

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
ENGENHARIA AMBIENTAL

**ESTUDO DE CASO: DIAGNÓSTICO DE UM SISTEMA DE  
REUSO DE ÁGUA EM TORRES DE RESFRIAMENTO**

**Orientada: Nataska Schincariol Pontremolez**  
**Orientador: Prof. Titular Eugênio Foresti**

Monografia apresentada ao curso de graduação  
em Engenharia Ambiental da Escola de  
Engenharia de São Carlos da Universidade de  
São Paulo.

São Carlos, SP

2009

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

P818e

Pontremolez, Nataska Schincariol

Estudo de caso : diagnóstico de um sistema de reuso de  
água em torres de resfriamento / Nataska Schincariol  
Pontremolez ; orientador Eugênio Foresti. -- São Carlos,  
2009.

Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) --  
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade  
de São Paulo, 2009.

1. Reuso da água. 2. Escassez de água. 3. Reuso da  
água para fins industriais. 4. Torre de resfriamento.  
I. Título.

### **FOLHA DE APROVAÇÃO**

Candidato: Nataska Schincariol Pontremolez

Monografia defendida e aprovada em: 27 de novembro de 2009 pela Comissão Julgadora:

---



Prof. Dr. Eugenio Foresti

---



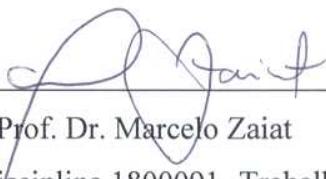
Prof. Dr. Marco Antonio Penalva Reali

---



Prof. Dr. Eduardo Cleto Pires

---



Prof. Dr. Marcelo Zaiat  
Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

Dedico esse trabalho à minha família e aos meus companheiros de classe, que muito contribuíram para a minha formação pessoal e como engenheira ambiental.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Eugênio Foresti, por ter acreditado nesse trabalho, e por ter me concedido seu tempo, instrução, disposição e amizade.

À Profa. Dra. Maria Bernadete A. Varesche Silva e à Dra. Eloisa Pozzi Gianotti pela importantíssima ajuda nos exames Microscópicos.

Ao Paulo, Júlio, Juliana, Natália e Cidinha, técnicos do Laboratório de Saneamento, pelo auxílio nas análises laboratoriais.

Aos meus pais, pela educação para a vida e por me darem coragem para enfrentar as dificuldades.

Às minhas irmãs pelo amor e amizade e por me apoiarem sempre.

Ao Alberto Nogueira, pela paciência, disposição e apoio fundamentais em todas as etapas do trabalho.

À minha amiga e companheira de república Giovanna, e à amiga Priscila, pelo auxílio e compreensão em todos os momentos.

À todos os meus professores da Graduação, cujos ensinamentos me possibilitaram realizar esse trabalho.

## RESUMO

PONTREMOLEZ, N. S. **Estudo de caso: diagnóstico de um sistema de reuso de água em torres de resfriamento.** 2009. 79 f. Monografia - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

Na cidade de São Paulo, o crescimento urbano desordenado iniciado na década de 1950 e o grande desperdício de água resultaram na ameaça de escassez e na valorização desse recurso. Nesse contexto, o reuso de água, que é o aproveitamento de águas previamente utilizadas, tornou-se alternativa para complementar a matriz hídrica de grandes consumidores, principalmente para usos não potáveis. Nos shoppings e indústrias, as torres de resfriamento apresentam uso considerável de água, sendo atualmente a forma de reuso predominante. Em decorrência disso, esse trabalho teve como objetivo estudar os processos físico-químicos e microbiológicos em um sistema de água de resfriamento composto por trocadores de calor e torres de resfriamento abastecido com água de reuso. Os resultados demonstraram que, apesar da tendência ao aumento da concentração das substâncias nos sistemas de resfriamento gerado pela evaporação de grande parte da água, houve decrescimento da concentração de nitrogênio amoniacal nesse sistema (em relação à água de reuso), pois ali houve condições ideais para o processo de nitrificação. Conseqüentemente, o aumento das concentrações de nitrito e nitrato foi maior que o número de ciclos de concentração da torre. Por meio da microscopia de contraste de fases, foi possível identificar a presença predominante de bactérias nitrificantes e bacilos na biomassa presente no lodo formado no sistema. Concluiu-se que é importante promover nitrificação e desnitrificação em sistemas de tratamento de esgotos para reuso em sistemas de água de resfriamento, uma vez que a amônia pode ser corrosiva para alguns metais (cobre, por exemplo) e o nitrato pode possibilitar o crescimento de algas, que prejudicam a troca térmica. Recomendou-se estabelecer um tratamento da água proveniente das torres de resfriamento para remoção de parte dos sólidos em suspensão e da matéria orgânica, antes de seu recalque para os trocadores de calor, evitando assim a sedimentação de partículas em suspensão nos trocadores de calor.

