



Trabalho Final de Mestrado em Engenharia Ambiental
Modalidade: Dissertação

**ANÁLISE COMPARATIVA DOS PROCESSOS DE FILTRAÇÃO
EM MEMBRANAS E CLARIFICAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA PARA
REUSO DE ÁGUA NA INDÚSTRIA**

Autora: *Luciana Paula Lobo*
Orientadora: *Thereza Christina de Almeida Rosso*
Co-orientador: *Gandhi Giordano*

Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia
Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente

Dezembro de 2004

**ANÁLISE COMPARATIVA DOS PROCESSOS DE FILTRAÇÃO
EM MEMBRANAS E CLARIFICAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA PARA
REUSO DE ÁGUA NA INDÚSTRIA**

Luciana Paula Lobo

Trabalho Final submetido ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental – Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Aprovada por:

Prof^a. Thereza Christina de Almeida Rosso, D. Sc. -
Presidente
PEAMB/UERJ

Prof. Gandhi Giordano, D. Sc.
PEAMB/UERJ

Liane Elizabeth Caldeira Lage, D. Sc.
INPI/MDIC

Profa. Juacyara Carbonelli Campos, D. Sc.
EQ/UFRJ

Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Dezembro de 2004

LOBO PAULA, LUCIANA

Análise Comparativa dos Processos de Filtração em Membranas e Clarificação Físico-Química para Reuso de Água na Indústria. [Rio de Janeiro] 2004.

xxii, 103 p. 29,7 cm (FEN/UERJ, Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental - Área de Concentração: Saneamento Ambiental - Controle da Poluição Urbana e Industrial, 2004.)

Dissertação - Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

1. Reuso de água
 2. Torres de resfriamento
 3. Ultrafiltração
 4. Clarificação
- I. FEN/UERJ II. Título (série)

Resumo do Trabalho Final apresentado ao PEAMB/UERJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiental.

ANÁLISE COMPARATIVA DOS PROCESSOS DE FILTRAÇÃO EM
MEMBRANAS E CLARIFICAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA PARA REUSO DE ÁGUA
NA INDÚSTRIA

Luciana Paula Lobo

Dezembro de 2004

Orientadora: Thereza Christina de Almeida Rosso

Co-orientador: Gandhi Giordano

Área de Concentração: Saneamento Ambiental - Controle da Poluição Urbana e Industrial

No cenário atual de escassez de água vários setores principalmente as indústrias vêm atuando de forma pró-ativa, buscando alternativas e formas de modificar o gerenciamento da água em seus processos. A indústria além dos incrementos nos custos de produção a partir da cobrança pelo uso da água, não tem uso prioritário segundo a política nacional de recursos hídricos. Tendo em vista a competitividade atual, o reuso de água se tornou uma questão de sobrevivência gerando maior autonomia, otimizando consumo e minimizando custos. A proposta deste trabalho foi comparar duas técnicas de tratamento terciário de efluentes a partir de um efluente conhecido proveniente de uma indústria farmacêutica para fins de reuso em torres de resfriamento. Foram realizados ensaios em equipamento *Jar Test* a fim de simular a clarificação físico-química e, no caso das membranas, optou-se por utilizar o sistema de ultrafiltração em escala real já implantado na indústria farmacêutica em questão. Em função dos resultados experimentais obtidos, verificou-se que o tratamento com membranas gera um efluente de melhor qualidade e oferece maior confiabilidade. A clarificação mostrou-se como uma técnica capaz de absorver variações de carga, mas de difícil controle no que diz respeito à quantidade de produtos químicos utilizada e geração de lodo.

Palavras-Chave: Reuso de Água, Torres de Resfriamento, Ultrafiltração, Clarificação.

Abstract of Final Work presented to PEAMB/UERJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Environmental Engineering.

COMPARATIVE ANALYSIS OF EFFLUENT TREATMENT WITH MEMBRANES
AND CLARIFICATION FOR INDUSTRIAL WATER REUSE

Luciana Paula Lobo

December 2004

Advisors: Thereza Christina de Almeida Rosso

Gandhi Giordano

Area: Environmental Sanitation - Urban and Industrial Pollution Control

In the present scenario of water shortage, many organizations, particularly industrial undertakings are beginning to pay increasing attention towards finding alternative forms for the management of the water used in their processes. Industry aside from bearing progressive increments in the cost of water it receives, is not accorded any priorities in supply in accordance with national policies governing water resources. In view of the current competition, the technologies for water reuse had become a question rather of survival, of generating greater autonomy, of optimizing consumption, and minimizing costs. The objective of this work was to compare two technologies of tertiary treatment, using a known secondary-treated effluent from a pharmaceutical industry which was to be recycled as cooling tower make-up. Jar Tests experiments were carried out in order to obtain clarified water, and the results were compared with those from an existing ultra filtration plant. The experimental results showed that membrane treatment produces a better quality effluent and is more reliable. It was verified that clarification is able to cater for load variations, but has difficulty in controlling the use of chemical additives and aspects of sludge generation.

Key words: Water Reuse, Cooling Tower, Ultra filtration, Clarification.

À minha família, em especial à minha mãe querida pela incessante ajuda em todos os momentos, pelo carinho e incentivo.

AGRADECIMENTOS

- À Prof^a Thereza Rosso pelo auxílio e incentivo na estruturação do trabalho e apreciação deste texto.
- Ao Prof. Gandhi Giordano, pelo apoio, disponibilidade, e pelos diversos ensinamentos e idéias transmitidos a cada reunião.
- À Empresa Tecma – Tecnologia em Meio Ambiente Ltda., nas pessoas dos seus Diretores, Gandhi Giordano e Luiz Carlos O. da Cunha por disponibilizarem recursos para a realização deste trabalho.
- Aos Engenheiros Carlos Gonzáles e Edson Bravin, pela enorme colaboração na coleta de amostras e visitas técnicas.
- Aos técnicos do laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental da Uerj, em especial Cláudia e Ubiratan, pela contribuição decisiva no desenvolvimento das atividades da parte experimental.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	IX
LISTA DE FIGURAS	X
RELAÇÃO DE SIGLAS E ABREVIATURAS	XIII
1. INTRODUÇÃO	1
2. REUSO DE ÁGUA NA INDÚSTRIA	4
2.1 ETAPAS DE UM PROJETO DE REUSO DE ÁGUA NA INDÚSTRIA	4
2.2 PRINCIPAIS USOS DA ÁGUA E REQUISITOS DE QUALIDADE	7
2.3 PROJETOS DE REUSO DE ÁGUA EM DIFERENTES SEGMENTOS	7
2.4 REUSO DE ÁGUA EM TORRES DE RESFRIAMENTO	11
2.4.1 <i>Tipos de Torres e suas Características</i>	12
2.4.2 <i>Tipos e Características dos Sistemas de Resfriamento</i>	16
2.4.3 <i>Principais Problemas em Torres de Resfriamento</i>	19
2.4.4 <i>Balanco Mássico no Sistema Aberto com Recirculação</i>	25
2.4.5 <i>Padrão de Qualidade da Água de Resfriamento</i>	28
3. CARACTERÍSTICAS E PROCESSOS DE TRATAMENTOS DE EFLUENTES INDUSTRIAIS	31
3.1 TÉCNICAS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES	34
3.1.1 <i>Tratamento Primário</i>	34
3.1.2 <i>Tratamento Secundário ou Biológico</i>	41
3.1.3 <i>Tratamento Terciário</i>	44
3.2 AVALIAÇÃO DAS ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS NOS PROGRAMAS DE REUSO.....	60
4. METODOLOGIA	63
4.1 DESCRIÇÃO DA PARTE EXPERIMENTAL	65
4.1.1 <i>Tratamento Físico-Químico – Jar Test</i>	66
4.1.2 <i>Tratamento com Membranas de Ultrafiltração</i>	70
RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
ANEXOS	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Etapas do projeto de reuso de água na indústria.....	4
Tabela 2.2: Correspondência entre o IR e a tendência à incrustação ou à agressividade.....	21
Tabela 2.3: Perdas por respingos em torres	26
Tabela 2.4: Parâmetros de controle X Impactos prováveis em sistemas de resfriamento	28
Tabela 2.5: Qualidade de água de reposição ou <i>makeup</i> para uso em sistemas de resfriamento com circuitos semi-abertos, com recirculação de água	29
Tabela 3.1: Processos de tratamento de efluentes líquidos conforme a classificação por níveis.....	34
Tabela 3.2: Coagulantes e faixas de pH em que são utilizados	37
Tabela 3.3: Vantagens e Desvantagens da Coagulação e Floculação Química.....	38
Tabela 3.4: Tipos de Sedimentação e Área de Aplicação	39
Tabela 3.5: Principais processos biológicos para o tratamento de efluentes.....	42
Tabela 3.6 : Relação entre porosidade de membranas, pressão de operação e rendimento total do processo	55
Tabela 3.7: Variação dos parâmetros de qualidade de acordo com o tipo de membrana utilizada	56
Tabela 3.8: Características físicas, químicas e biológicas dos efluentes industriais	62
Tabela 4.1: Dosagens dos produtos químicos utilizados na execução do <i>Jar Test</i>	67
Tabela 5.1: Resultados das análises do teor de sulfato por tipo de tratamento	74
Tabela 5.2: Análises complementares por tipo tratamento.....	75
Tabela 5.3: Resultados das análises de sólidos dissolvidos totais por tipo de tratamento	76
Tabela 5.4: Resultados das análises de turbidez por tipo de tratamento	77
Tabela 5.5: Resultados das análises de sólidos suspensos totais (SST)	78
Tabela 5.6: Resultados das análises da cor por tipo de tratamento	78
Tabela 5.7: Dosagem de produtos químicos X Volume de lodo gerado	79
Tabela 5.8: Variação da quantidade de sólidos em suspensão antes e após 1 hora de sedimentação em Cone Imhoff	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Fatores relacionados ao consumo de água na indústria	5
Figura 2.2: Distribuição do Consumo de Água em Indústria de Celulose e Papel	6
Figura 2.3: Distribuição do Consumo de Água em Refinarias.....	6
Figura 2.4: Distribuição do Consumo de Água em Indústria de Laticínios	6
Figura 2.5: Sistema Piloto de Reuso de Água do Jardim Zoológico - RJ	8
Figura 2.6: Detalhe do sistema piloto de ultrafiltração	8
Figura 2.7: Detalhe do armazenamento de água recuperada do sistema piloto.....	9
Figura 2.8: Fluxograma do Processo de Tratamento de Efluentes incluindo Reuso.....	10
Figura 2.9: Fluxograma da Estação de Tratamento de Águas Residuárias em Indústria Têxtil.....	11
Figura 2.10: Torre de resfriamento de tiragem natural.....	13
Figura 2.11: Torre de tiragem mecânica forçada.....	14
Fonte: AZEVEDO	
Figura 2.1: Fatores relacionados ao consumo de água na indústria	5
Figura 2.2: Distribuição do Consumo de Água em Indústria de Celulose e Papel	6
Figura 2.3: Distribuição do Consumo de Água em Refinarias.....	6
Figura 2.4: Distribuição do Consumo de Água em Indústria de Laticínios	6
Figura 2.5: Sistema Piloto de Reuso de Água do Jardim Zoológico - RJ	8
Figura 2.6: Detalhe do sistema piloto de ultrafiltração	8
Figura 2.7: Detalhe do armazenamento de água recuperada do sistema piloto.....	9
Figura 2.8: Fluxograma do Processo de Tratamento de Efluentes incluindo Reuso.....	10
Figura 2.9: Fluxograma da Estação de Tratamento de Águas Residuárias em Indústria Têxtil.....	11
Figura 2.10: Torre de resfriamento de tiragem natural.....	13
Figura 2.11: Torre de tiragem mecânica forçada.....	14
Fonte: AZEVEDO et al, 1999.	14
Figura 2.12a: Torre com tiragem mecânica induzida em corrente cruzada.....	15
Figura 2.12b: Torre com tiragem mecânica induzida em corrente cruzada	15
Figura 2.13a: Torre com tiragem mecânica induzida em contracorrente	16
Figura 2.13b: Torre com tiragem mecânica induzida em contracorrente.....	16
Figura 2.14: Sistema aberto sem recirculação.	17
Figura 2.15: Sistema aberto com recirculação.....	18
Figura 2.16: Sistema fechado.	19
Figura 2.17: Tubo com incrustação	22
Figura 2.18: Depósitos de óxido de ferro devido à água contendo bicarbonato de ferro	24
Figura 2.19: Balanço Mássico no Sistema Aberto com Recirculação.....	25
Figura 2.20: Ciclo de concentração x economia de água de alimentação (make-up).....	28
Figura 3.1: Remoção de poluentes por nível de tratamento	33
Figura 3.2 Configuração esquemática da dupla camada elétrica.....	36
Figura 3.3: Desenho esquemático do funcionamento das membranas.....	44
Figura 3.4: Comparação esquemática entre Filtração Convencional (“Dead End Filtration”) e a Filtração em Fluxo Cruzado (“Cross Flow Filtration”)	45
Figura 3.5: O Fenômeno de Polarização de Concentração.....	47
Figura 3.6: Módulo Placa-e-Quadro (detalhe da disposição à esquerda).....	49
Figura 3.7: Esquema do Módulo Espiral de Membranas de Ultrafiltração	50

Figura 3.8 : O espectro da filtração	51
Figura 3.9 Características dos processos que Utilizam Diferença de Pressão como Força Motriz	53
Figura 3.10: Medida de seletividade em processos com membranas.....	54
Figura 3.11: Variação do fluxo permeado com o tempo de operação ocasionada por Polarização de Concentração e “Fouling”. Operação em Fluxo Cruzado.....	57
Figura 3.12: Recuperação parcial de fluxo permeado usando a técnica de operação com retrolavagem (“Backflushing”).....	59
Figura 4.1: Processo de Tratamento de Efluentes de Indústria Farmacêutica.....	64
Figura 4.2: Fluxograma da metodologia proposta.....	65
Figura 4.3: Foto esquemática do experimento	67
Figura 4.4: Equipamento Estático (<i>Jar Test</i>) com amostra	68
Figura 4.5: Lay-out do Sistema de Reuso de Água em Indústria Farmacêutica	70
Figura 4.6a: Sistema de Reuso de Água – Ultrafiltração	71
Figura 4.6b: Sistema de Reuso de Água – Membranas de Ultrafiltração.....	71
Figura 5.1: Comparação entre efluente do decantador e permeado da membrana de ultrafiltração	72
Figura 5.2: Comparação entre efluente do decantador e efluente após o Jar Test	72
Figura 5.3: Comparação entre efluente após o Jar Test e permeado da ultrafiltração....	73
Figura 5.5: Comparação entre os volumes de coagulante utilizado e lodo gerado após o <i>Jar Test</i>	79
Figura 5.6: Quantificação do lodo – Cone Imhoff no início do experimento	80
Figura 5.7: Quantificação do lodo – Cone Imhoff no final do experimento (após 1 h) .	80
et al, 1999.	14
Figura 2.12a: Torre com tiragem mecânica induzida em corrente cruzada.....	15
Figura 2.12b: Torre com tiragem mecânica induzida em corrente cruzada	15
Figura 2.13a: Torre com tiragem mecânica induzida em contracorrente	16
Figura 2.13b: Torre com tiragem mecânica induzida em contracorrente.....	16
Figura 2.14: Sistema aberto sem recirculação.....	17
Figura 2.15: Sistema aberto com recirculação.....	18
Figura 2.16: Sistema fechado.	19
Figura 2.17: Tubo com incrustação	22
Figura 2.18: Depósitos de óxido de ferro devido à água contendo bicarbonato de ferro	24
Figura 2.19: Balanço Mássico no Sistema Aberto com Recirculação.....	25
Figura 2.20: Ciclo de concentração x economia de água de alimentação (make-up.....	28
Figura 3.1: Remoção de poluentes por nível de tratamento	33
Figura 3.2 Configuração esquemática da dupla camada elétrica.....	36
Figura 3.3: Desenho esquemático do funcionamento das membranas.....	44
Figura 3.4: Comparação esquemática entre Filtração Convencional (“Dead End Filtration”) e a Filtração em Fluxo Cruzado (“Cross Flow Filtration”)	45
Figura 3.5: O Fenômeno de Polarização de Concentração.....	47
Figura 3.6: Módulo Placa-e-Quadro (detalhe da disposição à esquerda)	49
Figura 3.7: Esquema do Módulo Espiral de Membranas de Ultrafiltração	50
Figura 3.8 : O espectro da filtração	51
Figura 3.9 Características dos processos que Utilizam Diferença de Pressão como Força Motriz	53
Figura 3.10: Medida de seletividade em processos com membranas.....	54
Figura 3.11: Variação do fluxo permeado com o tempo de operação ocasionada por Polarização de Concentração e “Fouling”. Operação em Fluxo Cruzado.....	57

Figura 3.12: Recuperação parcial de fluxo permeado usando a técnica de operação com retrolavagem (“Backflushing”).....	59
Figura 4.1: Processo de Tratamento de Efluentes de Indústria Farmacêutica.....	64
Figura 4.2: Fluxograma da metodologia proposta.....	65
Figura 4.3: Foto esquemática do experimento	67
Figura 4.4: Equipamento Estático (<i>Jar Test</i>) com amostra	68
Figura 4.5: Lay-out do Sistema de Reuso de Água em Indústria Farmacêutica	70
Figura 4.6a: Sistema de Reuso de Água – Ultrafiltração	71
Figura 4.6b: Sistema de Reuso de Água – Membranas de Ultrafiltração.....	71
Figura 5.1: Comparação entre efluente do decantador e permeado da membrana de ultrafiltração	72
Figura 5.2: Comparação entre efluente do decantador e efluente após o Jar Test	72
Figura 5.3: Comparação entre efluente após o Jar Test e permeado da ultrafiltração....	73
Figura 5.5: Comparação entre os volumes de coagulante utilizado e lodo gerado após o <i>Jar Test</i>	79
Figura 5.6: Quantificação do lodo – Cone Imhoff no início do experimento	80
Figura 5.7: Quantificação do lodo – Cone Imhoff no final do experimento (após 1 h) .	80

RELAÇÃO DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ASTM - *American Standards of Testing and Materials.*

AT – Alcalinidade Total

AWWA - *American Water Works Association.*

DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio.

DQO - Demanda Química de Oxigênio.

ETE - Estação de Tratamento de Efluentes.

IL - Índice de Langelier

IP - Índice de Estabilidade de Puckorius.

IR - Índice de Estabilidade de Ryznar.

ISL - Índice de Saturação de Langelier.

IVL - Índice Volumétrico de Lodo

PNRH – Política Nacional de Recursos Hídricos

STD - Sólidos Totais Dissolvidos.

STS - Sólidos Totais Suspensos.

TECMA – Tecnologia em Meio Ambiente Ltda.

UV - Ultravioleta.

UF – Ultrafiltração

1. INTRODUÇÃO

Atualmente a escassez de água vem sendo amplamente discutida em vários setores mas é o setor industrial que vem atuando de forma pró-ativa, buscando alternativas e modificando o gerenciamento da água em seus processos.

A situação legislativa no Brasil para fixação de princípios e critérios à reutilização da água é insipiente. As ações têm-se orientado por critérios de outros países e/ou pela Organização Mundial da Saúde (OMS). Não obstante, no Brasil, a Lei nº 9.433/97 consagra a água como um bem social, porém, com características de bem econômico, instituindo a cobrança pelo seu uso como um dos instrumentos para a gestão dos recursos hídricos.

No instrumento de cobrança pelo uso da água, implantado com o objetivo de garantir água na quantidade e qualidade para atual e futuras gerações, o usuário que reutiliza suas águas reduz as vazões de captação e lançamento e conseqüentemente tem sua cobrança reduzida. Dependendo das vazões utilizadas, o montante de recursos economizados com a redução da cobrança em função do reuso pode cobrir os custos de instalação de um sistema de reuso de água na unidade industrial.

Outro aspecto importante dessa política é o fato de que em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais. Desta forma, as novas alternativas e soluções tecnológicas para reuso de água se tornaram não apenas uma forma de crescimento, mas uma questão de sobrevivência à medida que promovem a autonomia e a racionalização do consumo.

Como o país não possui nenhuma legislação específica para reuso de água, o Conselho Nacional do Meio Ambiente está preparando a primeira resolução brasileira para a regulamentação de cinco tipos de reuso: agrícola, industrial, usos urbanos não potáveis, aquicultura e recarga de aquíferos.

É importante ressaltar o surgimento de garantias em relação à questão ambiental, ou seja, no momento em que há valorização do efluente e comprometimento da alta gerência, reduz-se o número de fiscalizações por parte das agências ambientais. A indústria é a maior interessada em ter esse controle, garantir a manutenção de bons índices de consumo, o perfeito desempenho e monitoramento dos sistemas, equipamentos e processos ao longo do tempo, contribuindo para a redução e manutenção dos custos.

O aumento da competitividade no setor exige a implantação de medidas para a otimização do consumo e redução de perdas e desperdícios, além de programas de conscientização e treinamento.

Ações desta natureza também têm reflexos diretos e potenciais na imagem das empresas, demonstrando a crescente conscientização do setor com relação à preservação ambiental e responsabilidade social.

As tecnologias para reuso de efluentes disponíveis precisam ser avaliadas cuidadosamente e selecionadas de acordo com as peculiaridades de cada projeto. Cada setor produtivo gera um determinado tipo de efluente para ser tratado e, conseqüentemente, diferentes tipos de contaminantes, os quais requerem métodos de tratamento específicos.

Os custos envolvidos, as dificuldades de projeto, a área disponível, a segurança do processo operacional e a confiabilidade devem fazer parte do check-list dos projetos de reuso. A utilização de sistemas piloto também são essenciais na tomada de decisão e, nesta etapa, vários tipos de filtros, membranas e outros sistemas devem ser testados.

Em relação aos processos avançados de tratamento de efluentes visando o reuso, há no mercado atual duas correntes tecnológicas. A primeira delas preconiza o uso da filtração em membranas e a outra defende o processo de clarificação físico-química. A lógica da implementação de um sistema de reuso é justamente procurar compreender quais são as reais necessidades não apenas no que diz respeito à vazão de água, mas principalmente no que diz respeito à qualidade requerida em cada ponto de consumo.

O presente estudo foi direcionado para o segmento responsável pelo maior consumo de água na maioria dos ramos industriais: as torres de resfriamento. As características da água de reuso e o comportamento desta água para essa aplicação foram amplamente discutidos conforme padrões estabelecidos para o mercado brasileiro.

O objetivo principal desta dissertação é comparar as alternativas de polimento, contribuindo para o levantamento dos aspectos mais significativos em cada processo incluindo os parâmetros de qualidade da água e a relação destes com o desempenho dos sistemas.

Foram coletadas amostras de efluentes provenientes de uma indústria farmacêutica que já os reutilizava após tratamento com membranas de ultrafiltração. Tais amostras foram

coletadas em dois locais distintos: na saída do decantador secundário e na saída da ultrafiltração. O tratamento físico-químico foi simulado através de ensaios no equipamento *Jar Test* e a qualidade do efluente final foi comparada com a qualidade do efluente do permeado da ultrafiltração. Concentrações variáveis de coagulante químico foram utilizadas e a sedimentabilidade e outros aspectos do lodo gerado foram avaliados através de testes convencionais e bastante difundidos.

2. REUSO DE ÁGUA NA INDÚSTRIA

2.1 Etapas de um Projeto de Reuso de Água na Indústria

As exigências cada vez mais restritivas na legislação ambiental, os custos associados aos processos de tratamento de efluentes, a atual cobrança pelo uso da água, a disponibilidade hídrica limitada e de má qualidade em conjunto com a busca pela auto-suficiência estão promovendo em escala crescente o surgimento de projetos de reuso de água na indústria.

O uso eficiente da água, abrangendo a componente de reuso, conduz ao alcance de outros objetivos intangíveis, tais como, a melhoria da imagem da indústria através da otimização dos recursos com a redução dos impactos ambientais negativos contribuindo, assim, para a sustentabilidade de uma atividade.

A implantação de um sistema de reuso deve contemplar diversas etapas a fim de que haja reciprocidade entre os benefícios ambientais e econômicos, como mostra a tabela 2.1. Desta forma, o controle ambiental na indústria poderá deixar de representar um custo pesado para transformar-se numa aplicação lucrativa de recursos.

Tabela 2.1: Etapas do projeto de reuso de água na indústria

ETAPAS DE UM PROJETO DE REUSO DE ÁGUA NA INDÚSTRIA
1. Definição dos principais usos de água na planta industrial e requisitos de qualidade.
2. Otimização das instalações existentes e a racionalização do uso de água.
3. Balanço de massa com a caracterização de todos os pontos de geração de efluentes de cada unidade do processo industrial.
4. Caracterização dos efluentes e avaliação da confiabilidade da estação de tratamento de efluentes.
5. Avaliação dos locais potenciais para reuso, ensaios de tratabilidade e legislação vigente.
6. Tratamento adicionais necessários e estudo de modificações na ETE.
7. Análise da viabilidade técnica e econômica das rotas tecnológicas para reutilização e reciclagem de efluentes.

A estratégia ótima para o desenvolvimento desses projetos deve conter obrigatoriamente uma análise da distribuição do consumo de água na indústria e da qualidade necessária para a água de acordo com o uso (BRAVO, 2003).

O consumo de água na indústria varia com diversos fatores conforme mostra a **figura 2.1**. O clima da região pode influenciar o consumo pois em regiões frias a quantidade de água utilizada em processos de resfriamento será menor nas indústrias desta região. A tecnologia empregada também influi no consumo. Quanto mais atualizada tecnologicamente, maior a eficiência do processo e melhor é o aproveitamento dos recursos naturais. Em fábricas antigas também pode ocorrer um grande desperdício de água devido ao desgaste dos equipamentos, vazamentos e até perda da produção decorrente de paradas para manutenção das máquinas, entre outros motivos (MIERZWA, 2002).



