UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE TECNOLOGIA
ESCOLA DE QUÍMICA

TRATAMENTO TERCIÁRIO DE EFLUENTE DE UMA INDÚSTRIA DE REFRIGERANTES VISANDO AO REUSO – UM ESTUDO DE CASO

Adão Silva Filho

Escola de Química/UFRJ

Dissertação de Mestrado

Prof[a]. Magali Christe Cammarota, D. Sc
Prof[a]. Alcina Maria Fonseca Xavier, D. Sc.

Rio de Janeiro
Março / 2009

TRATAMENTO TERCIÁRIO DE EFLUENTE DE UMA INDÚSTRIA DE REFRIGERANTES VISANDO AO REUSO – UM ESTUDO DE CASO

Adão Silva Filho

Dissertação submetida ao corpo docente da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre.

Aprovada por:

_____

Prof[a]. Magali Christe Cammarota – orientadora

_____

Prof[a]. Alcina Maria Fonseca Xavier - orientadora

_____

Prof[a]. Thereza Christina de Almeida Rosso (UERJ)

_____

Dr[a]. Lucila Teresa de Gusmão (INPI)

_____

Prof[a]. Lidia Yokoyama (EQ/UFRJ)

Rio de Janeiro

Março/2009

Filho, Adão Silva

Tratamento terciário de efluente de uma indústria de refrigerantes visando ao reuso – um estudo de caso / Adão Silva Filho – Rio de Janeiro, 2009.

Xi, 100 f.:il.

Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Escola de Química, 2009.

Orientadoras: Magali Christe Cammarota e Alcina Maria Fonseca Xavier

1. Tratamento de Efluentes. 2. Indústria de Refrigerantes. 3. Reuso de Água. 4. Tratamento Terciário.

DEDICATÓRIA

À Deus,
pela oportunidade de vida e pela graça de ter me permitido concluir este trabalho.
Aos meus pais, Adão (in memorian) e Clotildes,
que me ensinaram o valor do trabalho e da dignidade humana.
À minha esposa, Kátia,
companheira, amiga e grande incentivadora.
Às minhas filhas, Lidyane e Flávia, por
compreenderem a minha ausência durante o tempo dedicado aos estudos.

AGRADECIMENTOS

À Profa. Dra. Magali Chiste Cammarota e à Profa. Dra. Alcina Maria Fonseca Xavier,
por me aceitarem como orientando,
pela orientação dedicada e competente a esta pesquisa,
amizade e incentivo, acreditando em meu potencial e
sobretudo por ter acreditado neste projeto desde o seu inicio.

A todos os professores da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e a coordenação
de Pós-Graduação da UFRJ e União Educacional Minas Gerais (UNIMINAS),
pelo acolhimento, atenção e profissionalismo
demonstrados durante a realização deste grande sonho.

Ao meu amigo Eng. Sérgio Gallo,
pelas informações técnicas disponibilizadas,
orientações e acima de tudo pela atenção, amizade,
interesse e ajuda na execução deste projeto.

Aos colegas do mestrado,
pela parceria, ajuda e união.

À empresa Purolite do Brasil e em especial aos Srs. Fabio e Kledson,
pela disponibilização de informações técnicas
e de material para realização deste estudo.

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU), especialmente à Profa. Dra. Vicelma,
pelo apoio na disponibilização de
equipamentos para realização dos experimentos.

Ainda,
Os meus agradecimentos a todos aqueles que contribuíram,
direta ou indiretamente, para a realização deste estudo.

RESUMO

Filho, Adão Silva. **Tratamento terciário de efluente de uma indústria de refrigerantes visando ao reuso – um estudo de caso**. Orientadoras: Magali Christe Cammarota e Alcina Maria Fonseca Xavier. Rio de Janeiro: EQ/UFRJ, 2009. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos).

A utilização de efluentes tratados como água de alimentação de caldeiras e torres de resfriamento, associada ao crescimento das restrições ambientais e econômicas, impulsiona a necessidade de projetos de plantas com reuso de água. O reuso tem se mostrado como uma importante ferramenta para minimizar os problemas de reduzida disponibilidade hídrica, além de oferecer vantagens econômicas. Este trabalho teve como objetivo avaliar um tratamento terciário que viabilize o reuso do efluente tratado de uma indústria de refrigerantes como fonte de abastecimento para torres de resfriamento e caldeiras. O efluente gerado na referida indústria é tratado por processos físico-químicos e biológicos para atender a legislação ambiental local. No entanto, o efluente tratado ainda contém elevados níveis de Alcalinidade ao bicarbonato e total, Demanda Química de Oxigênio, Nitrogênio Amoniacal e Sólidos Dissolvidos Totais, sendo necessário o emprego de uma etapa de tratamento terciário a fim de torná-lo adequado para reuso como água de abastecimento de torres de resfriamento e/ou caldeiras. As tecnologias de tratamento terciário pesquisadas foram a coagulação/floculação, filtração (em filtros *bag* e de areia) e troca iônica. A tecnologia de tratamento composto por coagulação/floculação seguida de filtração em filtro de areia e troca iônica (empregando resinas aniônica e catiônica da Purolite) viabiliza o reuso do efluente, tanto na alimentação das torres de resfriamento como na produção de vapor nas caldeiras. Após a sequência de tratamento, todos os parâmetros estudados ficaram abaixo dos limites máximos permitidos para estes usos segundo as referências adotadas. Após selecionar o melhor tratamento para reuso, foi realizado um estudo de viabilidade econômica, destacando-se os gastos com água no atual cenário, e estimando-se os valores após a implantação do tratamento terciário. Com a implantação do sistema de reuso, estima-se que haja uma economia anual de 38.088 m^3 de água e de R$ 392.000,00, considerando os custos com captação, tratamento de água e emissão de efluentes.

ABSTRACT

Filho, Adão Silva. **Tertiary treatment of wastewater from soft drinks industry to the reuse - a case study**. Advisors: Magali Christe Cammarota and Alcina Maria Fonseca Xavier. Rio de Janeiro, 2009. Master dissertation (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos).

The use of treated wastewater as feed water for boilers and cooling towers, linked to the growth of economic and environmental constraints, driving the need for projects of plants with reuse of water. The reuse has been shown as an important tool to minimize the problems of reduced water availability, and offer economic advantages. The objective of the present study was to evaluate a tertiary treatment that allows the reuse of treated wastewater from a soft drink industry as a source of supply for the cooling towers and boilers. The wastewater generated in this industry is treated using physical-chemical and biological processes to meet discharge limits established by local environmental agency. However, the treated wastewater still contains high levels of total and bicarbonate alkalinity, COD, ammonia and total dissolved solids, making necessary the use of a stage of tertiary treatment in order to make it suitable for reuse as a water supply of cooling towers and/or boilers. The technologies of tertiary treatment investigated were coagulation/flocculation, filtration (bag filters and sand) and ion exchange. The technology of treatment consisting of coagulation/flocculation followed by filtration in the sand filter and ion exchange (using Purolite anionic and cationic resins) allows the reuse of wastewater, both in the feed of cooling towers as in the production of steam in boilers. After the treatment sequence, all parameters studied were below the maximum allowed for the uses, according the references adopted. After selecting the best treatment for reuse, a study of economic viability was made, standing out the expenses with water in the current scenario and estimating the values after the implementation of the tertiary treatment. With the deployment of the system for reuse, it is estimated that there is an annual saving of 38,088 m^3 of water and of R$ 392.000,00 considering the costs of collection, water treatment and emission of effluents.

LISTA DE SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AfB - Aniônica fracamente Básica (resina)

AFB - Aniônica Fortemente Básica (resina)

ANA - Agência Nacional das Águas

a.n.d - abaixo do nível de detecção

CfA - Catiônica fracamente Ácida (resina)

CFA - Catiônica Fortemente Ácida (resina)

CIRRA - Centro Internacional de Referência em Reuso de Água

CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

COT - Carbono Orgânico Total

Da - Dalton

DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO - Demanda Química de Oxigênio

DVB - Divinilbenzeno

DWA - *Drinking Water Act*

EBT - Efluente do Tratamento Biológico

EPT - Efluente do Tratamento Primário

EST - Efluente do Tratamento Secundário

ETA - Estação de Tratamento de Água

ETE - Estação de Tratamento de Efluentes

FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente

FIESP - Federação das Indústrias do Estado de São Paulo

IQA - Índice de Qualidade de Água

MBR - *Membrane Bioreactor* (Bio-reator de Membrana)

NF – Nanofiltração

NIRAE – Núcleo Integrado para o Reuso de Águas e Efluentes

NTU - *Nephelometric Turbidity Unit* (Unidade Nefelométrica de Turbidez)

O&G - Óleos e Graxas

PAC - Policloreto de Alumínio

PCRA - Programa de Conservação e Reuso de Água

pH - Potencial Hidrogeniônico

PLANASA - Plano Nacional de Saneamento

PNRH - Política Nacional de Recursos Hídricos

RW - *Raw Wastewater* (Efluente Bruto)

SAC - *Spectral Absorption Coeficient* (Coeficiente de Absorção de Cor)

SAMAE - Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto

SDT - Sólidos Dissolvidos Totais

SGA - Sistema de Gestão Ambiental

SINGREH - Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos

SRH-MMA - Secretaria de Recursos Hídricos do Ministério do Meio Ambiente

SS - Sólidos Sedimentáveis

SST - Sólidos Suspensos Totais

t.p.p - teste de presença positiva

UASB - *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (Fluxo Ascendente e Manta de Lodo)

UFC - Unidades Formadoras de Colônias

UV - Ultravioleta

WHO - *World Health Organization* (Organização Mundial da Saúde)

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Processo de Separação com Membranas em Função do Tamanho e Tipo de Contaminante removido	26
Figura 3.1	Fluxograma da ETE da Indústria de Refrigerantes	49
Figura 3.2	Caixa de Recepção da ETE	50
Figura 3.3	Sistema de Gradeamento/Caixa de Areia da ETE	51
Figura 3.4	Tanque de Aeração do Sistema Aeróbio	52
Figura 3.5	Decantador Secundário da ETE	53
Figura 3.6	Caixa de Saída do Efluente Final da ETE	53
Figura 3.7	Sistema de Filtração com Filtro *Bag*	56
Figura 3.8	Sistema de Filtração em Filtro de Areia	56
Figura 3.9	Ensaio em *Jar Test*	57
Figura 3.10	Sistema de Coagulação/Floculação/Filtros *Bag*	59
Figura 3.11	Sistema de Coagulação/Floculação/Filtro de Areia	59
Figura 3.12	Equipamento Experimental de Resinas de Troca Iônica	60
Figura 3.13	Resina Purolite Aniônica PFA-300 (A) e Resina Purolite Catiônica SST - 60H (B)	60
Figura 3.14	Sistema de Coagulação/Floculação/Filtros *Bag*/Resinas	62
Figura 3.15	Sistema de Coagulação/Floculação/Filtro de areia/Resinas	62
Figura 4.1	Influência do pH na Coagulação/Floculação do Efluente da ETE	70
Figura 4.2	Influência do pH na Coagulação/Floculação na Faixa de $6,0 \leq pH \leq 7,0$	71
Figura 4.3	Influência da Dosagem de PAC (mL de solução 15% v/v de PAC/L de efluente da ETE) no Processo de Coagulação/floculação	72
Figura 4.4	Comparação do Aspecto Visual antes (1) e Após (2) o Processo de Coagulação/ Floculação.	74
Figura 4.5	Comparação visual do: Efluente Bruto do Processo (1); Efluente Final Tratado na ETE (2); Efluente após Processo de Coagulação/ Floculação/ Filtração (3); Efluente Tratado por Coagulação/Floculação/Filtração/Resinas de Troca Iônica (4).	79
Figura 4.6	Fluxograma da ETE da Indústria de Refrigerantes	81
Figura 4.7	Fluxograma da ETA da Indústria de Refrigerantes	83
Figura 4.8	Fluxograma de Reuso Proposto	84

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1

2. FUNDAMENTOS 5

2.1 Qualidade e Disponibilidade das Águas 5

2.2 O Reuso da Água 8

2.2.1 Legislação Ambiental sobre o Reuso 10
2.2.2 Formas de Reuso de Água 13

2.3 Tecnologias e Tratamentos Utilizados visando ao Reuso de Efluentes 15

2.3.1 Coagulação/Floculação 17
2.3.2 Sedimentação 20
2.3.3 Abrandamento 20
2.3.4 Filtração 21
2.3.5 Processo de Adsorção em Carvão Ativado 22
2.3.6 Resinas de Troca Iônica 22
2.3.7 Processos de Separação com Membranas 25

2.4 Reuso de Água na Indústria 26

2.4.1 Casos de Aplicações bem Sucedidas de Reuso de Água 27
2.4.2 Reuso de água na Indústria de Refrigerantes 35
2.4.3 Reuso de Água em Torres de Resfriamento 39
2.4.4 Reuso de Água em Caldeiras 43

2.5 Considerações Finais 46

3. MATERIAIS E MÉTODOS 48

3.1 Caracterização do Efluente Gerado na Indústria de Refrigerantes 48

3.2 A Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) da Indústria 48

3.3 Caracterização do Efluente Tratado da ETE 54

3.4 Testes de Filtração 55

3.5 Teste de Coagulação/Floculação 57

3.5.1 Determinação do pH Ótimo para a Coagulação/Floculação 58
3.5.2 Determinação da Dosagem do Agente Coagulante 58

3.6 Testes de Filtração após a Coagulação/Floculação 59

3.7 Testes com Resinas de Troca Iônica 59
3.7.1 Colunas de Troca Iônica 61

3.8 Métodos Analíticos 63

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 65

4.1 Caracterização do Efluente da Indústria de Refrigerantes 65

4.2 Caracterização do Efluente da Estação de Tratamento 66

4.3 Testes de Filtração 68

4.4 Coagulação/Floculação 69
4.4.1 pH Ótimo para Coagulação/Floculação 69
4.4.2 Dosagem do agente coagulante (PAC) na Coagulação/Floculação 71
4.5 Resinas de Troca Iônica 76

4.6 Avaliação Técnico-econômica 79

5. CONCLUSÕES 89

6. SUGESTÕES 91

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 92

1. INTRODUÇÃO

A água é fundamental para o planeta. Nela, surgiram as primeiras formas de vida, e a partir dessas, originaram-se as formas terrestres, as quais somente conseguiram sobreviver na medida em que puderam desenvolver mecanismos fisiológicos que lhes permitiram retirar água do meio e retê-la em seus próprios organismos. A evolução dos seres vivos sempre foi dependente da água. É o mais crítico e importante elemento para a vida humana, pois compõe de 60 a 70% do peso corporal do homem e é essencial para todas as funções orgânicas: sistema circulatório, sistema de absorção, sistema digestivo, sistema de evacuação, regulador da temperatura corporal, etc. Em média, o organismo humano precisa de, no mínimo, 4 litros de água por dia. Por isso, tem-se que garantir uma água segura, com qualidade, pura e cristalina (CUNOLATINA, 2008).

A água é, provavelmente, o único recurso natural que tem a ver com todos os aspectos da civilização humana, desde o desenvolvimento agrícola e industrial aos valores culturais e religiosos arraigados na sociedade. É um recurso natural essencial, seja como componente bioquímico de seres vivos, como meio de vida de várias espécies vegetais e animais, como elemento representativo de valores sociais e culturais e até como fator de produção de vários bens de consumo final e intermediário (MOSS, 2008).

A água é um dos recursos naturais mais preciosos e importantes, pois é indispensável à vida do Homem. Houve a crença, durante séculos, de que a água era um recurso inesgotável, e que estaria disponível em boa qualidade para a população de forma indefinida. Este pensamento errôneo, somado à falta de informação da população, fez com que existisse um desperdício e uma utilização descontrolada de água no planeta.

Segundo Machado (2005), o crescimento acelerado da população, a urbanização das cidades, o desenvolvimento industrial e tecnológico, e principalmente a expansão da agricultura para produção de alimentos, são alguns dos fatores responsáveis pela situação de risco em que se encontram os recursos hídricos existentes. Nesta última década, cientistas têm alertado a população sobre um possível colapso no abastecimento de água, mostrando que a disponibilidade da água potável no mundo está diminuindo consideravelmente, podendo mesmo se esgotar. Esta informação deixou o campo científico

e tem sido constantemente divulgada através da mídia, com o objetivo de conscientizar as pessoas quanto à necessidade de preservação dos recursos hídricos e do uso racional da água, de forma a reverter o quadro atual de uso e degradação. A população mais informada e consciente vem se tornando mais exigente e cobrando que as empresas atuem de forma mais *ecologicamente correta.*

Frente às novas exigências da população e às novas leis ambientais, as indústrias se viram obrigadas a se adequarem. A primeira forma de controle da poluição dos recursos hídricos pelo setor industrial foi o chamado tratamento de *fim de linha (end of line)*. Em seguida, surgiu uma visão mais moderna com relação a efluentes industriais, o conceito *in plant design*, que não se baseia apenas no tratamento do efluente final, mas sim na busca constante do uso de tecnologias mais limpas, na minimização e reuso dos resíduos gerados. Segundo este novo conceito, as empresas devem focar a redução do efluente (em termos de volume e concentração de poluentes) dentro do processo industrial, e não simplesmente no problema, após a sua geração (MELO, 2005).

Muitas empresas têm utilizado o chamado *Marketing Verde* para conquistar a confiança de seus clientes, assim como novos mercados. Para tal, têm racionalizado o uso da água das mais diversas formas, até mesmo reutilizando efluentes tratados para fins menos nobres, visto que, em alguns casos, os efluentes finais das estações de tratamento podem ser reutilizados, diretamente ou após tratamentos terciários adequados, em aplicações específicas como resfriamento de máquinas e equipamentos, abastecimento de caldeiras, lavagem de gases de chaminés, lavagem de pisos, irrigação de jardins e água de combate a incêndios, etc.

A reutilização ou reuso de águas residuárias não é um conceito novo como parece e vem sendo praticado em todo o mundo há anos. Existem relatos de que na Grécia Antiga os esgotos eram utilizados na irrigação. No entanto, foi a demanda crescente de água neste último século que fez com que o reuso planejado da água se tornasse um tema atual e de grande importância. O reuso da água deve ser apenas parte de projetos de uso eficiente da água, sendo precedido por controle de perdas e desperdícios, como também pela minimização do consumo da água e da produção de efluentes (CETESB, 1987).

A reutilização das águas residuárias é uma busca pela minimização da demanda sobre os mananciais de água, pois assim se substituiria o uso da água potável por uma água de qualidade inferior. Atualmente, esta prática tem sido muito discutida e utilizada em alguns países, sendo baseada no conceito de substituição de mananciais. Esta substituição se faz possível em função da menor qualidade requerida para determinados usos. Assim, pode se poupar grandes volumes de água potável quando se utiliza água de qualidade inferior (efluentes pós-tratados) para atividades que não exijam padrões de potabilidade. De forma a garantir os critérios mínimos de qualidade da água exigidos para cada tipo de aplicação é necessário se fazer o tratamento e o controle adequados antes da sua reutilização (TOMAZELA, 2008).

A utilização de efluentes tratados como água de alimentação de caldeiras e torres de resfriamento, associada ao crescimento das restrições ambientais e econômicas, impulsiona a necessidade de projetos de plantas com reuso de água. O reuso tem se mostrado como uma importante ferramenta para minimizar os problemas de reduzida disponibilidade hídrica, além de oferecer vantagens econômicas.

O uso racional dos recursos hídricos, com procedimentos como reutilização em indústrias de alimentos, tende a ser cada vez mais difundido, devido ao alto consumo deste insumo. O reuso da água representa um inevitável caminho para contribuir para o seu melhor aproveitamento no planeta.

O propósito deste estudo foi avaliar o reuso do efluente de uma indústria de refrigerantes tratado a nível secundário, visando a sua reutilização no circuito de resfriamento (torres de resfriamento) e água para geração de vapor nas caldeiras, diminuindo a captação de água potável. Complementa-se o estudo com uma estimativa econômica preliminar do impacto da implantação desta proposta na referida indústria.

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos. O capítulo II contém a revisão bibliográfica abordando os fundamentos e os principais trabalhos relativos ao assunto em questão. O capítulo III descreve os materiais e métodos empregados no desenvolvimento do estudo. Em seguida, no capítulo IV são apresentados e discutidos os resultados obtidos. Finalmente, o capítulo V contém as principais conclusões do estudo e sugestões para trabalhos futuros.

Os seguintes objetivos específicos foram delineados:

- Levantar as características do efluente final da ETE em operação na indústria de refrigerantes usada como modelo;
- Realizar um levantamento dos padrões para água de abastecimento de caldeira e água de reposição de torre de resfriamento;
- Propor e avaliar tratamentos terciários para se atingir os padrões necessários para reuso;
- Realizar levantamento de dados experimentais para se avaliar a viabilidade da implantação dos tratamentos terciários propostos para reuso;
- Avaliar as possibilidades de reuso, através do balanço hídrico na planta industrial;
- Realizar estimativa técnico-econômica da implantação do sistema de reuso definido.

2. FUNDAMENTOS

Este capítulo apresenta um levantamento das informações sobre a disponibilidade e qualidade das águas, as justificativas e as legislações que regulamentam a prática do reuso de água nas indústrias, as tecnologias disponíveis para o tratamento de águas residuárias. O capítulo II contempla ainda, a citação de trabalhos realizados com este propósito e que apresentam os valores padrões dos parâmetros para reuso em torres de resfriamento e caldeiras. Estes fundamentos serão úteis para delinear os procedimentos que serão empregados nesta dissertação.

2.1 Qualidade e Disponibilidade das Águas

A água é a substância mais amplamente encontrada na natureza. A sua qualidade depende de características físicas, químicas e biológicas. O conceito de impureza de uma água tem significado relativo, pois deve ser especificado de acordo com o seu uso. Por exemplo, aquela destinada a uso doméstico deve ser insípida e inodora, enquanto que naquela usada em caldeiras industriais estas características não são relevantes.

A água é usada na indústria para três principais propósitos: para ser incorporada em produtos específicos, como um fluido térmico com finalidade de aquecimento ou resfriamento e para eliminar componentes indesejáveis. A caracterização da água é especificada por diversos parâmetros, os quais representam as suas características físicas, químicas e biológicas. Esses parâmetros são indicadores da sua qualidade e têm valores estabelecidos para determinado tipo de uso. Os principais indicadores de qualidade da água são discutidos a seguir, de acordo com aspectos físicos, químicos e biológicos.

Parâmetros físicos:

- Temperatura: influencia algumas propriedades da água, como densidade, viscosidade, oxigênio dissolvido, etc.;
- Sabor e odor;
- Cor: pode ser resultante, por exemplo, da presença de ferro ou manganês;
- Turbidez: é função da presença de matéria em suspensão na água, como

argila e organismos microscópicos (TOMAZELA, 2008).

Parâmetros químicos:

- pH: o pH baixo torna a água corrosiva, águas com pH elevado tendem a formar incrustações nas tubulações;
- Alcalinidade: causada por sais de metais alcalinos, principalmente sódio e cálcio, que em teores elevados podem proporcionar sabor desagradável;
- Dureza: resulta principalmente de sais de metais alcalino-terrosos (cálcio e magnésio), causa sabor desagradável, reduz a formação da espuma de sabões, provoca incrustações nas tubulações e caldeiras;
- Oxigênio dissolvido;
- Matéria orgânica (DBO, DQO);
- Componentes inorgânicos (TOMAZELA, 2008).

Parâmetros biológicos:

Os coliformes indicam a presença de microrganismos patogênicos. Como são encontrados em grande quantidade nas fezes humanas, quando encontrados na água significa que a mesma recebeu esgotos domésticos sem tratamento adequado. As algas em excesso podem causar alguns inconvenientes como: sabor, odor, toxicidade, turbidez e cor (TOMAZELA, 2008).

No Brasil, a classificação das águas é definida pela Resolução n° 357 de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente. Esta Resolução estabelece nove classes, sendo cinco de águas doces (com salinidade igual ou inferior a 0,5 g/L), duas de águas salobras (salinidade entre 0,5 e 30 g/L), e duas de águas salinas (salinidade igual ou superior a 30 g/L).

No estado de Minas Gerais, onde a indústria a ser estudada está localizada, os indicadores da situação ambiental das águas são formulados pela FEAM (Fundação Estadual do Meio Ambiente), a qual adota o Índice de Qualidade de Água – IQA e a contaminação por tóxicos. No cálculo do IQA são considerados os seguintes parâmetros: oxigênio dissolvido, coliformes fecais, pH, demanda bioquímica de oxigênio, nitratos, fosfatos, temperatura da água, turbidez e sólidos totais, gerando-se um índice com valores

variando de zero (qualidade muito ruim) a 100 (qualidade excelente). Assim definido, o IQA reflete a contaminação das águas por matéria orgânica, nutrientes e sólidos. A qualidade das águas é avaliada anualmente pela FEAM, a partir dos resultados de quatro campanhas de amostragem. O nível de qualidade reportado refere-se à média aritmética dos valores de IQA de cada estação e a contaminação por compostos tóxicos representa a pior condição identificada (MELO, 2005). Os resultados são transportados para um Mapa de Qualidade das Águas, publicado anualmente pela FEAM e disponível no site: www.feam.gov.br.

Durante muito tempo se acreditou que os recursos hídricos eram inesgotáveis. Realmente, o planeta Terra pode ser considerado como o "Planeta Água", pois aqui existem $1,4 \times 10^9$ quilômetros cúbicos de água. No entanto, apenas 2,5% desse total são compostos de água doce, dos quais mais de 99% apresenta-se na forma congelada nas regiões polares ou em rios e lagos subterrâneos, o que limita sua utilização pelo Homem. Rios, lagos e reservatórios (águas superficiais) de onde a humanidade retira, atualmente, o que consome correspondem apenas a 0,26% desse total (CUNOLATINA, 2008). Estes valores evidenciam ainda mais a necessidade de preservação dos recursos hídricos e do consumo racional da água doce.

O Brasil se encontra em uma posição privilegiada no que diz respeito à quantidade de água. A maior reserva de água doce do Planeta se encontra em território brasileiro, cerca de 13% da água doce do mundo. A região coberta por água doce no interior do Brasil ocupa 55.457 km^2, o que equivale a 1,66% da superfície do planeta. O clima úmido do país propicia uma rede hidrográfica grandiosa, formada por rios de grande volume de água, todos desaguando no mar. Com exceção das nascentes do rio Amazonas, que recebem fluxos provenientes do derretimento da neve e de geleiras, a origem da água dos rios é perene, ou seja, não se extingue no período da seca, e apenas no sertão nordestino, região semi-árida, existem rios temporários (MRE, 2001).

Mesmo com tamanha abundância, o Brasil sofre com a escassez de água, devido à má distribuição da densidade populacional dominante, pois 95% da água doce do Brasil se encontra na região da Amazônia e abastece apenas 5% da população, enquanto os outros 95% da população são abastecidos com apenas 5% da água disponível no território brasileiro.