**Palavras-chave: escassez de água, reuso de água, reuso de água para fins industriais, torre de resfriamento.**

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 3.1 - Sistema de resfriamento composto por trocadores de calor e torres de resfriamento.....	20
Figura 3.2 - Trocador de calor de feixe tubular.....	21
Figura 4.1 - Fluxograma ilustrativo das unidades constituintes do sistema de tratamento de esgoto e localização dos pontos de amostragem 1, 2 e 3.....	51
Figura 4.2 - Fluxograma ilustrativo das unidades constituintes do sistema de resfriamento e localização do ponto de amostragem 4.....	55
Figura 4.3 – Vista em planta do tanque central do sistema de resfriamento.....	56
Figura 5.1 – Balanço de massa do sistema de resfriamento.....	62
Figura 5.2 – Amostra de lodo coletada no ponto A – parede do tanque central do sistema de resfriamento.....	68
Figura 5.3 – Microscopia óptica de contraste de fase das morfologias microbianas: (a) bacilos, (b) bactérias nitrificantes.....	69
Figura 5.4 – (a) Microscopia óptica: material inerte; (b) Microscopia óptica de contraste de fase das morfologias microbianas: bacilos.....	70

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 3.1 - Padrões de qualidade recomendados para águas de reposição em sistemas de resfriamento.....	26
Tabela 3.2 - Principais tipos de algas encontrados em sistemas de resfriamento e condições ideais para seu crescimento.....	28
Tabela 3.3 – Gêneros dos principais fungos encontrados em águas de resfriamento, condições de crescimento com relação à temperatura e pH e problemas associados à proliferação de fungos nessas águas.....	29
Tabela 3.4 - Principais bactérias encontrados em águas de resfriamento, condições de crescimento com relação à temperatura e pH e problemas associados à proliferação de bactérias nessas águas.....	30
Tabela 3.5 – Recomendações da U. S. EPA (2004) para águas de irrigação agrícola.....	35
Tabela 3.6 – Substâncias presentes nas águas de reuso e seus problemas potenciais em sistemas de resfriamento.....	37
Tabela 3.7 - Gêneros dos principais organismos encontrados nos lodos ativados e suas respectivas funções no processo de tratamento de esgoto.....	42
Tabela 3.8 – Tempos de detenção celular para garantir a nitrificação.....	45
Tabela 4.1 - Temperaturas média, máxima e mínima na cidade de São Paulo durante o período de realização do estudo.....	54
Tabela 4.2 - Freqüência das análises físico-químicas e características analisadas.....	57
Tabela 5.1 – Características dos esgotos afluentes à ETE.....	59
Tabela 5.2 – Características da água de reuso e água do tanque central do sistema de resfriamento.....	60

Tabela 5.3 – Razão de concentração dos parâmetros químicos da água.....	66
Tabela A.1 – Valores de vazão de alimentação, vazão de purga, cloro, temperatura e OD.....	77
Tabela A.2 – Valores de pH, DQO, NTK e N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> .....	78
Tabela A.3 – Valores de N-orgânico, N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> e PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> .....	79

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Cl<sup>-</sup> – Cloro livre

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO – Demanda Química de Oxigênio

N – Nitrogênio

NH<sub>3</sub> – Amônia

NH<sub>4</sub><sup>+</sup> – Íon amônio

N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> – Nitrogênio amoniacal

N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup> – Nitrogênio sob forma de nitrito