Figura 2.1: Fatores relacionados ao consumo de água na indústria

As **figuras 2.2, 2.3 e 2.4** mostram a distribuição do consumo de água em diferentes ramos industriais.

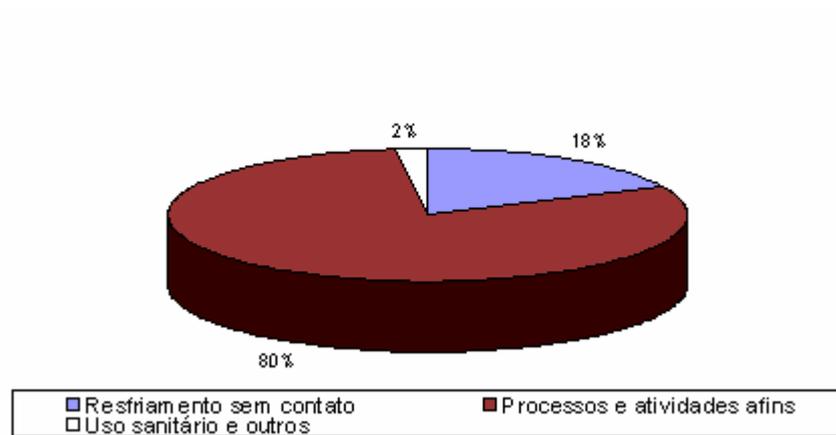


Figura 2.2: Distribuição do Consumo de Água em Indústria de Celulose e Papel
 Fonte: Adaptado de VAN DER LEEDEN, TROISE and TODD, 1990.

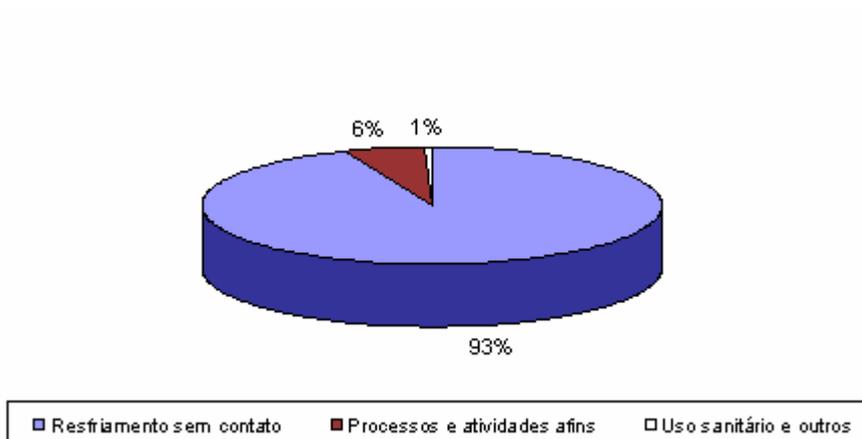


Figura 2.3: Distribuição do Consumo de Água em Refinarias
 Fonte: Adaptado de VAN DER LEEDEN, TROISE and TODD, 1990.

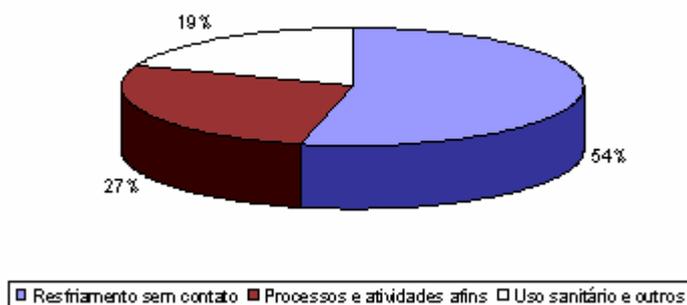


Figura 2.4: Distribuição do Consumo de Água em Indústria de Laticínios
 Fonte: Adaptado de VAN DER LEEDEN, TROISE and TODD, 1990.

2.2 Principais Usos da Água e Requisitos de Qualidade

As formas potenciais de reuso de água na indústria são (MANCUSO et al., 2003):

- Torres de resfriamento, as indústrias desenvolvem junto com o seu processo uma grande quantidade de calor residual, que deve ser removido ou reduzido. Em função disto possuem um sistema de refrigeração, que geralmente utiliza a água como meio refrigerante, que absorve este calor residual do processo para depois cedê-lo a outro meio.
- Lavagem de peças e equipamentos
- Irrigação de áreas verdes
- Lavagem de pisos e veículos
- Processo industrial, principalmente nas indústrias de papel, têxtil, plásticos, curtume, construção civil e petroquímica.
- Lavagem de gases da chaminé
- Uso sanitário
- Proteção contra incêndios

2.3 Projetos de Reuso de Água em Diferentes Segmentos

Em outubro de 2004 o Jardim Zoológico localizado no Rio de Janeiro implantou um sistema piloto de reuso de água utilizando membranas de ultrafiltração que foi apresentado em uma exposição promovida pela Fundação Rio-Zoo e a Secretaria de Meio Ambiente. O objetivo principal é obter dados para a implantação de um sistema em escala real que será acoplado à estação de tratamento de efluentes em construção atualmente.

O sistema tratará 600 m³/dia de efluentes e produzirá 400 m³/dia de água recuperada que será utilizada principalmente para a dessedentação de animais e lavagens de pisos e tanques. A composição do sistema de tratamento em escala real é: sistema de coleta dos efluentes; poço-elevatória; caixa de areia; peneira; tanque de equalização; tanque de aeração, decantador final, filtro de areia, membrana de ultrafiltração e desinfecção. O esquema completo do sistema piloto implantado pela empresa Tecma – Tecnologia em Meio Ambiente Ltda. pode ser visto na **figura 2.5**.



Figura 2.5: Sistema Piloto de Reuso de Água do Jardim Zoológico - RJ

Os resultados obtidos nos testes de tratabilidade permitiram definir a qualidade final da água necessária e os custos de investimento, operação e manutenção.

Nas **figuras 2.6 e 2.7** podem ser observados com detalhes o sistema de membranas de ultrafiltração e o tanque de água recuperada para reuso representado pelo aquário.



Figura 2.6: Detalhe do sistema piloto de ultrafiltração



Figura 2.7: Detalhe do armazenamento de água recuperada do sistema piloto

Outro exemplo de reuso de água utilizando membranas de ultrafiltração que pode ser citado é o caso de uma indústria automobilística localizada em São Paulo. Após levantamento técnico, foi constatado que dos 100.000 m³/dia de água comprada e fornecida pela concessionária local apenas 30% precisava ser potável. O sistema foi implantado e cerca de 70.000 m³/dia deixaram de ser lançados nos corpos receptores.

A **figura 2.8** apresenta o fluxograma completo do processo de tratamento que consiste, basicamente, de uma unidade chamada Sedimat, que trata quimicamente os efluentes industriais, e outra unidade chamada Biosedimat, que trata biologicamente o esgoto doméstico, mais os efluentes industriais já pré-tratados no Sedimat. Para produzir água de reuso foram instalados em seguida filtros de areia e uma unidade de ultrafiltração com capacidade de 135 m³/h que além de atender com segurança e regularidade todos os pontos de consumo não potáveis, era também um excelente pré-tratamento para sistemas de desmineralização onde era produzida água de alta qualidade para o processo de pintura.



Figura 2.8: Fluxograma do Processo de Tratamento de Efluentes incluindo Reuso

Fonte: CORREA, 2003.

Em outros casos, optou-se por utilizar um tratamento físico-químico para fins de reuso. Em uma indústria têxtil localizada no Rio de Janeiro o projeto original da estação de tratamento de efluentes era composto por peneira estática, tanque de equalização, flotação, e lodos ativados. Após alguns levantamentos técnicos e ensaios de tratabilidade, foi instalada uma estação compacta de tratamento de águas residuárias conforme **figura 2.9**. O volume de água fornecida pela concessionária local diminuiu consideravelmente e a água recuperada não foi utilizada apenas para tingimentos de cor branca.

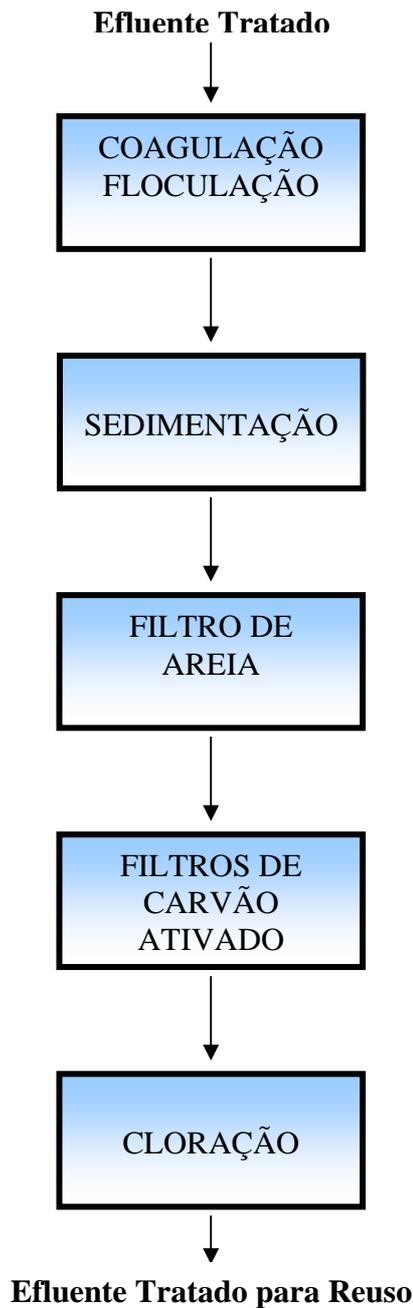


Figura 2.9: Fluxograma da Estação de Tratamento de Águas Residuárias em Indústria Têxtil

2.4 Reuso de Água em Torres de Resfriamento

Como foi mostrado nas figuras já citadas, o uso de água em torres de resfriamento representa um dos maiores consumos de água na indústria e será o objeto deste estudo. Desta forma, ênfase especial será dada para este tema neste capítulo.

A torre de resfriamento é um equipamento cuja função é rejeitar calor, liberando energia térmica para a atmosfera através do arrefecimento de uma corrente de água aquecida

inicialmente a uma determinada temperatura até uma temperatura menor, através da troca de calor dessa água com uma corrente de ar. O resfriamento ocorre em uma torre pelos mecanismos de resfriamento evaporativo e por sensível troca térmica.

Uma parte da água da bacia da torre de resfriamento é bombeada de volta ao processo para absorver mais calor e da outra é feita uma purga visando reduzir o acúmulo de contaminantes na água circulante. As torres de resfriamento são responsáveis pelo maior consumo de água na maioria dos ramos industriais. Este consumo refere-se à reposição das purgas de água, para manter uma determinada concentração de sais na torre de água de resfriamento, e das decorrentes da evaporação. A taxa de evaporação é de aproximadamente 1% do fluxo de água passando através da torre para cada 5,5° C reduzidos na temperatura da água. A perda por arraste ou respingo corresponde a 0,05% a 0,2% da vazão da torre.

2.4.1 Tipos de Torres e suas Características

Há dois modos de se classificar uma torre de resfriamento, conforme o tipo de tiragem ou conforme as direções dos fluxos de ar e água. Conforme o tipo de tiragem:

- a) Tiragem natural;
- b) Tiragem mecânica forçada;
- c) Tiragem mecânica induzida.

Nas torres de tiragem natural, o ar entra por baixo da torre, troca calor com a água e sobe devido à diminuição da sua densidade. Isto acarreta uma zona de baixa pressão que promove a entrada de mais ar frio na parte inferior da torre, conforme ilustrado na **figura 2.10**. A estrutura hiperbólica da torre auxilia a tiragem de ar quente. A movimentação do ar é proporcionada pela diferença de densidades do ar úmido no interior da torre e do ar ambiente. Como este efeito é menos acentuado em regiões onde a temperatura ambiente é mais elevada, as torres de tiragem natural são raramente utilizadas no Brasil (CASSETTA & MANSUR, 2004).

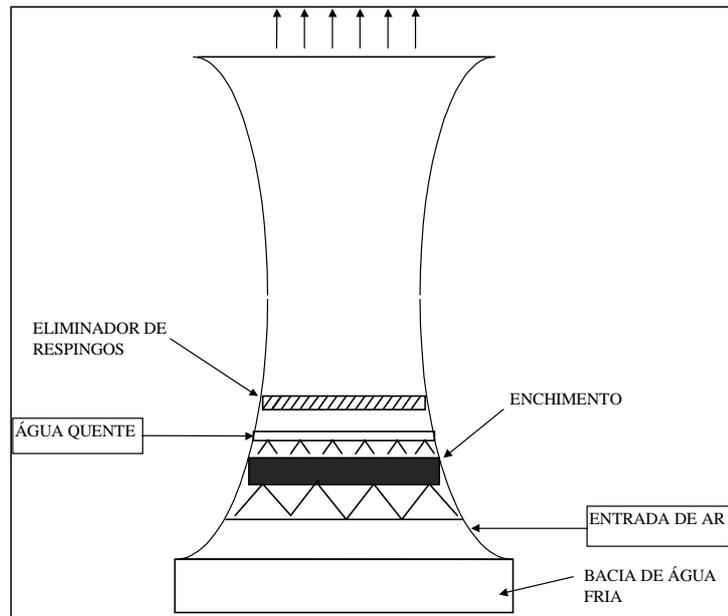


Figura 2.10: Torre de resfriamento de tiragem natural.

Fonte: AZEVEDO et al, 1999.

Ao contrário das torres com tiragem natural, que são utilizadas para grandes capacidades e em clima frio, principalmente na Europa, as torres de resfriamento com tiragem mecânica são largamente utilizadas no Brasil e possuem ventiladores para promover o fluxo de ar. Nas torres de tiragem mecânica forçada, os ventiladores são instalados na entrada de ar da torre (parte inferior) e nas torres de tiragem mecânica induzida os ventiladores ficam na saída de ar da torre, conforme ilustrado na **figura 2.11**.

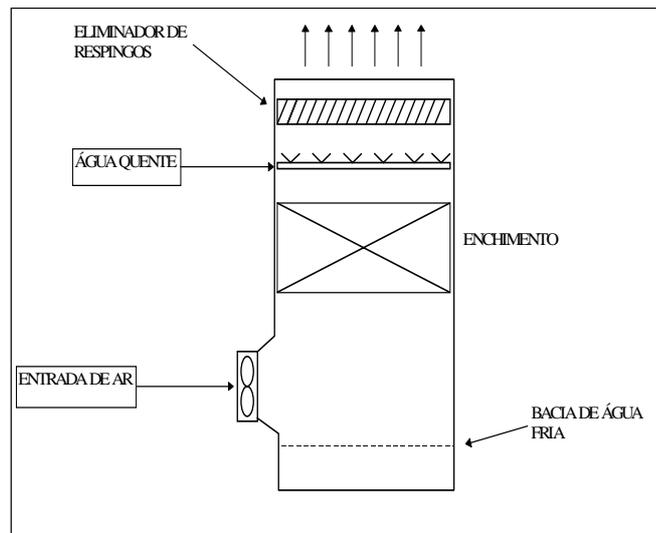


Figura 2.11: Torre de tiragem mecânica forçada.
Fonte: AZEVEDO et al, 1999.

As torres também são classificadas de acordo com as direções dos fluxos de ar e água, em:

- a) Torres de tiragem induzida corrente cruzada.
- b) Torres de tiragem induzida contra-corrente;

Nas torres de tiragem mecânica induzida em corrente cruzada, a água cai verticalmente através do enchimento e é resfriada pelo ar em trajetória horizontal, ilustrada nas **figuras 2.12a e 2.12b**. A distribuição de água quente é efetuada no topo, por meio de pequenos tanques com vários furos no fundo.

Nas torres de tiragem mecânica induzida contra-corrente, a água cai através do enchimento num percurso vertical e o ar usado para resfriamento sobe na torre no sentido oposto. Na saída do ar existe um eliminador de respingos, que visa diminuir o arraste de água, conforme **figuras 2.13a e 2.13b**.

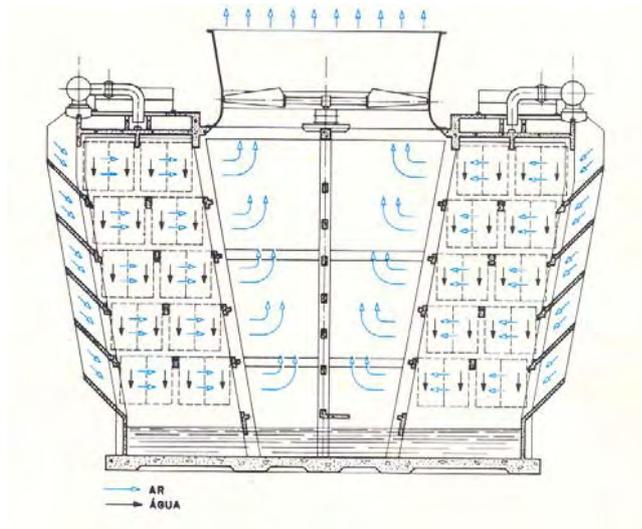


Figura 2.12a: Torre com tiragem mecânica induzida em corrente cruzada

Fonte: CASSETTA & MANSUR, 2004.



Figura 2.12b: Torre com tiragem mecânica induzida em corrente cruzada

Fonte: CASSETTA & MANSUR, 2004.

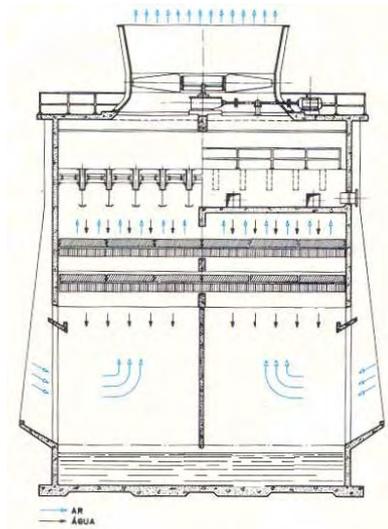


Figura 2.13a: Torre com tiragem mecânica induzida em contracorrente

Fonte: CASSETTA & MANSUR, 2004.



Figura 2.13b: Torre com tiragem mecânica induzida em contracorrente

Fonte: CASSETTA & MANSUR, 2004.

2.4.2 Tipos e Características dos Sistemas de Resfriamento

Conforme a disponibilidade de água e do tipo de circulação, existem três tipos principais de sistemas de resfriamento:

- a) Aberto sem recirculação
- b) Aberto com recirculação
- c) Fechado

Os **SISTEMAS ABERTOS SEM RECIRCULAÇÃO** são utilizados quando existem grandes volumes de água de boas características, usada numa só passagem e descarregada após a absorção de calor. Geralmente é utilizado quando a água de resfriamento é abastecida com água do mar, por exemplo. No Estado do Rio de Janeiro existem dois locais que utilizam este tipo de sistema de resfriamento: a Refinaria de Duque de Caxias (Reduc) e a Usina Nuclear de Angra dos Reis. O custo de instalação deste sistema é baixo, porém se a água não for tratada, pode trazer graves inconvenientes ao desempenho das instalações. Além disto, tais sistemas sofrem várias restrições ambientais, devido aos grandes volumes de água aquecida, provocando graves problemas de poluição térmica (DANTAS, 1988). A **figura 2.14** apresenta um desenho esquemático de sistema aberto sem recirculação.

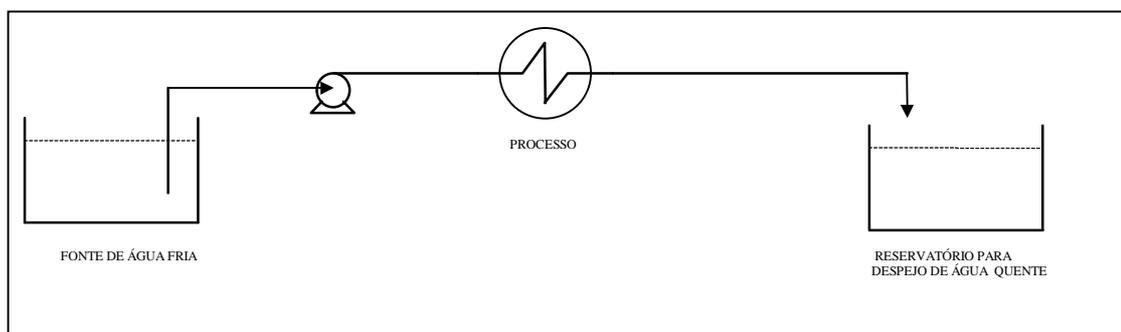


Figura 2.14: Sistema aberto sem recirculação.

Fonte: AZEVEDO et al, 1999.

Os **SISTEMAS ABERTOS COM RECIRCULAÇÃO** são utilizados quando algum tratamento da água e controles analíticos mais rigorosos são necessários antes da sua utilização e, em situações onde a economia de água se faz necessária.

Nestes sistemas, quando a água quente do sistema entra em contato com o ar, um fluxo espontâneo de calor passa dessa água quente para o ar frio, mas a maior parte do calor é

transferida por evaporação da água (GENTIL, 2003). A **figura 2.15** apresenta um desenho esquemático de sistema aberto com recirculação.

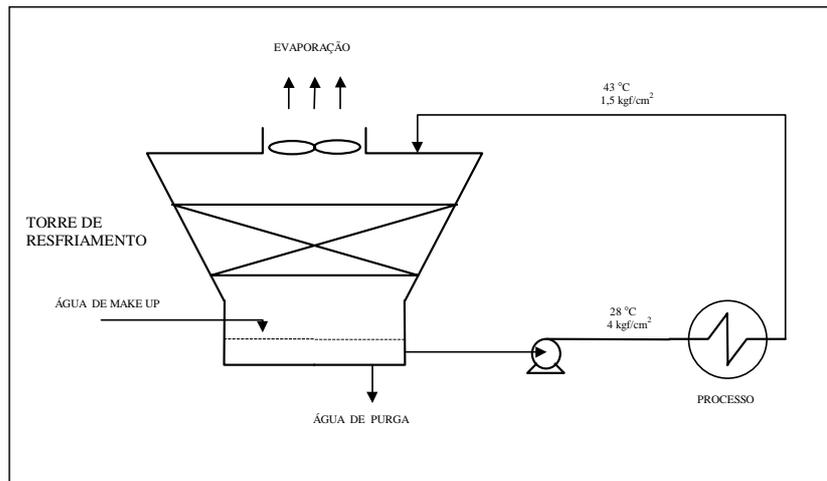


Figura 2.15: Sistema aberto com recirculação

Fonte: AZEVEDO et al, 1999.

Nos **SISTEMAS FECHADOS** o resfriamento da água se dá por troca térmica com o ar, e não por evaporação. Desta forma, o ciclo de concentração se mantém praticamente constante. Usualmente este sistema é implantado em conjunto com o sistema aberto com recirculação. A dissipação do calor ocorre em radiadores ou em trocadores de calor refrigerados por um gás ou outro circuito de água (DANTAS, 1988). A **figura 2.16** apresenta um desenho esquemático de sistema fechado.

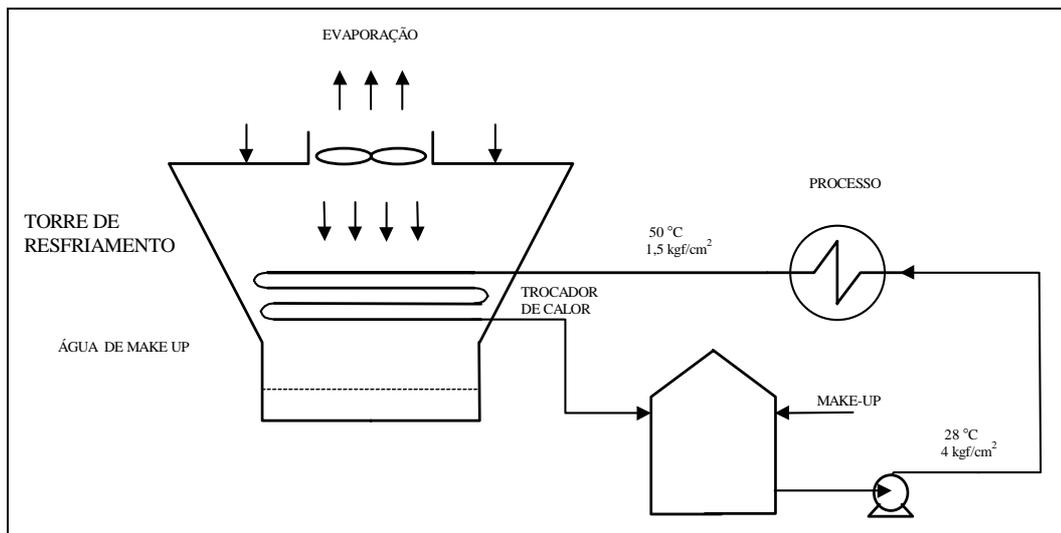


Figura 2.16: Sistema fechado.

Fonte: AZEVEDO et al, 1999.

Na maioria dos ramos industriais, os sistemas de resfriamento abertos com recirculação são empregados com maior frequência e por isto ênfase especial será dada à estes sistemas nos tópicos seguintes.

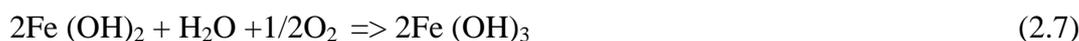
2.4.3 Principais Problemas em Torres de Resfriamento

❖ Incrustações

As incrustações são produzidas pela cristalização ou precipitação de sais dissolvidos na água do sistema. A temperatura, taxa de transferência de calor, cálcio, magnésio, ferro, sílica, alcalinidade, sólidos dissolvidos e pH são os fatores que interferem diretamente na formação de depósitos.