2.2 O Reuso da Água

O desenvolvimento industrial acelerado, concomitante com as tributações da captação de águas bem como das de esgoto tem elevado o preço deste bem. E assim incentivou a avaliação e a implantação de possibilidades internas de reuso de efluentes tratados como fonte de abastecimento em diversos setores da indústria.

O reuso da água favorece a redução da demanda sobre os mananciais, pela possibilidade de substituição da água de qualidade superior (potável, por exemplo) por outra de qualidade inferior, que seja compatível com o uso específico. Este procedimento conceitua-se como substituição de fontes. Desta forma, grandes volumes de água potável podem ser poupados, utilizando-se águas originárias de efluentes tratados para o atendimento de demandas cujas finalidades podem prescindir de água potável. Sua conservação está intimamente ligada à integração dos sistemas de abastecimento, esgotamento e drenagem urbana (MARON JUNIOR, 2006).

Efluentes incluem toda água gasta e usada, geralmente uma vez, no processo industrial. Efluentes industriais podem ser descartados em redes de esgotos sanitários, tratados e descartados na natureza em rios, lagos ou lençóis freáticos (WINGFIELD & SCHAFER, 2001).

Para a implantação da prática de reuso é preciso ter consciência de que este não substitui a necessidade de água total de uma planta industrial, pois existem limitações de ordem técnica, operacional, econômica e ambiental que restringem a utilização em sistemas internos (fechados). Portanto, é necessária uma avaliação do potencial de reuso, com base nas características da água disponível para captação, do efluente gerado e da água para as aplicações do reuso, além dos padrões de emissão de efluentes bem como de um estudo econômico. Tudo isto deve estar contemplado dentro de um Sistema de Gerenciamento Ambiental (SGA) que atenda à legislação ambiental vigente (MARON JUNIOR, 2006).

Segundo o Manual de Conservação e Reuso de Água para a Indústria (FIESP, 2005), as indústrias que buscarem a implantação de um programa de conservação e reuso de água serão beneficiadas nos seguintes aspectos:

Ambientais

- Redução de lançamento dos efluentes em cursos d´água ou sistemas de captação de efluentes públicos, melhorando assim a qualidade das águas;
- Redução da captação de águas superficiais e subterrâneas para as demandas necessárias.

Econômicos

- Conformidades ambientais de acordo com os padrões e normas ambientais;
- Melhoria nos processos produtivos, com ganho de produtividade e redução de custos;
- *Marketing* ambiental, para os clientes internos e externos;
- Abertura de novos negócios;
- Habilitação para receber incentivos e coeficientes redutores dos fatores da cobrança pelo uso da água;
- Abertura para iniciar certificações ambientais, por exemplo, ISO 14001;
- Aumento da competitividade do setor.

Sociais

- Melhoria da imagem da empresa junto aos órgãos ambientais e, principalmente, o reconhecimento da sociedade como empresa socialmente responsável;
- Ampliação de oportunidades de novos negócios e conseqüentemente novos clientes, possibilitando a probabilidade da geração de empregos diretos e indiretos;
- Troca de experiências com instituições educacionais e outras empresas *(Benchmarketing)*;
- Enquadramento à norma AS 8000 (responsabilidade social).

2.2.1 Legislação Ambiental sobre o Reuso

Até o ano 2000 não existiam normas européias para o reuso de água de esgoto tratado. No artigo nº 12 sobre as Diretivas para o Tratamento de Esgotos (91/271/EU) é estabelecido que os esgotos tratados devem ser reaproveitados de maneira conveniente (TOMAZ, 2001 apud SILVA et al., 2003).

Não há um modelo rígido que possa ser implementado em qualquer lugar do mundo. Segundo Rodrigues (2005), as especificações locais é que devem reger a implementação do reuso, e de que forma este deve estar inserido naquela realidade, seguindo alguns padrões, como o conhecimento dos riscos associados às práticas; o tratamento dos efluentes, bem como sua eficiência e segurança; a disponibilidade e características dos efluentes; experiência na promoção do reuso, que fornece subsídios para os estudos epidemiológicos; valores culturais; condições ambientais; condições econômicas e tecnológicas, entre outros.

O Brasil dispõe de um texto sobre o direito da água desde 1934, o Código de Águas. Porém, esse código não foi capaz de incorporar meios para combater o desconforto hídrico, a contaminação das águas e conflitos de uso, tampouco foi capaz de promover os meios de uma gestão descentralizada e participativa, exigências dos dias atuais (RODRIGUES, 2005).

A consciência de que os recursos hídricos têm fim e, portanto, merecem um tratamento jurídico mais atento, ganha contorno definido com a própria Constituição Federal de 1988 e com a lei que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos - PNRH (MANCUSO, 2003 *apud* MONTEIRO, 2007 et. al.).

Foi exatamente para preencher tais lacunas que foi elaborada a Lei n. 9.433/97, conhecida como a Lei das Águas, que apresenta a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH). Um dos seus princípios, o da gestão participativa e descentralizada, requer a adesão da sociedade na sua implementação. Por isso, o SINGREH é estruturado em colegiados, nos quais estão presentes as três esferas do Poder Público, os setores usuários e a sociedade civil organizada.

Esta lei define que a água é fonte de vida e de alimento para as populações e um bem de domínio público, dotado de valor econômico, que merece o cuidado da preservação, em quantidade e qualidade, para o atendimento dos seus múltiplos usos. Por ser um recurso natural vital para qualquer ser vivo, toda e qualquer regulamentação a respeito de seu uso ou disponibilidade é rodeada por inquietações e discussões pela sociedade como um todo. Neste contexto, no ano de 1986, a água passou a ser de domínio da União.

Pode-se dizer que as normas ambientais existentes no país possuem mecanismos capazes de promover o uso de água reciclada ao limitar a quantidade de água disponível para a população ou restringir o despejo de efluentes nos corpos receptores, seja através do seu uso racional, diminuição do consumo ou reuso em função da quantidade e da qualidade da água.

Apesar da utilização racional e integrada dos recursos hídricos ser um dos objetivos da PNRH (art. 2º, II), a Lei não prevê o reuso da água como instrumento da Política, dificultando sua adoção. Porém, a criação dos instrumentos de outorga e de cobranças pelo uso da água induzem a adoção de práticas de reuso. Atualmente, no Brasil, o único diploma legal que trata especificamente do reuso é a Resolução CNRH nº 54/05, que estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reuso direto não potável de água.

A primeira regulamentação que tratou de reuso de água no Brasil foi a norma técnica NBR-13.969, de setembro de 1997. Nesta norma, o reuso é abordado como uma opção à destinação de esgotos de origem essencialmente doméstica ou com características similares (ABNT, 1997).

Para o reuso, se faz necessário seguir critérios e diretrizes que podem ser encontrados em publicações de órgãos municipais, estaduais e federais, como SNGREH (Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos), CNRH (Conselho Nacional de Recursos Hídricos), SRH-MMA (Secretaria de Recursos Hídricos do Ministério do Meio Ambiente), ANA (Agência Nacional de Águas), PLANASA (Plano Nacional de Saneamento), CIRRA (Centro Internacional de Referência em Reuso de Água), WHO (World Health Organization), entre outros (RODRIGUES, 2005).

A legislação específica que regia o enquadramento ou estabelecimento dos níveis de qualidade mantidos ou atingidos nos corpos hídricos no Brasil era, até março de 2005, a

resolução CONAMA nº 20 de 1986. Sua revisão foi posteriormente aprovada, sendo então publicada a Resolução nº 357, revogando integralmente a primeira. Uma vez que a mesma não foi elaborada visando diretamente a definição de padrões para o reuso, alguns valores estabelecidos podem tornar o reuso inviável. Dessa forma, é importante se verificar a aplicabilidade do reuso em relação aos aspectos discutidos na Resolução.

No Brasil o reuso planejado é uma prática bastante recente. De acordo com o banco de dados de dissertações e teses da USP (Universidade de São Paulo), os primeiros trabalhos sobre o assunto são do fim da década de 90 (LAVRADOR FILHO, 1987; MANCUSO, 1988). A partir destes, as pesquisas se intensificaram, mas não foram definidos, até o momento, padrões específicos para o reuso da água.

Apesar de não haver legislações para prever expressamente o reuso da água, é implícita sua disseminação. Quando se fala em falta de legislação, não é propriamente para a utilização desta concepção, pois se observa que as leis estabelecem em seus princípios de execução, os mesmos princípios e filosofia aplicados ao reuso de água (TOMAZ, 2001).

No Brasil, o Centro Internacional de Referência em Reuso de Água (CIRRA) foi criado com o objetivo de promover e disponibilizar recursos técnicos e humanos para estimular a implementação de práticas conservacionistas. O CIRRA tem como funções básicas desenvolver pesquisas e tecnologias adequadas, proporcionar treinamento e divulgar informações visando a promoção, a institucionalização e a regulamentação da prática de reuso no país. O CIRRA ainda desenvolve outras atividades ligadas a cursos e programas de treinamento direcionados a temas específicos, como práticas de reuso, aplicação de ferramentas de gestão ambiental, otimização de processos industriais, operação de sistemas de tratamento avançado, educação ambiental, e estudos de tratabilidade de efluentes, entre outros.

O NIRAE (Núcleo Integrado para Reuso de Águas e Efluentes) da Universidade Federal do Rio de Janeiro trabalha na formação e capacitação de um grupo de especialistas nos setores públicos e nas indústrias, voltados para o uso de conceitos que possibilitem a integração ambiental das tecnologias de reuso. Este núcleo tem como meta, a realização de um diagnóstico do panorama atual dos recursos hídricos nos diversos setores produtivos do Estado do Rio de Janeiro. Este diagnóstico visa ações que promovam a consciência pela conservação dos recursos hídricos, a minimização dos impactos ambientais, redução na

geração de efluentes líquidos e nos custos ambiental e econômico no tratamento de efluentes e resíduos sólidos.

2.2.2 Formas de Reuso de Água

Ao longo do tempo, surgiu uma série de classificações baseadas em diversos aspectos, tais como a maneira com que o reuso ocorre, o grau de planejamento, a consistência da prática, bem como a finalidade para qual ele se destina. Essas classificações são necessárias para facilitar o entendimento de como o reuso pode ser realizado e para determinar a forma de atuação em relação a cada um deles (RODRIGUES, 2005).

O reuso macro interno deve ser realizado após uma avaliação integrada do uso da água no processo produtivo, a qual deve estar contemplada no Programa de Conservação e Reuso de Água (PCRA). É importante observar que antes de se implantar um sistema de reuso de efluentes da própria empresa, é preciso implantar medidas para a minimização do consumo de água, redução de perdas e desperdícios, além de programas de conscientização e treinamento.

Para a obtenção dos máximos benefícios, um PCRA deve ser implementado a partir de uma análise sistêmica das atividades em que a água é utilizada e naquelas em que ocorre a geração de efluentes, com o intuito de otimizar o consumo e minimizar a geração de efluentes. As ações devem seguir uma seqüência lógica, com atuação inicial na demanda de água e, em seguida, na oferta, destacando-se a avaliação do potencial de reuso de efluentes em substituição às fontes tradicionais de abastecimento (FIESP, 2005*)*.

Algumas classificações retiradas da Minuta de Resolução do CNRH (2005) e de NAVACHI (2002) são apresentadas a seguir.

Reuso indireto não planejado - ocorre quando a água, utilizada em alguma atividade humana, é descartada no meio ambiente e novamente utilizada a jusante, em sua forma diluída, de maneira não intencional e não controlada. Caminhando até o ponto de captação para o novo usuário, a mesma está sujeita às ações naturais do ciclo hidrológico (diluição, autodepuração).

Reuso indireto planejado - ocorre quando os efluentes, depois de tratados, são descartados de forma planejada nos corpos de águas superficiais ou subterrâneas, para serem utilizados a jusante, de maneira controlada, no atendimento de algum uso benéfico. Pressupõe-se que exista, também, um controle sobre as eventuais novas descargas de efluentes no caminho, garantindo assim que o efluente tratado esteja sujeito apenas a misturas com outros efluentes que também atendam aos requisitos de qualidade do reuso objetivado.

Reuso direto planejado - ocorre quando os efluentes depois de tratados são encaminhados diretamente do seu ponto de descarga até o local do reuso, não sendo descarregados no meio ambiente. É o caso com maior ocorrência, destinado a uso em indústria ou irrigação.

Reciclagem de água - é o reuso interno da água, antes de sua descarga em um sistema geral de tratamento ou outro local de disposição.

Reuso em cascata - nesta modalidade, o efluente gerado em um determinado processo industrial é diretamente utilizado, sem tratamento, em outro subseqüente, pois o efluente gerado atende aos requisitos de qualidade da água exigidos pelo processo subseqüente. Processo indicado quando ocorre a variação da concentração dos contaminantes no efluente com o tempo. Esta situação é comum em operações de lavagem com alimentação de água e descarte do efluente de forma contínua.

Reuso de efluentes tratados - esta é a forma de reuso que tem sido mais utilizada na indústria. Consiste na utilização de efluentes gerados localmente, após tratamento adequado para a obtenção da qualidade necessária aos usos pré-estabelecidos. Na avaliação do potencial de reuso de efluentes tratados, deve ser considerada a elevação da concentração de contaminantes que não são eliminados pelas técnicas de tratamento empregadas.

2.3 Tecnologias e Tratamentos Utilizados visando ao Reuso de Efluentes

A escolha dos processos de tratamento de águas residuárias é de fundamental importância para o sucesso do empreendimento. Por isso, esta deve ser bastante criteriosa e fundamentada na caracterização adequada do efluente a ser tratado, no conhecimento das técnicas de tratamento existentes e nas necessidades e requisitos de qualidade da aplicação do reuso proposto, bem como na estimativa de custos (METCALF & EDDY, 2003).

A qualidade da água é definida em função de características físicas, químicas, microbiológicas e radioativas. Para cada tipo de aplicação, o grau de qualidade exigido pode variar significativamente (SAUTCHUK, 2004).

Os tipos de tratamentos mais usuais empregados quando se tem como objetivo o reuso são: adsorção em carvão ativado; oxidação com ozônio, dióxido de cloro e peróxido de hidrogênio; floculação; separação por membranas (microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose inversa); troca iônica; destilação e precipitação (MIERZWA & HESPANHOL, 2005; METCALF & EDDY, 2003; MANCUSO & DOS SANTOS, 2003).

A escolha de uma ou a combinação entre duas ou mais técnicas sempre dependerá do potencial de cada tecnologia envolvida na redução do contaminante de interesse e da qualidade da água de reuso que se necessita (MIERZWA & HESPANHOL, 2005).

O estabelecimento de padrões de qualidade de águas industriais deve levar em consideração aspectos inerentes à proteção do produto fabricado, como contaminações químicas e biológicas, manchas, corrosão, fatores ligados a proteção dos equipamentos industriais, bem como fatores voltados à eficiência dos processos, tais como formação de incrustações, depósitos, espumas, etc. (FRANCO, 2007).

Para a obtenção de água de reuso, provinda de efluente doméstico ou industrial, são necessários processos de tratamento específicos para cada composição de efluente. Dependendo das características dos efluentes e da eficiência de remoção dos poluentes, os tratamentos podem ser classificados em:

- Preliminar – emprega principalmente processos físicos, com o objetivo de remover sólidos grosseiros em suspensão – com granulometria superior a 0,25 mm.

- Primário – para a remoção de sólidos em suspensão, assim como parte da matéria inorgânica e orgânica, empregando decantadores, filtros, centrífugas, flotadores e precipitação química.
- Secundário – empregado na remoção de sólidos dissolvidos, como carboidratos, proteínas e lipídios (matéria orgânica) e sólidos suspensos finos. Para este tipo de tratamento são utilizados:
    a. Processos biológicos anaeróbios – que utilizam bactérias anaeróbias e aeróbias facultativas em biorreatores como biodigestores de lodo, lagoas anaeróbias, fossas sépticas, reatores de fluxo ascendente;
    b. Processos biológicos aeróbios – que utilizam bactérias aeróbias, com necessidade constante de fornecimento de oxigênio para o líquido em questão. Os biorreatores mais usados são as lagoas de estabilização, lagoas aeradas, lodos ativados, biodiscos e filtros biológicos.
- Tratamento terciário – a partir desta etapa, obtém-se uma água de qualidade superior, com uma elevada remoção de matéria orgânica e nutrientes - como nitrogênio, fósforo e sódio, assim como de bactérias patogênicas.

Na maioria dos casos, o tratamento secundário promove adequada remoção de DBO e sólidos suspensos. O tratamento terciário é necessário para que os efluentes de plantas de tratamento avançado possam ser reusados ou reciclados, direta ou indiretamente, na planta industrial. Esta prática aumenta a disponibilidade de água para suprimento industrial ou doméstico, e porque alguns corpos d’água não são capazes de tolerar as cargas de poluentes do tratamento secundário (MACHADO, 2005).

Na Tabela 2.1 podem ser vistas algumas tecnologias de tratamento terciário e suas indicações para aplicação.

Tabela 2.1 - Tratamento Terciário, Tipo de remoção e Aplicação.

Tipo de remoção	Operação ou processo	Aplicação
Sólidos suspensos	Filtração	EST
	Peneiramento	
Oxidação de amônia	Nitrificação biológica	EST
Nitrogênio	Nitrificação / desnitrificação biológica	EST
Nitrato	Desnitrificação em estágio separado	EST + nitrificação
Fósforo	Remoção de fósforo na corrente principal [a]	RW, EPT
Nitrogênio e fósforo por métodos biológicos	Nitrificação / desnitrificação biológica e remoção de fósforo	RAS
Nitrogênio e fósforo por métodos físicos e químicos	Arraste com ar	EST
	Cloração no ponto de ruptura	EST + filtração
	Troca iônica	EST + filtração
Fósforo por adição química	Precipitação química com sais de metais	RW, EST, EBT, EST
	Precipitação química com cal	RW, EST, EBT, EST
Compostos tóxicos e matéria orgânica refratária	Adsorção em carvão ativado	EST + filtração
	Lodo ativado com carvão ativado granular	EPT
	Oxidação química	EST + filtração
Sólidos inorgânicos dissolvidos	Precipitação química	RW, EST, EBT, EST
	Troca iônica	EST + filtração
	Ultrafiltração	EST + filtração
	Osmose inversa	EST + filtração
	Eletrodiálise	EST + filtração + carvão ativado
Compostos orgânicos voláteis	Volatização e arraste com gás	RW, EPT

Fonte: METCALF & EDDY, 2003.
[a] EPT = efluente do tratamento primário.
EBT = efluente do tratamento biológico (antes da clarificação).
EST = efluente do tratamento secundário (após a clarificação).
RW = efluente bruto.

2.3.1 Coagulação/Floculação

O processo de coagulação tem como principal objetivo neutralizar as cargas elétricas das partículas em suspensão, normalmente negativas, por meio da adição de compostos químicos com cargas positivas, como sais de ferro, sais de alumínio e polímeros, proporcionando a formação de flocos densos em condições de decantar (NALCO, 1988; SANTOS FILHO, 1976; OENNING JR, 2006).

A coagulação é conduzida em câmaras de mistura rápida, que visam a homogeneização dos coagulantes e seus auxiliares. Esta mistura intensa é que assegura uma distribuição uniforme do coagulante na água, colocando-o em contato com as partículas existentes em suspensão, antes que a reação esteja terminada (LEME, 1979). A inexistência dessa mistura intensa e adequada implica em que parte da água seja supertratada, enquanto que outras partes sejam insuficientemente tratadas, prejudicando o tratamento.

Na maior parte das aplicações, o principal objetivo é o de se produzir um efluente clarificado, ou seja, com baixas concentrações de sólidos em suspensão. Na sedimentação floculenta, as partículas se aglomeram, formando flocos, que tendem a crescer de tamanho à medida que sedimentam. Com o aumento do tamanho das partículas (flocos), aumenta a velocidade de sedimentação. Como a floculação ocorre à medida que as partículas precipitam, quanto maior o contato entre elas, maior será a formação dos flocos (VON SPERLING, 1996).

Na maioria dos efluentes industriais, tem-se verificado que os flocos formados necessitam de maior densidade para poderem sedimentar em decantadores. Recorre-se então aos auxiliares de floculação, polieletrólitos que aumentam a velocidade de sedimentação dos flocos e a resistência às forças de cisalhamento. O tipo de polieletrólito adequado deve ser pesquisado em laboratório através de ensaios em *Jar Test*, podendo-se prever reduções do consumo de coagulante primário de até 20%. Caso ocorra turbidez no meio, pode-se recorrer a substâncias inertes para melhorar a floculação como: os polieletrólitos, a sílica ativada, agentes absorventes de peso e oxidantes (NUNES, 2006).

Para se ter uma boa coagulação, deve-se determinar o pH adequado, que é chamado de pH ótimo, no qual este processo ocorre no menor tempo possível e com uma dosagem mínima de coagulante. Produtos químicos como cal hidratada, carbonato de cálcio, carbonato de sódio, hidróxido de sódio, gás carbônico, ácidos clorídrico e sulfúrico são empregados para o ajuste do pH. A alcalinidade também possui importância indiscutível nos tratamentos químicos de água e efluentes. Quando a água não possui alcalinidade ideal para a coagulação, costuma-se adicionar álcalis como a cal virgem (CaO), cal hidratada ($Ca(OH)_2$) e barrilha (Na_2CO_3) para promovê-la e mantê-la nos valores ideais (AZEVEDO NETTO, 1979).

Os sais de alumínio e de ferro, utilizados como coagulantes, geralmente não apresentam uma produção de um lodo boa eficiência quando utilizados em estações de tratamento de efluentes, a fim de reduzir o seu custo, o que pode contribuir para a produção de um lodo contaminado, principalmente com metais pesados.

O policloreto de alumínio é um coagulante catiônico que, devido a sua dimensão e estrutura polimérica, substitui com vantagens os coagulantes inorgânicos comuns. Sua molécula constitui-se de um polímero inorgânico, com propriedades muito eficazes de agente coagulante e floculante para uso em estações de tratamento. Estas propriedades resultam da formação de um complexo polinuclear de íons hidroxi-alumínio, que em solução aquosa adquirem característica catiônica. O policloreto de alumínio atua em uma ampla faixa de pH (faixa ótima compreendida entre 6 e 9) e sua ação depende da temperatura (REIS, 1999 *apud* BREIA, 2006).

Polímeros orgânicos catiônicos a base de taninos naturais, de baixa massa molar, de origem essencialmente vegetal, derivados de fontes renováveis, podem atuar como coagulantes, floculantes e auxiliares de floculação. Em sistemas coloidais, neutralizam cargas, promovendo pontes elétricas entre as partículas, desestabilizando-as, formando os flocos e promovendo a sua sedimentação (REIS, 1999 *apud* BREIA, 2006).

O fenômeno da floculação é o processo pelo qual as partículas em estado de equilíbrio eletrostaticamente instável no seio da massa líquida são forçadas a se movimentar, a fim de que sejam atraídas entre si formado flocos que, com a continuidade da agitação, tendem a aderir uns aos outros, tornando-se pesados, para posterior separação nas unidades de decantação e filtração (AZEVEDO NETTO, 1979).

Em termos práticos, o que realmente interessa no processo de coagulação e floculação são a dosagem e a condição ótima para aplicação do coagulante, etapa de grande importância no tratamento, uma vez que as etapas subseqüentes dependem desta. Isso porque as reações envolvidas são muito rápidas e dependem da energia de agitação, da dose do coagulante, do pH e da alcalinidade da água. Caso estas condições estejam corretas, as reações ocorrem em um espaço de tempo bastante reduzido (MIERZWA & HESPANHOL, 2005).

Embora não usada de forma rotineira, a floculação em efluentes por agitação mecânica ou por ar dissolvido ou difuso pode ser usada para aumentar a remoção de

sólidos suspensos e DBO em decantadores primários; no condicionamento de efluentes contendo certos resíduos industriais; para aumentar a eficiência dos decantadores secundários de processos de lodos ativados; e como um pré-tratamento do efluente a ser filtrado posteriormente (METCALF & EDDY, 2003).

2.3.2 Sedimentação

A sedimentação ou decantação é um processo dinâmico de separação de partículas sólidas suspensas nas águas e efluentes. Estas partículas, sendo mais pesadas que o líquido tendem a sedimentar com determinada velocidade (AZEVEDO NETTO, 1979).

Os objetivos e aplicações da sedimentação são a retirada de partículas finas como areia, sólidos suspensos totais (SST) e flocos formados por coagulação química de materiais e organismos de difícil sedimentação. A sedimentação também é usada para gerar um lodo mais concentrado em sólidos, com possibilidade de ser manuseado e tratado mais facilmente (AZEVEDO NETTO, 1979; METCALF & EDDY, 2003).

2.3.3 Abrandamento

O processo de abrandamento com cal (CaO) tem o objetivo de transformar as espécies solúveis de cálcio e magnésio em espécies insolúveis, ou seja, é uma reação de precipitação. É um processo bastante utilizado em sistemas de reuso de efluentes e, geralmente, requer uma etapa de separação de sólidos após a precipitação. Os processos de coagulação/floculação, sedimentação e filtração possuem esta função. As principais reações envolvidas, segundo Mierzwa & Hespanhol (2005), são:

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 \quad (1)$$

$$CO_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow \downarrow CaCO_3 + H_2O \quad (2)$$

$$Ca(HCO_3)_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow \downarrow 2CaCO_3 + 2H_2O \qquad pH = 9{,}5 \quad (3)$$

$$Mg(HCO_3)_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow \downarrow CaCO_3 + MgCO_3 + 2H_2O \qquad pH = 9{,}5 \quad (4)$$

O efluente abrandado, além de passar por uma etapa de separação dos sólidos, deve passar por uma etapa de ajuste de pH, visto que após o tratamento o pH estará

próximo de 11. O processo de estabilização do pH pode ser feito com ácidos ou com a recarbonatação da água.

2.3.4 Filtração

A filtração é um importante processo no tratamento de efluentes, comumente utilizada para remoção de flocos biológicos residuais em efluentes sedimentados do tratamento secundário, e para remoção de precipitados residuais de sais de metais ou precipitação de fosfatos com cal. A filtração é utilizada como operação de pré-tratamento antes do efluente alimentar as colunas de carvão ativado. Este processo combina mecanismos físicos e químicos de remoção de sólidos, sendo por isso normalmente usado como uma etapa final, imediatamente antes da desinfecção e da disposição final e reuso. O processo de filtração consiste na passagem do efluente através de leito de material granular para remoção de sólidos, o que exige eventuais lavagens com água em contracorrente para remoção do material retido (MANCUSO & DOS SANTOS, 2003).

