriormente.

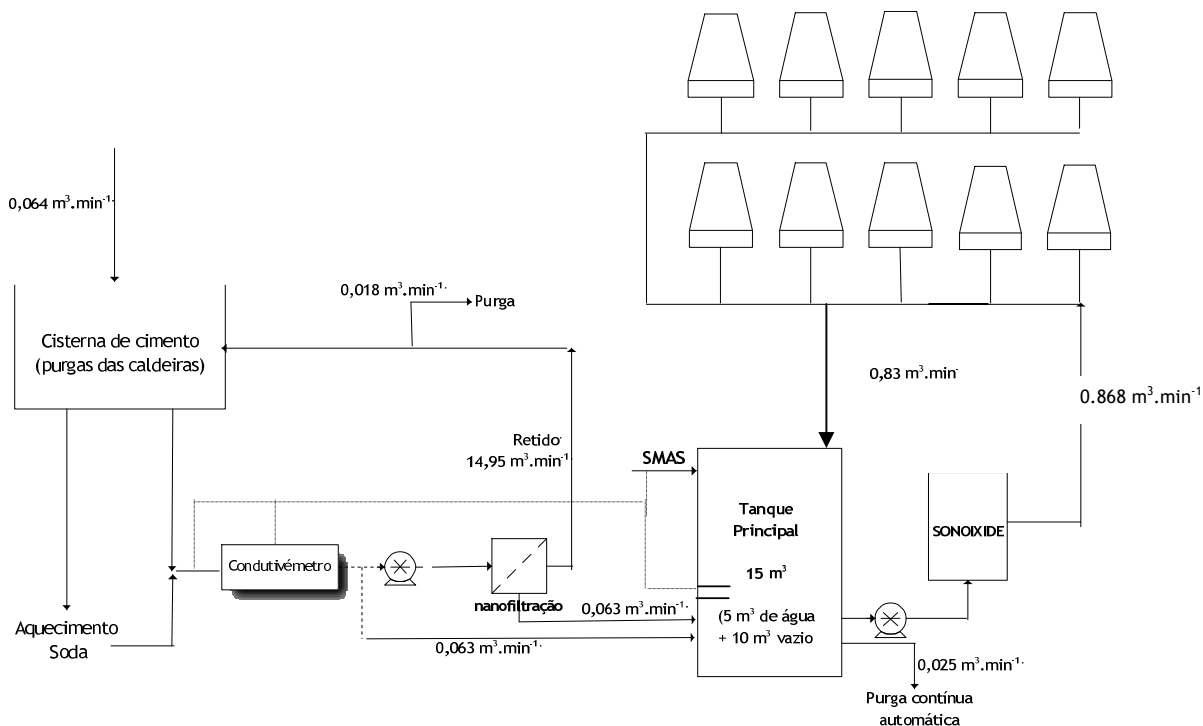


Figura 4.4 - Esquema da instala o para optimiza o dos condensadores evaporativos.

Caudal de água de Reposi o aos Condensadores (Evapora o + Purga):

O caudal de purga dos condensadores evaporativos foi estimado tendo em conta o valor lido de água perdida (contador de água) por evapora o e purga; dado que o fabricante fornece um valor recomendado para a purga dado um valor da evapora o, foi possível estimar o valor da purga através duma regra de 3 simples. O valor obtido foi de $0,00252 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ de purga e de $0,00377 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ de água evaporada.

Assim, pode assumir-se que o caudal da purga contínua do tanque principal tem de ser $0,026 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ e o que se perde por evapora o de $0,038 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$.

A soma destes dois caudais, que   aproximadamente $0,063 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, equivale ao caudal de reposi o de água tratada por Nanofiltrac o ou do SMAS. A tubagem que devolve a água aos condensadores tem um caudal de $0,868 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ (evapora o + retorno).

Área de Membrana Necessária:

Depois de realizados testes laboratoriais à membrana, verificou-se que as melhores condições de operação são a pressão 12 bar, caudal de retido $4,3 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ e a temperatura $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Nestas condições as membranas estudadas têm um fluxo de permeado de $1,116 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$.

Durante o funcionamento dos condensadores haverá uma perda de água por evaporação e pela purga contínua de $0,063 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. O caudal de purga que vem das caldeiras é cerca de $0,064 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. Como podemos ver, os dois valores são muito próximos. Assim sendo, toda a água perdida nos condensadores é possível ser reposta pelas purgas dos geradores de vapor. O caudal de água filtrada tem de ser de $0,063 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. Se ocasionalmente o caudal de purga for superior, a cisterna de cimento é grande o suficiente para acumular toda a água.

Para se obter o caudal mencionado de água filtrada a membrana de Nanofiltração tem uma área de 540 cm^2 . Como é uma membrana pequena pode ser de geometria plana.