Nas águas incrustantes o aumento da temperatura provoca a transformação do bicarbonato de cálcio ou magnésio em carbonato de cálcio e hidróxido de magnésio de baixíssima solubilidade, provocando a incrustação das tubulações com crostas amorfas ou cristalinas (GENTIL, 2003). Algumas reações que ocorrem são mostradas a seguir:





A incrustabilidade de uma água pode ser medida através de índices de estabilidade. O **ÍNDICE DE LANGELIER (IL)** mede a tendência corrosiva ou incrustante de uma água. Para um dado tipo de água a uma determinada temperatura, existe um valor de pH denominado de saturação e indicado por pHs, onde o carbonato de cálcio está em equilíbrio com o meio aquoso. O valor de pHs depende do teor de sólidos dissolvidos, da alcalinidade, da dureza cálcica e da temperatura da água.

O índice de Langelier é obtido através da diferença algébrica entre o pH medido de uma água e o pH de saturação (LANGELIER, 1936).

$$\text{IL} = \text{pH} - \text{pHs} \quad (2.8)$$

$$\text{pHs} = (\text{pK}_2' - \text{pKs}') + \text{pCa} + \text{pAlc} \quad (2.9)$$

Onde:

pHs – pH de saturação

K_2' – constante derivada de K_2 , segunda constante de dissociação do dióxido de carbono;

Ks' - constante derivada de Ks , produto da atividade do carbonato de cálcio;

pCa – cologaritmo da concentração molar de íon cálcio;

pAlc – cologarítmo da alcalinidade total expressa em equivalente g/L.

Se $\text{IL} < 0 \Rightarrow$ a água é agressiva e tende a dissolver carbonato de cálcio.

Se $\text{IL} = 0 \Rightarrow$ há equilíbrio de saturação, não havendo formação de crostas.

Se $\text{IL} > 0 \Rightarrow$ a água é incrustante e tende a depositar carbonato de cálcio.

Outro método de avaliação do poder incrustante de uma água é devido a Ryznar, e é chamado de **ÍNDICE DE ESTABILIDADE DE RYZNAR (IR)**. Sua definição é a seguinte:

$$IR = 2 \text{ pHs} - \text{pH} \quad (2.10)$$

onde pHs é o pH teórico de saturação definido por Langelier e pH é o pH medido da água, na temperatura considerada. O índice de Riznar indica a tendência à formação de cristais compostos de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ e CaCO_3 , quando o teor de oxigênio dissolvido está acima de 4 ou 5mg/L e o pH na faixa de 7 a 8,5. A tabela 2.2 mostra a correlação entre o IR e a tendência da água a ser agressiva ou incrustante.

Tabela 2.2: Correspondência entre o IR e a tendência à incrustação ou à agressividade

IR	Característica da água
4 a 5	Incrustação acentuada
5 a 6	Incrustação fraca
6 a 7	Equilíbrio
7 a 7,5	Agressividade fraca
7,5 a 8,5	Agressividade acentuada

Fonte: PUCKORIUS, 1983.

O ÍNDICE DE ESTABILIDADE DE PUCKORIUS (IP) é calculado a partir de uma modificação dos índices anteriores e confere maior exatidão na previsão de incrustações em água de resfriamento e compatível com águas de torres a níveis de pH maiores que 7,5 e tão alto quanto 9 (GENTIL, 2003).

A determinação deste índice é feita através do seguinte cálculo (PUCKORIUS, 1983).

$$IP = 2 \text{ pHs} - (\text{pHeq}) \quad (2.11)$$

$$\text{pHeq} = 1,465 \times \log AT + 4,54 \quad (2.12)$$

onde AT = Alcalinidade total em ppm CaCO_3 .

O controle das incrustações é feito através do uso de produtos químicos tais como: polimetáfosfatos, poliacrilatos, polimetacrilatos de sódio, fosfonatos aminados e não aminados, etc. Todos estes produtos agem como antinucleantes, controlando a taxa de crescimento dos cristais, impedindo incrustações e diminuindo a deposição de sólidos suspensos. (BETZ, 1980). A **figura 2.17** ilustra a formação de incrustações em sistemas de troca térmica.



Figura 2.17: Tubo com incrustação.

Fonte: GENTIL, 2003.

❖ **Crescimento Biológico**

Todo sistema exposto ao ar está sujeito a contaminações microbiológicas, o ar transporta bactérias e fungos, que entram na torre de resfriamento, além disso a água de reposição carrega bactérias e algas para o sistema. (MACÊDO, 2000).

Os fungos, algas e bactérias quando encontram condições favoráveis para o seu desenvolvimento tornam-se um problema para águas de resfriamento, onde causam corrosão, bloqueamento de tubos e através de um processo corrosivo, pode colocar a água de resfriamento contaminada em contato com um determinado produto, colocando em risco a sua qualidade sanitária. (MACÊDO, 2000). Além disto, ocorre uma diminuição da troca térmica, aumento da perda de carga no sistema e a diminuição da vida útil do sistema.

Como medidas gerais e mais relevantes para a proteção contra a corrosão induzida por microrganismos devem ser citadas:

- Emprego adequado de biocidas
- Limpeza sistemática e sanitização
- Revestimentos
- Eliminação de áreas de estagnação e frestas
- Aeração
- Variação de pH
- Proteção catódica

O Biocida ideal deve ser biodegradável, possuir grande atividade contra os microrganismos e a baixas concentrações, não ser tóxico para formas de vida superiores e ser compatível com o material dos equipamentos. Os Biocidas mais utilizados para o controle do crescimento biológico são: derivados clorados (dióxido de cloro, hipoclorito de sódio, hipoclorito de cálcio e dicloroisocianurato de sódio), sulfato de cobre, organoestanosos, organossulfurosos, sais de amônio quaternário, acroleína, entre outros (GENTIL, 2003).

❖ Corrosão

Os tipos de corrosão que aparecem com mais frequência em sistemas de resfriamento abertos com recirculação são: galvânica, aeração diferencial, ácida, alcalina, entre outros.

O processo corrosivo pode ser iniciado pela agressividade da própria água, atacando o ferro metálico do sistema e formando um depósito de $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ resultante da corrosão, responsável por incrustações, depósitos e formação de células de corrosão diferencial.

Os fatores que aceleram a corrosão são: presença de oxigênio, valores baixos de pH, presença de ácido carbônico, presença de metais distintos em contato no sistema, presença de microrganismos, elevadas concentrações de cloretos e sulfatos e absorção pela água de gases ácidos, tais como: H_2S , SO_2 e SO_3 . (DANTAS, 1988).

A proteção contra a corrosão pode ser feita através das seguintes práticas:

- Controle biológico (cloração e biocidas)
- Controle do pH
- Uso de inibidores de corrosão (cromatos e dicromatos, fosfatos condensados e polifosfatos, sais de zinco, produtos orgânicos e nitritos).
- Proteção catódica
- Uso de antiincrustantes – agentes de superfície ou dispersantes (polifosfatos, polifosfonatos e ésteres de fosfatos) e agentes complexantes ou quelantes (ácido etilenodiaminotetracético (EDTA), ácido nitrilotriacético (NTA), entre outros).

❖ Depósitos e Fouling

Segundo DANTAS (1988) os depósitos provocam erosão nas paredes das tubulações e em áreas de estagnação, restringem o volume de água circulada e contribuem para a formação de pilhas de aeração diferencial. Eles são originados de uma ou mais causas, tais como:

- Água contendo sílica coloidal;
- Água com clarificação deficiente, possibilitando uma pós-precipitação no sistema;
- Deficiência de filtração, permitindo a passagem de flocos da clarificação;
- Absorção pela água, circulando na torre, de poeira do meio ambiente;
- Teores elevados de ferro solúvel que, pela ação de bactérias ferro-oxidantes são precipitados como tubérculos nas tubulações.

O fouling é uma aglomeração de materiais composta por um ligante (biomassa, óleo mineral ou fluido de processo) e pelos sólidos suspensos (silt, poeira, lama, produtos de corrosão, precipitados inorgânicos, etc). O problema do fouling é que ele impede a transferência de calor satisfatória, restringe o volume de água circulada no sistema, promove o aparecimento de pilhas de aeração diferencial e o desenvolvimento de bactérias do tipo redutoras de sulfato (GENTIL, 2003).

O controle dos depósitos e fouling é feito através do uso de polímeros que agem como antiincrustantes ou estabilizadores das dispersões dos sólidos suspensos e, do uso de biocidas oxidantes halogenados complementados por biocidas não oxidantes e biodispersantes (DANTAS, 1988). A **figura 2.18** ilustra a formação de depósitos ocasionados por água contendo bicarbonato de ferro.



Figura 2.18: Depósitos de óxido de ferro devido à água contendo bicarbonato de ferro
Fonte: GENTIL,2003.

2.4.4 Balanço Mássico no Sistema Aberto com Recirculação

Um simples balanço da água em um sistema de resfriamento pode ser determinado se três dos quatro parâmetros forem conhecidos: make-up ou água de alimentação (A), evaporação (E), respingo (R) e descargas (D), conforme ilustrado na **figura 2.19**.

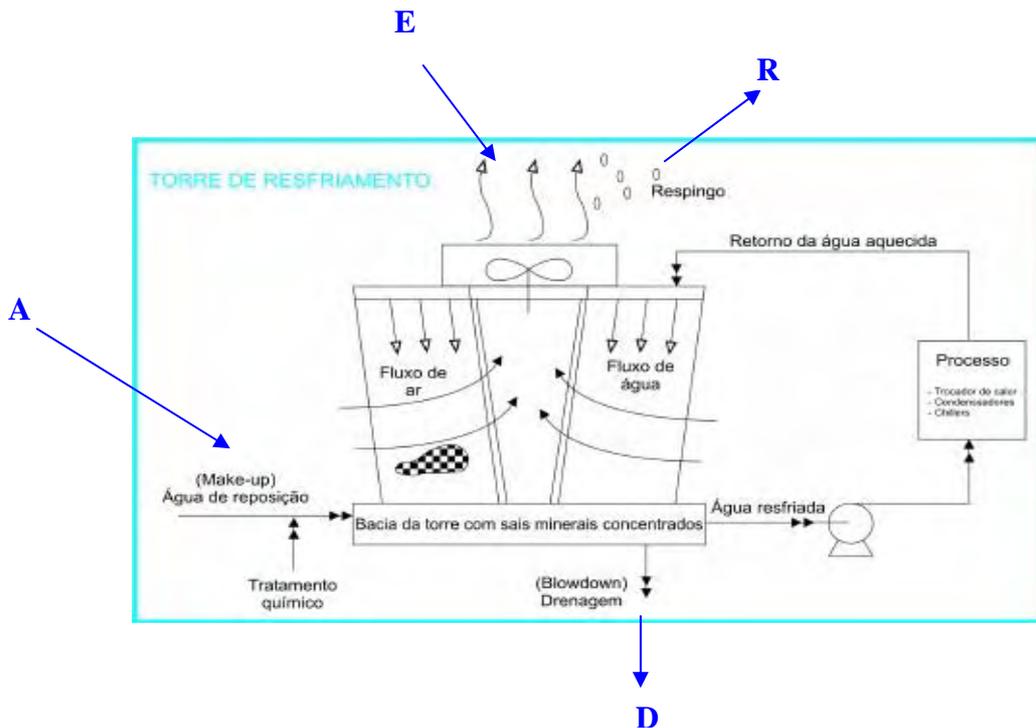


Figura 2.19: Balanço Mássico no Sistema Aberto com Recirculação

Fonte: MEIO FILTRANTE, 2003.

$$A = E + R + D \quad (2.13)$$

Ou, considerando-se as concentrações salinas envolvidas em cada etapa:

$$A \cdot C_A = E \cdot C_E + D \cdot C_D + R \cdot C_R \quad (2.14)$$

onde:

C_A = concentração de sais na água de alimentação (make up) (mg / L)

C_E = concentração de sais na evaporação (mg / L)

C_D = concentração de sais na água de descarga (blowdown)(mg / L)

C_R = concentração de sais nos respingos (drift) (mg / L)

As perdas por respingos nas torres variam conforme os critérios de construção da torre, do tipo e da sua localização (CASSETTA & MANSUR, 2004). A **tabela 2.3** expressa essas perdas como uma porcentagem da vazão de água de circulação.

Tabela 2.3: Perdas por respingos em torres

TIPO	% A MÉDIA	FAIXA % A
Tiragem Natural	0,5	0,3 – 1,0
Tiragem Forçada	0,2	0,05 – 0,3
Tiragem Induzida	0,2	0,05 – 0,3
Condensador Evaporativo	0,1	0,1 – 0,2

% A – Percentagem da água arrastada (em relação à vazão de circulação).

Fonte: DANTAS, 1988.

A taxa de evaporação é aproximadamente 1% do fluxo de água passando através da torre para cada 5,5°C reduzidos na temperatura da água. A redução na temperatura da água irá variar de acordo com o Ponto de Orvalho do ambiente. Quanto mais baixo for o ponto de orvalho, maior será a diferença de temperatura entre a água que está entrando na torre (água aquecida) e a água de saída da torre (água resfriada) (MEIO FILTRANTE, 2003).

CICLOS DE CONCENTRAÇÃO E TEMPO DE RETENÇÃO

Numa torre de resfriamento ocorrem perdas por evaporação, arraste de gotas de água pelo vapor que sai pelo topo e também há a necessidade de purgas para diminuir a concentração de sais na água circulante. O conteúdo de sais (cloretos, carbonatos, etc) deve ser continuamente controlado, a fim de evitar a formação de incrustações no sistema de distribuição ou corrosão.

A reposição de água clarificada na torre é imprescindível e varia de acordo com o tempo de retenção e com os ciclos de concentração. O ciclo de concentração pode ser definido como

o número de vezes que a água de alimentação se concentra num sistema, limitado inicialmente pelos respingos (GENTIL, 2003).

$$C = E + R + D / R + D \quad (2.15)$$

onde:

C = ciclo de concentração = número de vezes que a água de alimentação se concentra no sistema.

E = Evaporação (m³ / h)

D= Descarga (m³ / h)

R= Respingo (m³ / h)

O sistema é projetado para que o conteúdo de sais na torre seja de 5 a 10 vezes aquele da água de reposição.

O volume de água economizado pelo aumento do ciclo de concentração pode ser determinado como mostra a **figura 2.20**. Aumentando o ciclo de concentração de dois para seis, serão economizados 40% do volume da água de make-up inicial. O ciclo de concentração máximo na qual uma torre de resfriamento pode ainda operar corretamente dependerá da qualidade da água de make-up, assim como pH, STD, alcalinidade, condutividade, dureza e densidade de microorganismos. Taxas mínimas de descargas (blowdown) devem ser determinadas juntamente com um ótimo programa de tratamento de água para a torre de resfriamento (MEIO FILTRANTE, 2003).

Porcentagem de economia de água de make-up												
		Novo ciclo de concentração (CR _i)										
Ciclo de concentração Inicial (CR _i)		2	2.5	3	3.5	4	5	6	7	8	9	10
	1.5	33%	44%	50%	53%	56%	58%	60%	61%	62%	63%	64%
	2	—	17%	25%	30%	33%	38%	40%	42%	43%	44%	45%
	2.5	—	—	10%	16%	20%	25%	28%	30%	31%	33%	34%
	3	—	—	—	7%	11%	17%	20%	22%	24%	25%	26%
	3.5	—	—	—	—	5%	11%	14%	17%	18%	20%	21%
	4	—	—	—	—	—	6%	10%	13%	14%	16%	17%
	5	—	—	—	—	—	—	4%	7%	9%	10%	11%
	6	—	—	—	—	—	—	—	3%	5%	6%	7%

Figura 2.20: Ciclo de concentração x economia de água de alimentação (make-up)

Fonte: MEIO FILTRANTE, 2003.

O TEMPO DE RETENÇÃO de um sistema de refrigeração exprime o tempo que determinados produtos permanecem na água deste sistema, muitas vezes, provocando sua degradação, ou aumentando concentrações salinas, ou sólidos suspensos que interferem no tratamento. Este tempo pode ser obtido através da seguinte equação (DANTAS, 1988):

$$Tr = V / P \quad (2.16)$$

onde:

V= volume total de água no sistema

P= perdas totais do sistema (descargas, respingos, etc)

2.4.5 Padrão de Qualidade da Água de Resfriamento

Como foi exposto anteriormente, a qualidade da água de reposição é fundamental para garantir o bom funcionamento das torres de resfriamento. A tabela 2.4 mostra os parâmetros críticos de controle que afetam o desempenho dos sistemas de resfriamento.

Tabela 2.4: Parâmetros de controle X Impactos prováveis em sistemas de resfriamento

Parâmetros	Impactos Prováveis			
	Incrustação	Fouling	Corrosão	Corrosão microbiológica
Amônia			X	X
Fosfato	X		X	X
Condutividade		X	X	

COT		X		X
DBO		X		X
DQO		X		X
Ferro		X	X	
Cobre			X	
Manganês		X	X	
Fluoretos	X			
Sulfatos	X			
Cloretos			X	
Sílica	X			
Dureza cálcio	X			
Alcalinidade	X	X	X	
total				
pH			X	

Fonte: MACHADO, 2004.

O estudo realizado por EBLE e FEATHERS (1992) apresentou alguns limites teóricos para a concentração de contaminantes na água das torres de resfriamento. A partir do conhecimento desses limites é possível estimar o número de ciclos de concentração de acordo com a qualidade da água de reposição.

Alguns parâmetros de qualidade da água de reposição foram descritos na **tabela 2.5**. É importante ressaltar que tais parâmetros foram extraídos de literaturas internacionais e exigem adaptações para o caso brasileiro, pois a qualidade da água é diferente em cada região do país.

Tabela 2.5: Qualidade de água de reposição ou *makeup* para uso em sistemas de resfriamento com circuitos semi-abertos, com recirculação de água.

Parâmetro ^a	Limite Internacional ^b
Cl ⁻	500
SDT	500
Dureza	650
Alcalinidade	350
pH	6,9 – 9,0

DQO	75
STS	100
Turbidez	50
DBO	25
Material orgânico ^c	1,0
N-NH ₄ ⁺	1,0
PO ₄ ⁻³	4
SiO ₂	50
Al ⁺³	0,1
Fe ⁺²	0,5
Mn ⁺²	0,5
Ca ⁺²	50
Mg ⁺²	0,5
HCO ₃ ⁻	24
SO ₄ ⁼	200

^a - Todos os valores em mg/L, exceto pH

^b - Water Pollution Control Federation, 1989

^c - Substâncias ativas ao azul de metileno

Fonte: Environmental Protection Agency (1992).

3. CARACTERÍSTICAS E PROCESSOS DE TRATAMENTOS DE EFLUENTES INDUSTRIAIS

A escolha do processo de tratamento de efluentes depende principalmente dos tipos e características dos contaminantes presentes nos efluentes industriais, da qualidade requerida para o efluente tratado, dos custos e área disponível e da existência no futuro de uma legislação mais rígida no que diz respeito aos padrões de lançamento (ECKENFELDER, 1970).

As tecnologias de tratamento podem ser agrupadas em níveis crescentes de qualidade do efluente final. O tratamento preliminar remove fisicamente os sólidos de acordo com o diâmetro da partícula e inclui também a etapa de regularização da vazão de efluentes. No tratamento primário a matéria orgânica coloidal é reduzida assim como a quantidade de óleos e graxas emulsionadas, detergentes e corantes e a remoção da matéria orgânica dissolvida ocorre no tratamento secundário (SPERLING, 1996). Desta forma, as indústrias que possuem efluentes sem gorduras emulsionadas (exs: refrigerantes, cervejaria, entre outras) podem optar apenas pelo tratamento biológico, mas no caso de indústrias de pescado, margarinas, abatedouros, alimentos em geral, o tratamento físico-químico deve preceder o biológico.

A tendência atual é aumentar a eficiência e o grau de tratamento para que o efluente possa ser reutilizado ou reciclado cada vez mais dentro da indústria. A grande discussão gira em torno da técnica de polimento ótima para atingir tal objetivo. A figura 3.1 mostra os contaminantes removidos em cada nível de tratamento e a tabela 3.1 apresenta as tecnologias usuais disponíveis no mercado.

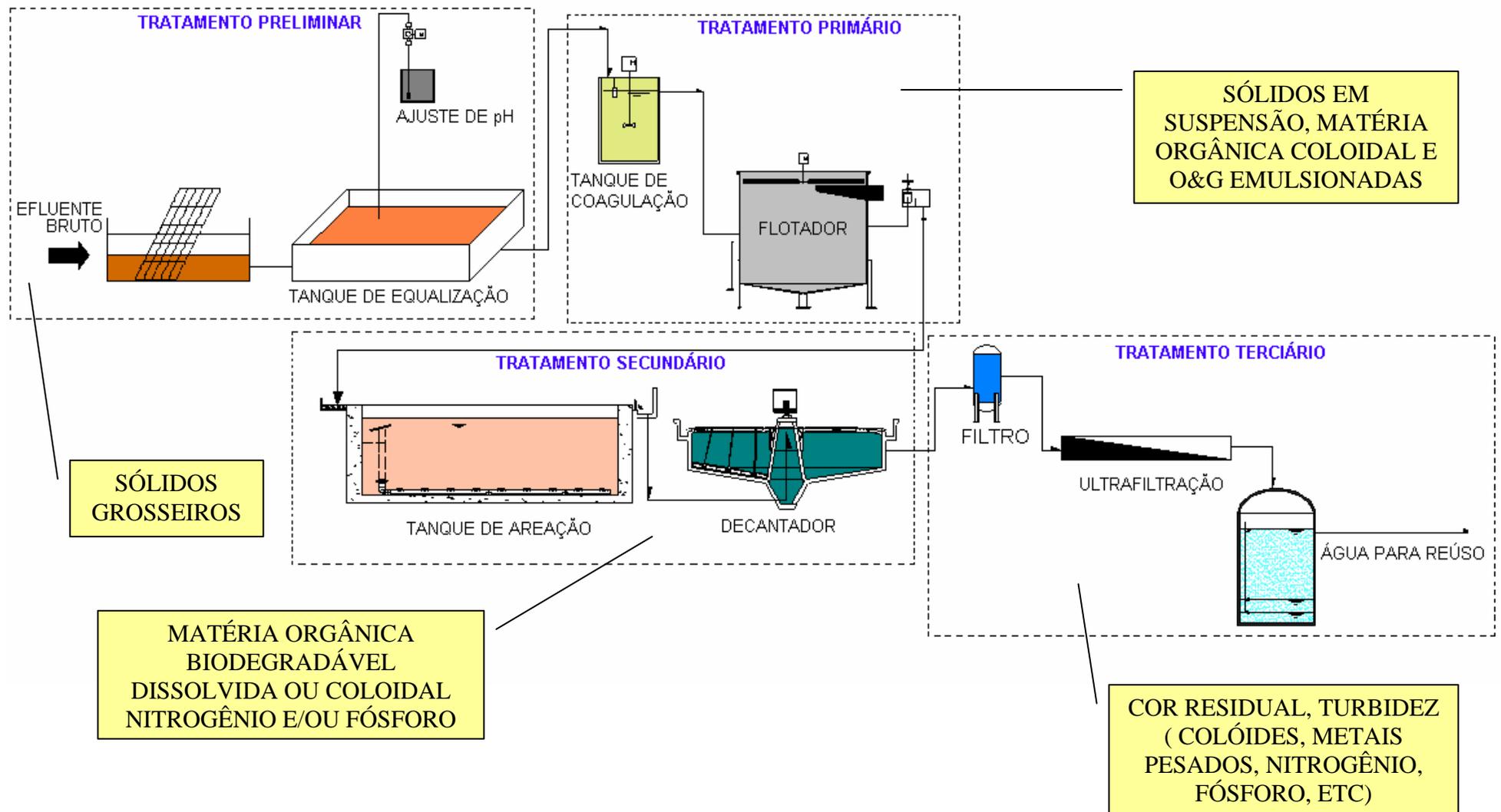


Figura 3.1: Remoção de poluentes por nível de tratamento

Tabela 3.1: Processos de tratamento de efluentes líquidos conforme a classificação por níveis

TRATAMENTOS			
PRELIMINAR	PRIMÁRIO	SECUNDÁRIO	TERCIÁRIO
Gradeamento	Neutralização	Lodos Ativados	Filtração com membranas
Peneiramento	Coagulação Química	Lagoas Anaeróbias	Adsorção com carvão ativado
Caixa de Areia	Floculação	Lagoas Aeradas	Ozonização
Separadores por Densidade (SAO)	Sedimentação	Filtros Biológicos	Coagulação Química
Equalização	Flotação	Biodiscos	Floculação Sedimentação Flotação

Fonte: LORA, 2002.

3.1 Técnicas de Tratamento de Efluentes

3.1.1 Tratamento Primário

- **Coagulação Química e Floculação**

A *Coagulação* é empregada na remoção de partículas em suspensão e coloidais. Este processo muito utilizado na clarificação de água emprega sais de alumínio e ferro ou polímeros sintéticos a fim de desestabilizar as partículas através de dois fenômenos principais: o primeiro, essencialmente químico, consiste na reação do coagulante com a água e formação de espécies hidrolisadas com carga positiva; o segundo, um processo de mistura rápida e essencialmente físico, consiste no transporte das espécies hidrolisadas para que haja contato com os contaminantes presentes na água. (DI BERNARDO, 1993).

A desestabilização mais eficiente resulta do contato de partículas coloidais com pequenos microflocos de hidróxidos carregados positivamente e gerados em menos de 0,1

segundo. Quanto maior for a intensidade de formação e menor for o período de tempo para a ocorrência será melhor.