Segundo Di Bernardo et al. (2003), a retenção de impurezas é considerada o resultado de dois mecanismos distintos, porém complementares: transporte e aderência. Em primeiro lugar, as partículas devem se aproximar das superfícies dos grãos e, posteriormente, permanecer aderidas a estes, de modo a resistir a forças de cisalhamento resultantes das características hidrodinâmicas do escoamento ao longo do meio filtrante. A eficiência da filtração depende, fundamentalmente, do tamanho e da resistência dos flocos formados nos processos que a precedem, muitas vezes sendo utilizados coadjuvantes de filtração, os quais aumentam a resistência do floco e a eficiência do filtro (MANCUSO & DOS SANTOS, 2003).

O meio filtrante mais utilizado é areia, entretanto, ao se fazer lavagem em contracorrente em um filtro de areia, as partículas mais finas dessa areia migram para a superfície do leito, causando um “entupimento”, o que faz com que o meio filtrante perca uma parcela de sua ação de superfície. Com o objetivo de resolver esse problema, foram desenvolvidos os filtros de dupla e até de múltiplas camadas, onde as superiores são constituídas de materiais com granulometria grande, porém leves, enquanto as inferiores

são constituídas de materiais de granulometria menor, porém mais pesados (MANCUSO & DOS SANTOS, 2003).

2.3.5 Processo de Adsorção em Carvão Ativado

A adsorção em carvão ativado promove a remoção da matéria orgânica solúvel e é utilizada quando se necessita de tratamento com qualidade mais elevada, após o tratamento biológico ou após o tratamento físico-químico por coagulação/floculação, sedimentação e filtração, sendo considerado um processo de polimento.

A matéria orgânica adsorve na superfície dos poros das partículas de carvão, até que sua capacidade de adsorção seja exaurida, sendo necessária sua regeneração, que é feita por meio do seu aquecimento até volatilização do material orgânico adsorvido, tornando os poros do carvão livres e regenerados.

Águas residuárias, oriundas do tratamento primário de uma unidade industrial foram estudadas por Abdessemed & Nezzal (2002) com o objetivo de reuso. Eles realizaram testes de coagulação/floculação usando como coagulante o $FeCl_3$ 120 mg/L em um pH ótimo de 5,5. Logo após, adicionaram carvão ativado de densidade 0,41 g/cm^3 com área de 600 – 800 m^2/g para a etapa de adsorção. Depois de certo tempo de contato foi feita a ultrafiltração, utilizando uma membrana tubular inorgânica, com uma diferença de pressão de 1 bar e uma velocidade de fluxo de 3 m/s. O resultado apresentou uma redução na turbidez de 90 NTU para zero e a DQO foi reduzida de 165 mg/L para 7 mg/L, usando o processo combinado, coagulação-adsorção-ultrafiltração (GUERRA FILHO, 2006).

2.3.6 Resinas de Troca Iônica

Resinas de troca iônica são produtos sintéticos, constituídas, em geral, de copolímeros de estireno com divinilbenzeno (D.V.B.), que colocados na água, poderão liberar íons sódio ou hidrogênio (resinas catiônicas) ou cloretos ou hidroxila (resinas aniônicas) e captar desta mesma água, respectivamente, cátions e ânions, responsáveis por seu teor de sólidos dissolvidos (cloretos, silicatos e sulfatos de sódio, magnésio e cálcio e combinados de Fe^{+2} e Fe^{+3}) indesejáveis a muitos processos industriais. Os íons presentes

na água são substituídos por uma quantidade equivalente de outras espécies iônicas, sendo retidos em uma fase sólida imiscível denominada resina. Por se tratar de uma fase sólida insolúvel, as resinas apresentam capacidade limitada. Em cada partícula de resina existe um número limitado de sítios ativos, de modo que quando todos estes sítios ativos são ocupados diz-se que a resina está saturada. Como este processo envolve uma reação de equilíbrio químico, as resinas podem ter a sua capacidade recuperada (MIERZWA & HESPANHOL, 2005).

Após a copolimerização, grupamentos ácidos ou básicos poderão ser inseridos nos núcleos de benzeno dos monômeros utilizados, dando uma funcionalidade às resinas. Entre os grupamentos ácidos, o mais comum é o ácido sulfônico, produzindo a resina catiônica fortemente ácida (C.F.A.) e o menos comum, o ácido carboxílico, produzindo a resina catiônica fracamente ácida (C.f.A.). Entre os grupamentos básicos inseridos nas cadeias das resinas aniônicas têm-se aminas terciárias, que produzem resinas fracamente básicas (A.f.B.) e os quaternários de amônio, que produzem resinas fortemente básicas (A.F.B). As resinas com grupamentos ácidos ou básicos, ao contrário das soluções aquosas de ácidos e bases, não se dissociam em duas espécies iônicas. Somente uma espécie é dissociada nas resinas catiônicas, Na^+ ou H^+; nas aniônicas, mais freqüentemente a hidroxila OH^-. As demais espécies ficam ligadas às cadeias de estireno e divinilbenzeno.

De acordo com os grupos ionizáveis presos às estruturas das resinas, elas se classificam em quatro grupos básicos: catiônica fraca, catiônica forte, aniônica fraca e aniônica forte.

Resina Catiônica Forte: C.F.A.

Estas resinas podem estar na forma de sal de sódio, quando são utilizadas para abrandamento da água ou na forma de hidrogênio, quando são utilizadas para descarbonatação ou desmineralização da água.

Reação de abrandamento

$$Ca^{2+} + 2\ R\text{-}Na \longrightarrow 2\ Na^+ + Ca\text{-}R_2 \qquad (5)$$

$$Mg^{2+} + 2\ R\text{-}Na \longrightarrow 2\ Na^+ + Mg\text{-}R_2 \qquad (6)$$

Reação de descarbonatação/desmineralização

$Ca^{2+} + 2R\text{-}H \rightarrow 2\ H^{+} + Ca\text{-}R_2$ (7)

$Mg^{2+} + 2R\text{-}H \rightarrow 2\ H^{+} + Mg\text{-}R_2$ (8)

$2Na^{+} + 2R\text{-}H \rightarrow 2\ H^{+} + Na_2\text{-}R_2$ (9)

Resina Catiônica Fracamente Ácida: C.f.A.

Estas resinas são utilizadas para remoção de cálcio, magnésio e sódio, ligados somente a ânion fraco, como o bicarbonato, e nunca aos ânions fortes, como sulfato, cloreto e nitrato. Na realidade, são usadas somente em águas com dureza temporária elevada.

$Ca^{2+}(HCO_3)_2 + 2\ R - COOH \rightarrow 2\ RCOO\text{-}Ca + 2H_2CO_3$ (10)

$Mg^{2+}(HCO_3)_2 + 2\ R - COOH \rightarrow 2\ RCOO\text{-}Mg + 2H_2CO_3$ (11)

$2Na^{+}(HCO_3)_2 + 2\ R - COOH \rightarrow 2\ RCOO\text{-}Na_2 + 2H_2CO_3$ (12)

Resina Aniônica Forte: A.F.B.

Todas as resinas aniônicas fortemente básicas removem ânions fortes e fracos, tais como cloretos, sulfatos, nitratos, bicarbonatos e silicatos. As resinas A.F.B são divididas em dois subgrupos, tipo I e tipo II, cuja diferença é a basicidade que as mesmas apresentam. Resinas do tipo I têm um caráter básico mais forte, o que resulta em uma menor fuga de íons, principalmente sílica. As resinas do tipo II também possuem caráter básico forte, porém não possibilitam a remoção de sílica. No entanto, apresentam como vantagem a necessidade de menor quantidade de solução regenerante.

$H_2SO_4 + 2\ R\text{-}OH \rightarrow 2\ R\text{-}SO_4^{2-} + 2\ H_2O$ (13)

$HCl + R\text{-}OH \rightarrow R\text{-}Cl^{-} + H_2O$ (14)

$HNO_3 + 2\ R\text{-}OH \rightarrow R\text{-}NO_3^{-} + H_2O$ (15)

Resina Aniônica Fracamente Básica: A.f.B

Estas resinas só removem ânions fortes, tais como sulfato, cloreto e nitrato, não removendo ânions fracos, como os bicarbonatos e silicatos.

$H_2SO_4 + 2\ R\text{-}OH \rightarrow 2\ R\text{-}SO_4^{2-} + 2\ H_2O$ (16)

$$HCl + R\text{-}OH \longrightarrow R\text{-}Cl^- + H_2O \quad (17)$$

$$HNO_3 + 2\ R\text{-}OH \longrightarrow R\text{-}NO_3^- + H_2O \quad (18)$$

2.3.7 Processos de Separação com Membranas

As membranas são meios filtrantes, em geral produzidos a partir de materiais poliméricos, que apresentam poros de dimensões variadas. Estes poros são responsáveis por todas as propriedades que tornam as membranas úteis em suas diversas aplicações, tanto para separar partículas como para fracionar moléculas de diferentes massas molares. Como barreiras seletivas, as membranas são capazes de promover separações em sistemas onde os filtros comuns não são eficientes (DIAS, 2006).

Os processos de separação com membranas utilizam uma combinação das propriedades seletivas das membranas poliméricas (porosidade, distribuição de poros, tipo de material) com a força motriz aplicada ao processo (temperatura, pressão, concentração, potencial químico) para efetuar a separação. Dentre os principais tipos de processos de separação com membranas pode-se destacar a microfiltração, a ultrafiltração, a nanofiltração, a osmose inversa, a eletrodiálise e a pervaporação. A Figura 2.1 mostra a capacidade de remoção de contaminantes em processos de filtração com membranas e troca iônica, em função do tamanho da partícula.

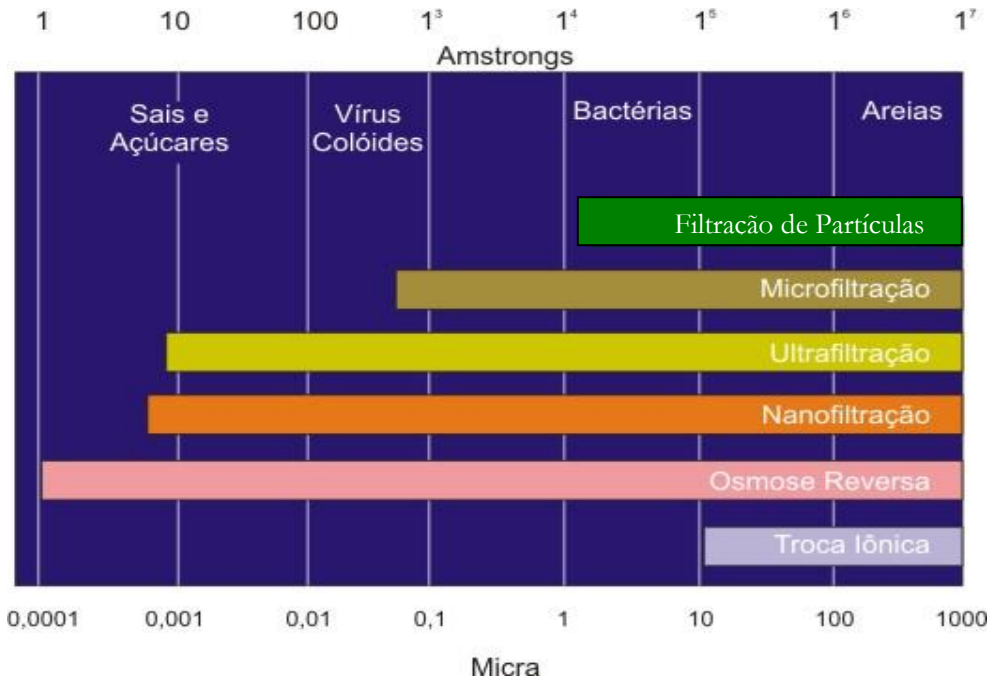

Figura 2.1 - Processo de Separação com Membranas em Função do Tamanho e Tipo de Contaminante removido.

Fonte: www.tratamentoaguaefluentes.com.br

2.4 Reuso de Água na Indústria

A indústria é um dos maiores usuários de águas, principalmente para atender a demandas de processos. Entretanto, o reuso de água na indústria varia bastante, e na maioria das vezes, requer um tratamento adicional das águas residuárias após o tratamento secundário, dependendo da aplicação que se pretende dar à água de reuso e também da fonte de efluentes que será utilizada. Em geral, a prática de reuso é uma alternativa que afeta o consumo, mas não a carga de contaminantes (BARBOSA, 2007).

O reuso industrial pode ser realizado através do aproveitamento dos efluentes produzidos na própria indústria, com ou sem tratamento prévio, ou pela utilização dos esgotos tratados provenientes das estações de tratamento das companhias de saneamento. A facilidade na implementação do reuso está relacionada à existência de uma rede paralela para o abastecimento das indústrias. A construção de ETE's (Estações de Tratamento de Efluentes) nas proximidades das zonas industriais são ações fundamentais para viabilizar a

implementação dos projetos de abastecimento com efluente tratado, tendo em vista a redução de custos para a construção de uma rede desde a ETE até o pólo industrial.

No ambiente industrial existem várias possibilidades de aplicação de reuso de efluentes tratados, tais como: água de refrigeração, água de alimentação de caldeiras, na construção de edificações, na lavagem de gases, pisos e peças, e na irrigação de áreas verdes, entre outras (MIERZWA & HESPANHOL, 2005). No item 2.4.1, apresentado a seguir, serão comentados alguns casos de aplicações de reuso de água na indústria.

Muitas vezes, não existem padrões de qualidade de água para uma atividade industrial, o que pode dificultar a identificação de oportunidades de reuso. É necessário, portanto, um estudo mais detalhado do processo industrial para a caracterização da qualidade da água. Simultaneamente, é preciso realizar um estudo de tratabilidade do efluente, para que seja estabelecido um sistema de tratamento que produza água com qualidade compatível com o processo industrial considerado para o reuso.

Em alguns casos, a qualidade da água de reuso pode ser definida com base nos requisitos exigidos por processos industriais já bem difundidos (como as torres de resfriamento), em que a qualidade mínima necessária é conhecida, devido a sua ampla utilização em atividades industriais.

2.4.1 Casos de Aplicações bem Sucedidas de Reuso de Água

A seguir serão apresentados alguns exemplos na indústria nacional e internacional de aplicações bem sucedidas da implantação de sistemas de reuso de água.

Uma das maiores fabricantes de fogões do mundo, a General Eletric Dako Apliances, vem investindo em gestão ambiental na unidade de Campinas (SP), baseado no reaproveitamento de 3,5 mil m^3 de água por mês em atividades que não exigem água potável (descargas em bacias sanitárias, irrigação de jardins e parte do processo industrial). O programa resultou, no período de 1999 a 2001, em um ganho de 5% em produtividade e redução de desperdícios. A economia obtida com essa medida ultrapassa R$ 680 mil/ano (FRANCO, 2007).

Em Betim (MG), a empresa Fiat atingiu a marca de reaproveitamento de 92% dos 1,5 bilhões de litros de água usados continuamente na produção. Com isso, a empresa economiza a compra mensal de 1,3 bilhões de litros de água (FRANCO, 2007).

Duas torres de resfriamento da usina Curtis Stanton Energy Center, em Orlando (EUA), usam mais de 30.240 m^3/dia de água reciclada para resfriar as caldeiras. A usina recebe água reutilizada altamente desinfetada da estação doméstica de tratamento de Orange County, em Orlando (www.dep.state.fl.us).

A empresa McIntosh, situada em Lakeland (EUA) reutiliza 20.000 m^3/dia de água para diversas finalidades de refrigeração em sua usina, recebendo água altamente desinfetada da Estação de Tratamento de Lakeland (www.dep.state.fl.us).

Após um estudo de alternativas para o uso racional e reuso da água na Kodak Brasil, o potencial de redução no consumo total foi estimado em 14,5%, enquanto o ganho de produtividade foi estimado em 76 horas por mês (MIERZWA & HESPANHOL, 2005).

Na fábrica de Taubaté (SP) da Volkswagen, o sistema de reciclagem de água recupera e reutiliza 70% da água consumida em suas instalações, para atividades como pintura, refrigeração e jardinagem. Com essa operação, a fábrica da companhia em Taubaté deixou de consumir 70 mil metros cúbicos de água da rede pública por mês, o equivalente ao consumo de 1.400 residências.

Com processos e práticas de gerenciamento dos recursos hídricos, a Natura, situada em Cajamar (SP), obtém vários benefícios de economia, eficiência e sustentabilidade. Em 2004, a empresa conseguiu uma redução de 23% no consumo de água por unidade vendida em relação a 2003. A reutilização da água aumentou de 29% em 2003 para 39,5% em 2004. Em janeiro e fevereiro de 2005, o volume de reuso superou este índice e alcançou a média de 50%. A ETE tem expandido sua capacidade física para atender ao crescimento da Natura. Hoje, a capacidade de tratamento de efluentes na ETE é de 253 m^3/dia. Ela será ampliada para 340 m^3/dia, o que deve suprir a demanda da empresa até 2008. O sistema de coleta de esgoto sanitário à vácuo representa grande economia para a empresa, uma vez que utiliza apenas 2 litros de água/descarga, contra 20 litros/descarga do sistema convencional. Ao utilizar 2 litros de água por descarga, são tratados 220 m^3 esgoto/dia na ETE; usando 20 litros de água/descarga, seriam tratados 1.200 m^3/dia (LOPES, 2006).

A Pilkington Brasil foi a primeira indústria vidreira da América Latina a conquistar a certificação ambiental ISO 14001 na Unidade Caçapava (SP) – Fábrica de vidros temperados, em 12/12/97, e também foi a primeira linha automotiva do grupo a obter

a certificação. A partir do estudo do reuso da água em 1997, a empresa obteve uma economia de 95% do consumo de água para uso industrial com um ganho final de 13.000 m^3/mês de água, proporcionando uma economia de R$ 35.000,00/mês. Houve também uma melhoria na qualidade do efluente industrial, já que a ETE opera 24 horas/dia e mesmo no caso de, eventualmente, a qualidade impedir o seu reuso, o lançamento na rede de esgotos será efetuado em condições muito abaixo dos limites estabelecidos pela legislação em vigor. Na ETE são gerados cerca de 20 m^3/mês (equivalente a 8 t de lodo desaguado) de lodo úmido rico em pó de vidro que atualmente são doados, mas com uma perspectiva de venda futura, caso se obtenha uma maior remoção da umidade presente no lodo. Os resultados da instalação da ETE e da implementação do programa de reuso foram: maior vazão tratada; viabilizar uso doméstico com o excedente do efluente tratado; agregar água de chuva à vazão de água tratada; maior confiabilidade do procedimento escrito; treinamento dos operadores e manutenção em seu posto; instrumentação do processo e na saída da ETA; maior qualidade do efluente tratado, permitindo novas aplicações mais nobres; uso em lavagem de produtos e embalagens; possibilidade de potabilizar o efluente tratado (questão polêmica); permitir desmineralização (LOPES, 2006).

A refinaria de Paulínia (SP) é a maior refinaria do Sistema Petrobrás, responsável pelo refino de 22% de todo o petróleo processado no Brasil. Após serem adotadas medidas de utilização racional e reuso da água a partir de 2004, conseguiu-se uma redução de lançamento de efluente de 350 m^3/h. Os resultados obtidos com a redução do consumo e conseqüente redução da vazão de efluente não se resumem ao aspecto quantitativo, mas também ao qualitativo, na medida em que reduzir a vazão de efluente implica melhores condições de tratabilidade em decorrência do aumento do tempo de residência hidráulica na estação de tratamento de efluentes. Desde 2002, a sua outorga, que era de 3.600 m^3/h, passou para 1.870 m^3/h e, devido às medidas de gerenciamento, para 1.750 m^3/h, provocando uma economia de US$ 30.000/mês. Uma redução de 350 m^3/h na vazão de efluente traduz, como equivalente em termos de captação de água, um consumo médio de 42.000 cidadãos. Certamente, reduzir o consumo de água não é meramente uma questão econômico-financeira, mas um diferencial competitivo que, em futuro não tão distante, representará a própria sobrevivência da empresa (LOPES, 2006).

A Rhodia, indústria química instalada em Paulínia (SP), no ano de 2005 aumentou em 400 m^3/h a sua produção de água filtrada, deixando de captar 3.000 m^3/h do rio Atibaia. Esta redução foi conseguida através de investimentos em torres de resfriamento, devido a problemas de escassez de água, principalmente nos meses de junho a setembro, que são mais críticos, e não ao custo da água. O volume de água captada há 5 anos era de 14.000 m^3/h e hoje, com as modificações nos processos, é de 8.430 m^3/h (LOPES, 2006).

A Mahle, metalúrgica localizada em Mogi-Guaçu, em 1998, com o projeto de reuso, conseguiu uma redução de 25% na água captada, 10% nos custos e eliminação do descarte. Parte maior de sua água é retirada de cinco poços profundos, e quase não há espaço para perfurar mais poços na área da empresa, pois estes precisam de uma distância de 300 m um do outro. A solução seria buscar água da rede pública (SAMAE), mas o custo aumentaria. Portanto, a medida mais sensata foi o reuso da água, e assim conseguiram equilibrar os custos e não sobrecarregar a SAMAE, que abastece também a cidade de Mogi-Guaçu. A implementação de um sistema de reuso do efluente condensado dos dois sistemas de refrigeração para a diluição do óleo solúvel, fechando o circuito de água dos fornos teve como resultados:

- Redução do consumo de 97.000 L/ano de água usada na diluição do óleo solúvel, que representa uma redução de 13,5% na captação total de água da planta, estimada em 720.000 L/ano;
- Redução estimada em 77.600 L/ano na vazão de efluente oleoso para a ETE, que possibilitou uma redução de custo no tratamento de efluentes de R$ 2.430,00/ ano (LOPES, 2006).

Três indústrias (galvanização de arames, bebidas e refino de açúcar) foram analisadas em Bulawayo, Zimbabwe, a fim de se identificar potenciais oportunidades de processos em circuito fechado, para reduzir e minimizar substancialmente a demanda de recursos hídricos e, conseqüentemente, o desperdício de fontes finitas de água potável (GUMBO et al., 2003). Os resultados mostraram que na indústria de galvanização foi possível economizar até 17% da água através do reciclo de água quente de têmpera em circuitos de refrigeração. A indústria pôde eliminar, por substituição, o uso de substâncias tóxicas como chumbo e cloreto de amônia, além de reduzir o uso de ácido clorídrico pela metade, através da introdução de uma câmara de aquecimento por indução em um ponto do

processo. Esse processo de galvanização é recomendado por reduzir a exposição dos trabalhadores a essas substâncias e sua descarga no esgoto público. O processo também utiliza 50% a menos de energia que o processo convencional.

A indústria de bebidas consumia uma grande quantidade de água. A água era pré-tratada previamente para atender os requisitos da qualidade exigida pela produção antes de ser usada no processo. Há diversas oportunidades de se minimizar o desperdício de água nesse ponto. Basicamente a água é tratada por um processo de floculação e filtração com três tipos de filtro (areia, carbono e filtro polidor). A água de contra-lavagem era descartada na rede de esgoto. Através da implantação de um sistema de reuso em cascata da água de contra-lavagem dos filtros em utilidades que demandam menor qualidade como, por exemplo, lavagem de pisos, pôde-se verificar uma economia de aproximadamente 5% (3,5 para 3,3 m^3/m^3 bebida), o que não confere uma economia tão significativa. Entretanto, no estudo foi realizado um levantamento de possibilidades de economia de água e emissão de efluentes na fábrica (GUMBO et al., 2003).

Um sistema de reciclo de água consistindo em flotação, filtração e nanofiltração (NF) foi desenvolvido e implementado para reuso de água em uma indústria de bebidas em Tóquio (MIYAKI et al., 2000). Essa fábrica, que produz bebidas carbonatadas e não-carbonatadas, usa água potável em abundância para a lavagem de garrafas e latas, assim como água de resfriamento para o processo de desinfecção. A NF foi aplicada com o intuito de remover compostos orgânicos solúveis dos efluentes, sendo capaz de remover até 70% da DQO e 40% dos sólidos suspensos voláteis. O emprego da nanofiltração para recuperação de efluentes permitiu uma reutilização de 2450 m^3/dia, considerando custos de investimento e operação. A Tabela 2.2 compara os resultados técnicos e econômicos da implantação do sistema de reuso.

Tabela 2.2 - Comparação de dados antes e após a implantação do sistema de reuso.

Água m^3/dia	**Antes**	**Depois**
Captada	3.600	1.650
Efluente	3.350	1.400
Recuperada	640	2.450
Custos, US $/d:		
Água de utilidades[a]	16.250	7,45
Drenagem e recuperação	50.000	150.000
Total	16.798	9,12

[a]Valor do m^3 de água para indústria = 4,5 US $/m³

Fonte: MIYAKI et al. (2000).

Em um complexo industrial, localizado em Bursa (Turquia), com mais de 200 indústrias de diferentes setores (têxtil, automotivo, siderúrgico, de plásticos e de alimentos), o efluente é tratado em um sistema de lodos ativados e atinge os padrões de descarga locais, porém o efluente é descartado sem nenhuma consideração em relação a reuso. SOLMAZ et al. (2007) avaliaram os processos de precipitação química (com NaOH e $Ca(OH)_2$) e troca iônica no tratamento do efluente gerado no complexo, visando ao reuso como água de processo. Os testes com $Ca(OH)_2$ em pH = 11 apresentaram maior eficiência de remoção para Sólidos Dissolvidos Totais (SDT), DQO, Fe e coeficiente de absorção (SAC) a 436, 525 e 626 nm, com valores de 96%, 27%, 94%, 75%, 88% e 90%, respectivamente. Após a precipitação química com $Ca(OH)_2$, o efluente era neutralizado e passava por resinas de troca iônica, obtendo-se melhores resultados, especialmente em termos de SDT e condutividade (remoções de 100% e 99%, respectivamente). A Tabela 2.3 apresenta as características da água de processo e os resultados obtidos após cada tratamento.

Tabela 2.3 – Qualidade do efluente após cada estágio de tratamento e características da água de processo.

Parâmetros	Efluente Bruto	Após pptação com $Ca(OH)_2$	Após Resina TI	Limites	Caracterização água de processo
pH	7,5 ± 0,3	7,5 ± 0,1	6,8 ± 0,3	6 – 9	6 – 9
DQO, mg/L	131 ± 18	96 ± 25	34 ± 6	400	50
SST, mg/L	75 ± 13	2,7 ± 1,2	0	200	0
Fe, mg/L	3,5 ± 0,3	0,2 ± 0,1	0,05	10	0,1
SDT, mg/L	1884 ± 80	1915 ± 215	43 ± 5	-	50
Alcalinidade, mg/L	513 ± 35	32 ± 4,7	2,3 ± 0,6	-	100
Dureza, mg/L	293 ± 92	64 ± 45	0	-	10
Sulfato, mg/L	244 ± 45	550 ± 190	40,9 ± 12,5	-	250
Cloreto, mg/L	1281 ± 190	1270 ± 180	22,7 ± 6,7	-	150
Condutividade, µS/cm	3803 ± 273	3590 ± 311	19,1 ± 6,0	-	100
SAC $_{436}$, 1/m	9,6 ± 3,3	2,4 ± 0,8	0,2 ± 0,1	-	7
SAC $_{525}$, 1/m	8,3 ± 2,9	1,0 ± 0,5	0,2 ± 0,1	-	5
SAC $_{620}$, 1/m	4,2 ± 1,3	0,4 ± 0,2	0	-	3

Fonte: SOLMAZ et al. (2007).