Caudal de Retido:

O sistema de Nanofiltração apresentado vai tratar um pequeno caudal de água. Como em qualquer sistema de filtração, após a membrana temos duas correntes, a de permeado, que é aquela que queremos introduzir nos condensadores, e a de retido. A corrente de retido possui uma concentração maior de sais, no entanto, por não ter uma concentração muito elevada, esta pode ser reaproveitada se uma parte dela for purgada.

Nos ensaios laboratoriais, para as condições escolhidas, obteve-se uma razão $Q_{\text{retido}}/Q_{\text{permeado}} \approx 238$. No caso em questão, para o caudal de permeado necessário, o caudal de retido tem que ser de $14,952 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. O que significa que o caudal de alimentação ao módulo de membranas é de $15,015 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$.

Dado que não é conhecido as concentrações relativas dos diferentes sais presentes na água, para se poder estimar o caudal de purga do retido assumiram-se duas hipóteses simplificativas: a água de alimentação tem uma concentração de $1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ e a remoção de sal seria de 50%, tendo o permeado uma concentração de $0,5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$.

Através de um balanço material, calculou-se o caudal de purga do retido, $Q_{\text{purga}} = 0,018 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. Desta forma não haverá acumulação de sais na cisterna.

5. Conclusões

O presente trabalho teve como objectivo a optimização do tratamento de água industrial para alimentação ao circuito de refrigeração e para a produção de vapor.

Do diagnóstico realizado verificou-se que a única alteração que deverá ser implementada e que reduzirá o consumo de produtos químicos é a introdução de uma bomba doseadora de Enviroplus. Relativamente ao circuito dos condensadores evaporativos e das torres de arrefecimento, propõem-se a unificação dos circuitos de forma a poder implementar um sistema de doseamento automático de biocidas.

Chegou-se à conclusão que se poderá reutilizar a água das purgas das caldeiras na alimentação do circuito de água dos condensadores evaporativos. Depois de tratada por Nanofiltração, a água deverá encontrar-se em condições para ser alimentada aos condensadores. Além de se economizar em água também se irá melhorar a eficiência dos condensadores e certamente, seguindo a proposta apresentada, perder-se-ia menos água em purgas nos próprios condensadores. Verificou-se que em 2008 o volume de água das purgas das caldeiras foi quase igual ao volume de água consumida pelos condensadores. Com a implementação desta proposta, como a água das purgas deixaria de ser perdida, o controlo da condutividade da água nas caldeiras viria facilitado dado o custo da água ser menor. As caldeiras passariam a operar com águas em boas condições assim como os condensadores que teriam água com concentração vestigial de cálcio e magnésio. Esta proposta permitirá reduzir muito os problemas de incrustações nos condensadores.

A alteração do tratamento microbiológico de químico para ultra-sónico apresenta uma mais-valia para a empresa e para o ambiente. O tratamento da água por ultrasons, para além de ser muito eficaz tem um impacto muito menor no ambiente e na saúde humana.

6. Avaliação do Trabalho Realizado

6.1. Objectivos Realizados

No âmbito do projecto foi realizado o levantamento de todos os produtos químicos utilizados no tratamento da corrosão, incrustações e microrganismos na água de alimentação aos sistemas de refrigeração e caldeiras. Foi ainda realizado o diagnóstico da aplicação do tratamento químico e feita uma proposta de melhoramento.

Tendo em atenção o enquadramento da empresa, foi apresentada uma proposta de optimização do tratamento da água dos condensadores evaporativos alterando o doseamento do anti-incrustante (Enviroplus) e alterando a instalação de modo a permitir o tratamento microbiológico por ultra-sons. Foi ainda proposta a reutilização da água das purgas das caldeiras, após purificação por Nanofiltração, no circuito de água dos condensadores. Esta reutilização deverá ainda melhorar de forma mais acentuada o funcionamento dos condensadores dado esta ser uma água com baixa dureza.

6.2. Trabalho Futuro

A membrana de Nanofiltração caracterizada para fazer a purificação da água das purgas das caldeiras, é sensível a pH superior a 9. No entanto, esta água apresenta por vezes um pH superior a este valor. Neste sentido deverá ser seleccionada e caracterizada uma membrana de Nanofiltração estável a pH elevados. A caracterização das novas membrana deverá considerar:

- Permeabilidade e selectividade da membrana;
- Colmatação da membrana após contacto prolongado com a água a tratar;
- Estabilidade de longo prazo.

Relativamente às condições de operação no laboratório, a maior dificuldade encontrada foi manter a temperatura fixa ao longo dos ensaios, porque o líquido arrefecedor do permutador da instalação piloto, que é água glicolada, tem um caudal que varia frequentemente.