Em um sistema bifásico (sólido-líquido) onde existe uma grande concentração de partículas coloidais, umas se aproximam das outras e/ou chocam-se entre si devido ao movimento contínuo e desordenado dessas mesmas partículas (movimento browniano), permitindo-se uma interação entre as camadas difusas, fazendo com que ocorra atração devido à força de Van de Waals e repulsão devido à força eletrostática ou da dupla camada elétrica.

A força de Van der Waals tem origem na interação de dipolos elétricos atômicos e moleculares, estando associada às flutuações na densidade eletrônica dos átomos. No caso de dois átomos a força atrativa de Van de Waals é inversamente proporcional à sétima potência da distância entre eles, porém, para duas partículas constituídas de grande número de átomos, as forças atuantes sobre cada par de átomos são aditivas, resultando em uma energia de atração inversamente proporcional ao quadrado da distância entre as superfícies das partículas.

A força da dupla camada elétrica tem origem na superfície das partículas sólidas, onde ocorre adsorção ou dessorção de íons entre a partícula sólida e a solução circundante.

As partículas coloidais possuem predominantemente cargas negativas, as quais atraem uma grande quantidade de íons de carga positiva presentes na solução, porém devido as dimensões das superfícies das partículas, apenas um número limitado de íons positivos consegue ser adsorvido. Esta adsorção faz com que os íons adsorvidos permaneçam de maneira rígida sobre a superfície da partícula, dando origem à denominada camada compacta ou camada de Stern. Quando íons negativos aproximam-se desta camada, atraem consigo alguns íons positivos, resultando na formação da camada difusa, que engloba a camada compacta, na realidade, a camada difusa resulta da atração de íons positivos, repulsão eletrostática de íons negativos e difusão térmica. O conjunto das camadas, difusa e compacta, resulta na denominada dupla camada elétrica cuja configuração encontra-se ilustrada na **figura 3.2.**

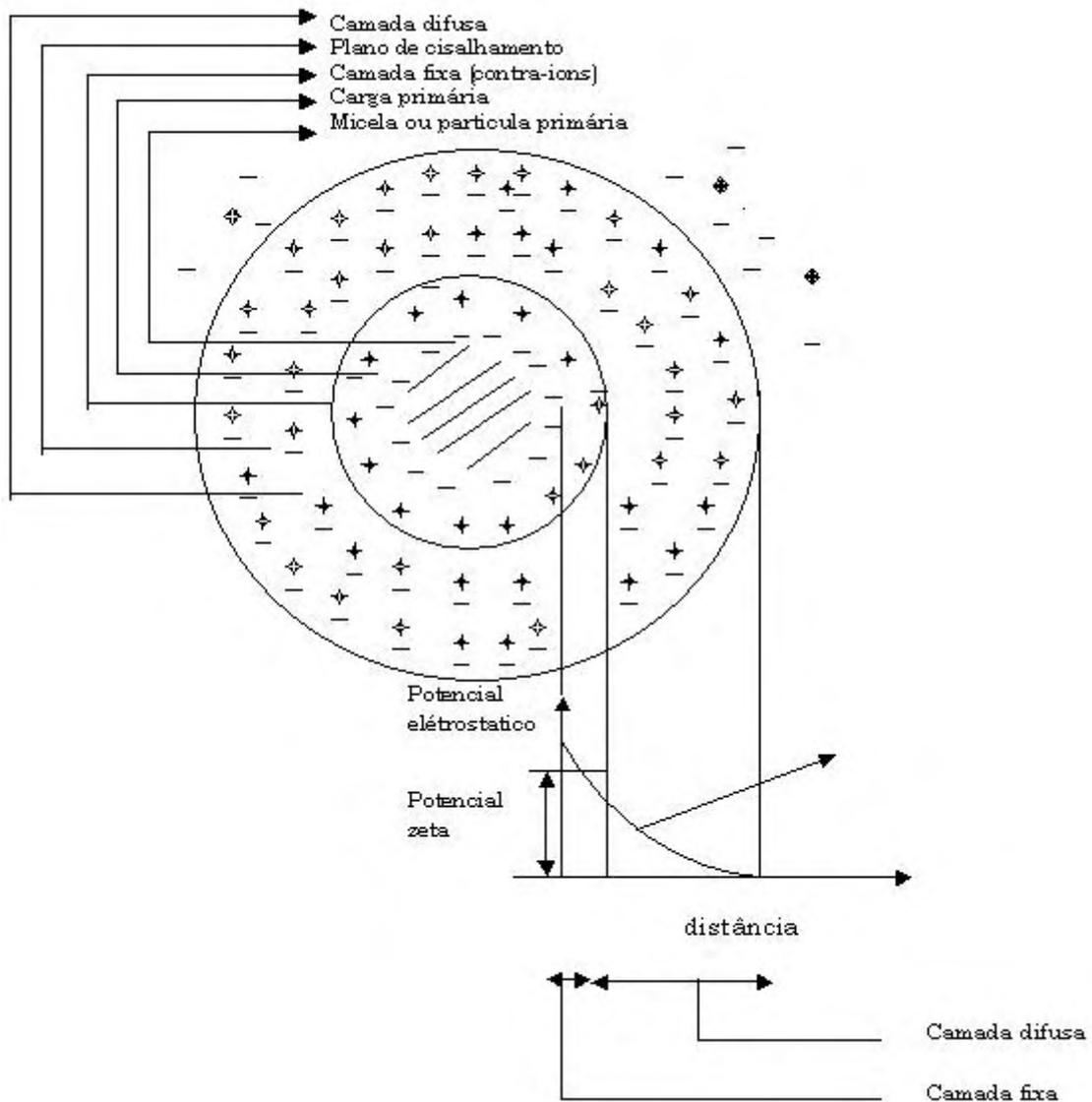


Figura 3.2 Configuração esquemática da dupla camada elétrica

Fonte: SILVA, T., 1999.

Os principais mecanismos de coagulação são (PAVANELLI, 1998):

- 1- *Compressão da camada difusa* – íons de cargas positivas (ex: Al^{3+} , Ca^{2+} e Na^+) neutralizam a carga das partículas permitindo a sua desestabilização. Quanto maior a carga do íon positivo, menor a quantidade requerida para a coagulação. Ao desestabilizar colóides negativos, as concentrações molares dos metais Na^+ , Ca^{2+} , Al^{3+} variam de 1000:10:1. Este fenômeno é explicado pela grande concentração de cargas positivas que causam excesso de íons na camada difusa, fazendo com que reduza o

volume da esfera para manter-se eletricamente neutra, reduzindo o potencial elétrico (Potencial Zeta) e predominando a força de Van der Waals.

- 2- *Neutralização da carga por adsorção de um coagulante pelo colóide* – íons metálicos hidrolisáveis são adsorvidos pelos colóides formando uma camada gelatinosa na superfície. Alguns dos compostos que dão origem a estes íons são sulfato de alumínio, sulfato ferroso e cloreto férrico.
- 3- *Ação de varredura de compostos precipitados* – quando são utilizadas concentrações muito elevadas de um coagulante ocorre a precipitação rápida de um hidróxido metálico e as partículas coloidais são então envolvidas pelos precipitados e arrastadas ao fundo num processo chamado de varredura. Os flocos formados são maiores do que aqueles formados pela adsorção e neutralização de cargas; conseqüentemente, suas velocidades de sedimentação são maiores.
- 4- *Ponte interpartícula através de adsorção de um polímero pelo colóide* – compostos orgânicos sintéticos e naturais caracterizados por grandes cadeias moleculares apresentam sítios ionizáveis ao longo da cadeia e podem atuar como coagulantes. O comportamento dos polímeros como coagulante pode ser explicado baseando-se na sua adsorção à superfície das partículas coloidais, seguida pela redução da carga ou pelo entrelaçamento das partículas nas cadeias do polímero.

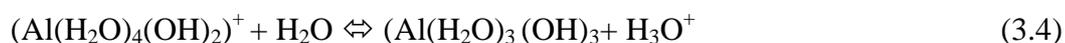
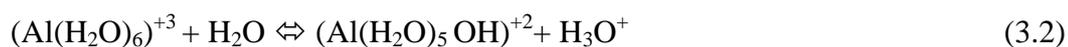
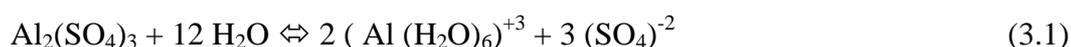
A **tabela 3.2** apresenta os diversos coagulantes e as faixas de pH em que geralmente se obtém as condições ótimas de tratamento.

Tabela 3.2: Coagulantes e faixas de pH em que são utilizados

COAGULANTES	FAIXA DE pH
Sulfato de alumínio	5,0 a 8,0
Sulfato ferroso	8,5 a 11,0
Sulfato férrico	5,0 a 11,0
Cloreto férrico	5,0 a 11,0
Sulfato ferroso clorado	acima de 4,0
Aluminato de sódio e Sulfato de alumínio	6,0 a 8,5

Fonte: AZEVEDO NETTO et al, 1995.

Os coagulantes são adicionados em tanques de mistura rápida e reagem com a água, formando uma série de íons hidratados:



Esses íons complexos com cargas elétricas positivas são rapidamente adsorvidos pelas partículas coloidais em suspensão que, normalmente, possuem cargas elétricas negativas, provocando uma redução de espessura da camada elétrica que envolve essas partículas (AL MUTARI, Z.N. et al., 2004).

Em seguida, inicia-se o processo de *Floculação* onde 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 formando flocos, que, com a continuidade da agitação, tendem a aderir uns aos outros, tornando-se pesados, para posterior separação nas unidades de sedimentação, filtração ou flotação (AZEVEDO NETTO et al., 1995).

Flocos de alumínio e ferro tendem a ser um tanto quanto frágeis e são facilmente dispersados quando misturados. Sílica ativada em dosagens de 2-5 mg/L pode ser adicionada para dar mais resistência ao floco. Polímeros aniônicos ou não de cadeias longas em dosagens de 0,2-1,0 mg/L podem ser adicionados para reunir e aumentar o período de floculação.

A **tabela 3.3** mostra as vantagens e desvantagens da coagulação e floculação química.

Tabela 3.3: Vantagens e Desvantagens da Coagulação e Floculação Química

VANTAGENS	DESVANTAGENS
Alta eficiência na remoção de óleos e gorduras	Geração de lodo químico
Redução da cor das águas residuárias	Custos do consumo de produtos químicos
Remoção de alguns componentes tóxicos	
Redução parcial da carga orgânica	

Fonte: FEEMA, 2002.

- **Sedimentação e Flotação**

A *Sedimentação* é um processo físico em que as partículas suspensas apresentam movimento descendente em meio líquido de menor massa específica, devido à ação da gravidade, enquanto que a *Flotação* caracteriza-se pela ascensão das partículas suspensas, pela aderência de bolhas de ar na superfície das mesmas, provocando um aumento do empuxo e tornando-as de menor massa específica que o meio onde se encontram (DI BERNARDO, 1993).

A **tabela 3.4** mostra que de acordo com a concentração e interação entre as partículas, quatro tipos de sedimentação podem ocorrer: discreta, floculenta, zonal e por compactação.

Tabela 3.4: Tipos de Sedimentação e Área de Aplicação

TIPO DE SEDIMENTAÇÃO	DESCRIÇÃO	APLICAÇÃO
Discreta	As partículas têm velocidades de sedimentação constantes.	Remoção de areia
Floculenta	Ocorre aumento da sedimentação devido aos efeitos de coalescência com outras partículas.	Sedimentadores primários e sedimentadores posteriores a processos de coagulação e floculação.
Zonal	As camadas de lodo apresentam várias zonas perfeitamente diferenciadas e com velocidades de sedimentação distintas.	Clarificadores secundários usados em conjunto com instalações de tratamento biológico.
Compactação	As partículas estão em tal concentração, que uma estrutura é formada, e sedimentação adicional pode ocorrer somente por compressão.	Clarificadores secundários e adensadores de lodo.

Fonte: METCALF & EDDY, 1991.

Alguns ensaios de laboratório podem ser realizados a fim de determinar a velocidade de sedimentação e gerar dados sobre a geração de lodo, esta a partir da zona de compactação da sedimentação (ECKENFELDER, 1989; DI BERNARDO et al, 2002). Desta forma, pode-se obter uma estimativa do tempo necessário desta etapa, assim como as taxas de aplicação superficial e de carga de sólidos, e, também, analisar o comportamento do lodo, de maneira a fazer os ajustes necessários no tratamento, compatíveis com a unidade dimensionada (DREW, 1979).

No caso da sedimentação flocculenta e zonal, o controle é feito através da análise dos sólidos em suspensão e de outros parâmetros de acompanhamento no clarificado, e pela altura do lodo na zona de compactação do decantador (FEEMA, 2002).

O *Jar Test* é um teste de coagulação e floculação utilizado para determinar as condições ótimas de operação no tratamento físico-químico de efluentes. Desta forma, é possível obter com sucesso os parâmetros de projeto de novas estações e otimizar as estações de tratamento de efluentes existentes (Di Bernardo et al., 2003). O teste divide-se em várias etapas, nas quais são variadas as concentrações de uma substância enquanto são fixadas as melhores dosagens de substâncias de outras etapas.

A Flotação é originada a partir dos seguintes processos (METCALF & EDDY, 1991):

- Injeção de ar no líquido sob pressão, seguido de redução na pressão (flotação a ar dissolvido)
- Aeração a pressão atmosférica (flotação a ar disperso)
- Saturação com ar a pressão atmosférica, seguido de aplicação de vácuo no líquido (flotação a vácuo)

Os critérios de dimensionamento desses sistemas devem ser obtidos através de testes em escala de laboratório e piloto, os quais devem verificar a quantidade de sólidos suspensos, a quantidade de ar utilizada, a velocidade de ascensão das partículas e a taxa de aplicação de sólidos (METCALF & EDDY, 1991).

3.1.2 Tratamento Secundário ou Biológico

O Processo de Lodos Ativados baseia-se na aeração do despejo com crescimento biológico floculento, seguido por separação do despejo tratado. Parte da biomassa é descartada para disposição adequada e o remanescente retorna ao sistema como reserva de atividade biológica.

Os controles operacionais podem ser realizados através da concentração de sólidos no tanque de aeração, pela carga mássica ou pela idade do lodo. Através do acompanhamento da concentração dos sólidos, verifica-se o equilíbrio do sistema, ajustando-o através do descarte do lodo. O sucesso da operação do sistema depende da separação eficiente sólido-líquido no decantador secundário (FEEMA, 2002).

Os decantadores secundários ocupam um papel importante, uma vez que neles se processa a decantação, a retirada do lodo recirculado para o tanque de aeração, e do excesso de lodo para uma digestão. Há interesse em que o lodo retorne rápida e imediatamente após ter sedimentado, evitando condições de septicidade. Deseja-se uma boa separação dos sólidos provenientes do tanque de aeração para que um efluente final bem clarificado, de baixa turbidez e com baixa concentração de sólidos em suspensão seja obtido e, também um bom adensamento do lodo sedimentado, que constitui o lodo ativado a ser retornado ao tanque de aeração.

O lodo que sedimenta apresenta características floculentas e a maior ou menor facilidade em sedimentar pode ser mediada através do Índice Volumétrico de Lodo (IVL) ou Índice de Mohlman (IM). Este é definido como o volume em mililitros ocupado por 1 grama de lodo, após 30 minutos de sedimentação. Quanto maior o IVL, menor o peso específico do lodo e pior a sua condição de sedimentação. Valores de IVL entre 40 e 150 indicam uma boa qualidade do lodo formado; valores acima de 200 são normalmente indicativos de um lodo de qualidade inferior.

Quando os valores de IVL são altos, verifica-se um fenômeno conhecido como entumescimento do lodo ou *bulking*, que consiste no lodo aflorar à superfície do decantador e sair com o efluente, piorando as características de sólidos em suspensão e de turbidez do efluente tratado. Isto ocorre geralmente com a formação de fungos filamentosos ou com a presença de cápsulas das células residuais da respiração endógena. (JORDÃO & PESSÔA, 1995).

O controle da operação do processo de lodos ativados é fundamental visto que as consequências da ineficiência deste recaem diretamente sobre o sistema de reuso. Dentre os principais efeitos podem ser citados o entupimento dos pré-filtros e parada do bombeamento para manutenção e a produção de água com qualidade inferior a requerida devido à passagem de material orgânico dissolvido. Desta forma, as principais variáveis para o sucesso de um programa de reuso deixam de atuar, ou seja, a confiabilidade da ETE e a segurança e eficiência do processo.

A **tabela 3.5** mostra outros processos de tratamento biológico e os principais usos. Ênfase especial foi dada ao processo de lodos ativados pois é a tecnologia empregada na indústria farmacêutica objeto deste estudo.

Tabela 3.5: Principais processos biológicos para o tratamento de efluentes

TIPO DE TRATAMENTO	NOME COMUM	USO
--------------------	------------	-----

Processos aeróbios	Processos de lodos ativados	
	-convencional	Redução de DBO carbonácea
	-mistura completa	
Com crescimento em suspensão	-aeração em etapas	
	-oxigênio puro	
	-reatores em batelada em série	
	-estabilização por contato	
	-aeração prolongada	
	-valos de oxidação	
	-poço profundo	
	Crescimento em suspensão e nitrificação	
Com crescimento em suportes	-lagoas aeradas	Nitrificação
		Redução de DBO carbonácea
	Digestão aeróbia com ar ou com oxigênio puro	
	Filtros biológicos com taxa de aplicação baixa ou alta	Estabilização e redução de DBO carbonácea
		Redução de DBO carbonácea
	Filtros grosseiros (leitões de pedra), contadores biológicos rotacionais e reatores com enchimento	Redução de DBO carbonácea
Processos anóxicos		
Com crescimento em suspensão	Crescimento em suspensão e desnitrificação	Desnitrificação
Com crescimento em suportes	Filme fixo e desnitrificação	Desnitrificação
Processos anaeróbios		
Com crescimento em suspensão	Digestão anaeróbia	Estabilização e redução de DBO carbonácea
	-taxa padrão de estágio único	
	-alta taxa de estágio único	
	-dois estágios	
Com crescimento em suportes	Processos anaeróbios de contato	Redução de DBO carbonácea
	Filtro biológico	Redução de DBO carbonácea, estabilização de esgotos (desnitrificação)
Processos em Lagoas		
Aeróbias		Redução de DBO carbonácea
Maturação		Redução de DBO carbonácea e nitrificação
Facultativas		Redução de DBO carbonácea
Anaeróbias		Redução de DBO carbonácea, estabilização de esgotos.

Fonte: METCALF & EDDY, 1991.

3.1.3 Tratamento Terciário

- **Processos de Filtração em Membranas**

Uma das principais características dos processos de separação com membranas é que eles podem ser operados em fluxo cruzado (*cross flow filtration*), além da operação clássica do tipo *dead end filtration*. Quando se tratar do solvente puro e sem interação com o material da membrana, o fluxo permeado, para uma dada pressão de operação, deve ser constante com o tempo para os dois modos de operação.

No caso de uma solução ou suspensão sendo processada no modo *dead end filtration*, o permeado passa através da membrana e o soluto, ou os materiais em suspensão, são retidos, acumulando-se na superfície da membrana. Trata-se de um modo de operação fundamentalmente transiente, uma vez que a concentração do soluto próximo à membrana aumenta com o tempo (HABERT et al., 2003).

Na filtração de fluxo cruzado a solução ou suspensão escoam paralelamente a superfície da membrana enquanto o permeado é transportado transversalmente a mesma, conforme mostra a **figura 3.3**. Neste caso, o escoamento paralelo à membrana limita o acúmulo do material retido sobre a mesma, tornando possível uma operação do sistema em condições de regime estabelecido de transferência de massa.

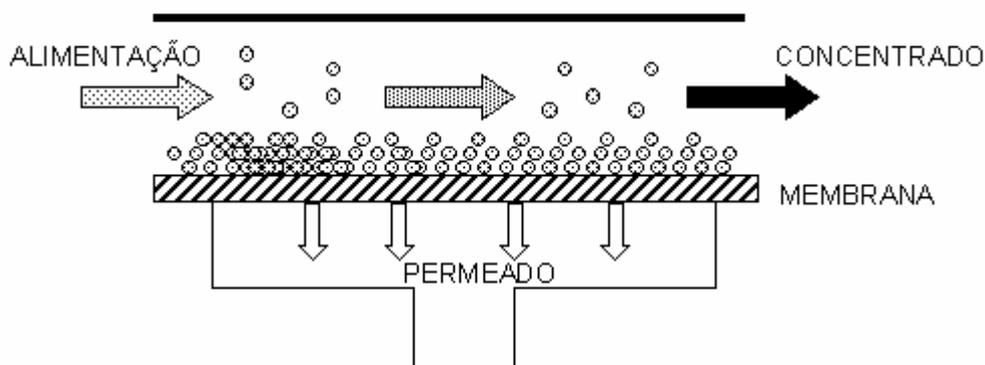


Figura 3.3: Desenho esquemático do funcionamento das membranas

Fonte: AZEVEDO et al., 1999.

Em outras palavras, o fluxo de permeado pode permanecer constante com o tempo, mas em um valor menor do que o obtido com o solvente puro, na mesma pressão de operação, uma vez que o aumento da concentração das espécies retidas próximo à superfície da membrana

provoca uma resistência adicional a transferência de massa do solvente. O aumento da concentração das espécies retidas próximo à superfície da membrana continua presente, mas seu efeito pode ser minimizado, em particular, alterando-se a hidrodinâmica do escoamento da corrente de alimentação, conforme mostra a **figura 3.4**.

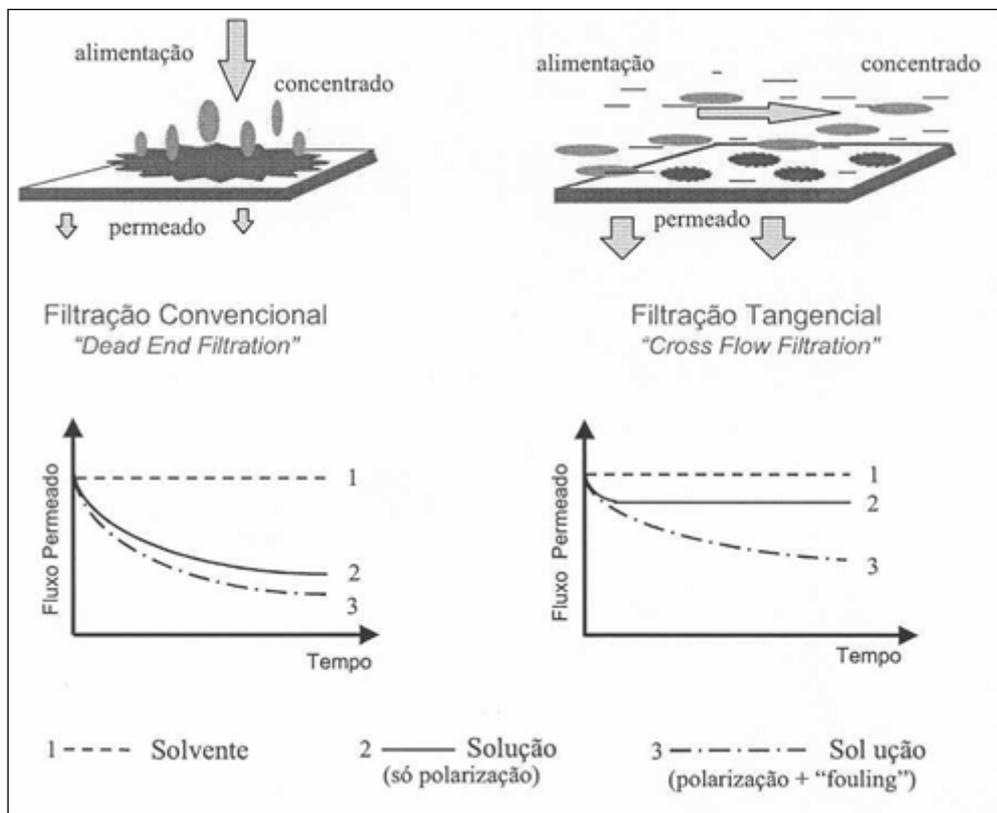


Figura 3.4: Comparação esquemática entre Filtração Convencional (“Dead End Filtration”) e a Filtração em Fluxo Cruzado (“Cross Flow Filtration”)

Fonte: HABERT et al., 2003.

O transporte de uma espécie química através da membrana ocorre através de uma força motriz que age sobre a mesma e que no caso de processos comerciais de separação com membranas é dado pelo gradiente de potencial elétrico e/ou químico. Este último pode ser expresso apenas em termos do gradiente de pressão e de concentração, pois os processos com membranas são em geral atérmicos.

Quando se processa uma solução com solutos de baixa massa molar ou macromoléculas utilizando-se processos de separação com membranas, devido a seletividade do processo, independente da operação ser do tipo *dead end* ou tangencial, sempre haverá aumento da concentração das espécies retidas próximo à superfície da membrana. O fato de a concentração do soluto próximo à superfície da membrana ser maior do que no seio da solução, provoca um movimento difusivo deste soluto no sentido de retornar ao seio da

solução. No caso da filtração tipo *dead end*, mesmo havendo este retorno de soluto pelo mecanismo difusivo, a tendência predominante é o aumento da concentração de soluto na região próxima à membrana e o processo será transiente. Por outro lado, se o sistema é operado em fluxo cruzado é possível obter um equilíbrio entre quantidade de soluto que é transportado em direção à membrana, arrastado pelo fluxo de solvente que permeia a membrana, e a quantidade de soluto se difunde da região próximo à superfície da membrana em direção ao seio da solução. O resultado deste equilíbrio é um perfil de concentração de soluto, próximo a membrana, independente do tempo, o que possibilita o sistema ser operado em condições de regime estabelecido de transferência de massa, ou seja, fluxo permeado constante (HABERT et al., 2003).