Tratamentos avançados como o processo de oxidação com reagente Fenton (FP), coagulação com policloreto de alumínio (PAC) e troca de íons foram aplicados no efluente deste mesmo complexo industrial a fim de se avaliar a possibilidade de reuso em uma indústria têxtil (SOLMAZ et al., 2007). O processo Fenton foi efetuado à temperatura ambiente (18 a 22ºC) usando dosagens constantes de $FeSO_4$ e H_2O_2, e variando-se os valores de pH para se determinar a condição de melhor remoção de cor e DQO. Na coagulação, após o processo Fenton, foram utilizados PAC e polímero aniônico Praestol A3010LTR (Stockhansen, Alemanha) (1% m/m) como coagulante e auxiliar de coagulação. O efluente obtido da coagulação com PAC foi bombeado através de colunas com resinas de troca catiônica (Lewatit Mono Plus S100) e aniônica (Lewatit Mono Plus M600) empacotadas sob diferentes combinações. Os resultados obtidos nesse estudo são apresentados na Tabela 2.4.

Do processo Fenton para a coagulação com PAC e a troca iônica, as eficiências de remoção de sólidos suspensos e DQO aumentaram consideravelmente, enquanto os coeficientes de absorção a 436, 525 e 620 nm (SAC - indicativos da cor presente no

efluente) foram reduzidos. O efluente final apresentava valores inferiores aos limites exigidos na água de processo para todos os parâmetros avaliados.

Tabela 2.4 - Características da água de processo e variação da qualidade da água após cada etapa do tratamento.

Parâmetros	Efluente Bruto	Processo FENTON	Coagulação com PAC	Troca Iônica*	Caracterização água de processo
pH	7.5 ± 0.3	8,0 ± 0.1	8,0 ± 0,1	8,1 ± 0.4	6 – 9
DQO (mg/L)	131 ± 18	93 ± 24	85 ± 24	41 ± 6	50
SST (mg/L)	75 ± 13	29 ± 5	5 ± 2	0	0
Fe (mg/L)	3,5 ± 0,3	4,3 ± 0,5	0,3 ± 0,2	0,05	0,1
SDT (mg/L)	1885 ± 80	1947 ± 580	2281 ± 341	30 ± 4	50
Alcalinidade (mg/L)	513 ± 35	-	330 ± 23	0	100
Dureza (mg/L)	293 ± 93	-	240 ± 46	4 ± 1	10
Sulfato (mg/L)	244 ± 45	-	420 ± 80	75 ± 9	250
Cloretos (mg/L)	1282 ± 190	-	1270 ± 179	90 ± 17	150
Condutividade (µS/cm)	3803 ± 273	4480 ± 350	4535 ± 330	49 ± 8	100
SAC					
436 nm/m	9,6 ± 3,3	7,2 ± 2,7	6,1 ± 2,5	0,2 ± 0,1	7
525 nm/m	8,3 ± 2,9	4,9 ± 2,0	4,3 ± 1,9	0,1 ± 0,1	5
620 nm/m	4,2 ± 1,3	1,6 ± 1,0	1,2 ± 0,8	0,1	3

Fonte: SOLMAZ et al. (2007)
* resultados com mistura catiônica:aniônica = 1:1.

Pawlowsky (2003) avaliou quatro processos de tratamento para melhorar a qualidade da água do efluente da ETE de uma indústria de café. A ETE era formada pelo processo de lodos ativados com aeração prolongada e clarificação usando a flotação, para reutilização da água em caldeiras, condensadores, refrigeração, lavagens em geral, irrigação e paisagismo. No efluente final da ETE foram aplicados os processos de adsorção com carvão ativado, separação por membranas, coagulação/floculação com polieletrólitos e oxidação com ozônio para, finalmente, definir qual deles apresentaria melhor desempenho. A Tabela 2.5 compara os resultados obtidos em cada tratamento estudado, mostrando que o efluente tratado pelo processo de adsorção foi o mais eficiente.

Tabela 2.5 – Comparativo dos resultados obtidos por parâmetros para cada tratamento aplicado.

Tecnologias Analisadas		**Adsorção**	**Nanofiltração**	**Coag./Floc.**	**Oxidação**
Parâmetros	**entrada (*)**	**saída (*)**	**saída (*)**	**saída (*)**	**Saída (*)**
Temperatura (ºC)	22,5	22,5	50	22,5	22,5
pH	5,3	6,8	5,6	7,0	3,8
Cor (Hazen)	127,5	23,0	23,0	70,0	160,0
DQO (mg/L)	104,5	36,0	38,0	120,0	100,0
SST (mg/L)	100,0	7,0	10,0	sem análise	Sem análise
Coliformes totais (UFC/mL)	1300,0	1,0	0,0	sem análise	0,0
coliformes fecais (NMP/100mL)	7,6	1,0	0,0	sem análise	0,0

Fonte: Pawlowski (2003) (*) Valores médios das várias análises realizadas;

2.4.2 Reuso de água na Indústria de Refrigerantes

Na indústria alimentícia e de bebidas, correntes de água de processo contendo diferentes níveis de contaminação são combinadas e encaminhadas até os tanques de mistura e de equalização, de onde, posteriormente, seguem para tratamentos biológicos. No estudo realizado por Blocher et al. (2002) pode se mostrar que o tratamento de correntes isoladas de efluente, advindas de pontos distintos do processo, resulta em maiores benefícios, enquanto problemas relacionados ao tratamento biológico podem ser minimizados ou até eliminados.

Por exemplo, testes mostraram que produtos puderam ser recuperados de água de pré-rinser altamente contaminada, e a água potável pôde ser produzida do processo de mistura de águas. Os passos dos processos para se alcançar essa qualidade podem ser resumidos da seguinte forma:

- Pré-tratamento para remover sólidos suspensos totais, excesso de impurezas orgânicas e sólidos grosseiros;
- Microfiltração integrada a processo biológico para reuso de água e remoção de óleo;
- Filtração com membrana para remover inorgânicos dissolvidos residuais e impurezas orgânicas (dois estágios de nanofiltração);

- Desinfecção com UV para assegurar que a água tratada atingirá os padrões bacteriológicos para o consumo direto (ingestão).

A Tabela 2.6 sumariza os resultados obtidos após cada um desses passos e compara os padrões de potabilidade de acordo com German Drinking Water Act[1].

Tabela 2.6 – Parâmetros de qualidade da água do processo comparados com os padrões estabelecidos pela German DWA.

Parâmetros	Água de processo	Separação de sólidos	Efluente do MBR	2 Estágios de NF	Limites de contaminantes de acordo com o DWA
pH	7,0 - 9,5	7,0 – 9,5	7,8 - 9,0	6,9 - 8,3	6,5 - 9,5
SST, g/L	1,0 – 7,3	1,0 – 7,3	-	-	-
Condutividade, μS/cm	-	-	2320 - 4300	27 - 1420	2000
Na^+, mg/L	-	-	839 - 1670	9 - 128	150
Cl^- , mg/L	-	-	35 - 68	1,2 - 9	250
DQO, mg/L	1800 - 6600	1800 – 6600	50 - 400	< 5	-
COT, mg/L	340 – 1800	340 – 1800	28 - 100	< 2	4
Bactérias Totais (UFC*/mL; 37ºC)**	-	-	10^3 - 10^5	≤ 35	100
***E. coli* / 100 mL**	t.p.p.*	t.p.p.	-	a.n.d.**	a.n.d.
***Streptococci* fecais / 100 mL**	t.p.p.	t.p.p.	-	a.n.d.	a.n.d.
Anaeróbios formadores de esporos, redutores de sulfito / 20 mL	t.p.p.	a.n.d.	a.n.d.	a.n.d.	-

Fonte: BLOCHER et al. (2002).
* t.p.p.: teste de presença positiva
** a.n.d.:abaixo do nível de detecção
***UFC: Unidades Formadoras de Colônias

Um processo integrado de biorreator com nanofiltração e desinfecção por membranas foi desenvolvido para produzir água potável através do tratamento de efluentes de empresas de bebidas de pequeno e médio porte (BLOCHER et al., 2002). Foi utilizado um biorreator de membrana (MBR) combinado com um estágio de nanofiltração e desinfecção com UV. No processo MBR, a remoção de DQO alcançou mais de 95%. Após a nanofiltração, parâmetros químicos e bacteriológicos da água tratada já se encontraram dentro dos limites da DWA (German Drinking Water Act). Assim, a água tratada pôde ser utilizada para vários propósitos, como abastecimento de caldeiras, água de “make-up”, fluido de refrigeração, etc. Através da otimização de ambos os estágios de tratamento, foi

possível uma recuperação de 80%. Assumindo um potencial de reuso de 5 m^3/h, essa economia girou em torno de 90.000 euros/ano. A Tabela 2.7 apresenta os parâmetros de qualidade da água durante os estágios do processo comparados aos padrões de acordo com a German DWA.

Tabela 2.7 – Qualidade da água nos estágios do processo comparados aos padrões de água potável na Alemanha.

Parâmetros	Água de processo	Separação de sólidos	Efluente do MBR	2 Estágios de NF	Limites de contaminates de acordo com o DWA
pH	7,0 – 9,5	7,0 – 9,5	7,8 – 9,0	6,9 – 8,3	6,5 – 9,5
SST, g/l	1,0 – 7,3	1,0 – 7,3	-	-	-
Condutividade, μS/cm	-	-	2320 - 4300	27 - 1420	2000
Na^+, mg/l	-	-	839 - 1670	9 - 128	150
Cl^- , mg/l	-	-	35 - 68	1,2 - 9	250
DQO, mg/l	1800 - 6600	1200 – 6100	50 - 400	< 5	-
COT, mg/l	340 – 1800	-	28 - 100	< 2	4
Bactérias Totais (UFC*/ml; 37ºC)**	-	-	10^3 - 10^5	≤ 35	100
Coliformes Fecais / 100 ml	t.p.p.*	t.p.p.	-	a.n.d.**	a.n.d.
***Streptococci* fecais / 100 ml**	t.p.p.	t.p.p.	-	a.n.d.	a.n.d.
Anaeróbios formadores de esporos, redutores de sulfito / 20 ml	a.n.d.	a.n.d.	-	a.n.d.	a.n.d.

Fonte: BLOCHER et al. (2002).
* t.p.p.: teste de presença positiva
** a.n.d.:abaixo do nível de detecção
***UFC: Unidades Formadoras de Colônias

No trabalho de Holden (1998), foram examinados aspectos técnicos da tecnologia de membranas aplicadas a indústria de bebidas. Foi instalado na "Wells Soft Drinks", em Northampton (Inglaterra), um sistema híbrido de membranas - uma combinação de ultrafiltração e osmose inversa, com membranas na configuração espiral.

O processo convencional de tratamento de água nesta indústria de bebidas era constituído de filtros à pressão, troca de íons e radiação ultravioleta, para remover sólidos, alcalinidade e efetuar desinfecção, respectivamente. A nova estação de tratamento com membranas foi capaz de tratar até 100 m^3/h de água captada do processo.

[1] Órgão que estabelece os padrões de potabilidade da água na Alemanha.

A água captada era filtrada e parte do fluxo direcionado para as membranas de ultrafiltração, enquanto o restante era bombeado para o sistema de osmose inversa. A água tratada na ultrafiltração era misturada à da osmose inversa, atingindo esta mistura o padrão mínimo de 30 mg $CaCO_3$/L. Essa água passava imediatamente por um processo de desinfecção com radiação ultravioleta, para alimentar prioritariamente as linhas de processo subseqüentes. Do ponto de vista técnico, o processo de desinfecção com UV não é realmente necessário, uma vez que as membranas removem todos os microrganismos. De toda forma, ele foi instalado apenas por questões de segurança de alimentos.

Os dois estágios de tratamento permitem às membranas de ultrafiltração retirarem quaisquer sólidos suspensos e microrganismos da água bruta. A osmose inversa remove contaminantes e sais dissolvidos. A mistura das duas correntes tratadas resulta em uma água desinfetada com alta qualidade para o processo. Os resultados obtidos com o sistema híbrido de membranas são apresentados na Tabela 2.8 a seguir.

Tabela 2.8 – Propriedades da água antes e após o tratamento com membranas.

Parâmetros	**Água bruta**	**Permeado da osmose inversa**	**Permeado da ultrafiltração**	**Mistura**
pH	7,1	6,1	7,4	7
Condutividade, μS/cm	583	28	583	102
Nitrato, mg N/l	1,89	< 0,5	1,92	0,58
Dureza total, mg $CaCO_3$/l	221	4	221	30
CO_2 livre, mg/l	16,5	12,1	7,4	4,5
Alcalinidade, mg $CaCO_3$/l	100	7	101	21
Cloreto, mg/l	63	< 4	65	11
Sulfato, mg/l	120	2	122	16
Sódio, mg/l	38,4	4,5	39,3	8,5
Cálcio, mg/l	72,4	0,7	73,8	9,8
COT, mg/l	4,5	0,57	3,45	0,78

Fonte: HOLDEN (1998).

Tendo em vista a similaridade do caso (indústria de bebidas, com efluentes e requisições de qualidade de água), o tratamento proposto parece atender bem a algumas necessidades de tratamento do efluente a ser reusado. Contudo, é necessário realizar uma análise econômica para se avaliar tratamentos menos dispendiosos, que também atendam a essas exigências.

2.4.3 Reuso de Água em Torres de Resfriamento

A transferência de calor também se apresenta como uma questão diretamente ligada a assuntos ambientais. Há necessidade de cálculos com intuitos mitigatórios e pesquisa contínua para se obter uma maior eficiência de equipamentos. Especificamente, o cuidado com a água envolvida em qualquer processo entrópico, deve ser considerado primordial ante qualquer projeto e assim seguir padrões legislativos.

Como os sistemas de resfriamento de água utilizam resfriadores evaporativos, têm como característica principal a evaporação parcial da própria água de recirculação. Tal fenômeno faz com que aumente a concentração dos sais dissolvidos na água que, aliada a outros fatores, provocam incrustações e corrosão dos diversos componentes da instalação. As incrustações prejudicam a troca de calor, baixam a eficiência do processo e põem em riscos diversos componentes do conjunto.

De acordo com Metcalf & Eddy (2003), normalmente são encontrados quatro tipos de problemas relacionados à qualidade da água em operações de torres de resfriamento. São eles as incrustações, a corrosão metálica, o crescimento biológico e a formação de *fouling* em trocadores de calor e condensadores.

As incrustações estão relacionadas à formação de depósitos salinos devido a precipitações de sais, quando estes atingem concentrações tais que ultrapassam o limite de solubilidade. As incrustações derivadas do elemento químico cálcio (carbonato, sulfato e fosfato de cálcio) são a principal causa dos problemas de incrustações em torres de resfriamento. O magnésio em forma de carbonato e fosfato também pode acarretar problemas. Depósitos de sílica são particularmente difíceis de remover das superfícies de trocadores de calor; no entanto, a maioria das águas residuárias contém quantidades relativamente pequenas de sílica. A redução do potencial incrustante dos efluentes é alcançada controlando-se a formação de fosfato de cálcio, que é o primeiro sal de cálcio a precipitar. O tratamento é normalmente realizado através de precipitação do fosfato. A troca iônica é outra tecnologia usada para reduzir a formação de incrustações de cálcio e magnésio. Mas esta técnica é comparativamente cara, limitando seu uso (METCALF & EDDY, 2003).

Metcalf & Eddy (2003) citam que em sistemas de refrigeração, a corrosão metálica pode ocorrer quando é criado um potencial elétrico entre superfícies metálicas diferentes. A célula de corrosão consiste em um anodo, onde ocorre a oxidação do metal, e um catodo, onde acontece a redução de outro metal. A qualidade da água afeta de forma acentuada a corrosão metálica. Contaminantes como sólidos dissolvidos totais (SDT) aumentam a condutividade elétrica da solução, acelerando as reações de corrosão. O oxigênio dissolvido e certos metais como manganês, ferro e alumínio promovem corrosão através de seus potenciais de oxidação relativamente altos. O potencial de corrosão de águas de refrigeração pode ser controlado através de inibidores químicos de corrosão. Deve-se levar em consideração que os critérios para o uso de produtos químicos no controle de corrosão em águas recuperadas são muito maiores do que em água doce, porque a concentração de SDT é de duas a cinco vezes maior em efluentes.

Segundo Buecker (1997), ligas de cobre formam uma camada de óxido cúprico e esta camada tende a proteger a base do metal da corrosão. As ligas de cobre podem sofrer corrosão na presença de compostos que formam complexos ou se ligam com o cobre, sendo a amônia o principal complexante do cobre. Amônia pode se tornar um problema quando esgoto tratado é usado como água de reposição em sistemas de resfriamento.

Outro agente corrosivo problemático é o sulfeto, ligas de cobre não devem ser usadas para conduzir águas que contém sulfeto (BUECKER, 1997). O sulfeto promove corrosão ativa de duas maneiras: por ser ácido, causa ataque por pH baixo; em segundo lugar é responsável pela formação de sulfeto de ferro, que é catódico com relação ao ferro e conduz à corrosão galvânica (DREW, 1979).

O ambiente morno e úmido existente dentro das torres de resfriamento proporciona um ambiente ideal para promover o crescimento biológico. Nutrientes orgânicos, como o nitrogênio e o fósforo, encontrados em efluentes favorecem o crescimento de microrganismos que podem se depositar em superfícies de trocadores de calor inibindo sua eficiência e o fluxo de água. Outro problema relacionado à presença de microrganismos na água de resfriamento é que certas espécies podem criar subprodutos corrosivos durante sua fase de crescimento. O controle do crescimento biológico pode ser feito através da adição de biocidas, ácido para o controle do pH e inibidores de incrustações e materiais biológicos.

Outro ponto que deve ser levado em consideração quando se usa água recuperada para resfriamento é a proteção da saúde de trabalhadores envolvidos com estes equipamentos e da vizinhança próxima às instalações. Normalmente os critérios utilizados para a água de reuso são estudados caso a caso, apesar destes critérios serem semelhantes aos usados em água de reuso para irrigação de culturas comestíveis (METCALF & EDDY, 2003).

A torre de resfriamento é fonte ideal para introdução de agentes causadores de deposição por atuar como um eficiente filtro de ar. Água morna, aeração, nutrientes e luz do sol também transformam a torre de resfriamento em um eficiente biorreator. O *fouling* refere-se ao processo de acúmulo e crescimento de depósitos orgânicos ou inorgânicos em diversos tipos de sistemas de torres de resfriamento com recirculação. Estes depósitos são crescimentos biológicos, de sólidos suspensos, de lodo, de produtos de corrosão e elementos inorgânicos. O resultado destes acúmulos é a inibição da transferência de calor em trocadores de calor. O controle do *fouling* é alcançado através da adição de dispersantes químicos que impedem que as partículas se agreguem e conseqüentemente depositem. A coagulação química e os processos de filtração requeridos para remoção de fósforo são efetivos na redução da concentração de contaminantes que contribuem para o *fouling* (METCALF & EDDY, 2003).

A Tabela 2.9 apresenta valores máximos de qualidade de água recomendados pela literatura para reposição em sistemas de resfriamento abertos, com recirculação

Tabela 2.9 – Requisitos para água de abastecimento da circulação em torres de resfriamento.

Parâmetros	Mancuso & Santos (2003)	Mierzwa (2002)	Metcalf & Eddy (2003)	Eble & Feathers (1992)	Na indústria deste estudo
Alcalinidade total	350	350	350	****	600
Alumínio	0,1	0,1	0,1	****	****
Bicarbonatos	24	24	24	****	****
Cálcio	50	50	50	1500	****
Cloretos	500	500	500	5000	300
COT	****	****	****	200	****
DBO	25	25	****	****	****
DQO	75	75	75	200	****
Dureza	650	650	650	****	300
Ferro	0,5	0,5	0,5	5 a 10	3
Fosfatos	4	4	****	****	5 a 25
Hidrocarbonetos	****	****	****	0 / 50	****
Magnésio	0,5	0,5	****	50 a 1000	****
Manganês	0,5	0,5	0,5	1,0	****
Surfactantes	1	****	1	****	****
Nitrogênio amoniacal	1	1	****	20 a 40	****
pH	8,0 a 9,0	6,9 a 9,0	****	7 a 9	7 - 8,5
SDT	500	500	500	9600	2500
Sílica	50	50	50	300	180
SST	100	100	100	40 a 200	****
Sulfatos	200	200	200	5000	****
Sulfetos	****	****	****	10	****
Turbidez (NTU)	50	50	****	****	****

Todos os valores são expressos em mg/L, salvo quando indicado.

A Tabela 2.10 apresenta os parâmetros e seus principais efeitos nos sistemas de torres de resfriamento.

Tabela 2.10 - Parâmetros de controle para água de reposição em torres de resfriamento e seus respectivos efeitos.

PARÂMETROS	EFEITO
Cloretos	Corrosão
SDT	Corrosão, Incrustação, Deposição
Dureza	Incrustação
Alcalinidade	Incrustação
pH	Corrosão, Incrustação
DQO	Deposição microbiológica
SST	Deposição
Turbidez	Deposição
DBO	Deposição microbiológica
MBAS	Deposição
Nitrogênio amoniacal	Deposição microbiológica
Fosfatos	Incrustação
Sílica	Incrustação
Alumínio	Incrustação, Deposição
Ferro	Incrustação, Deposição
Manganês	Corrosão, Incrustação
Cálcio	Incrustação
Magnésio	Incrustação
Bicarbonatos	Incrustação
Sulfatos	Corrosão, Incrustação
Sulfetos	Corrosão
Cloro residual livre	Corrosão
COT	Deposição microbiológica
Hidrocarbonetos Totais	Deposição, Deposição microbiológica

Fonte: Adaptado de BUECKER (1997), NALCO (1988), DI BERNARDO et al. (2002), EBLE & FEATHERS, 1992 apud PEREZ, 2003.

2.4.4 Reuso de Água em Caldeiras

Uma operação bastante comum na indústria é a geração de vapor, usualmente utilizado para a produção de trabalho mecânico em turbinas (vapor superaquecido) ou em processos de aquecimento, nos quais se emprega o vapor saturado. A qualidade do vapor nessas operações é fundamental, sendo dependente de um correto dimensionamento das linhas de distribuição, purgadores, válvulas, acessórios e, principalmente, de uma boa qualidade da água utilizada para gerar este vapor.

Como as caldeiras são de grande importância para as indústrias que necessitam de vapor, o processo de corrosão deve ser controlado e evitado ao máximo. Dessa forma, são

necessários o controle e tratamento da água utilizada em caldeiras. Alguns problemas recorrentes em caldeiras são:

- Corrosão ácida generalizada: recorrente nas superfícies internas das caldeiras, resultante do uso de águas com baixos valores de pH;
- Corrosão por oxigênio: gerada pelo uso de água aerada (remoção de oxigênio incompleta), causando a formação de pequenas áreas anódicas junto a grandes áreas catódicas;
- Corrosão Galvânica: diferentes metais podem ser conduzidos para o interior da caldeira, causando corrosão quando ionizados, complexados pela ação da amônia e/ou no estado particulado;
- Corrosão por Ácido Sulfídrico: a reação de gás sulfídrico com água produz ácido sulfídrico, que pode vir a se combinar com diferentes metais formando os sulfetos metálicos correspondentes;
- Corrosão ácida localizada: concentração de sais ácidos ou de cloretos dissolvidos na água da caldeira pode levar a elevados teores dos mesmos na água da caldeira, concentrando-se em altos níveis sob depósitos ou fendas em meio aerado, e produzindo áreas de baixo pH.

Por se tratarem de equipamentos operados a alta temperatura e pressão, é de suma importância o bom uso do equipamento para se evitar problemas que podem gerar baixo rendimento da caldeira, diminuição de vida útil, paradas indesejadas, desperdício de água ou até mesmo acidentes em casos mais extremos.

Os seguintes tratamentos são usualmente praticados para o pré-tratamento da água de caldeiras: abrandamento, desmineralização, desarenação e osmose inversa. A Tabela 2.11 apresenta padrões de qualidade de água recomendados pela literatura para alimentação de caldeiras a baixa pressão.

Tabela 2.11– Padrões de qualidade de água recomendados para alimentação e circulação em caldeiras a baixa pressão (0 – 300 psig).

	Macedo (2001)		**Crook (1996)**	**Na indústria deste estudo**	**Lenntech (1991)**	
Parâmetros	**Água de alimentação**	**Água da caldeira**	**Água de caldeira**	**Água de caldeira**	**Água de alimentação**	**Água de caldeira**
Alcalinidade Total	***	360	350	700	***	350
Alumínio	***	***	5	***	***	***
Cloretos	***	***	***	120	***	***
Cobre	< 0,05	***	0,5	***	0,05	***
Compostos Orgânicos	***	***	1	***	***	***
Condutividade (µS/cm)	***	1100 a 5400	***	***	***	3500
DQO	***	***	5	0	***	***
Dureza total	< 0,3	***	350	0	0,3	***
Ferro	< 0,1	***	***	3	0,1	***
Óleos e graxas	<1	***	***	***	1	***
Oxigênio Dissolvido	<0,007	***	2,5	***	0,04	***
pH	8,3 a 10	***	7,0 a 10,0	10,5 - 11,5	7,5 a 10	***
SDT	***	***	700	***	***	***
Sílica	***	< 150	30	***	***	150
SST	***	***	10	***	***	***

* Todos os valores são expressos em mg/L, salvo quando indicado.
Fonte: adaptado de MACEDO (2001), CROOK (1996), Lenntech (1991).

Metcalf & Eddy (2003) definem os padrões para abastecimento das caldeiras antes da adição de substâncias químicas na alimentação. Estes padrões são apresentados na Tabela 2.12.

Tabela 2.12- Critérios de qualidade requerida antes da adição de substâncias químicas para água de alimentação de aquecedores e caldeiras.