N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> – Nitrogênio sob forma de nitrato

NO<sub>2</sub><sup>-</sup> – Nitrito

NO<sub>3</sub><sup>-</sup> – Nitrato

N-orgânico – Nitrogênio sob forma orgânica

NTK – Nitrogênio Total Kjeldhal

OD – Oxigênio Dissolvido

P – Fósforo

PAC – Policloreto de Alumínio

pH – Potencial Hidrogênionico

PO<sub>3</sub><sup>-4</sup> – Fosfato total

R – Razão de concentração

T – Temperatura

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	v
<b>RESUMO .....</b>	vi
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	vii
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	viii
<b>LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS .....</b>	x
<b>SUMÁRIO .....</b>	xi
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	13
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	15
2.1. Objetivo Geral .....	15
2.2 Objetivos Específicos .....	15
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	16
3.1 Água Doce no Mundo e no Brasil .....	16
3.2 Sistemas de Água de Resfriamento .....	18
3.2.1 Trocadores de Calor .....	20
3.2.2 Torres de Resfriamento .....	22
3.2.3 Problemas comuns nos sistemas de circuito semi-aberto, com recirculação .....	25
3.2.4 Microbiologia de Sistemas de Resfriamento .....	27
3.3 Reuso de Água .....	30
3.3.1 Reuso para irrigação agrícola .....	34
3.3.2 Reuso para fins industriais .....	36
3.3.3 Reuso para recarga de lençóis subterrâneos de água .....	37

3.3.4 Reuso para fins recreacionais e ambientais .....	38
3.4 Tratamento de Esgotos – Sistemas de Lodos Ativados .....	39
3.4.1 Microbiologia de Lodos Ativados .....	41
3.5 Nitrificação e Desnitrificação.....	42
3.5.1 Nitrificação .....	42
3.5.2 Desnitrificação.....	47
3.6 Fósforo no Esgoto Sanitário.....	48
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>50</b>
4.1. Descrição do sistema de tratamento de esgoto.....	50
4.2. Descrição do sistema de resfriamento.....	54
4.3. Análises físico-químicas .....	57
4.4. Exames Microscópicos.....	58
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>59</b>
5.1 Análises físico-químicas .....	59
5.2 Exames microscópicos .....	67
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>71</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>73</b>
<b>ANEXO A - Análises Físico-químicas .....</b>	<b>77</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O crescimento exagerado das demandas localizadas e da degradação da qualidade das águas, associados ao grande desperdício, vem gerando problemas no abastecimento de água em diversas cidades brasileiras, tais quais São Paulo e Campinas, entre outras (REBOUÇAS, 2006).

Nesse contexto, em 1997, foi instituída a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH, Lei 9.433/97), a qual objetiva assegurar à atual e às futuras gerações, água em quantidade e qualidade adequadas aos respectivos usos, e ao mesmo tempo promover o desenvolvimento sustentável, através da utilização racional e integrada dos recursos hídricos e da gestão participativa, criando diversos instrumentos para isso.

O reuso de água, que é o aproveitamento de águas previamente utilizadas, uma ou mais vezes, em atividades humanas, para suprir a necessidade de outros usos benéficos, inclusive o original (LAVRADOR FILHO, 1987), é considerado, em diversos países (EUA, Dinamarca, Japão, entre outros) uma alternativa para minimizar o uso de águas potáveis para usos menos restritivos quanto à qualidade.

No Brasil, embora essa alternativa ainda não esteja presente na legislação, é explícita sua disseminação na PNRH, a qual cena diversas vezes para a necessidade de se racionalizar o uso da água e inclusive cria o instrumento de cobrança pelo uso da água como forma de cumprir esse objetivo (FLORES *et al*, 2003).