Este fenômeno é conhecido como **polarização de concentração**, é inerente a qualquer processo de transporte seletivo. Nas operações em fluxo cruzado a polarização de concentração se estabelece rapidamente, em questões de minutos. Ela também provoca uma resistência adicional à transferência de massa do solvente através da membrana, com conseqüente queda no fluxo permeado, relativa ao fluxo de solvente puro obtido na mesma pressão (LEITE, 1989).

A polarização da concentração é fortemente afetada pelas condições de escoamento da corrente de alimentação. A medida que se aumenta a velocidade tangencial da alimentação a espessura, δ , da região polarizada irá diminuir. Como conseqüência, o nível de polarização diminui e o fluxo permeado aumenta, conforme mostra a **figura 3.5**.

Polarização de Concentração

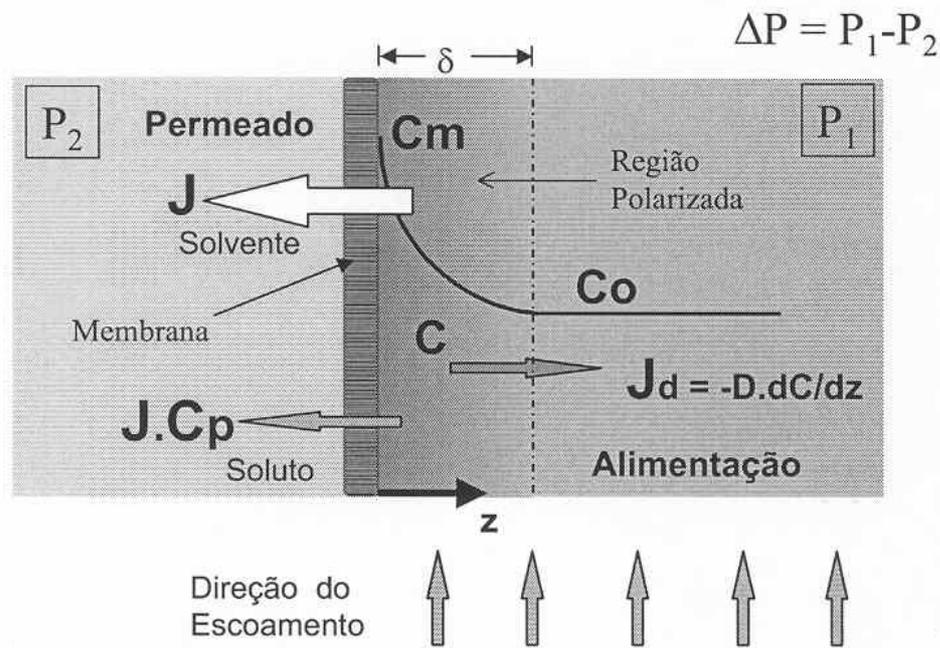


Figura 3.5: O Fenômeno de Polarização de Concentração

Fonte: HABERT et al., 2003.

A morfologia da membrana e a natureza do material que a constitui são algumas das características que vão definir o tipo de aplicação e a eficiência na separação. Do ponto de vista morfológico as membranas podem ser classificadas em duas grandes categorias: densas e porosas. As membranas são consideradas densas quando o transporte dos componentes envolve uma etapa de dissolução e difusão através do material que constitui a membrana. A membrana é considerada porosa quando o transporte dos permeantes ocorre preferencialmente em uma fase fluida contínua, que preenche os poros da membrana (DI LUCCIO, 1997).

Quando a membrana apresenta as duas morfologias, uma parte densa e uma parte porosa, é necessário considerar o tipo de transporte predominante e a característica de sua seção transversal. Desta forma, quando uma membrana possui uma fina camada densa sustentada por uma estrutura porosa, também pode ser considerada como uma membrana densa, pois o principal mecanismo envolvido na separação dos componentes permeantes envolve a dissolução e difusão no material dessa fina camada superficial da membrana. Por outro lado, a variação na densidade ao longo da seção transversal da membrana pode ser descrita como assimétrica ou, de modo mais geral, anisotrópica. Então, no caso considerado, a membrana é descrita como uma membrana anisotrópica densa (DI LUCCIO, 1997).

A classificação da membrana também deve distinguir o material que constitui as diferentes regiões na seção transversal da membrana. No caso de ser o mesmo material a membrana é dita integral, caso contrário denomina-se composta.

As membranas sintéticas comerciais são produzidas a partir de duas classes distintas de material: os polímeros, na sua grande maioria materiais orgânicos, e os inorgânicos, como metais e cerâmicos. Normalmente as membranas de natureza orgânica apresentam menor custo de produção do que as inorgânicas. No entanto, estas últimas apresentam uma maior vida útil e permitem limpezas mais eficientes.

Os principais materiais poliméricos empregados no preparo de membranas comerciais são: acetato de celulose, polisulfona, poliacrilonitrila, policarbonato, poliétersulfona, entre outros. Exemplos de materiais não poliméricos são: cerâmicos, carbono, óxidos metálicos e metais.

As características da superfície da membrana que está em contato com a solução a ser separada é que vão definir a utilização de uma membrana densa ou porosa. Tanto as membranas densas como as porosas podem ser isotrópicas ou anisotrópicas, ou seja, podem ou não apresentar as mesmas características morfológicas ao longo de sua espessura. As membranas anisotrópicas se caracterizam por uma região superior muito fina, mais fechada (com poros ou não), chamada de pele, suportada em uma estrutura porosa. Quando ambas as regiões são constituídas por um único material a membrana é do tipo anisotrópica integral. Caso materiais diferentes sejam empregados no preparo de cada região a membrana será do tipo anisotrópica composta (HABERT et al., 2003).

Diversos **módulos** têm sido projetados para condicionar as membranas na forma plana, em geral, estes devem ser projetados de forma contemplar uma melhor eficiência do escoamento da solução de alimentação. A utilização de espaçadores para aumentar fluxos secundários e melhorar a transferência de massa tem sido freqüente. As concepções de módulos mais empregadas têm sido as de Placa-e-Quadro e a Espiral.

No módulo de Placa-e-Quadro o projeto é similar ao de filtros convencionais, estando as membranas dispostas paralelamente, intermediadas por espaçadores e suportes, conforme mostra a **figura 3.6**. O suporte fornece resistência mecânica à membrana, quando submetida a diferenças de pressão elevadas. A alimentação ocorre simultaneamente a todas as membranas, sendo o concentrado (solução que não permeou) retirado por um duto central. Módulos com esta concepção têm custo de fabricação elevado e possui uma relação baixa entre a área de permeação e o volume do módulo ($400-600 \text{ m}^2/\text{m}^3$). Entretanto, as condições de escoamento da alimentação e do permeado podem ser facilmente controladas, bem como as membranas

que forem danificadas durante a operação podem ser substituídas sem perda do módulo. São utilizadas para processos de separação com membranas para aplicações em escalas pequena e média (HABERT et al., 2003).

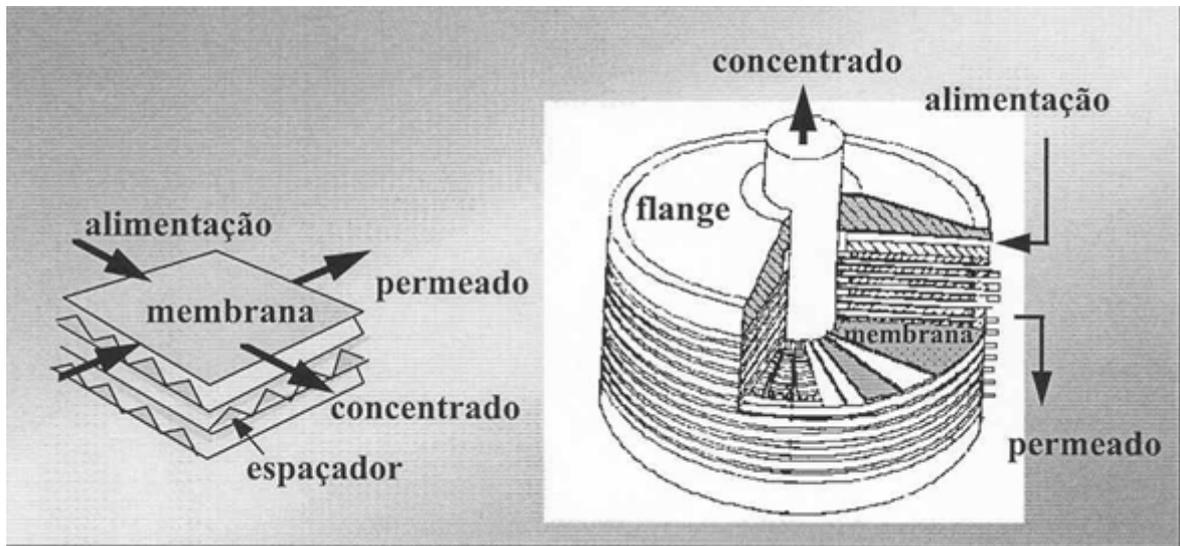


Figura 3.6: Módulo Placa-e-Quadro (detalhe da disposição à esquerda)

Fonte: HABERT et al., 2003.

No módulo espiral, ilustrado na **figura 3.7**, utiliza-se a membrana entre dois espaçadores. Um destes serve como um canal coletor para o permeado, enquanto o outro fornece espaço para escoar a solução de alimentação. As membranas conjuntamente com os espaçadores são enroladas em torno de um duto perfurado, para o qual o permeado escoar. O conjunto é selado externamente com resina epóxi. O custo de fabricação do módulo é baixo e apresenta uma relação entre área de permeação e volume do módulo mais elevada (800 - 1000 m^2/m^3). As condições de escoamento do lado permeado são inferiores a do módulo Quadro-Placa, e para alimentação dependem fortemente do tipo espaçador utilizado.



Figura 3.7: Esquema do Módulo Espiral de Membranas de Ultrafiltração

Fonte: Material cedido pela Tecma (2004).

A escolha da membrana a ser utilizada no tratamento terciário de efluentes depende dos tipos de contaminantes presentes na água de alimentação da membrana que, neste estudo, é o

efluente tratado proveniente do tratamento biológico, e também da qualidade requerida do permeado para reuso.

As técnicas tradicionais de separação por membranas envolvem: microfiltração (MF), ultrafiltração (UF) para a separação de partículas e moléculas de alto peso molecular e, nanofiltração (NF) e osmose inversa (OR) para a separação molecular. A **figura 3.8** apresenta uma escala geométrica dos contaminantes removidos nos diferentes processos de tratamento.

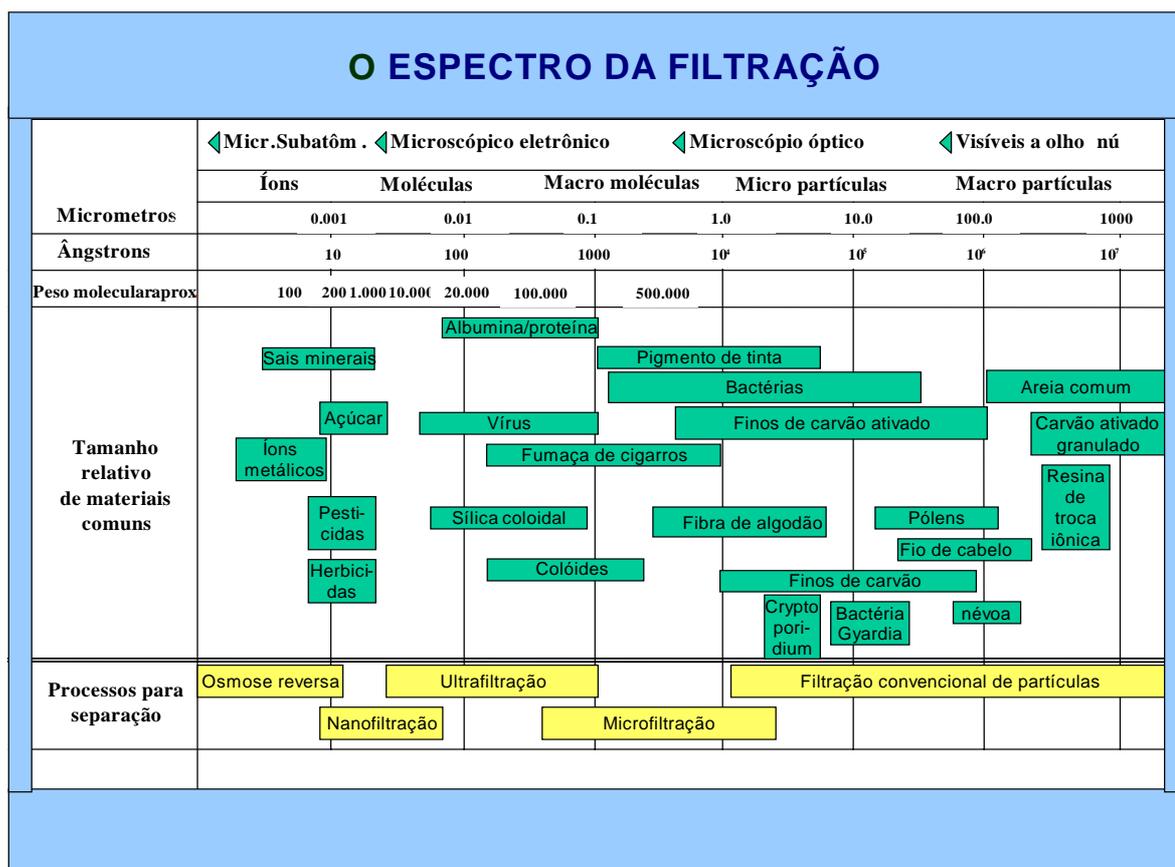


Figura 3.8 : O espectro da filtração
 Fonte: Adaptado de TOROK, 2004.

A **microfiltração** (MF) é o processo de separação com membranas mais próximo da filtração clássica. Utiliza membranas porosas com poros na faixa entre 0,1 e 10µm, sendo, portanto indicado para retenção de materiais em suspensão e emulsão. Como as membranas de MF são relativamente abertas, as pressões empregadas como força motriz para transporte são pequenas, dificilmente ultrapassando 3 bar. Na MF o solvente e todo material solúvel permeia a membrana. Apenas o material em suspensão é retido.

A **ultrafiltração** (UF) é um processo de separação por membranas utilizado quando se deseja purificar e fracionar soluções contendo macromoléculas. As membranas de UF apresentam poros na faixa entre 1 e 100 nm, portanto mais fechadas do que as membranas de MF. Soluções contendo solutos numa ampla faixa de massa molar ($10^3 - 10^6$ Dalton) podem ser tratadas por este processo. Como os poros das membranas de UF são menores, uma força motriz maior é necessária para obter fluxos permeados elevados o suficiente para que o processo possa ser utilizado industrialmente. Por este motivo as diferenças de pressão através da membrana variam na faixa de 2 a 10 bar.

Tendo em vista que as membranas de UF apresentam uma distribuição de tamanho de poros elas são caracterizadas através da chamada curva de retenção nominal, que relaciona o coeficiente de rejeição em função da massa molar do soluto. As membranas de UF são, normalmente, especificadas através da massa molar de retenção nominal ou *cut off*. A retenção nominal de uma membrana é definida como sendo o valor da massa molar para a qual a membrana apresenta coeficiente de rejeição de 95%. Assim, uma membrana com retenção nominal de 15kDa é aquela capaz de rejeitar 95% das moléculas presentes em uma solução de um soluto com massa molar de 15.000 Dalton. Os fluxos permeados em UF estão, em geral, na faixa de 150 a 250 L / h*m². Fluxos permeados bem menores podem ser obtidos em função da polarização de concentração e do fouling, em função da natureza da solução a ser tratada e das condições de operação do sistema.

A **osmose inversa** (OI) é um processo de separação com membranas usado quando se deseja reter solutos de baixa massa molar, tais como sais inorgânicos ou pequenas moléculas orgânicas como glicose. Por este motivo, as membranas de OI devem ser mais fechadas (poros menores) apresentando, portanto, uma maior resistência à permeação e, conseqüentemente, pressões de operação mais elevadas do que as utilizadas em UF. Na verdade, as membranas de OI apresentam características intermediárias entre as membranas de MF e UF (SIDNEY et al., 2000).

A **figura 3.9** mostra as principais características dos processos que utilizam diferença de pressão como força motriz.

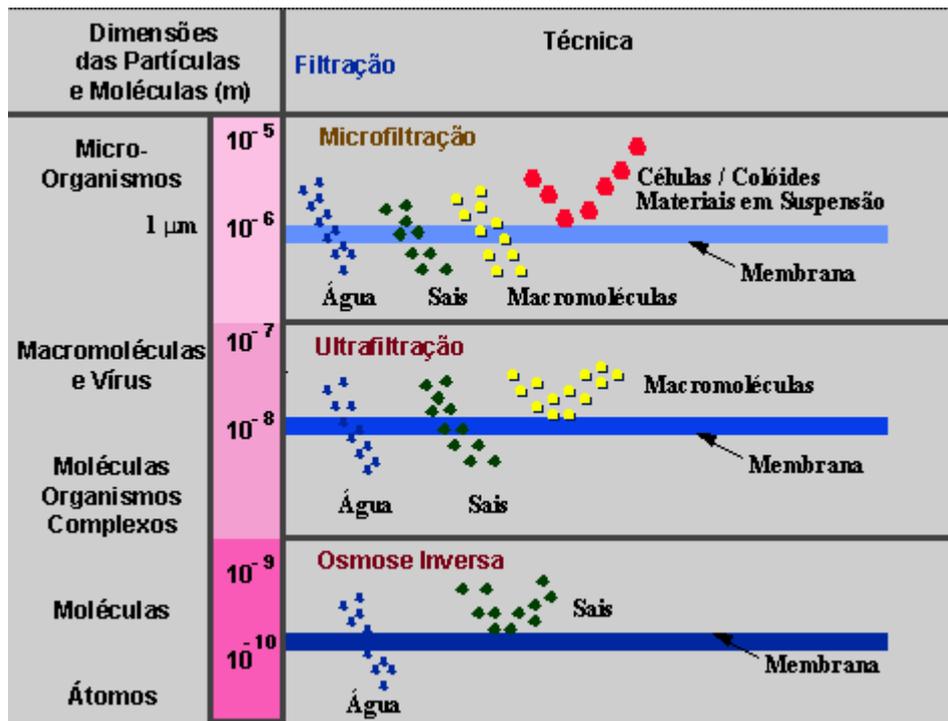


Figura 3.9 Características dos processos que Utilizam Diferença de Pressão como Força Motriz

Fonte: HABERT et al., 2003.

A eficiência da membrana é dada de acordo com o fluxo do permeado e seletividade, que são parâmetros afetados pelo fenômeno da polarização de concentração (GUO et al, 2004).

A seletividade está relacionada ao tamanho dos poros e propriedades físico-químicas dos polímeros componentes da membrana. Para processos cuja força motriz é o gradiente de pressão a capacidade seletiva da membrana, em relação a uma dada espécie, é medida através do Coeficiente de Rejeição (R), definido por uma relação entre a concentração da espécie na alimentação (C_0) e sua concentração no permeado (C_p), conforme mostra a **figura 3.10** (LEITE, 1989).

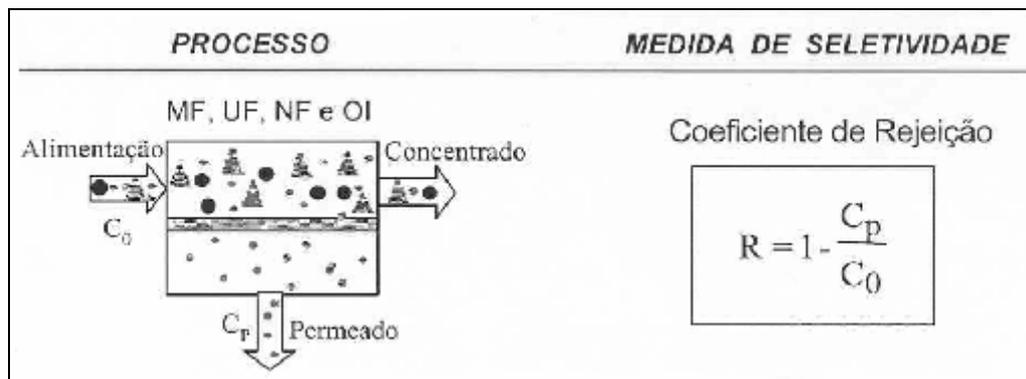


Figura 3.10: Medida de seletividade em processos com membranas

Fonte: HABERT et al., 2003.

Logo:

- Para $R=0$ => a membrana não apresenta nenhuma capacidade seletiva e as concentrações das espécies na alimentação e no permeado são iguais.
- Para $R=1$ => a membrana é capaz de rejeitar completamente a espécie em questão e a concentração desta é nula no permeado.

BELLONA et al. (2004) estudaram os fatores que afetam a rejeição de alguns contaminantes durante o tratamento com membranas de nanofiltração e osmose inversa. Foi constatada a importância de se conhecer a interação entre as características físico-químicas da membrana e do soluto (porosidade, peso molecular, morfologia, carga superficial, massa molar de retenção nominal ou *cut off*, hidrofobicidade, entre outros) de acordo com a composição da corrente de alimentação (pH, dureza etc) e demais condições operacionais.

A **tabela 3.6** apresenta as principais diferenças entre os quatro tipos de membranas citados.

Tabela 3.6 : Relação entre porosidade de membranas, pressão de operação e rendimento total do processo

MEMBRANA	POROSIDADE	PRESSÃO (bar)	MATERIAL RETIDO	RENDIMENTO
Microfiltração (MF)	0,1 µm – 0,2 µm	< 2	Protozoários, bactérias, vírus (maioria), partículas.	90 – 100%
Ultrafiltração (UF)	1.000 – 100.000 D	2 – 10	Material removido na MF + colóides + totalidade de vírus.	90%
Nanofiltração (NF)	200 – 1.000 D	5 – 40	Íons divalentes e trivalentes, moléculas orgânicas com tamanho maior do que a porosidade média da membrana.	80 – 90%
Osiose inversa (OR)	< 200 D	8 – 200	Íons, praticamente toda a matéria orgânica.	Dessalinização de água do mar: 25 – 50% Água de reuso de efluente secundário: 65 – 85%

$\mu\text{m} = 1 \times 10^{-6}$ m D: Dalton, medida de peso molecular e um D corresponde ao peso molecular de um átomo de hidrogênio.

Fonte: SCHNEIDER E TSUTIYA, 2001.

A **tabela 3.7** mostra a variação de alguns parâmetros de qualidade de acordo com o tipo de membrana utilizada.

Tabela 3.7: Variação dos parâmetros de qualidade de acordo com o tipo de membrana utilizada

PARÂMETROS	MF	UF	NF
Remoção de sólidos suspensos	excelente	boa	média
Redução de cor (%)	-	65	98
Redução de turbidez (%)	-	98	-
Remoção de orgânicos dissolvidos (%)	Não aplicável	57	93 a 98
Remoção de orgânicos voláteis (%)	Não aplicável	baixa	média
Remoção de óleos e graxas (%)	>97	>97	>97
Remoção de DQO (%)	-	72 a 90	-
Remoção de dureza (%)	-	5	67
Remoção de inorgânicos dissolvidos (%)	Não aplicável	2 a 9	20 a 80
Qualidade do produto	excelente	excelente	boa

Fonte: Adaptado de MUSTAFÁ (1998).

TEODOSIU et al. (1999) utilizaram membranas de ultrafiltração seguida de membranas de osmose inversa para tratamento de efluentes de uma refinaria. Os efluentes passavam previamente por um tratamento biológico cuja qualidade era inferior ao padrão requerido para uso em torres de resfriamento. Houve redução de 98% da turbidez e de 30% de DQO após a ultrafiltração que foi considerada uma boa alternativa para o pré-tratamento de efluentes com essa finalidade.

BAYAT et al. (2004) verificaram que após o tratamento com membranas de ultrafiltração houve uma remoção de aproximadamente 90% das bactérias existentes na água subterrânea clarificada que era utilizada para fins de resfriamento.

BES-PIÁ et al. (2003) avaliaram a combinação do tratamento físico-químico com membranas de nanofiltração para reuso de efluentes em indústria têxtil. Os resultados obtidos foram satisfatórios e apresentaram valores para os parâmetros DQO e condutividade do permeado menores que 100mg/L e 1000 μ S/cm respectivamente, atendendo às exigências mínimas para reuso no processo de enxágüe.

A utilização de membranas no tratamento de efluentes requer alguns cuidados para evitar a formação de depósitos de matéria orgânica e o crescimento de microrganismos.

Nos processos de separação com membranas, particularmente naqueles que utilizam membranas porosas, mesmo com operação em fluxo cruzado, é comum observar uma queda contínua do fluxo permeado com o tempo, indicando que outros fenômenos, além da polarização de concentração, devem estar presentes durante o processamento. Este fenômeno transiente, normalmente é acompanhado por um decréscimo na rejeição do soluto. É importante ressaltar que nas operações em fluxo cruzado, em princípio, a polarização de concentração se estabiliza nos instantes iniciais do processamento. Entretanto, a estabilização do fluxo permeado, se chegar a ocorrer, pode demorar minutos, horas ou até alguns dias. Esta variação continuada do fluxo permeado com o tempo é atribuída a possíveis alterações na membrana provocada pelas espécies presentes na solução processada. O conjunto dessas alterações é conhecido como *fouling* da membrana e, em alguns casos, pode levar a fluxos permeados tão baixos que chega a inviabilizar uma dada aplicação, conforme ilustrado na **figura 3.11**.