Parâmetros*	Industrial			Utilidades Elétricas
	Baixa Pressão	Pressão Intermediária	Alta Pressão	
Sílica (SiO_2)	30	10	0,7	0,01
Alumínio (Al)	5	0,1	0,01	0,01
Ferro (Fe)	1	0,3	0,05	0,01
Manganês (Mn)	0,3	0,1	0,01	0,01
Cálcio (Ca)	. (1)	0,4	0,01	0,01
Magnésio (Mg)	. (1)	0,25	0,01	0,01
Amônia (NH_4)	0,1	0,1	0,1	0,07
Bicarbonato (HCO_3)	170	120	48	0,5
Sulfato (SO_4)	. (1)	. (1)	. (1)	. (1)
Cloreto (Cl)	. (1)	. (1)	. (1)	(1) , (2)
Sólidos Dissolvidos	700	500	200	0,5
Cobre (Cu)	0,5	0,05	0,05	0,01
Zinco (Zn)	(1)	0,01	0,01	0,01
Dureza ($CaCO_3$)	350	1	0,07	0,07
Alcalinidade ($CaCO_3$)	350	100	40	1
pH	7,0 - 10,0	8,2 - 10,0	8,2 - 9,0	8,8 - 9,4
· Azul de Metileno	1	1	0,5	0,1
· Tetracloreto de Carbono	1	1	0,5	(1) , (3)
DQO	5	5	1	1
Ácido Sulfúrico (H_2S)	. (1)	. (1)	. (1)	. (1)
Oxigênio Dissolvido (O_2)	2,5	0,007	0,007	0,007
Temperatura (^oC)	. (1)	. (1)	. (1)	. (1)
Sólidos Suspensos	10	5	0,5	0,05

Fonte: Adaptado de METCALF & EDDY (2003, p. 1419 e 1420).
* Todas as unidades em mg/L , exceto pH e temperatura.
(1) Aceito como recebido; nunca houve problemas com as concentrações ou valores encontrados.
(2) Controlado pelo tratamento de outros constituintes.
(3) Ausente, não detectado por testes.

2.5 Considerações Finais

Diante do que foi apresentado, é evidente a necessidade de preservação dos recursos hídricos e do consumo racional de água doce, e que volumes consideráveis de água potável podem ser poupados, utilizando-se efluentes tratados para o atendimento de demandas cujas finalidades podem prescindir de água potável. As indústrias que implantam programas de conservação e reuso de água são beneficiadas nos aspectos ambiental,

econômico e social. No entanto, no Brasil, o reuso é uma prática bastante recente e passou a ser utilizado com maior freqüência na década de 1980, quando as águas de abastecimento foram se tornando cada vez mais caras, onerando o produto final quando usadas no processo de fabricação. A partir destes, as pesquisas se intensificaram, mas não foram definidos, até o momento, padrões específicos para o reuso da água.

No ambiente industrial existem várias possibilidades de aplicação de reuso de efluentes tratados, destacando-se a água de refrigeração e de alimentação de caldeiras. Para tal, são necessários processos de tratamento específicos para cada composição de efluente, sendo usualmente empregados adsorção em carvão ativado; oxidação com ozônio, dióxido de cloro e peróxido de hidrogênio; floculação; separação por membranas (microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose inversa); troca iônica; destilação e precipitação.

Existem muitos relatos na literatura de casos bem sucedidos de reuso de efluentes industriais, com redução expressiva dos custos de captação de água. Com relação à indústria de refrigerantes, muitos trabalhos mostram que a aplicação de técnicas de filtração em membranas e resinas de troca iônica, após separação de sólidos por coagulação/filtração pode resultar em águas com características adequadas para reuso em torres de resfriamento e caldeiras.

Estes resultados, aliados à possibilidade de redução de custos operacionais na indústria em questão, motivaram a realização deste estudo. Os dados levantados neste trabalho podem servir de base para a aplicação do reuso de efluente tratado nesta indústria.

As tecnologias, procedimentos e materiais empregados nas etapas do tratamento terciário proposto foram selecionados conforme a disponibilidade e aplicação das mesmas na indústria em estudo e também os materiais e apoio técnico por parte da indústria, uma vez que estas tecnologias já fazem parte de processos atuais da indústria. No capítulo de sugestões são citadas outras tecnologias que também podem ser avaliadas no processo de reuso de efluente tratado que através de uma avaliação dos resultados analíticos e financeiros pode ser viável sua aplicação.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve os materiais e métodos empregados no desenvolvimento do estudo. Inicialmente, são apresentadas as metodologias de amostragem e caracterização do efluente tratado da ETE. Em seguida, é feita uma descrição do tratamento do efluente da indústria e, finalmente, são apresentados os testes de bancada realizados com o intuito de selecionar a seqüência de equipamentos/processos mais adequada para o tratamento terciário do efluente visando ao reuso.

3.1 Caracterização do Efluente Gerado na Indústria de Refrigerantes

Durante um período de cinco dias (oito horas por dia) o efluente (bruto) gerado na indústria foi coletado em amostras compostas em um recipiente de 20 litros, armazenado sob refrigeração para, em seguida, ser analisado.

O efluente industrial foi caracterizado com relação aos parâmetros Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Sólidos Suspensos Totais (SST), Sólidos Sedimentáveis (SS), Teor de óleos e graxas (O&G), pH e Temperatura, visando ao projeto da ETE instalada na indústria, e descrita a seguir.

3.2 A Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) da Indústria

O Sistema de Tratamento de Efluentes foi implantado para garantir que o efluente final fosse descartado no curso d'água ou no sistema de tratamento municipal somente após apresentar características que atendam às legislações vigentes e que não impactem de forma negativa o meio ambiente. O Sistema de Tratamento de Efluentes usado pela referida indústria é misto, ou seja, anaeróbio e aeróbio, conforme mostra o fluxograma da Figura 3.1.

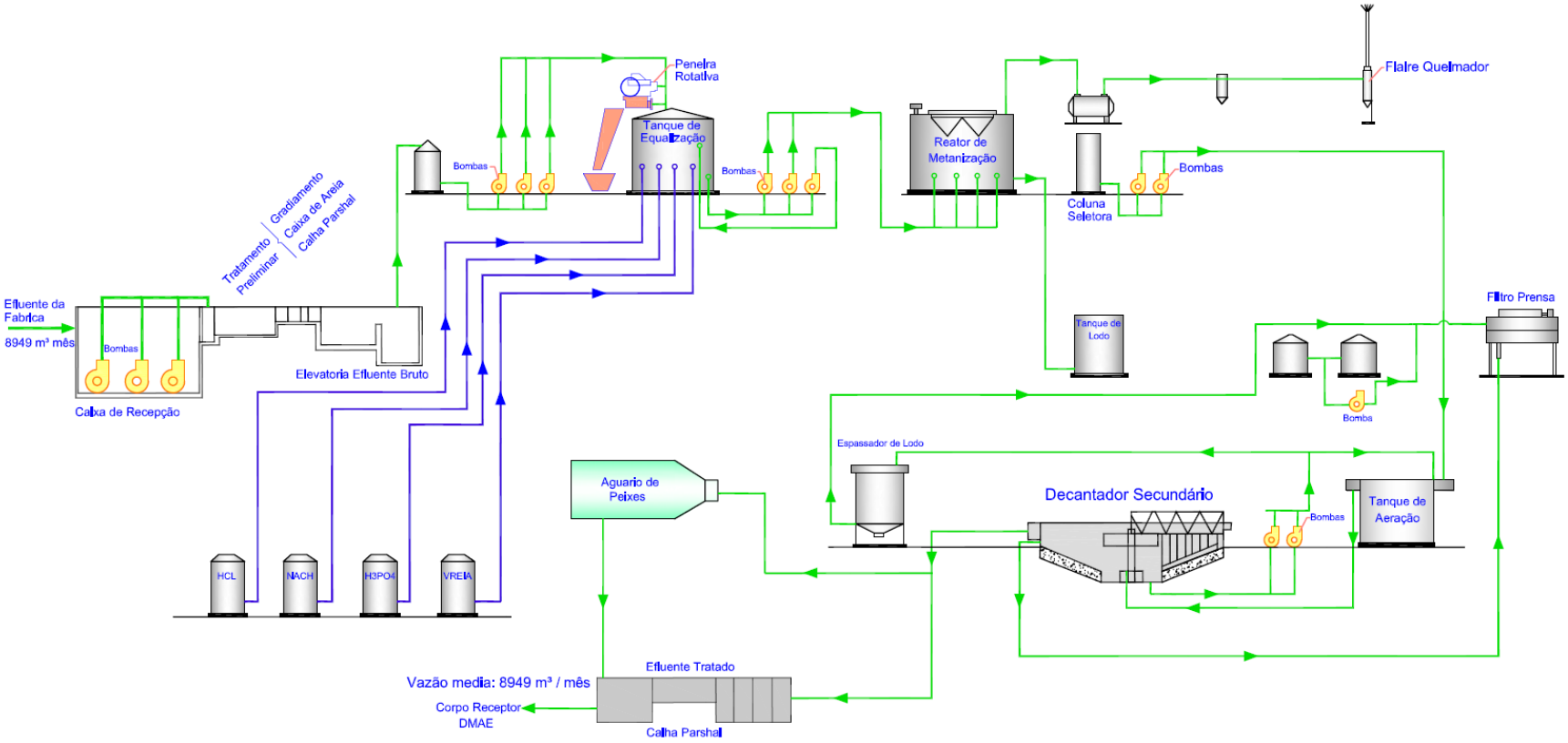

Figura 3.1 – Fluxograma da ETE da Indústria de Refrigerantes.

Todos os efluentes líquidos provenientes da área industrial, da etapa de engarrafamento e dos esgotos sanitários/refeitório são recebidos na ETE em uma caixa de recepção, mostrada na Figura 3.2, por apresentarem características semelhantes.

Figura 3.2 - Caixa de Recepção da ETE.

Em seguida, o efluente atravessa o sistema de gradeamento/caixa de areia (Figura 3.3) para remoção de sólidos grosseiros e areia. A vazão do efluente é medida através de uma calha Parshall. Na etapa de gradeamento são retidos os mais diversos tipos de materiais, que são coletados manualmente com o auxílio de um rastelo, colocados em recipientes especiais e enviados ao aterro sanitário municipal. Antes da entrada do efluente no tanque de equalização, este ainda é submetido a um separador de óleos e graxas e enviado a uma elevatória de efluente bruto. O efluente é então bombeado para uma peneira rotativa, para remoção de sólidos mais finos ainda remanescentes e, por gravidade, chega ao tanque de equalização, para homogeneização e correção de pH e temperatura, quando necessário.

Figura 3.3 - Sistema de Gradeamento/Caixa de Areia da ETE.

O tanque de equalização é fechado, possui agitação mecânica e opera em nível variável, absorvendo vazões de pico da indústria e evitando uma sobrecarga nos reatores biológicos. No dimensionamento deste tanque foram levadas em consideração as variações que ocorrem na composição do efluente durante o período de trabalho, sendo o pH o parâmetro que apresenta maior flutuação. Além da correção do pH com hidróxido de sódio ou ácido clorídrico, neste tanque também são adicionados nutrientes (N e P).

Do tanque de equalização, o efluente é enviado para o reator anaeróbio do tipo fluxo ascendente e manta de lodo (UASB), sendo a alimentação do efluente neste reator feita em quatro pontos diferentes de sua base. O funcionamento desta etapa do tratamento se dá através da passagem do efluente por um leito expandido de um consórcio de microrganismos anaeróbios. Na parte superior do reator existe um separador mecânico trifásico, denominado Separador de Placas Paralelas de Fluxo Cruzado, ou seja, várias placas projetadas para se obter a máxima eficiência de separação na mistura sólido/gás/líquido. O biogás gerado é queimado em um *flare*.

O efluente final do sistema anaeróbio é enviado para uma torre de gaseificadora, de onde é bombeado para o sistema de polimento composto por um reator aeróbio e um decantador secundário, ilustrados nas Figuras 3.4 e 3.5. O sistema de tratamento aeróbio é constituído por um tanque circular de aço carbono com sistema de injeção de ar por

serpentinas dispostas no fundo do tanque, alimentadas com ar comprimido através de compressores *Roots* (Figura 3.4). Este reator permite a adequação do efluente final da indústria às leis ambientais em vigência, pois sem esta etapa os limites exigidos não seriam atingidos.

Antes do descarte na rede municipal de esgoto, os sólidos remanescentes do tratamento biológico são sedimentados em um decantador secundário de seção circular (Figura 3.5) e o efluente tratado é descartado na rede municipal de esgoto.

Figura 3.4 - Tanque de Aeração do Sistema Aeróbio.

Figura 3.5 - Decantador Secundário da ETE.

O efluente final, antes de ser enviado à rede de esgoto, é caracterizado através de análises físico-químicas, visando a certificação de sua qualidade e atendimento à legislação. A caixa de saída do efluente final está ilustrada na Figura 3.6.

Figura 3.6 - Caixa de Saída do Efluente Final da ETE.

3.3 Caracterização do Efluente Tratado da ETE

O efluente tratado na ETE foi monitorado no período de janeiro a junho de 2008, conforme metodologia recomendada pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1998). Na caracterização, foram empregadas amostragens compostas em um período de cinco dias durante oito horas, perfazendo um total de 40 horas de monitoramento.

No decorrer do monitoramento, a ETE se manteve em operação por mais de duas horas ininterruptas, para dar início à realização da primeira coleta do efluente final tratado e dar seqüência no plano de coleta das amostras.

Na amostragem do efluente final da ETE empregou-se um recipiente de 20 litros para homogeneização do mesmo, o qual foi mantido refrigerado de modo a preservar as características das amostras coletadas. Foram realizadas 8 coletas, com intervalos de 1 hora. O volume de efluente coletado era constante para cada amostragem. Inicialmente, a válvula do ponto de coleta do efluente tratado era aberta durante 1 minuto (para descartar o efluente retido na tubulação) Em seguida, procedia-se a coleta e o armazenamento do efluente. Para eliminar interferências nas análises, o recipiente usado na coleta era, inicialmente, submetido a uma tríplice lavagem com o próprio efluente.

Ao final do processo de amostragem, agitou-se o recipiente para homogeneização e, em seguida, foram retiradas alíquotas para os ensaios de caracterização. Caracterizou-se o efluente amostrado empregando-se o seguinte procedimento:

- Homogeneizou-se o efluente coletado;
- Retirou-se uma amostra a qual foi preservada de acordo com as orientações do laboratório Bioagri Ambiental (onde foram realizadas as análises);
- As amostras foram analisadas em termos de: DQO, SST, DBO, SS, Óleos e graxas, pH, Temperatura e outros parâmetros citados na Tabela 4.2 do Capítulo 4.

Após a caracterização, os valores dos parâmetros avaliados foram comparados com os desejados, visando aos reusos propostos, conforme apresentado no Capítulo 2.

Em seguida, foram realizados testes experimentais e, empregando-se um tratamento seqüencial, analisou-se a viabilidade de cada sistema testado.

Os primeiros experimentos foram os ensaios de filtração, empregando-se dois tipos de filtros: *bag* e de areia, conforme o procedimento descrito a seguir.

3.4 Testes de Filtração

Mediante as características do efluente tratado da indústria em questão e a proposta de usá-lo como fonte de abastecimento das torres de resfriamento e das caldeiras, inicialmente empregou-se a filtração como forma de remoção de turbidez e sólidos suspensos. Nos ensaios de bancada foram utilizados filtros *bag* de porosidade 25 e 5 μm, cujas especificações estão contidas na Tabela 3.1, e também filtro de areia empregando-se sílica de baixa granulometria, conforme as características indicadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.1 - Características físicas e dimensões dos filtros *bag* de 5 e 25 μm.

Elemento filtrante modelo	**POXL5 P01E-WW**	**POXL25 P02E**
Material	Feltro agulhado em polipropileno	
Dimensões	18 cm (diâmetro) x 41 cm (comprimento)	18 cm (diâmetro) x 81 cm (comprimento)
Micragem nominal	5 μm	25 μm
Permeabilidade ao ar	200 a 300 L/dm^2.min	400 a 600 L/dm^2.min
Máxima temperatura de operação	90°C	
Resistência termoquímica	Meio aquoso, solventes alifáticos, sistemas alcalinos e ácidos	
Resistência à tração transversal	900 N/5cm (min.)	700 N/5cm (min.)
Resistência à tração longitudinal	700 N/5cm (máx.)	530 N/5cm (máx.)

Fonte: Eaton Ltda.

Tabela 3.2 – Características físicas e dimensões do filtro de areia.

Camada	**Diâmetro das partículas**	**Altura do leito (m)**
Filtrante	0,45 - 0,55 mm	0,30
	3,36 – 1,19 mm	0,15
Torpedo	¼” – 1/8”	0,10
Seixos rolados	½”- ¼”	0,10
	¾” - ½”	0,10
	1 ½” – ¾”	0,15

Fonte: Manual de Especificações Técnicas – Teo Tokus Indústria e Comércio Ltda Américo Brasiliense - SP.

Filtração com Filtro *Bag*

O filtro *bag* foi um dos equipamentos empregados como alternativa para a remoção da turbidez e dos sólidos suspensos. A coleta das amostras para estes testes foi realizada por amostragem composta, conforme descrito no item 3.3. A amostra era filtrada no filtro com porosidade de 25 μm e, posteriormente, no de 5 μm, conforme ilustrado no esquema da Figura 3.7. O líquido filtrado era coletado em outro recipiente e enviado para análises de pH, turbidez, Sólidos Dissolvidos Totais e Sólidos Suspensos Totais.

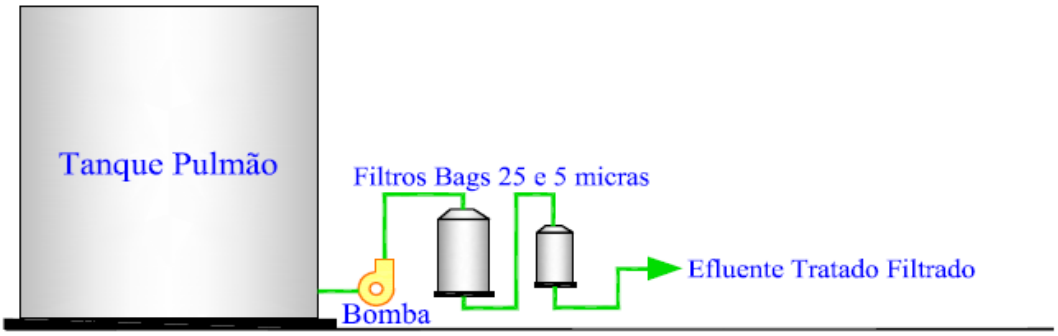

Figura 3.7 – Sistema de Filtração com Filtro *Bag*.

Filtração com Filtro de Areia

Neste experimento o efluente também era coletado empregando-se amostragem composta. Em seguida, era caracterizado e submetido ao teste de filtração, conforme ilustra a Figura 3.8.

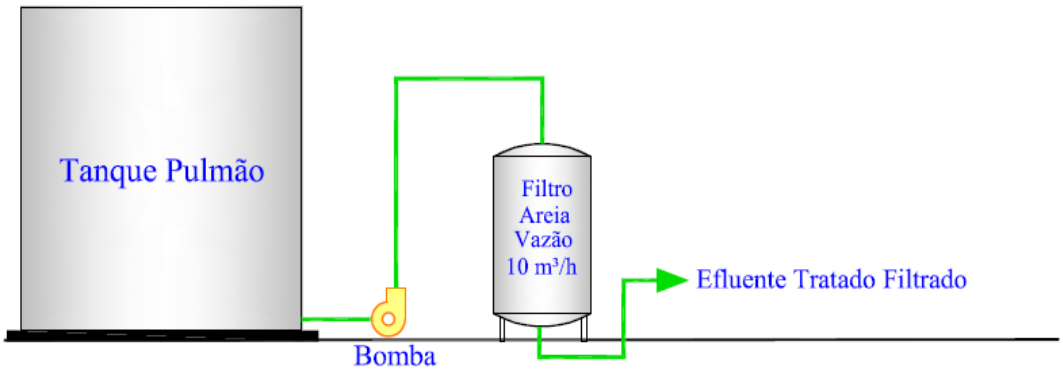

Figura 3.8 – Sistema de Filtração em Filtro de Areia.

O filtrado resultante era caracterizado empregando-se os seguintes parâmetros: Sólidos Dissolvidos Totais, Sólidos Suspensos Totais, Turbidez e pH.

Analisando-se os resultados obtidos nos testes de filtração empregando-se filtros *bag* e filtro de areia, decidiu-se realizar testes de coagulação/floculação, preliminarmente à filtração, visando a remoção de sólidos suspensos, turbidez e cor ainda remanescentes.

3.5 Testes de Coagulação/Floculação

Os testes de coagulação/floculação foram realizados no laboratório da indústria de refrigerantes empregando-se um *Jar Test* de bancada (especificação - Quimis – Modelo Q305D6 44x94x25 com regulador eletrônico de velocidade entre 15 e 180 rpm e gradiente de velocidade aproximadamente entre 5 e 600 s^{-1}), conforme ilustrado na Figura 3.9.

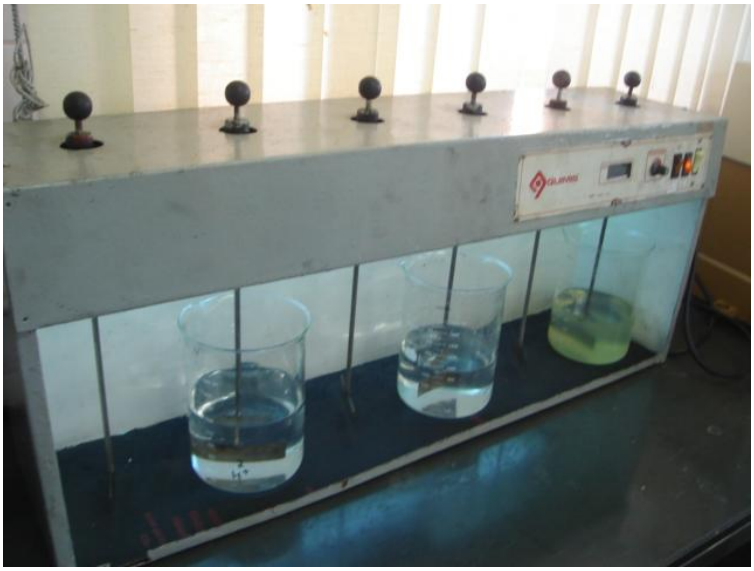

Figura 3.9 – Ensaio em *Jar Test*.

O agente coagulante utilizado foi o policloreto de alumínio – PAC (15% v/v – Panfloc-AB). A velocidade de rotação e o tempo de mistura utilizados nos testes foram adotados segundo valores recomendados pela CETESB (1987). O tempo e a velocidade máxima (início do teste) e mínima foram de 5 minutos e 60 rpm e 20 minutos e 30 rpm, respectivamente. Após as etapas de mistura rápida e lenta, permitiu-se que os flocos formados sedimentassem por 20 minutos. Em seguida, retirou-se alíquota do sobrenadante para análises de pH, turbidez, sólidos suspensos e cor.

Na primeira etapa do teste estudou-se o valor do pH ótimo para a coagulação/floculação, e na segunda etapa determinou-se a melhor dosagem de PAC a ser utilizada no *Jar Test* no valor de pH estabelecido na primeira etapa.

3.5.1 Determinação do pH Ótimo para a Coagulação/Floculação

Para a determinação do pH ótimo de coagulação/floculação utilizou-se 6 *beckers* contendo 1,0 litro de amostra. Os valores de pH das amostras nos *beckers* foram variados no intervalo de 5 a 10, mantendo-se a concentração do agente coagulante (PAC 15% v/v). Para atingir estes valores foi adicionada uma solução de ácido sulfúrico (1,0 N) à amostra coletada, medindo-se o pH.

Avaliou-se este teste monitorando-se a turbidez, cor aparente e sólidos suspensos totais do efluente e do clarificado obtido ao término do ensaio.

Os testes descritos acima foram repetidos até se obter o valor do pH ótimo para a coagulação/floculação na concentração (12 mL de solução de PAC 15% v/v) do agente coagulante empregada. Em seguida, neste valor de pH estabelecido, foram realizados ensaios para se determinar a melhor dosagem do agente coagulante.

3.5.2 Determinação da Dosagem do Agente Coagulante

Após definir o valor de pH no ensaio anterior, em cada um dos seis *beckers* do equipamento foram colocados 1L de amostra neste valor de pH. Em seguida, variou-se a dosagem do agente coagulante entre 7 e 12 mL/L (1323 a 2268 mg/L de efluente). Os mesmos procedimentos de mistura descritos no item 3.5 foram adotados. Avaliou-se a eficiência do agente coagulante em termos também de turbidez, cor aparente e sólidos suspensos totais. Depois de estabelecidos os valores de pH e dosagem do agente coagulante, os valores dos parâmetros analisados foram comparados com os valores de referência. Nesta comparação observou-se que os valores de sólidos suspensos totais e turbidez ainda estavam acima dos valores de referência.

Assim, testou-se o processo de filtração após a etapa de coagulação/floculação, descrito a seguir.

3.6 Testes de Filtração após a Coagulação/Floculação

A coleta das amostras para os referidos testes foi realizada por amostragem composta, conforme descrito no item 3.3. Os testes de coagulação/floculação foram realizados conforme descrito no item 3.5. O efluente, após este ensaio, foi submetido ao processo de filtração em filtros *bag* e de areia, conforme descrito no item 3.4. Este procedimento é ilustrado nas Figuras 3.10 e 3.11.

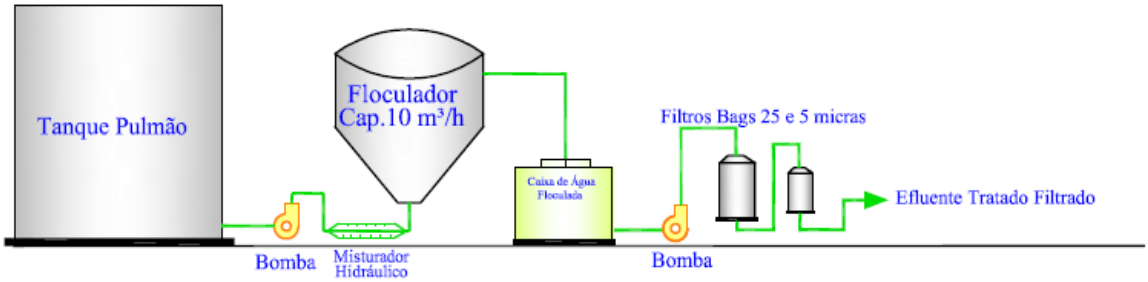

Figura 3.10 – Sistema de Coagulação/Floculação/Filtro *Bag*.

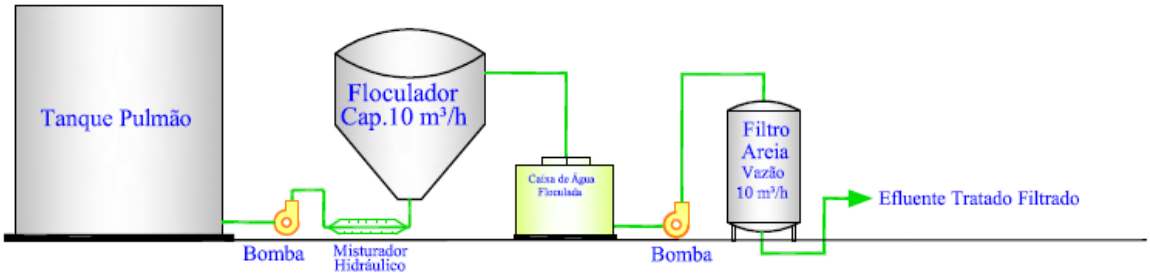

Figura 3.11 – Sistema de Coagulação/Floculação/Filtro de Areia.