Existem diversas possibilidades para reuso de água: irrigação agrícola, uso industrial, recarga de aquíferos subterrâneos, fins recreacionais e ambientais, entre outros. No contexto da cidade de São Paulo, destaca-se a possibilidade de reuso industrial. Nas indústrias, as águas podem ser reutilizadas em lavagem de pisos, descarga de sanitários, irrigação de áreas verdes,

processo produtivo e resfriamento evaporativo. Esse último uso está associado a um grande consumo de água nas indústrias, sendo, portanto, um candidato potencial para ter a demanda de água suprida pelo reuso.

Nos sistemas de resfriamento evaporativos, a água aquecida (por ter removido carga térmica de um sistema) é distribuída no topo das torres de resfriamento, onde há um enchimento interno para melhor espalhar a água. Ar ambiente é insuflado em contracorrente ou corrente cruzada com a água que desce. Por meio desse contato líquido-gás, parte da água evapora, e ocorre seu resfriamento (CORTINOVIS; SONG, s.d.). A evaporação de parte da água causa a concentração dos sais dissolvidos e das partículas em suspensão, gerando problemas tais quais: corrosão, incrustação e *fouling*. Se a água de alimentação for de reuso, além desses problemas, pode-se ter a concentração da matéria orgânica e de nutrientes e a formação de espuma e lodo nas torres de resfriamento e nos trocadores de calor, o que prejudica a troca térmica (MANCUSO, 2001).

Talvez pela impressão de enorme disponibilidade hídrica ou pela pouca importância atribuída ao tratamento de esgotos, o reuso de água ainda é pouco difundido e estudado no Brasil. Na tentativa de contribuir para a mudança desse quadro, esse trabalho apresenta um estudo de caso de reuso de água em um sistema de água de resfriamento composto por trocadores de calor e torres de resfriamento, em uma indústria do ramo de edição e impressão de jornais situada na cidade de São Paulo.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo Geral

Estudar os processos físico-químicos e microbiológicos em um sistema de água de resfriamento composto por trocadores de calor e torres de resfriamento, abastecido com água de reuso.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Estudar os ciclos de concentração das matérias orgânica, nitrogenada e fosfatada;
- Investigar as causas da formação de lodo no tanque central do sistema de resfriamento e da sedimentação de lodo nos trocadores de calor;
- Apresentar sugestões para projeto e operação do reuso de água em sistemas de água de resfriamento.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Água Doce no Mundo e no Brasil

Considera-se que a quantidade total de água na Terra, de 1386 milhões de km<sup>3</sup>, tenha permanecido constante nos últimos 500 milhões de anos. Ao longo desse período, o que se alterou foi sua distribuição nos principais reservatórios do planeta. Atualmente, 97,5 % do volume total de água formam os oceanos e mares, e somente 2,5 % é doce. Das águas doces, as calotas polares, geleiras e neves eternas representam 68,9%, a umidade do solo e os pântanos, 0,9 %, as águas subterrâneas, 29,9 % e os rios e lagos, 0,3 % (REBOUÇAS, 2006).

Segundo Clarke e King (2005), no ano de 1900 o consumo médio anual de água foi de 350 m<sup>3</sup>/hab.ano, enquanto no ano 2000 foi de 642 m<sup>3</sup>/hab.ano. Isso significa que não só a população mundial, mas também o consumo de água *per capita* está aumentando. No ano 2000, a representatividade de cada setor em relação ao consumo de água foi:

- Uso agrícola: 69 %
- Uso industrial: 21 %
- Uso doméstico: 10 %

Considerando o aumento do consumo de água em todo mundo, já em 1958, o Conselho Econômico e Social das Nações Unidas estabeleceu uma política de gestão para áreas onde há escassez de recursos hídricos, pela qual: “nenhuma água de qualidade superior à requerida para determinado fim deve ser utilizada, salvo se encontrar-se em excesso, se o fim pretendido tolerar água de qualidade inferior” (UNITED NATIONS, 1958).

O Brasil possui uma ampla diversidade climática, predominando os tipos equatorial úmido, tropical, subtropical úmido e tropical semi-árido (sobre menos de 10 % do território). A pluviosidade situa-se entre 1000 e 3000 mm/ano em 90% do território brasileiro. A combinação desse quadro com as condições geológicas dominantes gera excedentes hídricos que alimentam uma grande rede de rios perenes. Assim, a disponibilidade de água doce do Brasil representa 12 % do total mundial (REBOUÇAS, 2006).