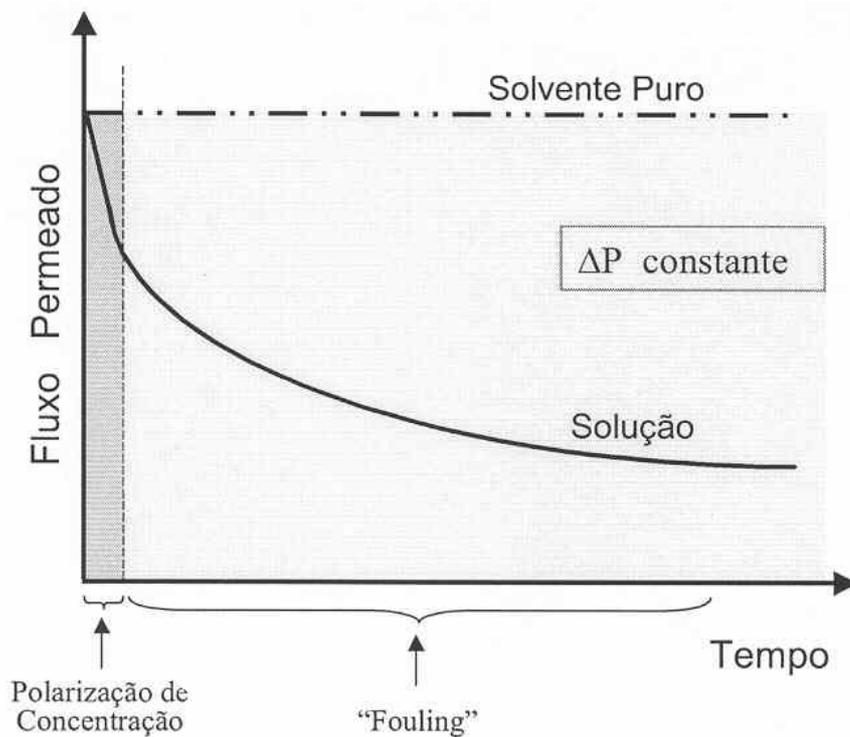


Figura 3.11: Variação do fluxo permeado com o tempo de operação ocasionada por Polarização de Concentração e “Fouling”. Operação em Fluxo Cruzado.

Fonte: HABERT et al., 2003.

Os principais efeitos de fouling sobre sistemas de membrana são: redução do fluxo, diminuição da rejeição de solutos, aumento da quantidade de sais precipitados, maior diferencial de pressão ao longo do canal de alimentação, contaminação do permeado, biodeterioração de componentes do módulo, degradação química da membrana, aumento dos custos com limpeza química, interrupções do processo e redução do tempo de uso da membrana (BUHRMANN et al., 1999).

O fenômeno da concentração de polarização é reversível, ou seja, uma vez terminada a operação e a limpeza da membrana a permeabilidade ao solvente puro é recuperada. Já os fenômenos que constituem o *fouling* são considerados como sendo, total ou parcialmente irreversíveis.

Os principais fenômenos que contribuem para o *fouling* são (HABERT et al., 2003):

- **Adsorção das moléculas de soluto na superfície da membrana** ou/e no interior de seus poros devido a interações físico-químicas com o material da membrana;
- **Entupimento de poros por moléculas ou partículas em suspensão.** Trata-se da ação mecânica de bloqueio de poros, que pode ocorrer tanto na superfície da membrana como no seu interior, dependendo de sua morfologia.
- **Depósito de material em suspensão sobre a superfície da membrana com formação de uma torta de filtração.** No caso de soluções de macromoléculas, na região próxima à superfície da membrana, pode-se atingir uma concentração suficientemente elevada, de modo a possibilitar a gelificação da solução nesta região. Solutos de baixa massa molar, como sais, por exemplo, podem atingir o limite de solubilidade e precipitarem na superfície da membrana.

A queda do fluxo permeado com o tempo é um problema inevitável. Entretanto, existem algumas técnicas de operação que resultam em recuperação, ao menos parcial, do fluxo permeado. A mais comum é a **retrolavagem** (*Backflushing*) que é a inversão, por um intervalo curto de tempo, de sentido do fluxo permeado. Esta operação é realizada

automaticamente utilizando uma válvula solenóide e um circuito de bombeamento do permeado. A **figura 3.12** ilustra esta técnica.

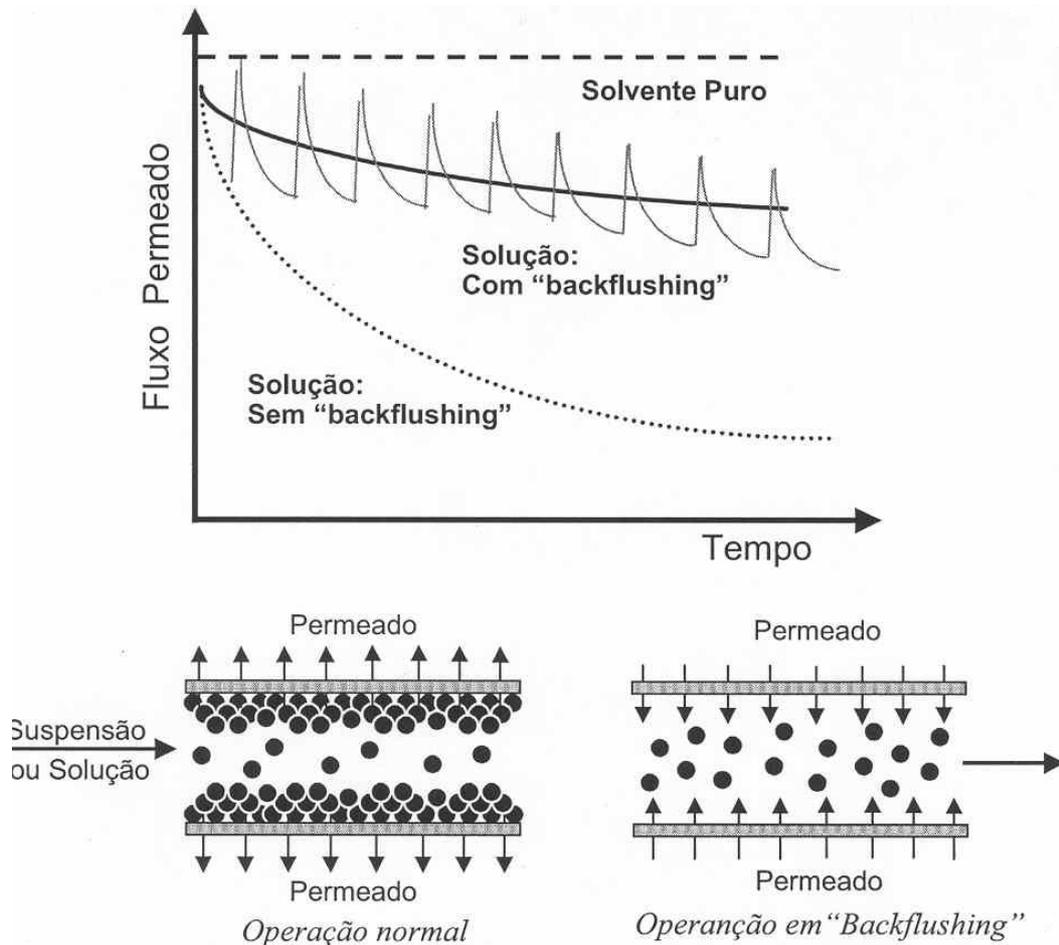


Figura 3.12: Recuperação parcial de fluxo permeado usando a técnica de operação com retrolavagem (“Backflushing”).

Fonte: HABERT et al., 2003.

Os efeitos de fouling podem ser minimizados a partir de uma otimização e controle dos ciclos de operação e limpeza química periódica assim como da variação da pressão de operação ao longo do tempo (GUADIX et al., 2004).

É importante considerar também como a eficiência dos pré-tratamentos existentes interfere no mecanismo de fouling (SHON et al., 2004). Segundo FEEMA (2002), os aspectos importantes no uso das membranas são:

- Permeabilidade – altas permeabilidades permitem altos fluxos do produto;
- Entupimento – uma membrana secundária ou camada bloqueadora pode-se formar em volta da membrana original e controlar totalmente as propriedades do fluxo do sistema;
- Solubilidade – no caso dos mecanismos de solução-difusão para a osmose inversa, a solubilidade do permeante no material da membrana é vital;
- Volume/Arranjo – unidades compactas são desejáveis;
- Durabilidade – normalmente em plantas de UF as membranas duram mais de 2 anos e em plantas de osmose inversa para dessalinização mais de 5 anos;
- Custo – análises dos custos de plantas mostram que a troca de membranas é o principal elemento do total custo anual da planta, atingindo em mais de 20% em muitos sistemas.

Outras considerações importantes podem ser feitas no que diz respeito ao bom funcionamento das membranas, tais como:

- Necessidade de um tanque pulmão para manter um regime de alimentação contínuo nas membranas;
- Uso de pré-filtros (filtro de areia) antes e de um filtro de celulose descartável após o tanque pulmão a fim de aumentar a proteção das membranas;
- Uso de polieletrólitos no tratamento físico-químico não é aconselhável pois pode ocasionar problemas sérios de entupimento nas membranas.

Cabe ressaltar que a coagulação química também será considerada uma técnica de tratamento terciário se for utilizada para polimento.

3.2 Avaliação das Alternativas Tecnológicas nos Programas de Reuso

As características dos efluentes industriais estão diretamente relacionadas à composição das matérias-primas, ao tipo de água de abastecimento e ao processo industrial. Os contaminantes presentes nestes efluentes têm concentrações que variam de acordo com a eficiência do processo e com o consumo de água (GIORDANO, 2004). A escolha por uma determinada tecnologia de tratamento para fins de reuso deve ser baseada nestas características e para cada tipo de efluente, o ideal é que se realize um estudo de tratabilidade,

avaliando suas particularidades e a real possibilidade de aplicação dos equipamentos ou sistemas propostos.

Alguns parâmetros de qualidade foram selecionados de acordo com as características necessárias para o reuso de água em torres de resfriamento. A **tabela 3.8** apresenta a descrição de tais parâmetros e o método de análise utilizado durante os experimentos.

Tabela 3.8: Características físicas, químicas e biológicas dos efluentes industriais

PARÂMETRO	UNIDADE	DESCRIÇÃO	MÉTODO (AWWA)
Alcalinidade total	mg/L	Indica a capacidade tampão do meio.	SM 2320 (B)
Cloreto	mg/L	Indica contaminação por esgoto e salinidade.	SM 4500 Cl ⁻
Colimetria	NMP/100mL	Pesquisa microbiológica.	SM 9221
Condutividade	mS/cm	Relação com a concentração de sais nos efluentes.	SM 2510 (B)
Cor	uH	Relacionada a corantes orgânicos e inorgânicos (metais pesados), compostos húmicos e outros subprodutos de biodegradação.	SM 2120 (B); GIORDANO, 1999a)
DBO	mg/L	Quantidade de oxigênio requerida para estabilizar a matéria orgânica biodegradável dissolvida ou coloidal. Medida indireta da MO.	SM 5210 (B)
Demanda de cloro	mg/L	Quantidade de cloro a ser adicionada a um despejo para que se tenha um residual padrão após 10 minutos de contato. Estimativa do teor de MO.	SM 4500 Cl
DQO	mg/L	Quantidade de oxigênio requerida para estabilizar quimicamente a matéria orgânica dissolvida ou em suspensão. Medida indireta da MO.	SM 5220 (B)
Dureza de cálcio	mg/L	Soma de cátions polivalentes presentes na água. Associada à incrustação em sistemas de resfriamento.	SM 2340 (C)
Nitrogênio amoniacal	mg/L	Produzido no primeiro estágio da decomposição do nitrogênio orgânico (contaminação recente).	SM 4500 NH ₃ ⁺
pH		Condições ácidas ou alcalinas de um despejo.	SM 4500 H ⁺ (B)
Sólidos totais (ST)	mg/L	A composição de cada forma expressa direta ou indiretamente os outros poluentes.	SM 2540 (B)
Sólidos totais fixos (STF)	mg/L	matéria inorgânica	SM 2540 (E)
Sólidos totais voláteis (STV)	mg/L	matéria orgânica	SM 2540 (E)
Sólidos suspensos (SS)	mg/L	matéria orgânica e inorgânica com diâmetro maior que 0,45 µm.	SM 2540 (D)
Sólidos suspensos fixos (SSF)	mg/L	matéria inorgânica coloidal e com diâmetros superiores.	SM 2540 (E)
Sólidos suspensos voláteis (SSV)	mg/L	matéria orgânica ou biomassa	SM 2540 (E)
Sólidos dissolvidos totais	mg/L	matéria orgânica e inorgânica com diâmetro menor que 0,45 µm.	SM 2540 (C)
Sólidos dissolvidos fixos (SDF)	mg/L	sais e óxidos solúveis	SM 2540 (E)
Sólidos dissolvidos voláteis	mg/L	matéria orgânica dissolvida	SM 2540 (E)
Sulfato	mg/L	É precursor dos sulfetos em meio anaeróbio.	SM4500 SO ₄ ²⁻ (E)
Turbidez	uT	Indica a transparência dos efluentes.	SM 2130 (B)

NMP= número maisuT = unidade de toxicidade provável

Fonte: APHA, AWWA, WEF, 1999. GIORDANO, G., 2003. MACÊDO, 2003.

4. METODOLOGIA

O presente estudo foi desenvolvido a partir da coleta de amostras provenientes da estação de tratamento de efluentes de uma indústria farmacêutica. O sistema que já se encontrava em funcionamento era composto por:

1. Tratamento preliminar composto por peneiramento, gradeamento e caixa de gordura;
2. Tratamento primário composto por coagulação química e flotação para o tratamento de efluentes oleosos gerados durante a produção da linha de cremes e no restaurante interno da fábrica. Outro tratamento primário composto por coagulação química e sedimentação era utilizado para o tratamento de efluentes com elevada concentração de sais contendo principalmente magnésio;
3. Tratamento biológico com lodos ativados.

As duas correntes de efluentes geradas após tratamento primário eram encaminhadas para o tanque de equalização assim como o restante dos efluentes gerados no processo industrial. Após equalização, os efluentes eram encaminhados para o tanque de aeração que recebia também o esgoto sanitário da fábrica.

O efluente tratado da ETE era também submetido a um tratamento adicional, em uma unidade de ultrafiltração, a qual foi instalada em 2003 com objetivo de reuso de água e conseqüente minimização da quantidade de efluente lançada nos corpos receptores.

Na unidade de Ultrafiltração eram obtidas duas correntes, o rejeito que retornava para o tanque de aeração, e o permeado que era direcionado para o reservatório de água para uso industrial, para ser posteriormente enviado para as torres de resfriamento ou para lavagens de pisos e irrigação de áreas verdes.

A **figura 4.1** apresenta a ETE existente de forma simplificada.

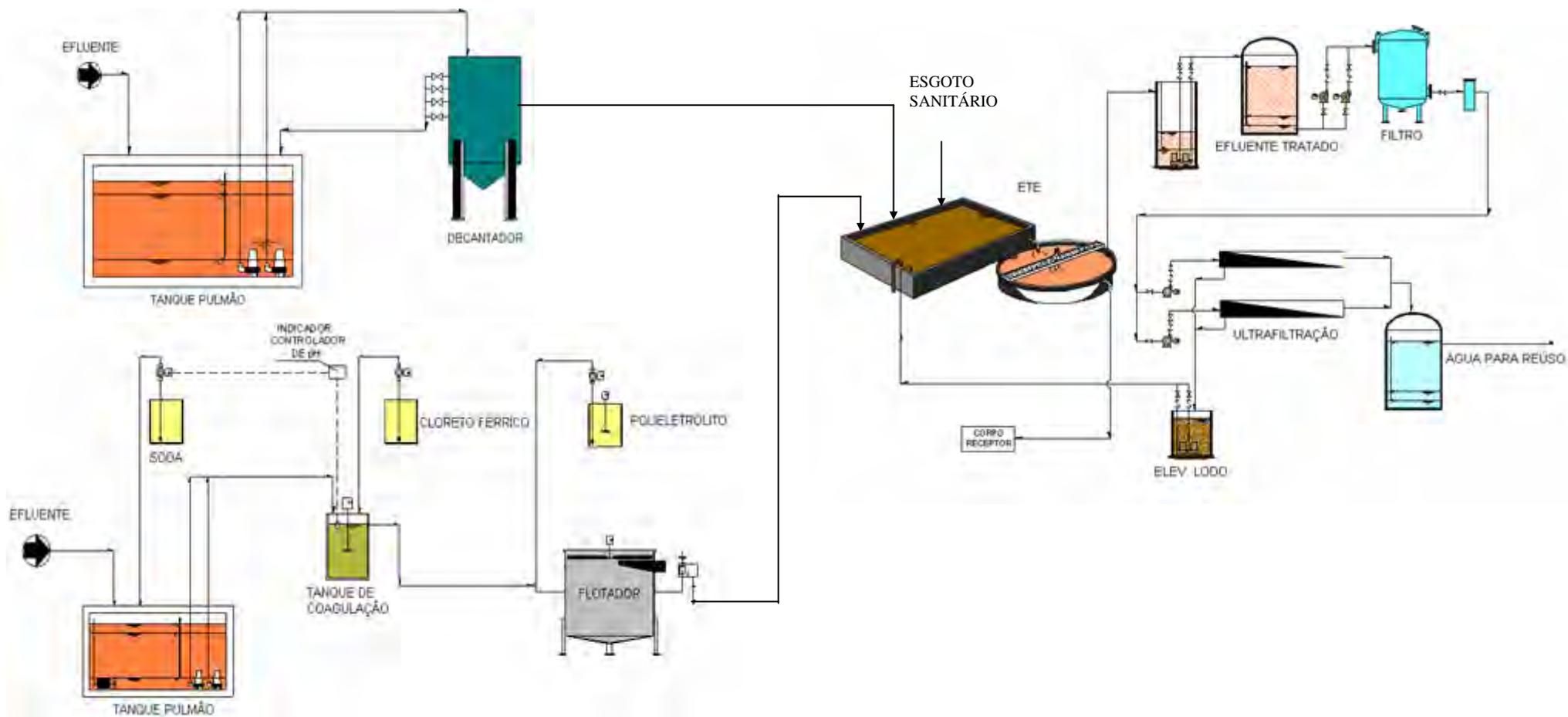


Figura 4.1: Processo de Tratamento de Efluentes de Indústria Farmacêutica
 Fonte: Adaptado do material cedido pela Tecma.

4.1 Descrição da Parte Experimental

Para os ensaios foram coletadas amostras compostas na saída do decantador secundário e na saída do sistema de reuso composto pela membrana de ultrafiltração. Parte da amostra coletada na saída do decantador secundário foi analisada no laboratório e na outra parte foram realizados *Jar Tests* a fim de simular o tratamento físico-químico. A amostra tratada gerada no *Jar Test* foi também analisada, assim como a amostra do permeado da ultrafiltração. A figura 4.2 apresenta resumidamente a metodologia descrita anteriormente. No presente estudo, este procedimento foi seguido cinco vezes, durante os meses de Setembro e Outubro de 2004, gerando um total de 15 amostras.

As condições operacionais do processo industrial não ocasionaram variações significativas neste estudo porque as coletas foram realizadas num intervalo de tempo relativamente curto e, principalmente devido ao tempo de residência projetado para o tanque de equalização e para o sistema biológico ser de 48 e 24 horas, respectivamente.

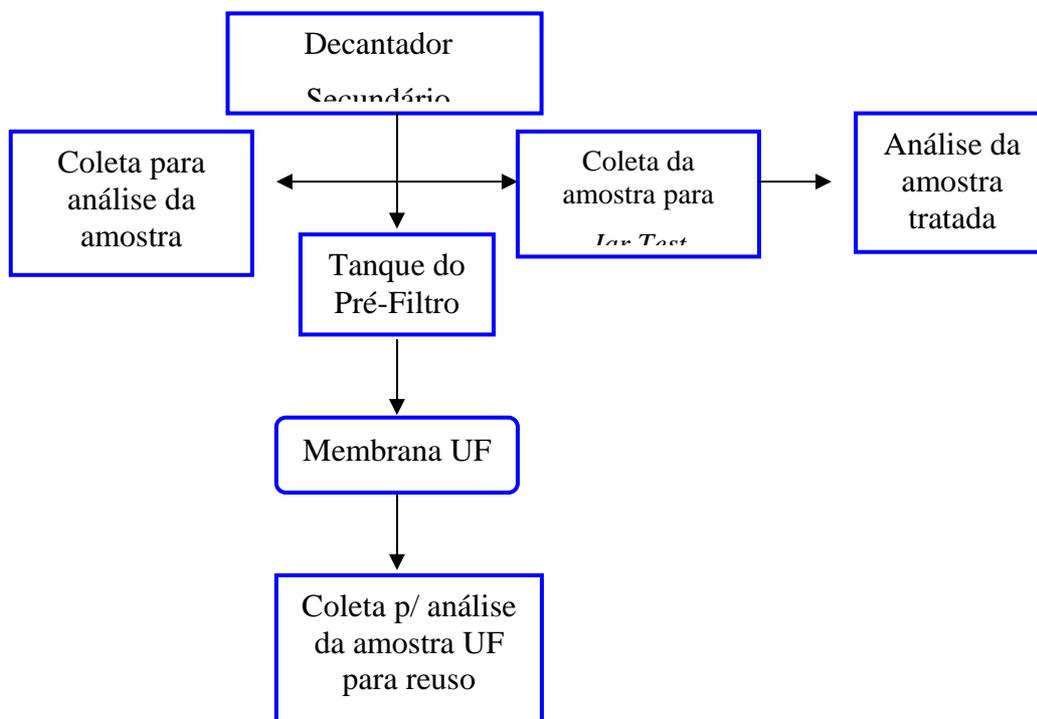


Figura 4.2: Fluxograma da metodologia proposta

4.1.1. Tratamento Físico-Químico – Jar Test

Neste trabalho, os ensaios no *Jar Test* permitiram definir a quantidade de produto químico utilizada, os aspectos do lodo gerado e o teor de sais dissolvidos do efluente clarificado.

- Materiais, equipamentos e reagentes

Foram utilizados os seguintes equipamentos e ou materiais:

- Agitador tipo *Jar Test*, para seis provas, marca Phipps & Bird Stirrer 7790-400
- Béqueres de 2000 mL e 2500 mL
- Béqueres de 100 mL e 200 mL
- Potenciômetro Digimed DM 2
- Turbidímetro Solar Instrumentação SL 2K
- Pipetadores automáticos
- Provetas de 5 mL
- Termômetros
- Cronômetro
- Cone de Imhoff
- Bastão de vidro
- Máquina fotográfica digital
- Solução de sulfato de alumínio (10 g/L)
- Solução de polieletrólito catiônico (0,1%)

Os ensaios foram realizados em Equipamento de Reatores Estáticos, composto por seis bécheres, com capacidade de dois litros. O coagulante utilizado em todos os experimentos foi o sulfato de alumínio e um polieletrólito catiônico fraco foi adicionado como auxiliar de floculação.

A escolha da dosagem de sulfato de alumínio e de polieletrólito foi determinada tomando como referência algumas literaturas especializadas sobre tratamento de água e a partir de alguns ensaios simulados no laboratório. Durante os experimentos, a faixa de concentração de coagulante químico utilizada variou de 5 a 30 mg/L.

No caso do auxiliar de floculação optou-se por utilizar um volume constante do polieletrólito catiônico a 0,1% visto que a adição deste não proporcionava variações e melhorias significativas no processo. O ajuste de pH também não foi necessário pois este permaneceu próximo da neutralidade em todos os bécheres. A **tabela 4.1** apresenta os volumes de produtos químicos utilizados durante a execução dos experimentos.

Tabela 4.1: Dosagens dos produtos químicos utilizados na execução do *Jar Test*

Ensaio	VAl ₂ (SO ₄) ₃ (ml)	[Al ₂ (SO ₄) ₃] (mg/L)	Vpolieletrólito (ml)
1	1,00	10	1,00
2	0,50	5	1,00
3	0,50	5	1,00
4	2,00	20	1,00
5	3,00	30	1,00

Na **figura 4.3** é mostrada uma foto esquemática do experimento.