Analisando-se os parâmetros monitorados nos filtrados obtidos nas seqüências descritas no item 3.6, observou-se que os parâmetros ainda permaneciam acima dos valores de referência para os reusos propostos. Assim, na seqüência, avaliou-se o processo de resinas de troca iônica para a remoção de sólidos dissolvidos totais e turbidez ainda remanescentes, como descrito a seguir.

3.7 Testes com Resinas de Troca Iônica

Os testes com resinas de troca iônica foram conduzidos em colunas de bancada, como apresentado na Figura 3.12.

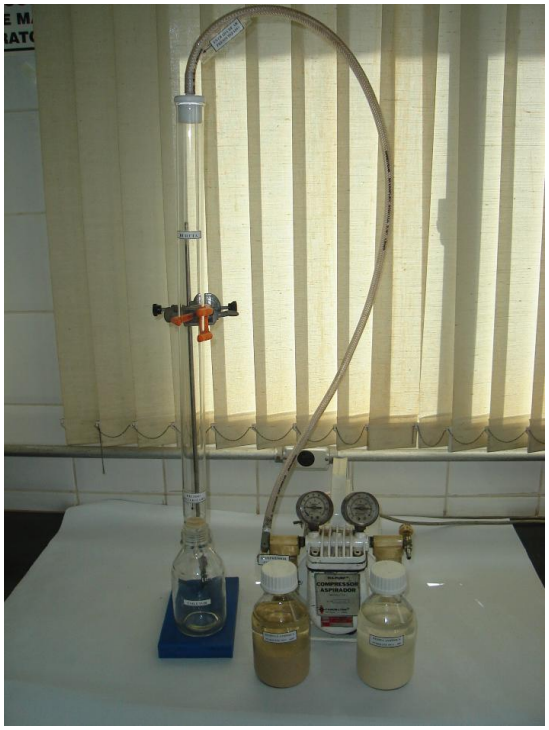

Figura 3.12 – Equipamento Experimental de Resinas de Troca Iônica.

As resinas foram selecionadas de acordo com as características do clarificado obtido e da qualidade final desejada para o reuso.

As resinas utilizadas nos testes, ilustradas na Figura 3.13, foram adquiridas junto à empresa *Purolite do Brasil,* e suas características físico-químicas estão contidas na Tabela 3.3.

(A) (B)

Figura 3.13 – Resina Purolite Aniônica PFA-300 (A) e Resina Purolite Catiônica SST-60H (B).

Tabela 3.3 - Características físico-químicas das resinas Catiônica e Aniônica empregadas.

Características	**Resina Catiônica Purolite SST60 H**	**Resina Aniônica Purolite PFA-300**
Estrutura da matriz do polímero	Base de poliestireno e Divinilbenzeno, Tipo Gel	Base de poliestireno e Divinilbenzeno, Tipo Gel
Aspecto físico	Partículas esféricas	Partículas esféricas de cor âmbar
Grupo funcional	Ácido Sulfônico	Quaternário de Amônio tipo II
Forma iônica original	H^+	Cloreto, Cl^-
Diâmetro médio das partículas	0,60 - 0,85 mm	0,52 - 0,62 mm
Temperatura limite de operação (forma H^+)	120ºC	35ºC
Temperatura limite de operação (forma Na^+)	140ºC	85ºC

Fonte: Purolite do Brasil Ltda.

Antes da utilização das resinas, as mesmas eram ativadas. Para isso, foram colocados 250 mL de cada resina em dois *beckers* distintos. Em seguida, a ativação de cada uma foi conduzida conforme descrito a seguir.

Resina catiônica Purolite SST60H

A resina catiônica foi lavada com água desmineralizada várias vezes, até que o líquido descartado apresentasse aspecto límpido. Logo após, a resina foi acondicionada na coluna, efetuando-se lavagens com água desmineralizada em sentido descendente, até que a água remanescente apresentasse valor de pH entre 2 e 4.

Resina aniônica Purolite PFA300

A resina aniônica também foi lavada com água desmineralizada até que o líquido descartado apresentasse aspecto límpido. Posteriormente, a resina foi lavada com solução de NaOH 4% (m/v) durante aproximadamente 30 minutos. Após a lavagem com soda, a resina foi acondicionada na coluna, recebendo água desmineralizada em sentido descendente e monitorando-se a condutividade da água remanescente, até que a mesma se mantivesse entre os valores de 300 e 500 μS/cm.

3.7.1 Colunas de Troca Iônica

O equipamento utilizado nos experimentos consistia em uma bureta com ¾” de diâmetro interno e 60 cm de altura, cuja base era composta por vidro sinterizado para evitar a perda das resinas. Foi também acoplado ao topo da bureta, uma mangueira (devidamente vedada com uma rolha de tecnil) ligada a um pequeno compressor, visando exercer um deslocamento positivo de ar para facilitar o escoamento do líquido através das resinas.

Após a montagem do equipamento e ativação das resinas, foram realizados os testes com os líquidos clarificados das seqüências coagulação/floculação/filtração em *bag* e coagulação/floculação/filtração em areia, conforme ilustram as Figuras 3.14 e 3.15.

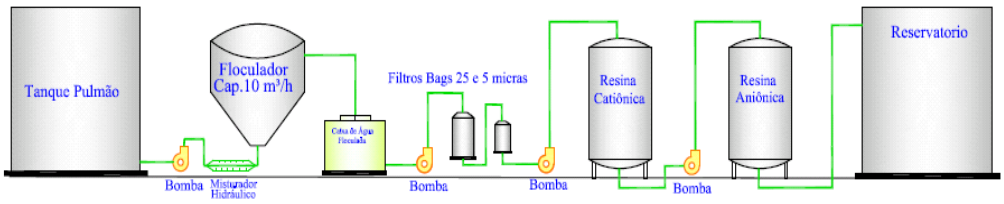

Figura 3.14 – Sistema de Coagulação/Floculação/Filtros *Bag*/Resinas.

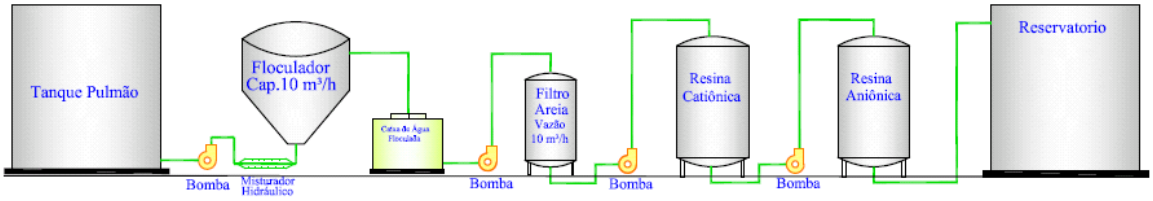

Figura 3.15 – Sistema de Coagulação/Floculação/Filtro de Areia/Resinas.

Segundo recomendação do fabricante, a vazão horária de líquido foi mantida entre 8 e 40 vezes o volume do leito de resina. Como o equipamento possuía um leito de 250 mL de resina, foi mantida uma vazão de 6 L/h. O tempo gasto na passagem de 1,0 L de efluente pela resina catiônica foi de 8 minutos e pela aniônica, de 10 minutos. A realização dos testes se deu em batelada, com fluxo descendente, ou seja, o efluente era alimentado na bureta, e esta era vedada para que ocorresse uma pressurização positiva e o líquido percolasse o leito. Foram realizados os testes com a resina catiônica Purolite SST60H e a resina aniônica Purolite PF A300.

O líquido percolado foi avaliado com relação a todos os parâmetros apresentados nas Tabelas 2.9 e 2.11 (Alcalinidade Total, Alcalinidade ao Bicarbonato, Alumínio, Cálcio, Cloretos, Cobre, Condutividade, COT, DBO, DQO, Dureza, Ferro, Fosfatos, Magnésio, Manganês, Nitrogênio Amoniacal, pH, SDT, Sílica, SST, Sulfatos, Sulfetos, Surfactantes, Turbidez, Óleos & Graxas e Tetracloreto de Carbono). Estes valores foram novamente comparados com os de referência para o reuso proposto.

Avaliou-se a eficiência das colunas de troca iônica monitorando-se os seguintes parâmetros: turbidez, sólidos suspensos e sólidos dissolvidos antes e após a passagem pelas colunas. Após esta análise foi elaborada uma estimativa econômica preliminar dos processos combinados selecionados para o tratamento terciário, ou seja, coagulação/floculação/filtração/resinas de troca iônica.

Resumidamente, com o objetivo de obter a remoção de turbidez, sólidos dissolvidos e sólidos suspensos desejada, como já descrito, foram empregadas algumas combinações de processos avaliando-se a capacidade de remoção de cada sistema alternativo do tratamento terciário. A Tabela 3.4 sumariza as combinações que foram avaliadas para o efluente da ETE da indústria de refrigerantes visando ao seu reuso.

Tabela 3.4 - Sistemas alternativos avaliados para o tratamento terciário visando ao reuso.

Experimentos	**Processos avaliados**
1	Filtro *bag*
2	Filtro de areia
3	Coagulação/Floculação/Filtro *bag*
4	Coagulação/Floculação/Filtro de areia
5	Coagulação/Floculação/Filtro *bag*/Resinas de troca iônica
6	Coagulação/Floculação/Filtro de areia/Resinas de troca iônica

3.8 Métodos Analíticos

Os métodos analíticos empregados foram conduzidos de acordo com o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1998), à exceção da

análise de hidrocarbonetos. Os métodos analíticos empregados são apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Métodos analíticos empregados.

Parâmetro	Método	Referência
Alcalinidade Total e ao Bicarbonato	2320B - Titulometria	*Standard Methods* (APHA, 1998)
Alumínio, Cálcio	3120B - plasma indutivamente acoplado	*Standard Methods* (APHA, 1998)
Cloretos	4500CIB – Titulação	*Standard Methods* (APHA, 1998)
Carbono Orgânico Total (COT)	5310B - combustão a alta temperatura	*Standard Methods* (APHA, 1998)
DBO_5	5210B	*Standard Methods* (APHA, 1998)
DQO	5210D	*Standard Methods* (APHA, 1998)
Dureza	2340C – Titulação com EDTA	*Standard Methods* (APHA, 1998)
Ferro	3500FeB – método da fenantrolina	*Standard Methods* (APHA, 1998)
Fosfatos	4500P-E - colorimétrico por redução com ácido ascórbico	*Standard Methods* (APHA, 1998)
Hidrocarbonetos	5041A - extração com hexano	EPA (1993)
Magnésio, Manganês	3120B – espectrometria de massa	*Standard Methods* (APHA, 1998)
Surfactantes	5540C - azul de metileno	*Standard Methods* (APHA, 1998)
Nitrogênio Amoniacal	$4500NH_3$-F	*Standard Methods* (APHA, 1998)
pH	pH-metro (Quimis), utilizando-se para padronização - soluções tampão de pH 4,0 e 7,0)	
Sílica	$4500SiO_2C$	*Standard Methods* (APHA, 1998)
Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)	2540C – gravimetria	*Standard Methods* (APHA, 1998)
Sólidos Suspensos Totais (SST)	2540D – gravimetria	*Standard Methods* (APHA, 1998)
Sulfatos	4500SO42E - turbidimetria	*Standard Methods* (APHA, 1998)
Sulfetos	4500S2D - azul de metileno	*Standard Methods* (APHA, 1998)
Turbidez	turbidímetro (HACH 2100P)	

Os experimentos que compõem esta pesquisa foram então realizados conforme a metodologia descrita neste capítulo. O capítulo seguinte expõe os resultados obtidos nos experimentos, bem como os comentários e discussões sobre os mesmos

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos neste trabalho. Inicialmente, apresenta-se a caracterização do efluente industrial e do efluente da ETE. Comparando-se a caracterização do efluente da ETE com a qualidade da água para reuso, foram avaliados os processos de filtração, coagulação/floculação e resinas de troca iônica, bem como um arranjo seqüencial com os mesmos. Após selecionar a seqüência de tratamento, foi elaborada uma estimativa preliminar de custos para avaliar a viabilidade da proposta de tratamento terciário do efluente.

4.1 Caracterização do Efluente da Indústria de Refrigerantes

Nas indústrias de refrigerantes, a água é utilizada nos proporcionadores de bebidas, na rinsagem de garrafas pet e latas, em lavadoras de garrafas retornáveis, na limpeza dos pisos e na higienização (limpeza e sanitização) dos equipamentos. Além das atividades diretamente ligadas ao processo produtivo, as indústrias também utilizam água para fins sanitários, nas cozinhas e refeitórios para fins potáveis, na irrigação de áreas verdes, em equipamentos de segurança como, por exemplo, lava-olhos e sistemas de combate a incêndios (hidrantes e sistemas fixos).

Em função destas atividades, pode-se esperar no efluente final destas indústrias, resíduos provenientes das lavagens de garrafas retornáveis, açúcares e produtos utilizados na higienização (limpeza e sanitização) dos equipamentos, como hipoclorito de sódio, detergente alcalino e ácido peracético.

Entre os maiores fabricantes de refrigerantes do Brasil (Coca-Cola e AmBev), o consumo de água por litro de refrigerante pode variar de 1,7 a 2,2 litros (htt://www.financialweb.com.br/noticias/índex.asp?cod=5003 – Reportagem Gazeta Mercantil 29/07/2008 – Empresas já se preocupam com a água – parte 2). Alguns procedimentos podem ser implantados para se obter a redução de volume de efluente como, por exemplo, o reuso da água de processo. No caso da indústria de refrigerantes, pode-se adotar o reaproveitamento da água utilizada na contra-lavagem dos filtros e no enxágüe final das garrafas pet e latas antes do processo de produção.

Baseado nestas considerações, o efluente da indústria estudada foi caracterizado em termos de: DQO, DBO, SST, SS, O&G, pH e Temperatura, cujos valores máximos e mínimos estão exibidos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Características do efluente da indústria de refrigerantes.

Parâmetros	**Características**
DQO	4000-6000 mg/L
DBO	2000-3500 mg/L
SST	300-400 mg/L
SS	< 15 mL/L
O&G	< 50 mg/L
pH	5-11
Temperatura	21-42ºC

(amostragem composta durante 5 dias)

4.2 Caracterização do Efluente da Estação de Tratamento

Como este trabalho foi conduzido empregando-se o efluente final da ETE, inicialmente o mesmo foi caracterizado segundo o procedimento descrito no item 3.3. Os valores médios dos parâmetros monitorados estão mostrados na Tabela 4.2. Esta tabela compara também os valores dos parâmetros monitorados com os padrões recomendados na literatura específica (METCALF & EDDY, 2003) para o uso de água em caldeiras e torres de resfriamento. Estes valores padrão foram estabelecidos nos limites mais restritos encontrados na literatura, exceto para os valores de pH e de condutividade, para os quais foram empregados os recomendados por Crook (1996) e Lenntech (1991), respectivamente.

Para o uso em caldeiras foram priorizados os padrões de qualidade requeridos antes da adição de produtos químicos (anti-incrustantes, seqüestrantes de oxigênio e corretivos de pH). Portanto, neste trabalho, foram descartados, a princípio, parâmetros como oxigênio dissolvido e concentração de sulfito.

Analisando-se a caracterização do efluente final da ETE (Tabela 4.2), pôde-se observar que alguns parâmetros do efluente visando a sua reutilização em torres de resfriamento (Alcalinidade Total, Alcalinidade ao Bicarbonato, Nitrogênio Amoniacal e Sólidos Dissolvidos Totais - SDT) e em caldeiras (Alcalinidade Total, Alcalinidade ao

Bicarbonato, DQO, Nitrogênio Amoniacal, SDT e Sólidos Suspensos Totais - SST) ultrapassavam os limites máximos selecionados.

Tabela 4.2 – Caracterização do efluente final da ETE e padrões selecionados para uso em torres de resfriamento e caldeiras.

Parâmetros	Resultados	Padrão Resfriamento	Padrão Caldeira
Alcalinidade ao Bicarbonato	850	24	170
Alcalinidade total	850	350	350
Alumínio	<0,1	0,1	5
Cálcio	<0,5	50	--
Cloretos	76,9	300	--
Condutividade (µS/cm)	1827	--	3500
COT	8,5	200	--
DBO	<6	25	--
DQO	45	75	5
Dureza	<5	300	350
Ferro	0,2	0,5	1
Fosfatos	3	4	--
Magnésio	<0,5	0,5	--
Manganês	<0,01	0,5	--
Nitrogênio amoniacal	3,7	1	0,1
Óleos e graxas	0,8	--	1
Oxigênio Dissolvido	5,4	--	--
pH	7,3	7,0 – 8,5	7,0 – 10,0
SDT	1109	500	700
Sílica	5	50	30
SST	13	100	10
Sulfatos	0,8	200	--
Sulfetos	0,011	10	--
Surfactantes	<0,1	1	--
Tetracloreto de Carbono	<1		--
Turbidez (NTU)	9,2	50	--
Cobre	< 1	--	0,5
Dureza Total	< 5	--	350

Todos os valores expressos em mg/L, salvo quando indicado.
Fonte: Adaptado de Mancuso & Santos (2003), Mierzwa (2002), Metcalf& Eddy (2003), Eble & Feathers (1992) *apud* Perez(2003), Crook (1996) e Lenntech (1991).

Assim, conforme descrito no Capítulo 3, foram avaliados alguns processos ou mesmo o acoplamento de alguns deles visando ao tratamento terciário do efluente da ETE,

e conseqüentemente a sua adequação para os reusos propostos. Os itens a seguir apresentam os resultados obtidos neste estudo e, paralelamente, uma comparação com o desejado.

4.3 Testes de Filtração

Este item apresenta os resultados obtidos nos testes de filtração empregando-se os filtros *bag* e de areia.

A Tabela 4.3 compara os resultados referentes às etapas de filtração em filtros *bag* e em filtro de areia com os resultados da caracterização do efluente final da ETE com relação aos parâmetros: pH, SDT, SST e Turbidez.

Tabela 4.3 – Comparação dos valores dos parâmetros avaliados antes e após a filtração em filtros *bag* e de areia.

Amostras	pH	SDT (mg/L)	Remoção (%)	SST (mg/L)	Remoção (%)	Turbidez (NTU)	Remoção (%)
Efluente Tratado	7,3	1109	--	13	--	9,2	--
Filtrado dos filtros *bag*	7,2	1005	9,4	8	38,5	7,5	18,5
Filtrado do filtro de areia	7,2	859	22,5	2	84,5	2,6	71,7

Analisando-se esta Tabela pode-se notar que praticamente não ocorreu remoção de sólidos dissolvidos (9,4%) no emprego dos filtros *bag*, obtendo-se remoção considerável apenas de SST (38,5%) e de Turbidez (18,5%), não atendendo aos valores padrões de SDT e de Turbidez desejados neste estudo.

Observa-se que as remoções conseguidas com o filtro de areia foram superiores às obtidas com os filtros *bag*, porém o valor de SDT ainda continuou 18% acima do valor de referência para o reuso em torres de resfriamento. No caso de reuso em caldeiras, o filtrado obtido no filtro de areia atendeu aos padrões relativos aos parâmetros SDT, SST e Turbidez. Entretanto, como a proposta deste estudo é o reuso tanto em caldeiras como em torres de resfriamento, optou-se por testar outros processos que também permitissem a remoção destes parâmetros (SDT, SST e Turbidez), visando obter opções de tratamento do

efluente da ETE para o estudo de viabilidade econômica. Para isso, foi testado o processo de coagulação/filtração, cujos resultados são apresentados a seguir.

4.4 Coagulação/Floculação

Apesar dos valores de SST e turbidez apresentados na Tabela 4.2 serem baixos e estarem dentro dos limites recomendados (com exceção dos SST para água de caldeira), a presença de materiais suspensos era visível no efluente. Certamente, estes materiais, se não removidos, resultariam em problemas operacionais nas unidades subseqüentes de tratamento ou de reuso.

Na coagulação-floculação foram monitorados três parâmetros: cor, SST e turbidez, cujos resultados estão mostrados nas Tabelas 4.4 a 4.6 e nas Figuras 4.1 a 4.3.

4.4.1 pH Ótimo para Coagulação/Floculação

Os resultados dos ensaios para a determinação do valor do pH na coagulação/floculação estão apresentados na Tabela 4.4. A Figura 4.1 mostra a influência do pH na coagulação/floculação através dos valores de Turbidez, SST, SDT e Cor aparente obtidos.

Tabela 4.4 – Valores dos parâmetros monitorados no processo de coagulação/floculação - $5,0 \leq pH \leq 10,0$ - (conc.PAC 2268 mg/L).

Amostras	pH_i	pH_f	Cor (Pt-Co)	Remoção (%)	SST (mg/L)	Remoção (%)	Turbidez (NTU)	Remoção (%)
Efluente tratado	7,3	7,3	202	--	24	--	11	--
Clarificado da coagulação/ Floculação	5,0	4,9	32	84,2	1	95,8	1,5	85,8
	6,0	5,9	27	86,6	1	95,8	1,0	90,6
	7,0	6,7	35	82,7	2	91,7	1,0	90,6
	8,0	7,6	45	77,7	4	83,3	1,5	85,8
	9,0	8,4	78	61,4	7	70,8	3,3	68,9
	10,0	9,5	96	52,5	8	66,7	3,9	63,2

i = inicial, f = final.

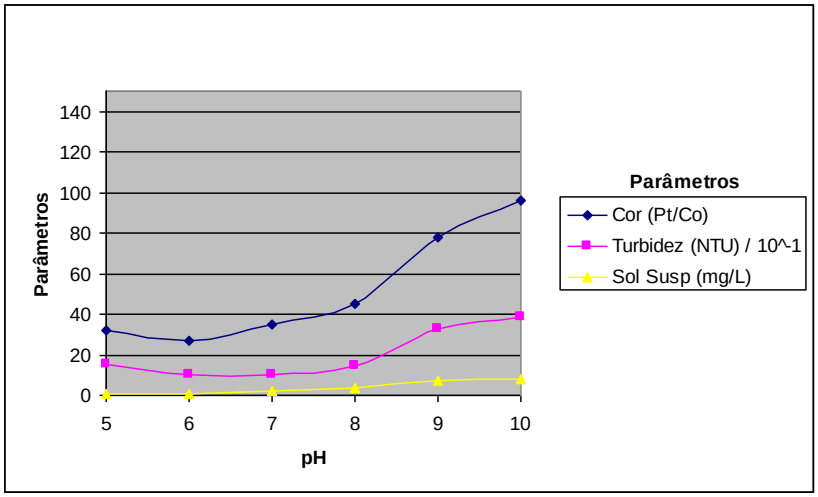

Figura 4.1 – Influência do pH na Coagulação/Floculação do Efluente da ETE.

Verificou-se que a melhor condição de coagulação/floculação ocorreu entre os valores de pH 6,0 e 7,0, para os quais se obteve uma maior remoção dos parâmetros analisados. Com o objetivo de avaliar o valor exato do pH, foi realizado o mesmo teste variando-se o pH entre 6,0 e 7,0. Os resultados podem ser vistos na Tabela 4.5 e na Figura 4.2.

Tabela 4.5 – Valores dos parâmetros monitorados no processo de coagulação/floculação na faixa de 6,0 ≤ pH ≤7,0.

Amostras	**pH_i**	**pH_f**	**Cor (Pt-Co)**	**Remoção (%)**	**SST (mg/L)**	**Remoção (%)**	**Turbidez (NTU)**	**Remoção (%)**
Efluente tratado	7,7	7,7	185	--	22	--	9	--
Clarificado da coagulação/ Floculação	6,0	5,8	30	83,8	2	90,9	0,15	98,3
	6,2	5,9	37	80,0	3	86,4	0,19	97,9
	6,4	6,2	47	74,6	5	77,3	0,24	97,3
	6,6	6,3	72	61,1	7	68,2	0,31	96,6
	6,8	6,6	72	61,1	9	59,1	0,35	96,1
	7,0	6,8	64	65,4	8	63,6	0,32	96,4

i = inicial, f = final.

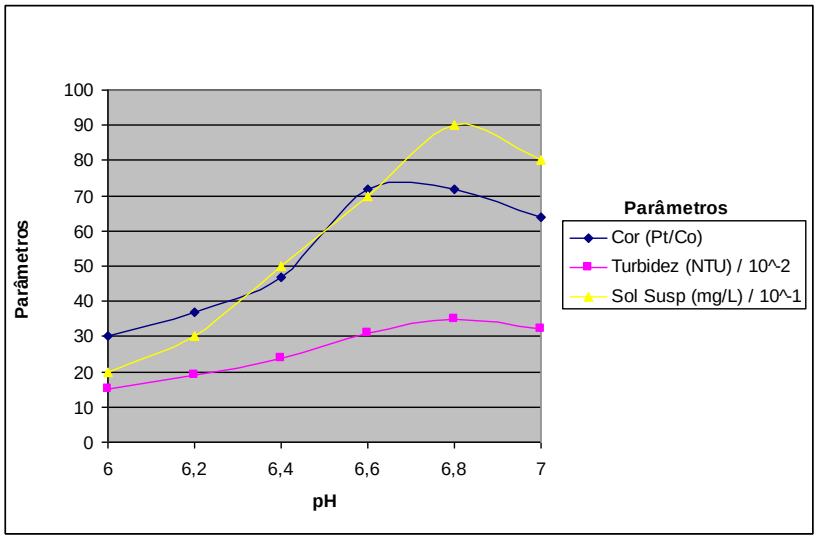

Figura 4.2 – Influência do pH na Coagulação/Floculação na Faixa de 6,0 ≤ pH ≤7,0.

Observando-se os valores de cor, turbidez e sólidos suspensos totais nos ensaios para se determinar o melhor valor de pH, conclui-se que a coagulação/floculação ocorreu com maior eficiência em pH igual a 6,0. Nesta condição, o consumo médio de ácido sulfúrico foi de 10 mL de solução 1,0 N /litro de efluente tratado.

4.4.2 Dosagem do Agente Coagulante (PAC) na Coagulação/Floculação

Determinado o pH ótimo para a coagulação/floculação, foi conduzido um ensaio para a determinação da dosagem de coagulante a ser utilizada. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.6 e na Figura 4.3.

Tabela 4.6 – Valores dos Parâmetros Avaliados na Determinação da Dosagem de Coagulante.

Amostra	Dosagem mL - PAC 15% v/v /L de efluente	Dosagem PAC (mg/L de efluente) *	Cor (Pt-Co)	Remoção (%)	SST (mg/L)	Remoção (%)	Turbidez (NTU)	Remoção (%)
Efluente tratado	--	--	180	--	21	--	10,7	--
Clarificado da coagulação / Floculação	7	1323	84	53,3	11	47,6	0,75	93,0
	8	1512	79	56,1	10	52,4	1,62	84,9
	9	1701	55	69,4	7	66,7	0,32	97,0
	10	1890	76	57,8	7	66,7	0,38	96,4
	11	2079	74	58,9	8	61,9	0,48	95,5
	12	2268	46	74,4	3	85,7	0,25	97,7

* Considerando a concentração da solução de PAC como 15% (v/v), a densidade de 1,26 g/cm^3 e a dosagem do coagulante dada em miligramas de PAC por litro de efluente tratado.