Um outro factor relevante para o bom funcionamento da instalação proposta é o controlo da condutividade da água das caldeiras. Para um melhor controlo, este deve ser feito de modo automático e assim a condutividade da água nunca atingirá valores demasiado elevados, o que dificultaria o processo de Nanofiltração.

6.3. Apreciação Final

Depois de ultrapassadas as dificuldades encontradas com o tema do trabalho e de encontrada uma solução alternativa para o tratamento da água em questão, penso que o projecto teve uma apreciação positiva. Apesar de tudo, a autora tem consciência de ter seguido um caminho bastante diferente daquele inicialmente previsto. Isso deveu-se ao facto de, na opinião da autora, ter sido proposto um projecto que não tinha muito por onde se desenvolver.

7. Referências Bibliográficas

- [1] <http://www.unicer.pt>
- [2] <http://www.fem.unicamp.br/~em672/GERVAP4.pdf>
- [3] <http://www.segurancaetrabalho.com.br/download/caldeiras-apostilha.pdf>
- [4] http://www.mascia.com.br/cms/arquivos/curso_tratamento_água.pdf
- [5] http://www.kurita.com.br/adm/download/sequestrante_de_oxigenio_hidrazina.pdf
- [6] http://www.kurita.com.br/adm/download/sequestrante_de_oxigenio_sulfitos.pdf
- [7] <http://www.meiofiltrante.com.br/materiais.asp?action=detalhe&id=272>
- [8] http://web.ist.utl.pt/luis.roriz/MyPage/et_T01.htm
- [9] <http://www.meiofiltrante.com.br/materias.asp?action=detalhe&id=72>
- [10] http://www.armacan.com/filesnew/PMCB_prinfunc.gif
- [11] <http://www.procknor.com.br/stabsetout03.htm>
- [12] Princípios de Tratamento de Água industrial; Publicado por Drew Produtos Químicos Ltda; São Paulo - Brasil
- [13] <http://www.agna.com.br/port/tratagua/download/1%20-%20Introducao.pdf>
- [14] Timothy J. Mason; Advances in Sonochemistry; JAI Press, Inc; Volume 5; 1999
- [15] <http://www.gemi.org/waterplanner/Documents/Ashland-C21128200616455.pdf>
- [16] <http://www.jobwerx.com/news/ashland>
- [17] Norman N. Li, Anthony G. Fare, W. S. Winston Ho, Takeshi Matsuura; Advanced membranes Technology and Applications; Jonh Wiley & Sons, Inc; 2008

Anexo 1

Cálculo do Caudal de Água de Reposição dos Condensadores Evaporativos (Evaporação + Purga):

O valor calculado para a reposição de água devido à evaporação e à purga contínua baseou-se no registo de um contador existente na tubagem de alimentação dos sistemas de refrigeração. Relacionando os valores do contador com a teoria da ficha de especificação dos condensadores. Os valores dados pelo fabricante são válidos quando os condensadores trabalham à máxima eficiência.

O contador registou, em 2008, 41 093 m³ de água para os dez condensadores evaporativos e as duas torres de arrefecimento. Os equipamentos são lavados uma vez por semana. No processo de lavagem, além de se gastar água para lavar, no final também se gasta água para abastecer os equipamentos. Assim, só 39 653 m³, o que equivale a um caudal total de 0,075 m³·min⁻¹ é que foi perdido por evaporação e purgas. Cada equipamento consome cerca de 0,006 m³·min⁻¹.

A ficha de especificação dos condensadores refere que, quando trabalham à máxima eficiência, o caudal de evaporação é de 0,037 m³·min⁻¹ e a purga contínua, para manter os níveis de concentração de sais adequada, é de 0,025 m³·min⁻¹. O que significa que a perda total de água, em cada condensador, é de 0,061 m³·min⁻¹. Como se pode verificar, pelos valores do contador, os condensadores não estão a ter esta perda de água, o que significa que estão a trabalhar a baixa eficiência. Fazendo uma relação directa entre o caudal de água perdida quando se trabalha à máxima eficiência e o caudal perdido na situação real, obtém-se o caudal aproximado, que se pratica neste momento de purga contínua e de evaporação.

$$\begin{array}{l} 0,06198 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \text{ consumo água} \text{ ----- } 0,02484 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \text{ caudal de purga} \\ 0,006287 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \text{ consumo água} \text{ ----- } X \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \text{ caudal de purga} \end{array}$$

Usando a regra de três simples obtém-se o valor de 0,00252 m³·min⁻¹ de purga contínua em cada condensador.

Fazendo o mesmo raciocínio para a evaporação.

$$\begin{array}{l} 0,06198 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \text{ consumo água ----- } 0,03714 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \text{ caudal de evaporação} \\ 0,006287 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \text{ consumo água ----- } X \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \text{ caudal de evaporação} \end{array}$$

O que dá um valor de $0,003767 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ de água evaporada em cada condensador.