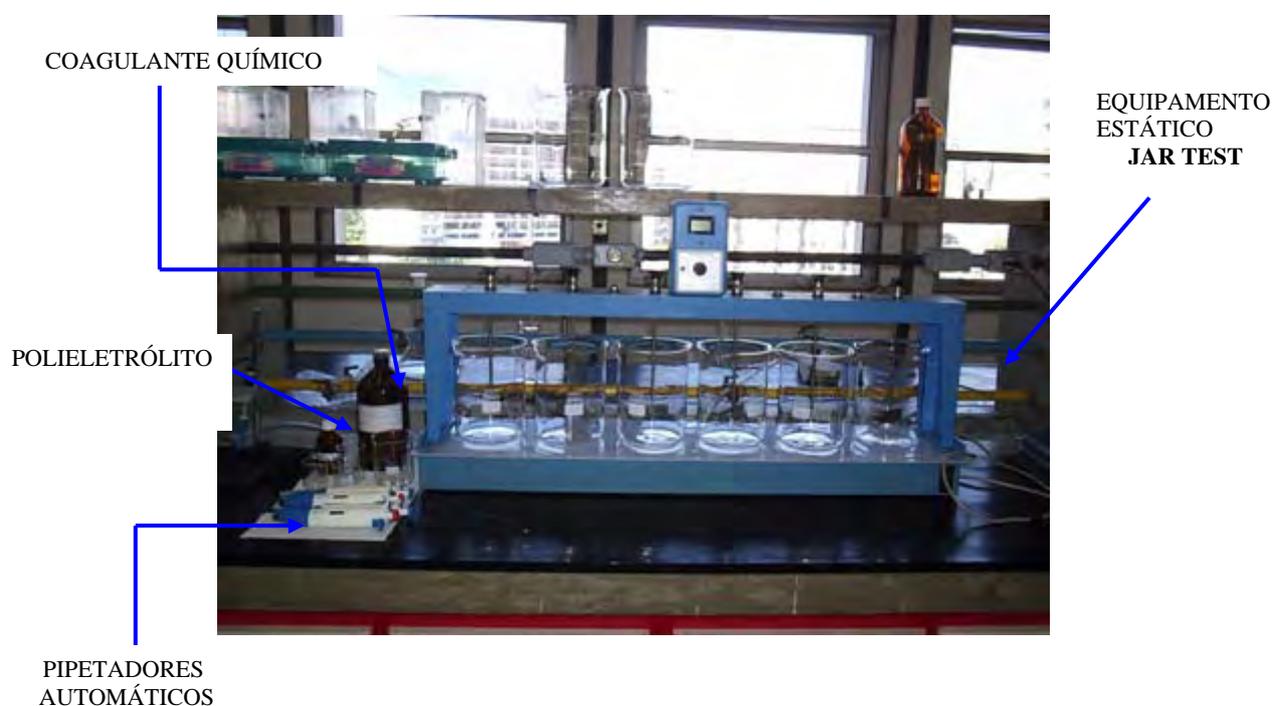


Figura 4.3: Foto esquemática do experimento

O procedimento convencional do *Jar Test* foi ajustado e procedeu-se na sequência e de acordo com as seguintes etapas:

Etapa 1

- Os reagentes foram preparados nas concentrações determinadas previamente. Mediu-se a temperatura do laboratório e o pH e a temperatura da amostra.

Etapa 2

- Um litro de amostra homogeneizada foi colocada em cada um dos seis bécheres, conforme ilustrado na **figura 4.4**. Em seguida, foi ligada a agitação rápida do aparelho e iniciado o processo de adição de coagulante e polieletrólito. Os bécheres foram agitados numa velocidade rápida ($v = 365 \text{ rpm}$) por 2 minutos e depois numa velocidade lenta ($v = 4 \text{ rpm}$) por 15 minutos. O tempo de sedimentação foi de 20 minutos.

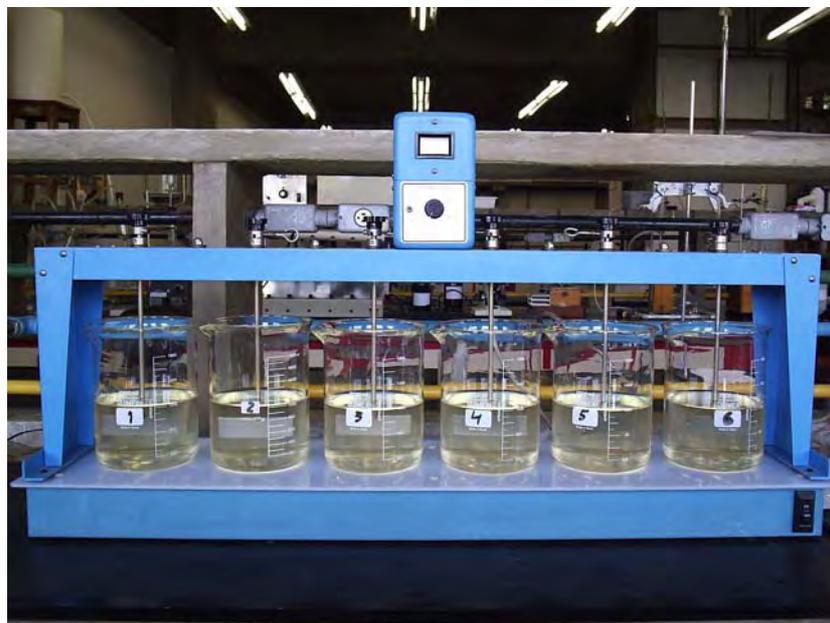


Figura 4.4: Equipamento Estático (*Jar Test*) com amostra

Etapa 3

- O pH foi medido em todos os bécheres e no becher que apresentou a melhor clarificação foi registrada a concentração de coagulante utilizada. Devido à dificuldade de visualização durante os ensaios, a turbidez foi medida em todos os bécheres a fim de determinar a amostra ótima.

Etapa 4

- O procedimento foi repetido utilizando uma quantidade de amostra dobrada e para a dosagem ótima de coagulante determinada anteriormente. Após o *Jar Test* a amostra tratada foi colocada em um cone Imhoff a fim de obter a quantidade de lodo gerada.
- A quantificação do lodo foi obtida deixando-se em repouso 1 litro de amostra homogeneizada durante 1 hora. A tendência do lodo para flotar ou sedimentar foi verificada, assim como o volume de lodo gerado em mL/L.
- Em seguida a amostra clarificada sobrenadante foi coletada e foram feitas análises dos parâmetros desejados da amostra.

A fim de complementar o *Jar Test* os parâmetros abaixo foram analisados pelos técnicos do Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ) seguindo as normas contidas no manual Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater listadas nos anexos do presente estudo.

- Condutividade
- Sólidos Suspensos Totais
- Sólidos Dissolvidos Totais
- Turbidez
- Cor
- pH
- DBO

- DQO
- Teor de sulfato
- Cloretos
- Dureza
- Alcalinidade Total
- Amônia

4.1.2 Tratamento com Membranas de Ultrafiltração

O sistema de ultrafiltração estudado era composto por membranas da marca Osmonics composto por polisulfona (material polimérico orgânico) e com capacidade para tratar até 10m³/h de efluente. O sistema operava à temperatura ambiente e à pressão de 100 psi. A **figura 4.5** mostra o *lay-out* e as **figuras 4.6a e 4.6b** ilustram detalhadamente o sistema de reuso completo instalado na indústria farmacêutica em questão.

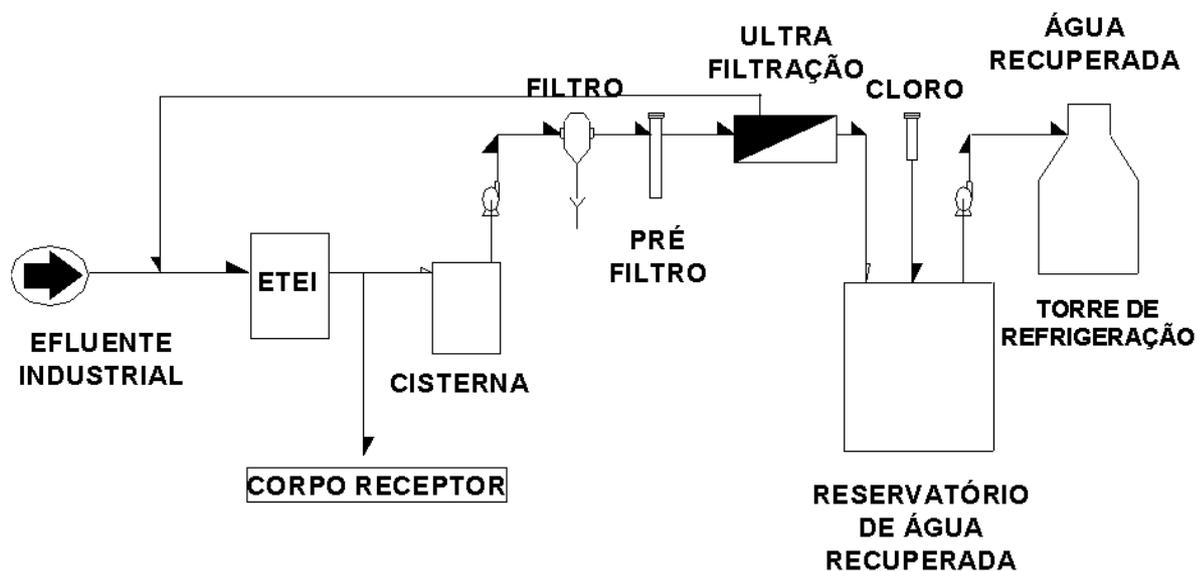


Figura 4.5: Lay-out do Sistema de Reuso de Água em Indústria Farmacêutica

Fonte: Material cedido pela Tecma.



Figura 4.6a: Sistema de Reuso de Água – Ultrafiltração
Fonte: Material cedido pela Tecma.



Figura 4.6b: Sistema de Reuso de Água – Membranas de Ultrafiltração

Fonte: Material cedido pela Tecma.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios realizados no presente estudo geraram efluentes bastante clarificados tanto nas amostras que passaram por tratamento físico-químico quanto nas amostras submetidas ao processo de filtração em membranas. As **figuras 5.1 a 5.4** mostram os aspectos das amostras geradas em cada etapa do experimento.



Figura 5.1: Comparação entre efluente do decantador e permeado da membrana de ultrafiltração



Figura 5.2: Comparação entre efluente do decantador e efluente após o Jar Test



Figura 5.3: Comparação entre efluente após o Jar Test e permeado da ultrafiltração



Figura 5.4: Comparação entre os três tipos de amostra estudadas: D – amostra proveniente do decantador secundário, J – amostra após o Jar Test e M - permeado da ultrafiltração.

Os resultados das análises laboratoriais permitiram definir os parâmetros mais significativos para o efluente estudado, tais como: teor de sulfato, sólidos dissolvidos totais (SDT), sólidos suspensos totais (SST), turbidez e cor. O comportamento destes parâmetros durante os experimentos foi avaliado conforme comentários a seguir.

A **tabela 5.1** mostra a variação da concentração de sulfato em todas as etapas descritas na metodologia, ou seja, após o decantador secundário, após a membrana de ultrafiltração e após o *Jar Test*. A redução da concentração de sulfato após a

ultrafiltração pode ser atribuída a fração insolúvel deste ânion. No caso dos resultados obtidos após o *Jar Test* verifica-se um aumento na concentração do sulfato. Este resultado é decorrente da dosagem de sulfato de alumínio no processo de coagulação química. Cabe ressaltar que a adição de sais nesta etapa não foi um agravante porque neste caso especificamente foi utilizado um pequeno volume de coagulante químico.

A adição deste coagulante também contribuiu para a reação de hidrólise ácida reduzindo levemente o pH e a alcalinidade, conforme mostra a **tabela 5.2**. Deve ser ressaltado que o monitoramento da corrosão, a dosagem de produtos químicos na coagulação e as características corrosivas ou incrustantes da água são extremamente influenciadas por este parâmetro.

Tabela 5.1: Resultados das análises do teor de sulfato por tipo de tratamento

Sulfato (mg/L)			
Ensaio	Após Decantador	Após UF	Após <i>Jar Test</i>
1	43	32	47
2	15	5	17
3	16	2	43
4	59	57	66
5	50	40	108
MÉDIA	37	27	56

Tabela 5.2: Análises complementares por tipo tratamento

Parâmetro	Ensaio	Após Decantador	Após UF	Após Jar Test
pH	1	7,30	7,40	7,30
	2	7,50	7,50	7,60
	3	7,60	7,30	7,60
	4	7,60	7,80	7,60
	5	6,70	7,30	6,00
	Média	7,34	7,46	7,22
Alcalinidade Total (mg CaCO₃/L)	1	82	71	78
	2	95	84	89
	3	155	85	153
	4	106	124	107
	5	65	61	27
	Média	101	85	91
Dureza (mg CaCO₃/L)	1	40	36	36
	2	36	32	32
	3	32	35	33
	4	80	64	58
	5	60	40	48
	Média	50	41	41
Condutividade (µS/cm)	1	689	659	666
	2	696	667	687
	3	821	687	801
	4	689	689	695
	5	634	501	717
	Média	706	641	713
Nitrogênio Amoniacal (mg N-NH₄⁺/L)	1	0,2	0,2	0,2
	2	0,4	<0,2	0,2
	3	0,2	0,2	0,2
	4	<0,2	<0,2	<0,2
	5	<0,2	<0,2	<0,2
	Média	0,27	0,20	0,20
Cloreto (mg Cl⁻/L)	1	57	56	55
	2	64	62	60
	3	68	70	66
	4	66	59	60
	5	63	44	62
	Média	64	58	61
DBO (mg/L)	1	4	2	4
	2	2	2	2
	3	2	2	2
	4	7	7	5
	5	2	2	2
	Média	3	3	3
DQO (mg/L)	1	31	23	31
	2	40	26	31
	3	25	17	26
	4	27	16	16
	5	45	17	16
	Média	34	20	24

Em relação à concentração de sólidos dissolvidos totais, as membranas também apresentaram os melhores resultados. Houve redução deste parâmetro após o *Jar Test*, mas isto não ocorreu de forma constante em todos os ensaios. O tratamento físico-químico não foi capaz de absorver a possível variação na qualidade do efluente alimentado e parte da carga de sais adicionados com o uso do coagulante químico. A **tabela 5.3** apresenta a variação de sólidos dissolvidos totais.

Tabela 5.3: Resultados das análises de sólidos dissolvidos totais por tipo de tratamento

SDT (mg/L)			
Ensaio	Após Decantador	Após UF	Após <i>Jar Test</i>
1	578	512	510
2	568	508	556
3	604	491	600
4	506	492	572
5	502	452	528
MÉDIA	552	462	553

É importante ressaltar que a concentração de sólidos dissolvidos totais (SDT) é um parâmetro restritivo para o uso de água em diversas aplicações industriais e existe uma limitação dentre os processos de tratamento de efluentes para remoção deste contaminante. Além disso, este parâmetro tende a aumentar à medida que o efluente é reutilizado já que uma carga adicional de sais é incorporada através da adição de produtos químicos e da evaporação.

As análises de turbidez mostraram claramente a dificuldade encontrada durante a execução do *Jar Test*. O método de visualização para a escolha da melhor dosagem de coagulante não foi possível face aos pequenos volumes utilizados e semelhança entre as amostras tratadas. A turbidez foi utilizada para este fim, mas também oscilou bastante e os ensaios precisaram ser repetidos algumas vezes até que a dosagem ótima fosse estabelecida.

A clarificação se mostrou como uma operação de difícil controle. Na maior parte dos ensaios, os flocos não foram formados da maneira adequada e a sedimentação ocorreu de forma bastante lenta.

No caso da ultrafiltração os resultados foram satisfatórios. Houve redução significativa da turbidez o que demonstrou a maior confiabilidade desta técnica.

A **tabela 5.4** apresenta o comportamento da turbidez ao longo dos experimentos.

Tabela 5.4: Resultados das análises de turbidez por tipo de tratamento

Turbidez (NTU)			
Ensaio	Após Decantador	Após UF	Após <i>Jar Test</i>
1	6,0	2,0	3,0
2	17,0	3,0	7,0
3	5,0	1,0	7,0
4	6,9	0,8	8,0
5	9,8	2,0	2,6
MÉDIA	8,9	1,8	5,5

Da mesma forma que a turbidez, os sólidos suspensos totais também apresentaram características oscilatórias após o *Jar Test*. No caso da ultrafiltração, foi possível constatar um aumento na concentração deste parâmetro ao longo dos ensaios 2 e 3. Isto pode ter sido ocasionado pela perda de carga após a filtração o que gerou a desestabilização de material orgânico coloidal. Na **tabela 5.5** estão apresentados os resultados obtidos para esse parâmetro.

Tabela 5.5: Resultados das análises de sólidos suspensos totais (SST)

SST (mg/L)			
Ensaio	Após Decantador	Após UF	Após Jar Test
1	12	6	34
2	14	16	16
3	2	4	16
4	32	5	4
5	56	0	20
MÉDIA	23	6	18

A **tabela 5.6.** mostra que houve redução da cor na maior parte dos ensaios sendo que os melhores resultados foram obtidos após a ultrafiltração.

Tabela 5.6: Resultados das análises da cor por tipo de tratamento

Cor (mg Pt/L)			
Ensaio	Após Decantador	Após UF	Após Jar Test
1	40	35	50
2	60	40	50
3	30	20	30
4	40	8	35
5	35	15	3
MÉDIA	41	24	34

Paralelamente ao *Jar Test*, foram feitas medições da quantidade de lodo gerado com a coagulação através do método de decantação em cone Imhoff. A sedimentação do lodo ocorreu de forma bastante lenta e instável. Para 1 litro de amostra tratada, a quantidade de lodo gerada após 1 hora de sedimentação no cone Imhoff foi bastante variável, compreendendo uma faixa de 0,02 até 21 mL/L.

A **tabela 5.7** e a **figura 5.5** mostram a dosagem de produtos químicos utilizada em cada ensaio e o volume de lodo gerado. Embora a dosagem de coagulante tenha sido a mesma nos ensaios 2 e 3 observa-se um aumento do volume de lodo, o que mostra a dificuldade encontrada no ajuste da dosagem ótima de sulfato de alumínio.

Tabela 5.7: Dosagem de produtos químicos X Volume de lodo gerado

Ensaio	VAl ₂ (SO ₄) ₃ (ml)	[Al ₂ (SO ₄) ₃] (mg/L)	Vpolieletrólito (ml)	V lodo gerado (ml)
1	1,00	10	1,00	0,02
2	0,50	5	1,00	0,03
3	0,50	5	1,00	1,00
4	2,00	20	1,00	6,00
5	3,00	30	1,00	21,00

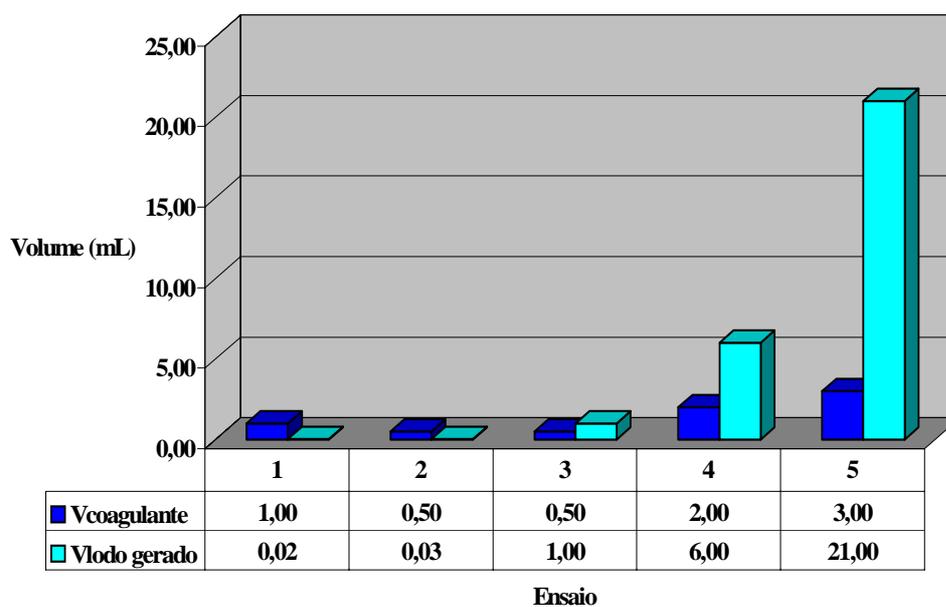
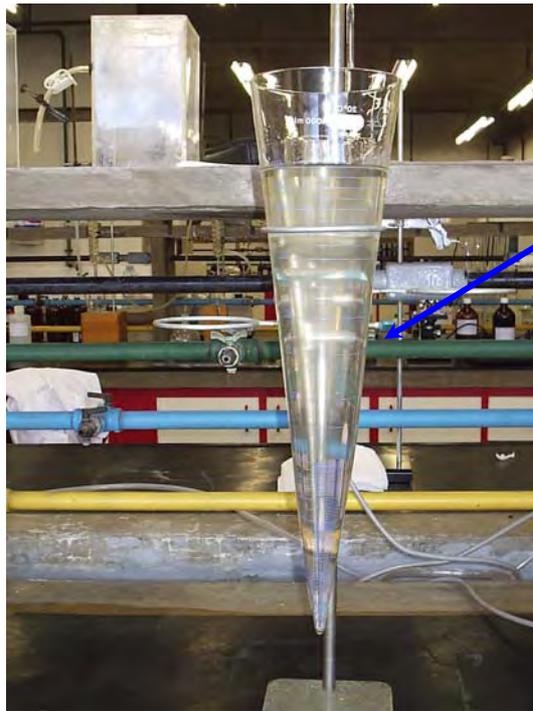


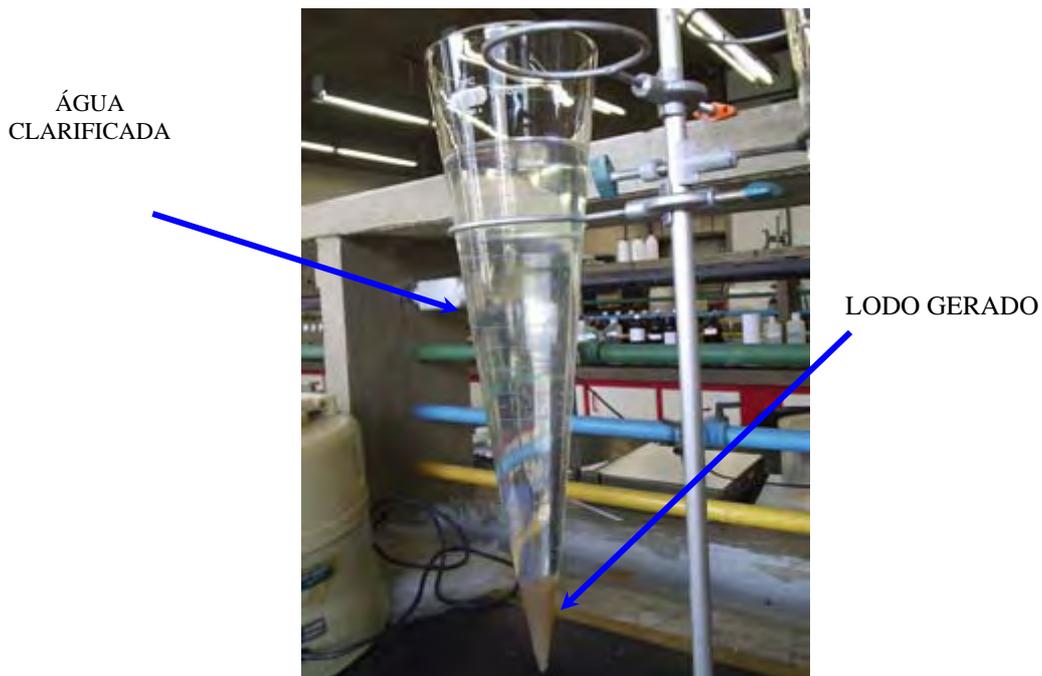
Figura 5.5: Comparação entre os volumes de coagulante utilizado e lodo gerado após o Jar Test

As **figuras 5.6** e **5.7** apresentam os aspectos do lodo gerado antes e após 1 hora de sedimentação no método de decantação em cone Imhoff.



MATERIAL EM
SUSPENSÃO

Figura 5.6: Quantificação do lodo – Cone Imhoff no início do experimento



ÁGUA
CLARIFICADA

LODO GERADO

Figura 5.7: Quantificação do lodo – Cone Imhoff no final do experimento (após 1 h)

A quantificação dos sólidos suspensos totais também foi feita antes e após uma hora de sedimentação em Cone Imhoff, conforme ilustrado na **tabela 5.8**. Na metodologia utilizada aproximadamente 200 mL da amostra tratada foram coletados

imediatamente após o *Jar Test* e outra parte da amostra foi coletada após 1 hora de sedimentação em Cone Imhoff.

Tabela 5.8: Variação da quantidade de sólidos em suspensão antes e após 1 hora de sedimentação em Cone Imhoff

SST (mg/L)	
ANTES	APÓS 1 HORA
46	34
68	16
206	16
22	4
28	20

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste estudo foi utilizado um efluente clarificado com boas características, proveniente de uma estação de tratamentos de efluentes a nível secundário que apresentava bom desempenho, qualidade e regularidade. Este fato por um lado favoreceu a técnica de filtração em membranas e por outro lado criou dificuldades durante o processo de clarificação físico-química.

A clarificação físico-química é menos vulnerável em relação à variação de carga mas as unidades devem ser dimensionadas prevendo os custos gerados a partir do consumo de produtos químicos e para o tratamento e disposição do lodo gerado. Para o efluente estudado o consumo de coagulante químico foi pequeno e, desta forma, não houve gasto significativo e a conseqüente adição de sais também não gerou oscilações importantes em outros parâmetros estudados.

Como já era esperado, a simulação da coagulação química em escala laboratorial mostrou que o *Jar Test* é um teste eficaz, com eficiência comprovada no que diz respeito à obtenção de dados e boas estimativas para o processo em escala real.

Durante os experimentos foi observada uma grande dificuldade no controle da sedimentação e geração do lodo. O consumo de coagulante foi pequeno mas variou bastante em todos os ensaios. A sedimentação ocorreu de forma lenta devido à presença de flocos leves, desagregados, com bolhas de ar em seu interior e constituídos principalmente de material orgânico coloidal (resíduos de flocos biológicos). A quantidade de lodo gerada também oscilou bastante assim como a quantidade de sólidos no efluente clarificado.

No caso da filtração em membranas o principal inconveniente é o arraste de sólidos após o decantador secundário. Esse arraste deve ser evitado ao máximo para que não haja *fouling* na membrana e parada do sistema. Isto pode ser feito através do uso de pré-filtros eficientes e de um controle operacional da estação de tratamento de efluentes cuja capacidade de absorver variações na carga e na qualidade do efluente alimentado é imprescindível.

Em geral, ambos os tratamentos geram água de boa qualidade. A ultrafiltração destaca-se como uma técnica de alta confiabilidade, possui fácil operação mas por outro lado é extremamente influenciada pela estabilidade da estação de tratamento de efluentes. Esta deve ser dimensionada corretamente, possuir instalações adequadas e ter alto controle operacional, a fim de garantir um desempenho constante já que os efeitos recaem diretamente sobre a membrana. Os filtros e pré-filtros devem ter suas dimensões otimizadas e garantir alta eficiência.