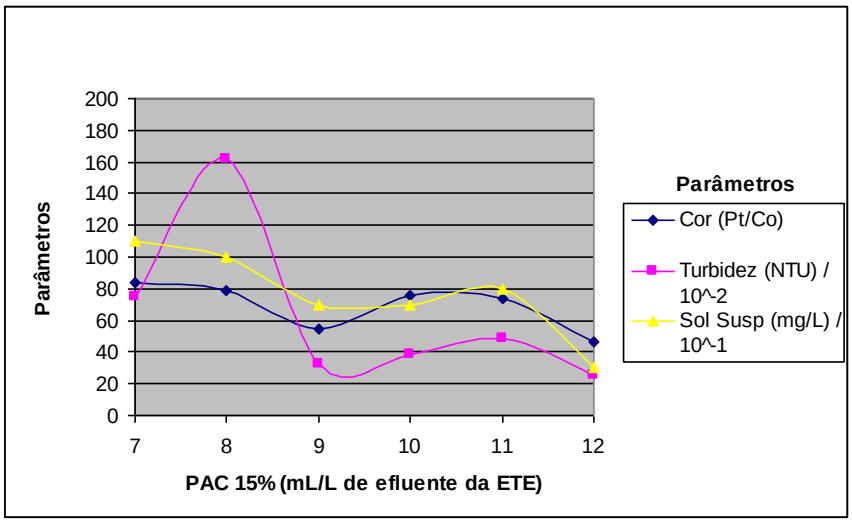

Figura 4.3 - Influência da Dosagem de PAC (mL de solução 15% v/v de PAC/L de efluente da ETE) no Processo de Coagulação/floculação.

Analisando-se os resultados da Tabela 4.6 e da Figura 4.3 pode-se concluir que melhores resultados são obtidos a uma concentração de PAC no processo de coagulação/floculação a pH 6,0 de 2268 mg/L, ou seja, 12 mL de solução de PAC a 15% (v/v)/L de efluente da ETE.

A partir dos resultados dos ensaios de pH e de concentração de PAC para a Coagulação/Floculação foram conduzidos novos ensaios nas condições especificadas, isto é: pH= 6,0 e dosagem de PAC = 12 mL/L de efluente tratado, avaliando-se a eficiência de

remoção dos parâmetros exigidos visando a reutilização do efluente. A Tabela 4.7 apresenta os resultados obtidos nestas condições, na qual se pode observar que após a coagulação/floculação foi possível obter remoções de SST e de Turbidez de 84,6% e 91,8%, respectivamente.

Tabela 4.7 – Caracterização do Efluente após a Coagulação/Floculação em pH= 6,0 e 12 mL PAC/L de efluente tratado.

Parâmetros	Padrões Exigidos		Resultados do Efluente Tratado da ETE	Resultados Após Coagulação/ Floculação
	Caldeira	Torre de Resfriamento		
Alcalinidade total	350	350	850	169
Alcalinidade ao Bicarbonato	---	24	850	169
Alumínio	< 0,1	0,1	< 0,1	0,1
Cálcio	---	50	< 0,5	0,558
Cloretos	---	300	76,9	298
COT	---	200	8,5	5,5
DBO	---	25	< 6	6
DQO	5	75	45	22
Dureza	350	300	< 5	< 5
Ferro	1	0,5	0,2	0,1
Fosfatos	---	4	3	<1
Magnésio	---	0,5	< 0,5	<0,5
Manganês	---	0,5	<0,01	<0,01
Surfactantes	---	1	<0,1	<0,1
Nitrogênio amoniacal	0,1	1	3,7	1,9
PH	7,0 – 10,0	7,0 - 8,5	7,3	5,6
SDT	700	500	1109	1429
Sílica	30	50	5	5
SST	10	100	13	2
Sulfatos	---	200	0,8	737,5
Sulfetos	---	10	0,011	0,005
Turbidez (NTU)	---	50	9,2	0,75
Cobre	0,5	---	< 1	< 0,005
Condutividade (µS/cm)	3500	---	1827	2450
Óleos e Graxas	1	---	0,8	< 1
Tetracloreto de Carbono	1		< 1	< 1

Valores expressos em mg/L, salvo quando indicado; --- Parâmetros não exigidos.
Fonte: Adaptado de Mancuso & Santos (2003), Mierzwa (2002), Metcalf& Eddy (2003), Eble & Feathers (1992) *apud* Perez(2003), Crook (1996) e Lenntech (1991)

Outros parâmetros também foram reduzidos após a coagulação/floculação, como a alcalinidade (total e ao bicarbonato: 80,1%), COT (35,3%), DQO (51,1%), Ferro (50,0%), fosfatos (> 66,7%), Nitrogênio Amoniacal (48,6%), Sulfetos (54,5%) e Cobre (99,5%), enquanto as concentrações de alumínio, cálcio, dureza, magnésio, manganês, O&G, sílica, surfactantes, tetracloreto de carbono e DBO permaneceram inalteradas. As concentrações de cloretos, SDT, sulfatos e a condutividade aumentaram. O aumento da concentração de cloretos já era esperado, em função da natureza do agente coagulante. Neste mesmo raciocínio o aumento da concentração de sulfato está relacionado com a adição de ácido sulfúrico para a redução do pH de 7,3 para 6,0. O aumento destes íons resultou no aumento da concentração de SDT e da condutividade.

Analisando-se agora os parâmetros alcalinidade ao bicarbonato, nitrogênio amoniacal, pH, SDT e sulfatos, pode ser observado que os valores dos mesmos ficaram acima dos padrões estabelecidos para reutilização do efluente em torres de resfriamento. Já os valores dos parâmetros: DQO, Nitrogênio Amoniacal, pH e SDT ficaram acima dos padrões para reutilização em caldeiras.

A Figura 4.4 compara a mudança visual do efluente antes e após a coagulação/floculação.

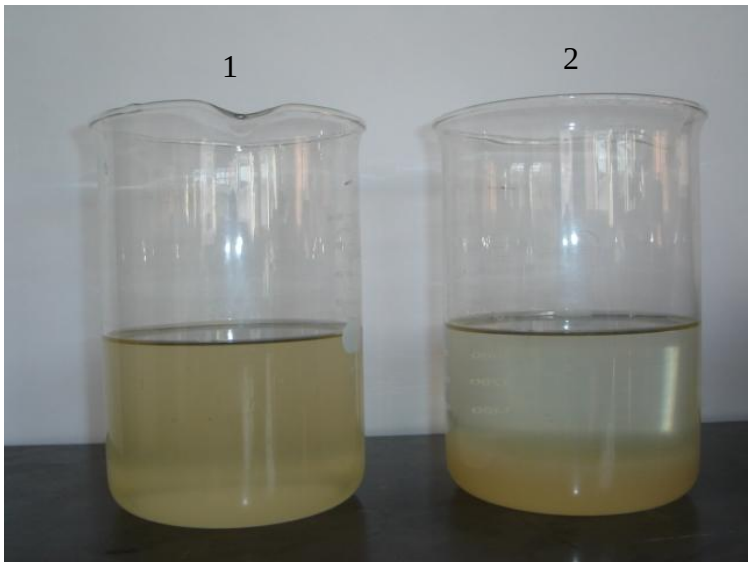

Figura 4.4 – Comparação do Aspecto Visual antes (1) e Após (2) o Processo de Coagulação/ Floculação.

O processo de coagulação empregando policloreto de alumínio (PAC) foi avaliado por Solmaz et al. (2007) em um efluente de um complexo industrial, a fim de se avaliar a possibilidade de reuso em uma indústria têxtil. Na coagulação, foram utilizados PAC e polímero aniônico Praestol A3010LTR (1% m/m) como coagulante. Em relação ao efluente bruto, estes autores também verificaram remoções significativas de DQO (35%), SST (93%), Ferro (91%), Alcalinidade (36%) e Cor (de 36 a 71%) e aumento das concentrações de SDT (de 1885 para 2281 mg/L) e Sulfatos (de 244 para 420 mg/L) e da Condutividade (de 3803 para 4535 μS/cm).

O tratamento de águas residuárias pela seqüência coagulação/adsorção/ ultrafiltração foi estudado por Abdssemed & Nezzal (2002), com o objetivo de determinar as condições ótimas para o tratamento terciário. O processo de coagulação-adsorção-ultrafiltração obteve resultados bastante satisfatórios, visto que reduziu a DQO de 165 mg/L para 7 mg/L e a turbidez de 90 NTU para zero (GUERRA FILHO, 2006). Estabelecendo uma comparação com os resultados deste trabalho, evidencia-se a eficiência do processo de coagulação/floculação que, neste estudo de caso reduziu 51% da DQO e 92% de turbidez, respectivamente.

Analisando-se os resultados dos ensaios de coagulação/floculação deste estudo pôde-se concluir que somente o processo de coagulação/floculação não foi suficiente para a obtenção da qualidade de água desejada para a reutilização do efluente, tanto como água de reposição de torres de resfriamento como de caldeiras.

Considerando que os parâmetros que necessitavam ser reduzidos se tratavam, na maioria, de cátions (amônio) e ânions (bicarbonatos, sulfatos) solúveis, uma forma de se adequar aos limites necessários poderia ser através do tratamento com resinas de troca iônica. Assim, no efluente final do processo seqüencial de coagulação/floculação/filtração (*bag* e filtro de areia) foram realizados testes com resinas de troca iônica.

Antes do processo de troca iônica, foram realizados testes de filtração (*bag* e areia) no clarificado do processo de coagulação/floculação com o objetivo de adequar alguns parâmetros como: turbidez, sólidos suspensos e dissolvidos. A Tabela 4.8 compara os resultados com os dois tipos de filtros empregados.

Tabela 4.8 – Comparação dos resultados do tratamento seqüencial de coagulação/floculação/filtração (*bag* e Filtro de areia).

Amostras	**pH_i**	**pH_f**	**SDT (mg/L)**	**Remoção (%)**	**SST (mg/L)**	**Remoção (%)**	**Turbidez (NTU)**	**Remoção (%)**
Clarificado da Coagulação/ Floculação	5,6	5,6	1429	--	2	---	0,75	--
Coagulação/ Floculação/ Filtro *bag*	5,6	5,6	1144	19,9	2	0	0,62	17,3
Coagulação/ Floculação/ Filtro de areia	5,6	5,5	674	52,8	1	50	0,43	42,7

i = inicial , f = final

Pode-se concluir através da análise destes resultados que as remoções de sólidos dissolvidos, sólidos suspensos e turbidez foram superiores quando se empregou o filtro de areia. Observou-se, mesmo após esta seqüência de tratamentos, que o parâmetro Sólidos Dissolvidos ainda continuava com valor superior ao padrão para reuso em torres de resfriamento. Com o objetivo de ajustar este parâmetro no filtrado obtido nesta seqüência testou-se resinas de troca iônica, cujos resultados são apresentados a seguir.

4.5 Resinas de Troca Iônica

A Tabela 4.9 compara os valores obtidos para os parâmetros monitorados após o tratamento seqüencial coagulação/floculação/filtração em filtro de areia/resina de troca iônica com os padrões estabelecidos neste estudo (Tabelas 2.9 e 2.12).

Observando-se os valores da Tabela 4.9 pode-se concluir que o tratamento seqüencial apresentou resultados satisfatórios em relação a todos os parâmetros analisados, permitindo desta forma o seu reuso tanto em água de reposição de caldeiras como em torres de resfriamento.

Tabela 4.9 – Comparação dos resultados do tratamento seqüencial (coagulação/floculação/filtração/resinas de troca iônica) com os valores padrões.

Parâmetros	Padrões		Efluente após o tratamento seqüencial
	Caldeira	Torre de Resfriamento	
Alcalinidade total	350	350	268
Alcalinidade ao Bicarbonato	---	24	0
Alumínio	< 0,1	0,1	< 0,01
Cálcio	---	50	< 0,5
Cloretos	---	300	135
COT	---	200	< 5
DBO	---	25	< 2
DQO	5	75	< 5
Dureza	350	300	8
Ferro	1	0,5	< 0,01
Fosfatos	---	4	< 0,02
Magnésio	---	0,5	< 0,5
Manganês	---	0,5	< 0,01
Surfactantes	---	1	0,15
Nitrogênio amoniacal	0,1	1	< 0,1
pH	7,0 – 10,0	7,0 - 8,5	8,1
SDT	700	500	34
Sílica	30	50	5
SST	10	100	2
Sulfatos	---	200	1
Sulfetos	---	10	<1
Turbidez (NTU)	---	50	0,31
Cobre	0,5	---	< 0,005
Condutividade (µS/cm)	3500	---	140
Óleos e Graxas	1	---	< 1
Tetracloreto de Carbono	1		< 1

Valores expressos em mg/L, salvo quando indicado; --- Parâmetros não exigidos

Fonte: Adaptado de Mancuso & Santos (2003), Mierzwa (2002), Metcalf& Eddy (2003), Eble & Feathers (1992) *apud* Perez(2003), Crook (1996) e Lenntech (1991)

A Tabela 4.10 mostra a caracterização inicial do efluente tratado da ETE e a do efluente obtido após o tratamento seqüencial, bem como a remoção dos parâmetros analisados.

Tabela 4.10 – Comparação dos resultados do tratamento seqüencial com os do efluente final da ETE.

Parâmetros	Resultados do Efluente Final da ETE	Efluente após o tratamento seqüencial	Remoção (%)
Alcalinidade total	850	268	68,5
Alcalinidade ao Bicarbonato	850	0	100,0
Alumínio	< 0,1	< 0,01	> 90,0
Cálcio	< 0,5	< 0,5	--
Cloretos	76,9	135	--
COT	8,5	< 5	> 41,2
DBO	< 6	< 2	> 66,7
DQO	45	< 5	> 88,9
Dureza	< 5	8	--
Ferro	0,2	< 0,01	> 95,0
Fosfatos	3	< 0,02	> 99,0
Magnésio	< 0,5	< 0,5	--
Manganês	<0,01	< 0,01	--
Surfactantes	<0,1	0,15	--
Nitrogênio amoniacal	3,7	< 0,1	> 97,0
pH	7,3	8,1	--
SDT	1109	34	96,9
Sílica	5	5	--
SST	13	2	84,6
Sulfatos	0,8	1	--
Sulfetos	0,011	<1	--
Turbidez (NTU)	9,2	0,31	96,6
Cobre	< 1	< 0,005	> 99,0
Condutividade (µS/cm)	1827	140	92,3
Óleos e Graxas	0,8	< 1	--
Tetracloreto de Carbono	< 1	< 1	--

Valores expressos em mg/L, exceto quando indicado.

Solmaz et al. (2007) avaliaram os processos de precipitação química (com NaOH e $Ca(OH)_2$) e troca iônica no tratamento do efluente gerado em um complexo industrial visando ao reuso como água de processo. Após a precipitação química com $Ca(OH)_2$, o efluente era neutralizado e passava por resinas de troca iônica, obtendo-se bons resultados em termos de redução de SDT (100%) e condutividade (99%) e qualidade suficiente para o

reuso como água de processo, assim como mostram os resultados deste estudo de caso, onde foram removidos 97 % de SDT e 92% da condutividade.

Em outro trabalho, os mesmos autores (SOLMAZ et al., 2007) avaliaram o tratamento do efluente da coagulação com PAC através de colunas com resinas de troca catiônica (Lewatit Mono Plus S100) e aniônica (Lewatit Mono Plus M600) empacotadas sob diferentes combinações. Quando se empregou uma mistura de resinas catiônica e aniônica de 1:1, obtiveram-se os melhores resultados e um efluente que atendia a todos os requisitos para reuso como água de processo.

A Figura 4.5 ilustra comparativamente o aspecto visual do efluente do processo industrial (1), do efluente tratado da ETE (2), do efluente obtido após o tratamento seqüencial coagulação/floculação/filtração (3) e do tratamento global: coagulação/floculação/filtração/resina de troca iônica (4).

Figura 4.5 – Comparação visual do: Efluente Bruto do Processo (1); Efluente Final Tratado na ETE (2); Efluente após Processo de Coagulação/Floculação/Filtração (3); Efluente Tratado após Coagulação/Floculação/Filtração/Resinas de Troca Iônica (4).

4.6 Avaliação Técnico-econômica

Para a elaboração da análise técnico-econômica deste trabalho foi monitorada a quantidade de água de *make-up* das torres de resfriamento e caldeiras (geração de vapor) através de um balanço hídrico durante o último trimestre de 2008. O desenvolvimento deste

balanço se deu através de duas leituras diárias dos medidores de volume das tubulações de água de reposição, sendo a vazão para cada dia calculada pela diferença entre a leitura atual e a anterior, dividida pelo período entre as mesmas.

A análise dos balanços hídricos realizados mostrou que o consumo de água de reposição das torres de resfriamento gira em torno de 77 m^3/mês, ao passo que as caldeiras consomem, em média, 3097 m^3/mês de água para geração de vapor. Como mencionado no fluxograma da ETE (Figura 4.6), atualmente são gerados 8949 m^3 de efluente por mês, em média, o que torna viável o reaproveitamento de 3174 m^3/mês para água de reposição de caldeiras e torres de resfriamento.

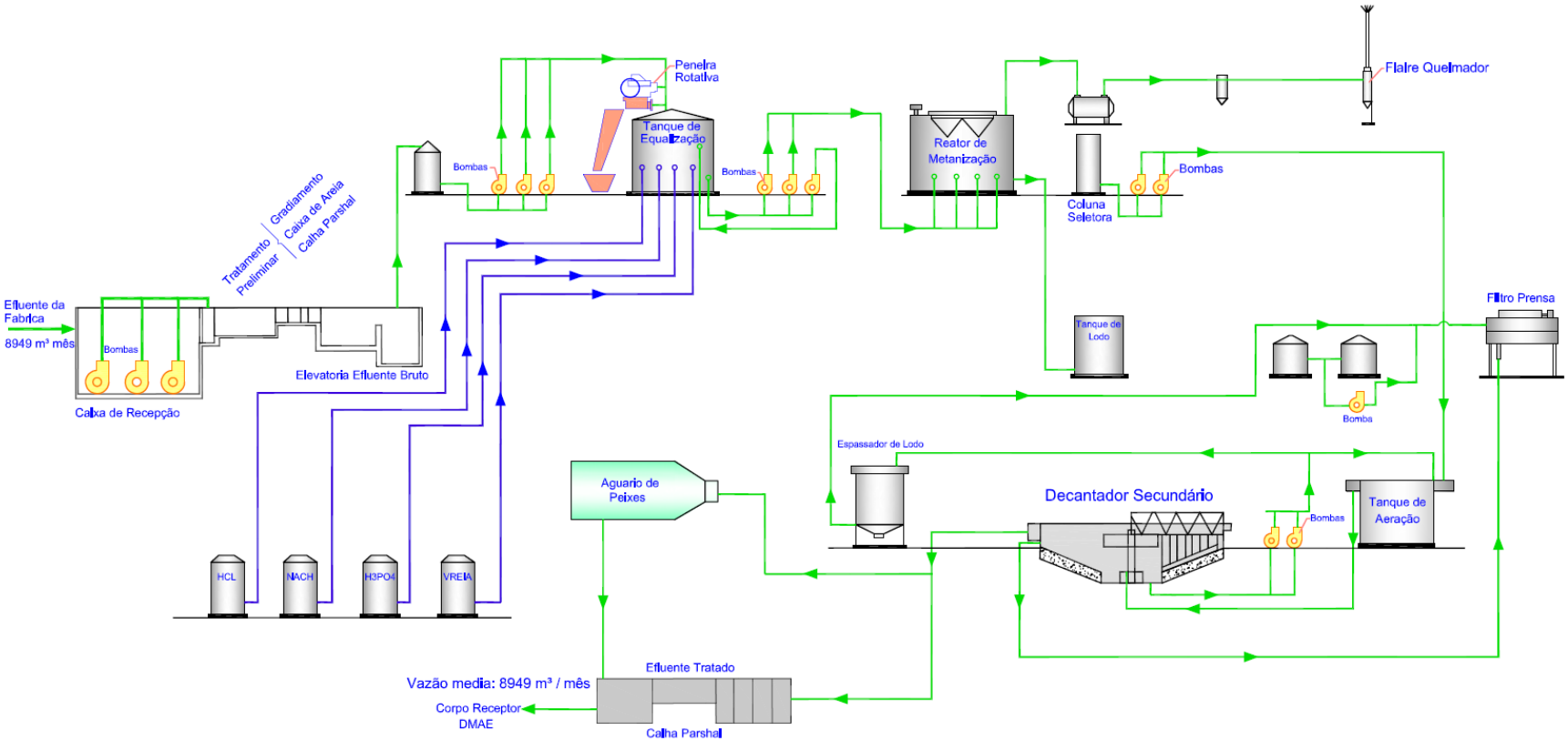

Figura 4.6 – Fluxograma da ETE da Indústria de Refrigerantes.

Em termos de economia de água, pode-se estimar uma diferença de custos com tratamento/captação de água e despejo de efluente, antes e depois da implantação do reuso de água nas caldeiras e torres de resfriamento. Com base no balanço hídrico das plantas da ETE, mostrado na Figura 4.6, e da ETA, ilustrado na Figura 4.7, pode-se estimar esses valores comparando-se as vazões que seriam alteradas após a implantação do reuso, conforme mostra a Figura 4.8. Os fluxogramas apresentados ilustram de forma sistemática esses dois quadros.

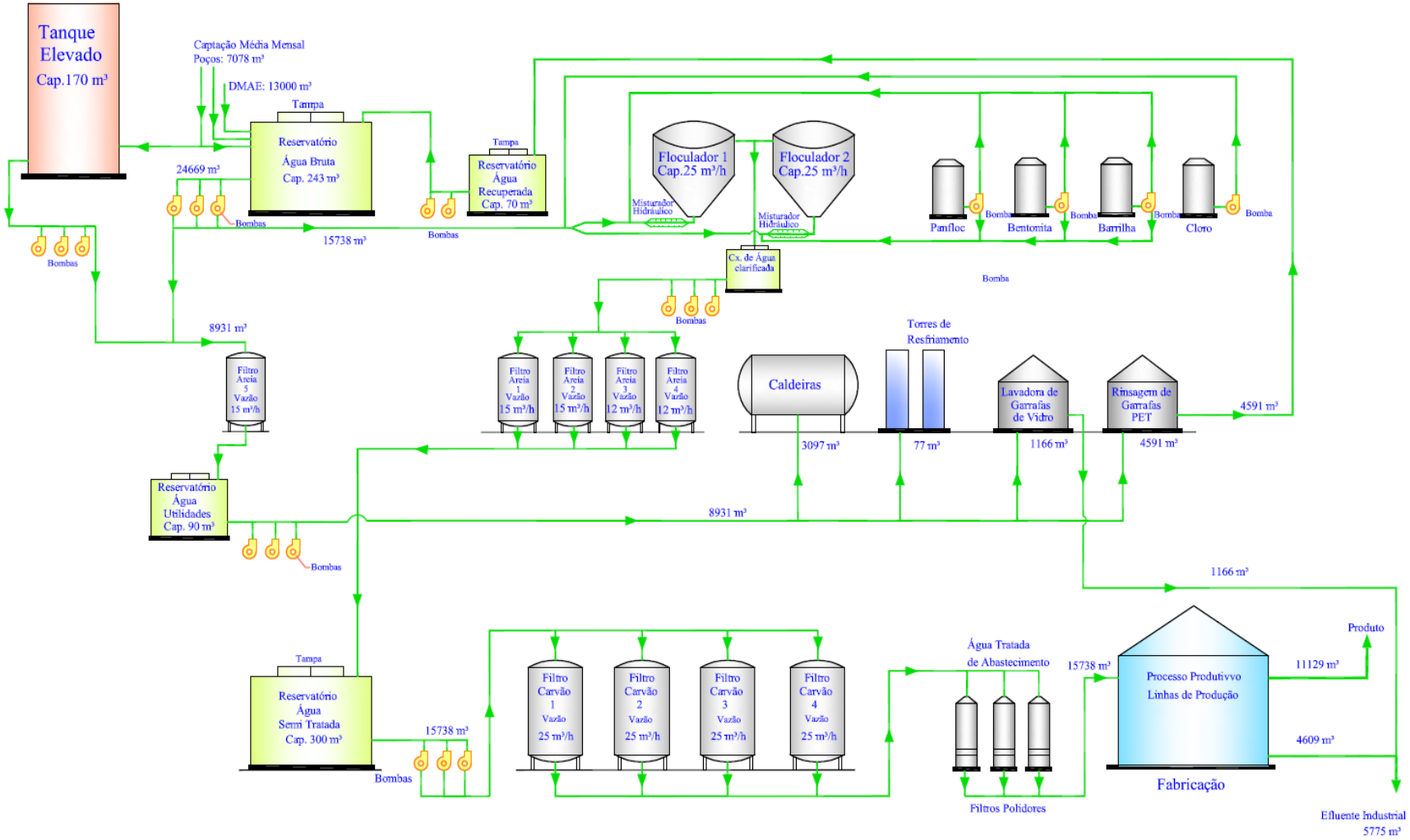

Figura 4.7 – Fluxograma da ETA da Industria de Refrigerantes

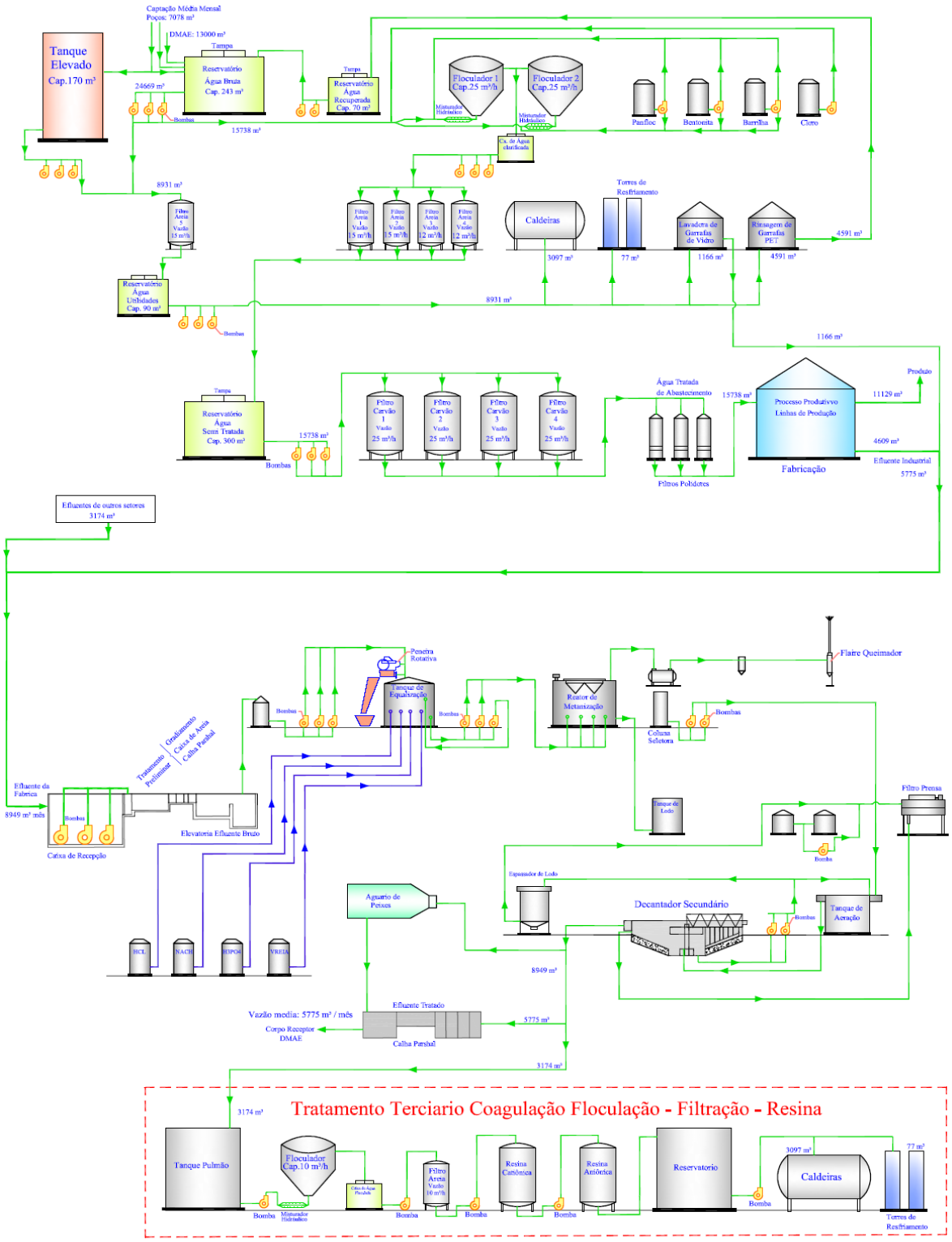

Figura 4.8 – Fluxograma de Reuso Proposto.