Para uma análise da viabilidade econômica deve-se considerar os custos da água fornecida pela concessionária local, custos do tratamento e descarte de efluentes antes e depois da implantação dos sistemas de reuso incluindo os investimentos necessários e os custos operacionais.

Recomendações:

- Realizar estudos experimentais utilizando amostras de diversos tipos de efluentes industriais, em maior número e num período de amostragem mais longo;
- Estudar outros tipos de coagulantes químicos e avaliar a influência destes nos parâmetros de qualidade da água;
- Desenvolver estudos experimentais para avaliar a eficiência da flotação a partir de ensaios em Floteste;
- Realizar estudos experimentais utilizando outros tipos de membranas a fim de obter parâmetros de custo e eficiência;
- Estabelecer programas de pesquisas para aprimorar os parâmetros de operação e adequá-los aos diferentes tipos de água tratados a fim de reduzir os custos de operação dos sistemas de membrana;
- Determinar padrões de qualidade próprios para fins de reuso a partir de ensaios laboratoriais e em escala piloto a fim de atender ao mercado nacional.
- Estabelecer uma legislação específica para o reuso de água para diversas aplicações incluindo diretrizes e critérios para a qualidade da água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-MUTARI, N. Z.; HAMODA, M. F.; AL-GHUSAIN, I. **Coagulant Selection and Sludge Conditioning in a Slaughterhouse Wastewater Treatment Plant.** *Bioresource Technology*, n. 95, 2004. pp.115-119.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, WATER ENVIRONMENTAL FEDERATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.** 20 ed. Washington, D.C.: APHA, AWWA, WEF, 1998. 1157p.

AZEVEDO NETTO, J. M., RICHTER, C.A. **Tratamento de Água.** 1ª ed. São Paulo: Editora Edgar Blucher, 1995. 332 p.

AZEVEDO, C. A. L. de, KAYANO, C. A. S., ABREU, G. M. R. de & SALVESTRO, R. E. **Reutilização de Efluentes Líquidos de uma Refinaria de Petróleo,** São José dos Campos: 1999 monografia (Pós Graduação), Fundação Armando Alvares Penteado - FAAP, 1999. 220p.

BAYAT, O.; ARSLAN, V.; BAYAT, B.; POOLE, C. **Application of Flocculation-Ultrafiltration Process for Bacteria (*Desulfovibrio desulfuricans*) Removal from Industrial Plant Process Water,** *Biochemical Engineering Journal*, v. 18, 2004. pp. 105-110.

BELLONA, C.; DREWES, J. E.; XU, P; AMY, G. **Factors Affecting the Rejection of Organic Solutes During NF/RO. Treatment – a Literature Review.** *Water Research*, n.38, 2004. pp.2795-2809.

BES-PIÁ, A.; MENDOZA-ROCA, J.A.; ALCAINA-MIRANDA, M.I.; IBORRA-CLAR, A.; IBORRA-CLAR, M.I. **Combination of Physico-Chemical Treatment and Nanofiltration to Reuse Wastewater of a Printing, Dyeing and Finishing Textile Industry,** *Desalination*, v. 157, 2003. pp. 73-80.

BETZ LABORATORIES, INC. **Handbook of Industrial Water Conditioning**. Trevoze, 1980. p. 178, 202-205.

BRAVO, J. L. R. **Levantamento de Oportunidades para Racionalização do Uso da Água em Unidades de Processo de uma Metalurgia de Cobre Primário**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2003, 66p.

BUHRMANN, F.; WALDT, M. VAN DER.; HANEKOM, D.; FINLAYSON, F. **Treatment of Industrial Wastewater for Reuse**. Desalination, n.124, 1999. pp.263-269.

CALDEIRA, L. E. **Síntese e Caracterização de Membranas de Acetato de Celulose para Ultrafiltração**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1984. 104p.

CASSETTA, E.; MANSUR, W. **Torres de Resfriamento de Água**. São Paulo: TRA Torres de Resfriamento de Água Ltda, 2004. 72p.

CORREA, A. F. **Aplicações de Reuso de Água na Indústria – Caso Prático da Volkswagen Taubaté**. Seminário Rio Águas - Rede de Tecnologia/Rede de Química Analítica do Rio de Janeiro, REQARJ, Rio de Janeiro, 2003.

DANTAS, E. **Tratamento de Água de Refrigeração e Caldeiras**. 2ª ed., Rio de Janeiro: Ecolab Química LTDA, 1988. pp. 123-237.

DE CARVALHO, R. B. **Membranas Anisotrópicas para Nanofiltração e Osmose Inversa preparadas pelo Processamento Simultâneo de Duas Soluções Poliméricas**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2001. 123p.

DI BERNARDO, L. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. ABES, Rio de Janeiro, 1993.

DI BERNARDO, L.; BOTARI, A.; NICIURA, L. C.; SANTOS, D. C.G.; SOUZA, F. G. C.; PAZ, L. P. S.; CUNHA, M. C.; SANTOS, P. I. A. **Parâmetros de Projeto de Unidades de Floculação de Estações de Tratamento de Água a partir de Ensaio em Equipamentos de Jarreste**. In: 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2003, Joinville. **Anais...** Santa Catarina: ABES, 2003.

DI BERNARDO, L.; DI BERNARDO, A.; FILHO, P. L. C. **Ensaio de Tratabilidade de Água e dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água**. 1ª ed. São Carlos. Rima, 2002.

DI LUCCIO, M. **Membranas Microporosas Planas e do Tipo Fibras-Oca a partir de Sistemas contendo Policarbonato como Polímero Base**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1997. 131p.

DREW. **Princípios de Tratamento de Água Industrial**. São Paulo: Drew Produtos Químicos LTDA, 1979. pp. 48-166.

EBLE, K. S. & FEATHERS, J. **Characterization of Streams First Step in Reuse Scheme**. Oil & Gas Journal, Nova Iorque, 1992. pp. 86 – 92.

ECKENFELDER Jr, W. W. **Industrial Water Pollution Control**. 2 ed. Singapore, Mc Graw- Hill Book Company, 1989, pp. 84- 95.

ECKENFELDER Jr, W. W., **Water Pollution Control**, Jenkins Book Publishing Company Austin and New York, 1970. pp.83- 90.

FEEMA – FUNDAÇÃO ESTADUAL DE ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE. **Controle de Efluentes Líquidos Industriais**. Rio de Janeiro, 2002. 109p.

FINC, D. R.; SANTOS, H. F. dos. **A Legislação de Reuso de Água**. In: MANCUSO, P. C. S.; Santos, H. F. dos (Editores). **Reuso de Água**. 1 ed. São Paulo: Editora Manole LTDA, 2003. cap.8, pp.267- 268, 276- 277.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3^a ed, Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos S.A., 2001. pp. 185-198.

GIORDANO, G. **Saneamento Básico e Tratamento de Efluentes**. Apostila UERJ, Rio de Janeiro, 2003. 71p.

GUADIX, A.; SORENSEN, E.; PAPAGEORGION, L. G.; GUADIX, E. M. **Optimal Design and Operation of Continuous Ultrafiltration Plants**. Journal of Membrane Science, n. 235, 2004. pp 131-183.

GUO, W. S.; VIGNESWARAN, S.; NGO, H.H.; CHAPMAN, H. **Experimental Investigation of Adsorption – Flocculation – Microfiltration Hybrid System in Wasterwater Reuse**. Journal of Membrane Science, n.242, 2004. pp.27- 35.

HABERT, A. C., BORGES, C. P., NOBREGA, R. **Escola Piloto em Engenharia Química: Processos de Separação com Membranas**. Programa de Engenharia Química, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2003. 133p.

HESPANHOL, I. **Potencial de Reuso de Água no Brasil: Agricultura, Indústria, Município e Recarga de Aquíferos**. In: MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. dos (Editores) Reuso de Água. 1^a ed. São Paulo: Editora Manole LTDA, 2003. cap.3, pp.41- 49.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 3^o ed., Rio de Janeiro: ABES, 1995. pp. 47-50.

LANGELIER, W. F. **The Analytical Control of Anticorrosion Water Treatment**. JAWWA, v. 28, 1936.

LEITE, M. M. **Síntese e Propriedades de Transporte de Membranas de Acetato de Celulose e de Polissulfona para Ultrafiltração e Osmose Inversa**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1989. 102p.

LORA, E. E. S. **Prevenção e Controle da Poluição nos Setores Energético, Industrial e de Transporte**. 2^a ed. Rio de Janeiro. Interciência, 2002. 481p.

MACÊDO, J. A. B. **Métodos Laboratoriais de Análises Físico-Químicas e Microbiológicas**. 2ª ed. Belo Horizonte. CRQ – MG, 2003, 450p.

MACÊDO, J. A. B. de. **Águas & Águas**, 1ª Edição, Minas Gerais, Editora Ortofarma, 2000. 505 p.

MACHADO, L. P. **Reuso de Esgotos Sanitários Tratados para Fins de Água de Reposição em Torres de Resfriamento – Sistemas Semi-Abertos**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, Rio de Janeiro, 2004.

MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. dos (Editores) **Reuso de Água**. 1ª ed. São Paulo: Editora Manole LTDA, 2003. 579p.

METCALF & EDDY. **Waster Engineering - Treatment, Disposal, and Reuse**. Singapura: McGraw-Hill, 1991. p. 1159-1167.

MIERZWA, J.C. **O Uso Racional e o Reuso como Ferramentas para o Gerenciamento de Águas 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. 399p.

MUSTAFÁ, G. **Reutilização de Efluentes Líquidos em Indústria Petroquímica**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1998.

PAVANELLI, G. **Eficiência de Diferentes Tipos de Coagulantes na Coagulação, Floculação e Sedimentação de Água com Cor ou Turbidez Elevada**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Hidráulica e Saneamento da Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

PUCKORIUS, P. **Get a Better Reading on Scaling Tendency of Cooling Water**. Power, 1983.

REVISTA MEIO FILTRANTE, 2003. **Água de resfriamento, porque mantê-la limpa**, Rio de Janeiro, Meio Filtrante, v. 06., 2003. 7p.

SCHNEIDER, R. P.; TSUTIYA, M. T. **Membranas Filtrantes para o Tratamento de Água, Esgoto e Água de Reuso**. 1ª ed., São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001. p. 6-9.

SHON, H. K.; VIGNESWARAN, S.; KIM, I. S.; CHO, J.; NGO, H. H. **The Effect of Pretreatment to Ultrafiltration of Biologically Treated Sewage Effluent: a Detailed Effluent Organic Matter (EFFOM) Characterization**. Water Research, n.38, 2004. pp.1933- 1939.

SIDNEY, L. M.; VILANI, C.; OLIVEIRA, C. A.; et al. **Aplicação de Osmose Inversa para ser utilizada em Hemodiálise**. XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Águas de São Pedro, São Paulo, 2000.

SILVA, S. A.; OLIVEIRA, R. de. **Manual de Análises Físico-Químicas de Águas de Abastecimento e Residuárias**. Campina Grande, 2001. 266p.

SPERLING, M. von. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgoto**. 2ª ed., Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 1996. pp. 170, 173 - 176.

SILVA, T. S. S. da. **Estudo de Tratabilidade Físico-Química com Uso de Taninos Vegetais em Água de Abastecimento e Esgoto**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação da Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública, 1999.

TEODOSIU, C. C.; KENNEDY, M. D.; STRATEN, H. A. V.; SCHIPPERS, J. C. **Evaluation of Secondary Refinery Effluent Treatment using Ultrafiltration Membranes**, Water Research, V.33, Nº 9, 1999. pp. 2172-2180.

TOROK, M. **The filtration Spectrum**. [http:// www.osmonics.com](http://www.osmonics.com) , 2004.

VAN DER LEEDEN, F.; TROISE, F. L. and TODD, D.K. **The Water Encyclopedia**, Second Edition, Lewis Publishers, Inc., Michigan, USA, 1990. 808p.

ANEXOS



UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS
FACULDADE DE ENGENHARIA
LES - LABORATÓRIO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E DO MEIO AMBIENTE
Rua São Francisco Xavier, 524 – Prédio João Lira Filho, sl.5029 F - Maracanã – RJ
Tel. (21) 2587-7743 e-mail:

Laudo de Análises Físico-Químicas nº 21/2004

Local de coleta: Indústria Farmacêutica – Jacarepaguá – Rio de Janeiro - RJ
Amostras coletadas por: Tecma – Tecnologia em Meio Ambiente Ltda
Data de coleta: 10/09/04
Data de entrada no laboratório: 10/09/04

Parâmetros	Amostra 77 Saída do Decantador	Amostra 78 Saída da Ultrafiltração	Amostra 79 Jar Test	Norma referente ao método de ensaio
pH	7,3	7,4	7,3	SM 4500 H ⁺
Alcalinidade Total (mg CaCO ₃ /L)	82	71	78	SM 2320 (B)
Condutividade (µS/cm) Obs.: µ = 10 ⁶	689	659	666	SM 2510 (B)
Cloreto (mg Cl ⁻ /L)	57	56	55	SM 4500 (B)
Dureza (mg CaCO ₃ /L)	40	36	36	SM 2340 C
Sulfato (mg SO ₄ ²⁻ /L)	43	32	47	SM 4500-SO ₄ ²⁻
Cor (mg Pt/L)	40,0	35,0	50,0	SM 2120 (B)
Turbidez (NTU)	6,0	2,0	3,0	SM 2130 (B)
DQO (mg O ₂ /L)	31	23	31	SM 5220 (B)
DBO (mg O ₂ /L)	4	2	4	SM 5210 (B)
Sólidos Suspensos Totais (mg/L)	12	6	34	SM 2540 (D)
Sólidos Suspensos Totais (mg/L) – sem decantação	-	-	46	SM 2540 (D)
Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L)	578	*471	510	SM 2540 (B)/ SM 2540 (D)
Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L) - sem decantação	-	-	644	SM 2540 (B)/ SM 2540 (D)
Nitrogênio Amoniacal (mg N-NH ₄ ⁺ /L)	0,2	0,2	0,2	SM4500NH3(E)

Obs:

- 1) Os resultados destas análises têm significação restrita e se aplicam somente às amostras trazidas pelo interessado;
- 2) SM : Standard Methods For Examination Of Water And Wasterwater, 18th, 1992;
- 3) * Valor obtido por comparação com a condutividade.

Data: 07/10/2004

Analista responsável

Claudia Valbonetti Rodrigues
Cláudia Valbonetti Rodrigues
ENG^o. QUÍMICA
CRQ 3^a Reg. 03315334

Aprovação

Elisabeth Ritter
ELISABETH RITTER
CHEFE DO LABORATÓRIO DE ENG^o SANITÁRIA
Matr.33853-3



UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS
FACULDADE DE ENGENHARIA
LES - LABORATÓRIO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E DO MEIO AMBIENTE
Rua São Francisco Xavier, 524 – Prédio João Lira Filho, sl.5029 F - Maracanã – RJ
Tel. (21) 2587-7743 e-mail:

Laudo de Análises Físico-Químicas nº 22/2004

Local de coleta: Indústria Farmacêutica – Jacarepaguá – Rio de Janeiro - RJ
Amostras coletadas por: Tecma – Tecnologia em Meio Ambiente Ltda
Data de coleta: 16/09/2004
Data de entrada no laboratório: 17/09/04

Parâmetros	Amostra 82 Saída do Decantador	Amostra 83 Saída da Ultrafiltração	Amostra 84 Jar Test	Norma referente ao método de ensaio
pH	7,5	7,5	7,6	SM 4500 H ⁺
Alcalinidade Total (mg CaCO ₃ /L)	95	84	89	SM 2320 (B)
Condutividade (µS/cm) Obs.: µ = 10 ⁻⁶	696	667	687	SM 2510 (B)
Cloreto (mg Cl ⁻ /L)	64	62	60	SM 4500 (B)
Dureza (mg CaCO ₃ /L)	36	32	32	SM 2340 C
Sulfato (mg SO ₄ ²⁻ /L)	15	5	17	SM 4500-SO ₄ ²⁻
Cor (mg Pt/L)	60,0	40,0	50,0	SM 2120 (B)
Turbidez (NTU)	17,0	3,0	7,0	SM 2130 (B)
DQO (mg O ₂ /L)	40	26	31	SM 5220 (B)
DBO (mg O ₂ /L)	2	< 2	< 2	SM 5210 (B)
Sólidos Suspensos Totais (mg/L)	14	16	16	SM 2540 (D)
Sólidos Suspensos Totais (mg/L) – sem decantação	-	-	68	SM 2540 (D)
Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L)	568	508	556	SM 2540 (B)/ SM 2540 (D)
Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L) - sem decantação	-	-	718	SM 2540 (B)/ SM 2540 (D)
Nitrogênio Amoniacal (mg N-NH ₄ ⁺ /L)	0,4	< 0,2	0,2	SM4500NH3(E)

Obs:

- 1) Os resultados destas análises têm significação restrita e se aplicam somente às amostras trazidas pelo interessado;
- 2) SM : Standard Methods For Examination Of Water And Wasterwater, 18th, 1992

Data: 07/10/2004

Analista responsável

Claudia Valbonetti Rodrigues
Cláudia Valbonetti Rodrigues
ENG^a. QUÍMICA
CRQ 3^a Reg. 03315334

Aprovação

Elisabeth Ritter
ELISABETH RITTER
CHEFE DO LABORATÓRIO DE ENG^a SANITÁRIA
Matr.33853-3



UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS
FACULDADE DE ENGENHARIA
LES - LABORATÓRIO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E DO MEIO AMBIENTE
Rua São Francisco Xavier, 524 – Prédio João Lira Filho, sl.5029 F - Maracanã – RJ
Tel. (21) 2587-7743 e-mail:

Laudo de Análises Físico-Químicas nº 23/2004

Local de coleta: Indústria Farmacêutica – Jacarepaguá – Rio de Janeiro - RJ
Amostras coletadas por: Tecma – Tecnologia em Meio Ambiente Ltda
Data de coleta: 22/09/04
Data de entrada no laboratório: 23/09/04

Parâmetros	Amostra 85 Saída do Decantador	Amostra 86 Saída da Ultrafiltração	Amostra 87 Jar Test	Norma referente ao método de ensaio
pH	7,6	7,3	7,6	SM 4500 H ⁺
Alcalinidade Total (mg CaCO ₃ /L)	155	85	153	SM 2320 (B)
Condutividade (µS/cm) Obs.: $\mu = 10^{-6}$	821	687	801	SM 2510 (B)
Cloreto (mg Cl ⁻ /L)	68	70	66	SM 4500 (B)
Dureza (mg CaCO ₃ /L)	32	35	33	SM 2340 C
Sulfato (mg SO ₄ ²⁻ /L)	16	2	43	SM 4500-SO ₄ ²⁻
Cor (mg Pt/L)	30,0	20,0	30,0	SM 2120 (B)
Turbidez (NTU)	5,0	1,0	7,0	SM 2130 (B)
DQO (mg O ₂ /L)	25	17	26	SM 5220 (B)
DBO (mg O ₂ /L)	< 2	< 2	< 2	SM 5210 (B)
Sólidos Suspensos Totais (mg/L)	2	4	16	SM 2540 (D)
Sólidos Suspensos Totais (mg/L) - sem decantação	-	-	206	SM 2540 (D)
Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L)	604	*491	600	SM 2540 (B)/ SM 2540 (D)
Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L) - sem decantação	-	-	440	SM 2540 (B)/ SM 2540 (D)
Nitrogênio Amoniacal (mg N-NH ₄ /L)	0,2	0,2	0,2	SM4500 NH ₃ (E)

- 1) Os resultados destas análises têm significação restrita e se aplicam somente às amostras trazidas pelo interessado;
2) SM : Standard Methods For Examination Of Water And Wastewater, 18th, 1992
3) * Valor obtido por comparação com a condutividade

Data: 07/10/2004

Analista responsável

Cláudia Valbonetti Rodrigues
Cláudia Valbonetti Rodrigues
ENG³. QUÍMICA
CRQ 3^a Reg. 03315334

Aprovação

Elisabeth Ritter

ELISABETH RITTER
CHEFE DO LABORATÓRIO DE ENG³ SANITÁRIA
Matr.33853-3



UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS
FACULDADE DE ENGENHARIA
LES - LABORATÓRIO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E DO MEIO AMBIENTE
Rua São Francisco Xavier, 524 – Prédio João Lira Filho, sl.5029 F - Maracanã – RJ
Tel. (21) 2587-7743 e-mail:

Laudo de Análises Físico-Químicas nº 25/2004

Local de coleta: Indústria Farmacêutica – Jacarepaguá – Rio de Janeiro - RJ

Amostras coletadas por: Tecma – Tecnologia em Meio Ambiente Ltda

Data de coleta: 05/10/04

Data de entrada no laboratório: 06/10/04

Parâmetros	Amostra 88 Saída do Decantador	Amostra 89 Saída da Ultrafiltração	Amostra 90 Jar Test	Norma referente ao método de ensaio
pH	7,6	7,8	7,6	SM 4500 H ⁺
Alcalinidade Total (mg CaCO ₃ /L)	106	124	107	SM 2320 (B)
Condutividade (µS/cm) Obs.: $\mu = 10^{-6}$	689	689	695	SM 2510 (B)
Cloreto (mg Cl ⁻ /L)	66	59	60	SM 4500 (B)
Dureza (mg CaCO ₃ /L)	80	64	58	SM 2340 C
Sulfato (mg SO ₄ ²⁻ /L)	59	57	66	SM 4500-SO ₄ ²⁻
Cor (mg Pt/L)	40,0	8,0	35,0	SM 2120 (B)
Turbidez (NTU)	6,9	0,8	8,0	SM 2130 (B)
DQO (mg O ₂ /L)	27	16	16	SM 5220 (B)
DBO (mg O ₂ /L)	7	7	5	SM 5210 (B)
Sólidos Suspensos Totais (mg/L)	32	5	4	SM 2540 (D)
Sólidos Suspensos Totais (mg/L) – sem decantação	-	-	22	SM 2540 (D)
Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L)	506	*492	572	SM 2540 (B) SM 2540 (D)
Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L) - sem decantação	-	-	494	SM 2540 (B) SM 2540 (D)
Nitrogênio Amoniacal (mg N-NH ₄ ⁺ /L)	< 0,2	< 0,2	< 0,2	SM4500 NH ₃ (E)

Obs:

- 1) Os resultados destas análises têm significação restrita e se aplicam somente às amostras trazidas pelo interessado;
- 2) SM : Standard Methods For Examination Of Water And Wasterwater, 18th, 1992;
- 3) * Valor obtido por comparação com a condutividade

Data: 05/11/2004

Analista responsável

Claudia Valbonetti Rodrigues

Claudia Valbonetti Rodrigues

ENG^a. QUÍMICA

CRQ 3^a Reg. 03315334

Aprovação

Elisabeth Ritter

ELISABETH RITTER

CHEFE DO LABORATÓRIO DE ENG^a SANITÁRIA

Matr.33853-3



UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS
FACULDADE DE ENGENHARIA
LES - LABORATÓRIO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E DO MEIO AMBIENTE
Rua São Francisco Xavier, 524 – Prédio João Lira Filho, sl.5029 F - Maracanã – RJ
Tel. (21) 2587-7743 e-mail:

Laudo de Análises Físico-Químicas nº 26/2004

Local de coleta: Indústria Farmacêutica – Jacarepaguá – Rio de Janeiro - RJ
Amostras coletadas por: Tecma – Tecnologia em Meio Ambiente Ltda
Data de coleta: 21/10/04
Data de entrada no laboratório: 21/10/04

Parâmetros	Amostra 104 Saída do Decantador	Amostra 105 Saída da Ultrafiltração	Amostra 106 Jar Test	Norma referente ao método de ensaio
pH	6,7	7,3	6,0	SM 4500 H ⁺
Alcalinidade Total (mg CaCO ₃ /L)	65	61	27	SM 2320 (B)
Condutividade (µS/cm) Obs.: $\mu = 10^{-6}$	634	501	717	SM 2510 (B)
Cloreto (mg Cl ⁻ /L)	63	44	62	SM 4500 (B)
Dureza (mg CaCO ₃ /L)	60	40	48	SM 2340 C
Sulfato (mg SO ₄ ²⁻ /L)	50	40	108	SM 4500-SO ₄ ²⁻
Cor (mg P/L)	35,0	15,0	2,5	SM 2120 (B)
Turbidez (NTU)	9,8	2,0	2,6	SM 2130 (B)
DQO (mg O ₂ /L)	45	17	16	SM 5220 (B)
DBO (mg O ₂ /L)	2	2	< 2	SM 5210 (B)
Sólidos Suspensos Totais (mg/L)	56	0	20	SM 2540 (D)
Sólidos Suspensos Totais (mg/L) - sem decantação	-	-	28	SM 2540 (D)
Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L)	502	452	528	SM 2540 (B)/ SM 2540 (D)
Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L) - sem decantação	-	-	608	SM 2540 (B)/ SM 2540 (D)
Nitrogênio Amoniacoal (mg N-NH ₄ ⁺ /L)	< 0,2	< 0,2	< 0,2	SM4500 NH ₃ (E)

Obs:

- 1) Os resultados destas análises têm significação restrita e se aplicam somente às amostras trazidas pelo interessado;
- 2) SM : Standard Methods For Examination Of Water And Wastewater, 18th, 1992

Data: 05/11/2004

Analista responsável

Cláudia Valbonetti Rodrigues
Cláudia Valbonetti Rodrigues
ENG^a. QUÍMICA
CRQ 3^a Reg. 03315334

Aprovação

Elisabeth Ritter
ELISABETH RITTER
CHEFE DO LABORATÓRIO DE ENG^a SANITÁRIA
Matr.33853-3