Em termos de viabilidade quantitativa, nota-se que é gerada uma vazão de efluente maior do que a necessária para o abastecimento das caldeiras e para reposição das torres de resfriamento. Dessa forma, é viável a eliminação de toda a água tratada para essa finalidade, substituindo-a pelo efluente tratado (após tratamento terciário). É importante ressaltar que a quantidade de água/efluente reutilizada também não necessita mais ser captada da rede municipal de água (DMAE – Departamento Municipal de Água e Esgoto), diminuindo também a quantidade de água a ser tratada na ETA.

Através dos custos médios de captação e tratamento por metro cúbico de água e efluente, foi feita uma estimativa de diferença de custos nos dois contextos (com reuso e sem reuso), apresentada na Tabela 4.12. Os cálculos foram baseados no balanço hídrico realizado no período de janeiro a dezembro de 2008, e nas tarifas praticadas pelo Departamento (fornecedor) Municipal de Água e Tratamento de Esgoto (DMAE), apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 Valores médios praticados pelo DMAE (2008) e na indústria.

Taxa Esgoto DMAE (R$/m^3)	**Custo Água DMAE (R$/m^3)**	**Custo do Tratamento de Água na ETA (R$/m^3)**	**Custo do Tratamento de Água Total (R$/m^3)**
2,34	6,64	0,93	7,57

Tabela 4.12 – Comparação de custos mensais com captação, tratamento de água e descarte de efluentes.

		Consumo de água sem implementação do reuso (m^3/mês)[a]	**Custo sem implementação do reuso (R$/mês)[b]**	**Consumo de água após implementação do reuso (m^3/mês)[a]**	**Custo após implementação do reuso (R$/mês)[b]**	**Economia mensal após implementação do reuso**
Água Captada	Poços	7078	0	7078	0	0 m^3
	DMAE	13000	86325,20	9826	65248,57	3174 m^3
Água Recuperada		4591	4269,63	4591	4269,63	0 m^3
Água Tratada		24669	186754,20	21495	162725,75	3174 m^3
Emissão de efluente		8949	20940,66	5775	13513,5	3174 m^3
TOTAL (R$)		--	298289,69	--	245757,45	R$ 52532

[a] Estimativa com base nas vazões de 2008.
[b] Calculados com base em valores médios praticados pelo DMAE (2008).

A Tabela 4.12 mostra a redução de custos com captação e tratamento de água e descarte de efluente na ordem de R$ 52.532,00 ao mês.

A Tabela 4.13 mostra uma estimativa dos custos de tratamento por metro cúbico, utilizando-se as tecnologias avaliadas. Os cálculos foram baseados no volume de efluente a ser tratado e nos custos de operação de cada tecnologia. Para o processo de coagulação/floculação, foram considerados os volumes para tratar 1 litro de efluente e valores dos reagentes (PAC solução a 15% v/v e solução de Ácido Sulfúrico 1N) sob a perspectiva econômica do período de janeiro a dezembro de 2008.

Tabela 4.13 – Estimativa de custos da tecnologia de Coagulação/Floculação.

Efluente Tratado (L)	**PAC Sol. 15% v/v utilizado (L)**	**H_2SO_4 1N utilizado (L)**	**Custo PAC Sol. 15% v/v (R$/L)**	**Custo H_2SO_4 1N (R$/L)**	**Custo Total PAC (R$/mês)***	**Custo Total H_2SO_4 (R$/mês)***	**Total (R$/mês)**
1	0,012	0,01	0,00171	0,14	5427,54	4443,60	9871,14
3.174.000	38088	31740					

* Considerando uma vazão média de efluente de 3174 m^3/mês.

Para a implantação do sistema de reuso na indústria, devem ser considerados, também, os gastos operacionais dos processos de filtração e troca iônica, como: a contra-lavagem, reposição e troca de material no filtro de areia, ativação e regeneração das resinas. Estima-se que os custos operacionais mensais com o processo de filtração e troca iônica estejam em torno de R$ 10.000,00 (dez mil reais), baseado nos gastos atuais da empresa utilizando estas mesmas tecnologias em outros processos e também por estimativa de custos garantida por fornecedores que trabalham na implantação destas tecnologias.

De acordo com o sistema de tratamento terciário escolhido, foi feita uma estimativa dos custos de manutenção e operação e dos gastos com equipamentos e materiais que seriam utilizados na implantação do projeto.

Tabela 4.14 – Planilha de custo estimado para a implantação do sistema de tratamento terciário na indústria.

Equipamentos e Materiais	Quantidade	Valor unitário (R$)	Valor total (R$)
Tanque - Água clarificada 2 m³	1	10.000,00	10.000,00
Tanque Pulmão 20 m³	1	40.000,00	40.000,00
Tanque abastecimento 100 m³	1	80.000,00	80.000,00
Tanque floculador 10 m³/h	1	60.000,00	60.000,00
Filtro de areia 10 m³/h	1	65.000,00	65.000,00
Areia	8500 Kg	0,61	5.154,50
Coluna de resina catiônica	1	70.000,00	70.000,00
Coluna de resina aniônica	1	90.000,00	90.000,00
Resina catiônica	650 L	8,71	5.664,75
Resina aniônica	2700 L	13,45	36.316,35
Material inerte	300 L	13,92	4.177,92
Instalação/tubulações	--	30.000,00	30.000,00
Bomba (transf. e dosagem)	8	5.000,00	40.000,00
Total R$			536.313,52

Com base nos resultados apresentados nas Tabelas 4.11 a 4.14, procede-se uma análise técnico-econômica, que estima o tempo em que o projeto pode ser pago. Esta análise é realizada dividindo-se o total gasto na implementação do tratamento terciário (R$ 536.313,52) pelo total economizado (R$52.532,00/mês) subtraído o montante gasto mensalmente com as tecnologias de coagulação/floculação, filtração e troca iônica (R$ 9.871,14/mês) e os custos operacionais das mesmas (R$ 10.000,00/mês). Efetuando este cálculo, conclui-se que a economia mensal passa a ser R$ 32.660,80 e o tempo necessário para se compensar o investimento é de aproximadamente 17 meses (1 ano e 5 meses), período bastante razoável comparado à vida útil dos equipamentos. A tabela 4.15 apresenta a consolidação dos resultados, demonstrando o tempo de retorno financeiro.

Tabela 4.15 – Planilha de avaliação de retorno financeiro

AVALIAÇÃO ESTIMADA DE RETORNO FINANCEIRO RELATIVO AO INVESTIMENTO DA IMPLANTAÇÃO DO PROJETO DE REUSO	
A. Investimento do Projeto de Reuso	R$ 536.313,52
B. Economia mensal sem o custo operacional	R$ 52.532,00
C. Custo mensal – operação do tratamento terciário	R$ 19.871,14
D. Economia mensal = B - C	R$ 32.660,80
E. Tempo previsto do retorno financeiro = A/D	17 meses

A avaliação técnico-econômica deste projeto tende a ser uma etapa importante neste estudo. A ameaça sobre a disponibilidade de água e a possível cobrança pelo comitê da bacia do Rio Araguari, ligada à captação de água feita pelo DMAE no Rio Uberabinha; pode-se ter uma alteração no valor do metro cúbico de água. A implementação deste procedimento de cobrança pelo comitê de bacia, pode fazer com que a concessionária que abastece a cidade promova reajustes nas tarifas de captação e descarte de efluente, repassando assim os custos cobrado, elevando, consequentemente, os custos de produção da indústria. Caso tais alterações nos custos ocorram, torna-se ainda mais imprescindível a prática do reuso de água.

5. CONCLUSÕES

A eficiência da seqüência dos tratamentos propostos neste trabalho, composto por Coagulação/Floculação/Filtração em filtro de areia/Resinas de troca iônica para o efluente da ETE de uma indústria de refrigerantes permitiu obter um efluente final (tratado em nível terciário), com características para a reutilização tanto na alimentação das torres de resfriamento como na produção de vapor em caldeiras. Todos os parâmetros estudados ficaram abaixo dos limites máximos permitidos para estes usos segundo as referências adotadas.

Com este tratamento seqüencial foi possível a remoção de 84,6%, 96,9%; 66,3%; 88%; 66,7%; 90%; 68%; 95%; 99%; 99%; 92,3% e 97% de Sólidos Suspensos Totais, Sólidos Totais Dissolvidos, Turbidez, DQO, DBO, Alumínio, Alcalinidade Total, Ferro, Fosfato, Cobre, Condutividade e Nitrogênio Amoniacal, respectivamente.

A estimativa preliminar econômica mostrou que o investimento fixo para a implantação do mesmo é da ordem de R$ 540.000,00 (quinhentos e quarenta mil reais). O custo operacional mensal da mesma foi estimado em aproximadamente R$ 20.000,00 (vinte mil reais). Entretanto, implantando-se esta proposta para o reuso, a economia anual foi estimada em R$ 392.000,00 (Trezentos e noventa e dois mil reais), considerando-se os custos com captação, tratamento de água e emissão de efluentes. Com isso, o tempo necessário para compensar o investimento é de aproximadamente 17 meses.

A implantação do sistema de reuso permitirá obter economia anual de consumo de água de 38088 m^3, o que representa uma redução de 24,4% em relação ao consumo de água da rede de abastecimento público (156.000m^3/ano). O reaproveitamento desse volume de água é significativo levando-se em consideração a decrescente disponibilidade de recursos naturais preservando os recursos hídricos e ampliando, inclusive, a capacidade de produção.

Além disso, a redução do volume de efluente a ser descartado no corpo receptor é outro fator relevante para a implantação do sistema de reuso do efluente. As vantagens mensuráveis e não mensuráveis ligadas à imagem da empresa como: responsabilidade

sócio-ambiental, abertura para prática do marketing ambiental, beneficio quanto à preservação dos recursos hídricos, aliado à política ambiental da empresa e aumento da disponibilidade de recurso natural (água) para aumento futuro de produtividade são argumentos que justificam a implementação do projeto.

6. SUGESTÕES

A avaliação técnico-econômica deste projeto foi realizada levando em conta o volume gasto mensalmente nas caldeiras e torres de resfriamento. Considerando o vasto consumo de água em todos os setores da referida indústria, existe a possibilidade de haver outros reusos para reduzir ainda mais o volume de efluente tratado enviado para o corpo receptor.

Alternativamente, o efluente tratado pelo processo de coagulação/floculação e filtração, por exemplo, poderia ser reutilizado para fins menos nobres antes do processo de troca iônica, diminuindo os custos de tratamento e atendendo, também, outros setores da indústria.

Nesta sequência apresentada recomenda-se fazer uma desinfecção no efluente tratado antes de iniciar o processo de coagulação/floculação, com objetivo de reduzir a contagem microbiana melhorando a performance das etapas seguintes de tratamento, salientando que caso a opção de desinfecção seja a cloração, deve-se incluir um filtro de carvão ativado para remoção do cloro antes do tratamento de troca iônica, pois o cloro é prejudicial a resina.

Por outro lado, há a possibilidade de inserir uma etapa de desinfecção após o tratamento com resinas de troca iônica, viabilizando o reuso em setores que exigem água de melhor qualidade. Outras tecnologias, como microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração, adsorção em carvão ativado e osmose inversa, surgem, paralelamente, como alternativas interessantes a serem testadas como tratamento terciário.

A disponibilidade e a qualidade da água no mundo, além de ser um tema atual, é urgente. O reuso mostra-se cada vez mais necessário, principalmente na indústria, onde se concentra a maior parte do consumo mundial. Sendo assim, um projeto de reuso de efluentes é totalmente viável em termos de gestão ambiental e, mediante uma avaliação técnico-econômica pode ser implantado em muitas indústrias para atender a demanda de processos e reduzir o desperdício e os impactos ambientais.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDESSEMED, D. and NEZZAL, G. – **Treatment of Primary Effluent by Coagulation – Absorption – Ultrafiltration for Reuse**. Desalination, vol. 152, p. 367 – 373, 2002 Apud GUERRA FILHO, D. Águas Residuárias: uma Alternativa Racional de Reuso. Cadernos UniFOA, Volta Redonda, ano 1, n° 1. jul. 2006.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13.969: **Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação**. Rio de Janeiro, 60 p., 1997.

APHA. (American Public Health Association) . **Twentieth Edition of Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.** American Public Health Association, Washington, DC, 1368 p, 1998.

AZEVEDO NETTO, J. M.; **Técnicas de abastecimento e tratamento de água**, 2ª ed. v. 2, São Paulo, CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 1979.

BARBOSA, F. L. **Regulamentação do reuso da água em refinarias – Análise do modelo americano e perspectivas para o cenário nacional**. 2007. 268 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

BLÖCHER, C.; CHIMIEL, H.; KASHECK, C.; MAVROV, V.; NORONHA, M.; **Concepts for the treatment of spent process water in the food and beverage industries.** Desalination v.152, 2002a, p. 307-314.

_____; **Recycling of spent process water in the food industry by an integrated process of biological treatment and membrane separation.** Desalination v. 144, 2002b, p. 143-l 50.

BUECKER, B. **Power Plant Chemistry a Practical Guide.** 1a ed., Oklahoma: Pennwell Publishing Company, 1997.

CETESB, **Técnicas de Abastecimento e Tratamento de Água**, vol 2- Tratamento de Água. 3ª Ed., CETESB/ASCETESB, 1987.

CONAMA. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 18 de março de 2005.

CNRH. Resolução nº 54/05 de 28 de novembro de 2005. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF.

CROOK, J.; **Water reclamation and reuse criteria. Water quality management library**. v. 10 / Wastewater reclamation and reuse. Pennsylvania. USA: Technomic Publication, 1996.

CUNOLATINA (2008). Guia para o estudo da água. São Paulo. 2002. Disponível em http://www.cunolatina.com.br/dicas.htm#agua1. Acessado em 12 de Maio de 2008.

DIAS T.; **Membranas: Meio Filtrante de Tecnologia Avançada.** Meio Filtrante. Ano V – Edição 23 – novembro/dezembro. Disponível em http://www.meiofiltrante.com.br/materias.asp?action=detalhe&id=265. Acessado em Abril de 2008.

DI BERNARDO, L.;DI BERNARDO, A.; FILHO, P. L. C. **Ensaios de Tratabilidade de Água e dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água.** 1ª Edição, São Carlos: Editora RiMa, 2003.

DREW, **Princípios de Tratamento de Água Industrial.** 1a ed. São Paulo: Drew produtos Químicos, 1979.

EBLE, K. S.; FEATHRES, J. **Water Reuse within refinery**. (Apresentado no NPRA Anual Meeting em New Orleans, em 1992). Trevose: Betz Industrial; Washington: National Petroleum Refinery Association 1992 16p. *Apud* PEREZ, A. L. **Avaliação dos Impactos da Política Nacional de Recursos Hídricos na Gestão Ambiental da Água e Efluentes na Indústria** 2003, 203p, Dissertação, Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

EPA. ***Handbook on Polluton Preventions Opportunities for Bleached Kraft Pulp and Paper Mills***, United States Environmental Protection Agency, Office of Research of Development; Office of Enforcement: Washington, DC, June 1993.

FEAM, Fundação Estadual do Meio Ambiente. Disponível em: http://www.feam.br/Consultas/Html%20D%20-%20L/indica.htm. Acessado em 12 de Abril de 2008.

FIESP. **Manual de conservação e reuso de água para a indústria**. FIESP; CIESP.. v. 1, 2005.

FRANCO, M. J. M. **Aplicação da metodologia de APPCC – Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle como ferramenta para reuso de água na indústria***:* **Modelo para indústria de aromas e essências.** 2007. 118 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

GUERRA FILHO, D. Águas Residuárias: uma Alternativa Racional de Reuso. Cadernos UniFOA, Volta Redonda, ano 1, n° 1. jul. 2006. Disponível em http://www.unifoa.edu.br/pesquisa/caderno/edicao/01/17.pdf . Acessado em 16 de Maio de 2008.

GUMBO, B. , MLILO, S. , BROOME, J. , LUMBROSO, D. - **Industrial water demand management and cleaner production potential: a case of three industries in Bulawayo, Zimbabwe.** Physics and Chemistry of the Earth v. 28, 2003, p. 797–804.

HOLDEN, P.; **Anglian Water membrane hybrid system for the soft drinks industry.** Desalination. v. 118, 1998, p. 267-271.

LAVRADOR FILHO, J.. **Contribuição para o entendimento do reuso planejado da água e algumas considerações sobre suas possibilidades no Brasil**. 1987. 198 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.

LEME, F. P., **Teoria e técnicas de tratamento de água**, São Paulo: CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 1979.

Lenntech Water & Luchtbehandeling Holding B. V. Disponível em www.lenntech.com. Acessado em 10 de junho de 2008.

LOPES, C. L. J. **Gerenciamento de recursos hídricos e o processo de internalização da variável água nas indústrias**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências. Universidade Estadual de Campinas.

MACEDO, J. A. B.; **Águas e Águas**. São Paulo: editora Varela, 2001. 505 p.

MACHADO, B. J. F. **Reuso de efluentes em torres de resfriamento** – estudo de caso: Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro. 2005. 106 p. Dissertação (Mestrado) –

Programa de Pós- Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, 2005. Rio de Janeiro.

MANCUSO, P. C. S. **Reuso de água**. São Paulo, 1988. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo.

_____; DOS SANTOS, H. F. (ed.) **Reuso de água** – Universidade de São Paulo, Faculdade de Saúde Pública, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental 1 Ed. São Paulo: Editora Manole LTDA, 2003

_____; **Reuso de água** – Universidade de São Paulo, Faculdade de Saúde Pública, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental 1 Ed. São Paulo: Editora Manole LTDA, 2003. *Apud* MONTEIRO, J. P.; MAGRINI, A.; SZKLO, A. S.; NUNES, R. T.S.in: **Gerenciamento de Água na Indústria de Refino de Petróleo e as Perspectivas do Reuso** (2007). Disponível em http://www.aquaflot.com.br/artigos/Gerenciamento_de__gua_na_Ind_stria_de_Refino_de_Petr_leo_e_as_Perspectivas_de_Re_so..pdf . Acessado em 3 de Agosto de 2008.

MANUAL DE ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS – Teo Tokus Indústria e Comércio Ltda Américo Brasiliense - SP.

MANUAL DE ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS – QUIMIS APARELHOS CIENTÍFICOS, 22 ED, 2004.

MANUAL TÉCNICO - Eaton Ltda. Disponível em: http://www.eaton.com.br/arq_pdf/fluidpowerfiltracao/filtracaoprodutos/cartucho&bags.pdf. Acessado em 18 de Abril de 2008.

MANUAL TÉCNICO – Purolite do Brasil Ltda. Disponível em: http://www.purolite.com.br/downloads/Literaturas/Portugues/SST-60%20port.pdf .

Acessado em 20 de Agosto de 2008.

MARON JR, R. **Reuso de água em indústria metalúrgica rolamenteira** – estudo de caso da SKF do Brasil LTDA. 2006. 79 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

MELO, A. R. **Otimização do Reuso de Água em Lavadores Contínuos da Indústria Têxtil**. 2005. 219 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina – Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos.

METCALF & EDDY. **Wastewater Engineering – Treatment, Disposal and Reuse.** Singapura: McGraw-Hill, 2003.

MIERZWA, J. C., HESPANHOL, I. **Água na Indústria - Uso Racional e Reuso.** 1a ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

_____.**O uso racional e reuso como ferramentas para o gerenciamento de água e efluentes na indústria**. Estudo de caso da Kodak brasileira. Tese de Doutorado Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Sanitária da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MIYAKI, H. et al.; **Water recycling by floating media filtration and nanofiltration at a soft drink factory.** Desalination. v. 13, 2000, p. 47-53.

MOSS, M. (2008). **A importância da água**. Brasil das águas, Rio de Janeiro. Disponível em http://www.brasildasaguas.com.br/brasil_das_aguas/importancia_agua.html. Acessado em 10 de Junho de 2008.

MRE. *Brasil:* **Informações Gerais Sobre Aspectos Geográficos**. Disponível em: www.mre.gov.br/mdsg/textos/brinfg-p.htm . Acessado em 16 de Abril de 2008.

NALCO; **The Nalco Water Handbook.** 2ª ed, New York: McGraw-Hill, 1988.

NAVACHI, J. A. **Reutilização dos efluentes tratados**: Caso de uma lavanderia industrial. 2002. 89 p. Dissertação (Mestrado) –Instituto de Engenharia Ambiental, Universidade Regional de Blumenal. Blumenau.

NUNES R. T. S.; **Conservação da água em edifícios comerciais: Potencial de uso racional e reuso em shopping center**. 2006. 144 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

OENNING JR, A. **Avaliação de tecnologias avançadas para o reuso de água em indústria metal-mecânica.** 2006. 223 p. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. – Curitiba, 2006

PAWLOWSKY, U **Comparação de tecnologjas para reciclagem de águas residuárias tratadas em indústria de café**. Gestão Ambiental, nº 21 - Agosto/Setembro de 2003.

REIS, J. L. R. **Estudo Biodegradabilidade do Efluente da Indústria de Borracha Sintética** – Universidade do Rio de Janeiro, 1999. Rio de Janeiro. *Apud* BREIA, G. C. **Aplicação dos Processos de Coagulação/Floculação e Adsorção em Carvão Ativo no Tratamento Primário dos Efluentes de Indústrias de Defensivos Agrícolas**. 2006. 175 p. Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado do Rio de Janeiro – Instituto de Química.

RODRIGUES, R.S.; **As dimensões legais e institucionais do reuso de água no Brasil**: Proposta de regulamentação do reuso no Brasil. 2005. 177 p. Dissertação (Mestrado) – Depertamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo

SANTOS FILHO, D. F., **Clarificação de água e remoção de alguns elementos indesejáveis.** Tecnologia de Tratamento de Água – Água para Indústrias. Rio de Janeiro: Almeida Neves. p.18-27, 1976.

SAUTCHUK, C. A.; **Formulação de diretrizes para implantação de programas de conservação de águas em edificações**. 2004. 332 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

SOLMAZ, A.; ÜSTÜN, G. E.; BIRGÜL, A.; TASDEMIR, Y.; **Regeneration of industrial district wastewater using a combination of Fenton process and ion exchange -A case study**. Resources, Conservation and Recycling v. 52, 2007, p. 425–440.

_____; **Treatability studies with chemical precipitation and ion exchange for an organized industrial district (OID) effluent in Bursa, Turkey**. Desalination v. 217, 2007, p. 301–312.

TOMAZ, P. (2001). **Economia de Água para Empresas e Residências** – Um Estudo Atualizado sobre o Uso Racional de Água. Navegar editora. 2ª Edição. São Paulo.

TOMAZ, P. (2001). **Economia de Água para Empresas e Residências** – Um Estudo Atualizado sobre o Uso Racional de Água. Navegar editora. 2ª Edição. São Paulo. *Apud* SILVA, A. C. P. et al. **Reuso de água e suas implicações jurídicas**. São Paulo: Navegar Editora, 2003. 111 p.

TOMAZELA, D. P. **Monitoramento Espacial e Temporal de Parâmetros Físicos, Químicos e Biológicos da Bacia Hidrográfica do Rio Capivari.** 2008. 49 p. Projeto de Graduação. Universidade Federal de Santa Catarina – Centro de Ciências Biológicas.

VON SPERLING, M., **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos.** 2ª ed. Minas Gerais: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental UFMG, 1996.

WINGFIELD, T; SCHAEFER, J.; **Making Water Work Harder**, *Environmental Protection*, 2001. Disponível em http://www.pall.com/pdf/EP1101.pdf . Acessado em 3 de Agosto de 2008.

Sites:

Gerenciamento de Água na Indústria de refino de Petróleo, ano VI, Edição n° 29, Nov./Dez. 2007. Disponível em: http://www.tratamentodeagua.com.br/a1/informativos/acervo.php?chave=3079&cp . Acessado em 5 de Setembro de 2008.

Tratamento de Água e Efluentes – Filtração. Disponível em: http://www.tratamentoaguaefluentes.com.br/filtrosfiltracao/Tratamento_Agua_filtracao.htm Acessado em 20 de Agosto de 2008.

http://www.dep.state.fl.us . Acessado em 25 de Abril de 2008.

htt://www.financialweb.com.br/noticias/índex.asp?cod=5003 – Reportagem Gazeta Mercantil 29/07/2008 – Empresas já se preocupam com a água – parte 2 . Acessado em 10 de Agosto de 2008.

Núcleo Integrado para o Reuso de Águas e Efluentes do Estado do Rio de Janeiro – Implantação e Consolidação. Disponível em: http://dpi.eq.ufrj.br/Anais_A/CNIRAE01/Abertura%20do%20Seminario.pdf Acessado em 16 de Março de 2009.