Apesar da enorme disponibilidade hídrica, Rebouças (2006) aponta que esses dados de abundância de água doce serviram de suporte à cultura do desperdício e da não realização de investimentos necessários ao uso e proteção eficientes da água. Além disso, tem-se que 78 % das águas encontram-se na região amazônica e do Tocantins, onde a densidade populacional é baixíssima, da ordem de 2 a 5 hab/km<sup>2</sup>; e 6 % estão na bacia do Paraná, cuja densidade de população é em média de 53 hab/km<sup>2</sup>.

Segundo Machado da Cunha e Whately (2006), o abastecimento de água de algumas cidades brasileiras é afetado tanto pela escassez hídrica quanto pela degradação dos recursos hídricos causada por poluição de origem doméstica, industrial e agrícola.

Assim sendo, os problemas brasileiros no abastecimento de água decorrem da combinação do crescimento exagerado das demandas localizadas e da degradação da qualidade das águas. Esse quadro é uma consequência da expansão desordenada dos processos de urbanização e industrialização iniciados na década de 1950 (REBOUÇAS, 2006). Macedo (2000) acrescenta ainda o desperdício de água que, na cidade de São Paulo, é estimado em 40 %.

Pelo fato de a água possuir papel fundamental para o desenvolvimento econômico e social (BRAGA; LANNA, 2006), em 1997 foi estabelecida a Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei das Águas) pela Lei 9433/97, que tem como objetivo assegurar à atual e às futuras gerações, água em quantidade e qualidade adequadas aos respectivos usos, e ao

mesmo tempo promover o desenvolvimento sustentável, através da utilização racional e integrada dos recursos hídricos e da gestão participativa (LEI 9433/97). Os instrumentos de gestão criados pela Lei das Águas e seus respectivos objetivos foram:

- Planos de Recursos Hídricos: definir ações para a utilização múltipla dos recursos hídricos;
- Enquadramento dos corpos de água: possibilitar uma melhora contínua e gradual da qualidade das águas nas bacias hidrográficas;
- Outorga de direito de uso de recursos hídricos: assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso à água;
- Cobrança pelo uso da água: incentivar o uso racional da água e obter recursos financeiros para a implementação das ações preconizadas nos planos de recursos hídricos;
- Sistema de informações sobre recursos hídricos: prover informações de oferta e demanda de recursos hídricos para utilização no planejamento e gestão das águas.

### 3.2 Sistemas de Água de Resfriamento

Em muitos processos industriais, há a necessidade de se remover carga térmica de um sistema. Para isso, usa-se um fluido de resfriamento, geralmente a água (CORTINOVIS; SONG, s.d.). Nesse processo, a água recebe parte do calor do fluido quente e se aquece, sendo, portanto, necessária a introdução constante de água fria para que o resfriamento ocorra de forma contínua (MANCUSO, 2001).

De acordo com Mancuso (2001), os sistemas de água de resfriamento podem ser de três tipos:

- Sistemas de circuito aberto, sem recirculação de água: a água aquecida é descartada na mesma medida em que é substituída por água fria captada de um manancial;
- Sistemas de circuito semi-aberto, com recirculação de água: a água aquecida é reutilizada depois de ser resfriada em equipamentos denominados torres de resfriamento, conhecidos também como sistemas evaporativos. Há descarte de uma porcentagem da água aquecida para evitar o acúmulo de material indesejável na superfície de troca de calor.
- Sistemas de circuito fechado, com recirculação de água: a água aquecida é reutilizada após ser resfriada em sistemas não evaporativos. Teoricamente, esses sistemas não apresentam perdas de água.

Em situações de escassez de água, adotam-se os sistemas do tipo semi-aberto com recirculação de água ou fechado também com recirculação de água. Devido à sua maior relevância no consumo de água, o sistema evaporativo será tratado mais especificamente.

A Figura 3.1, adaptada de Mancuso (2001), mostra o esquema típico de um sistema de resfriamento de água, composto por torre de resfriamento e trocador de calor.

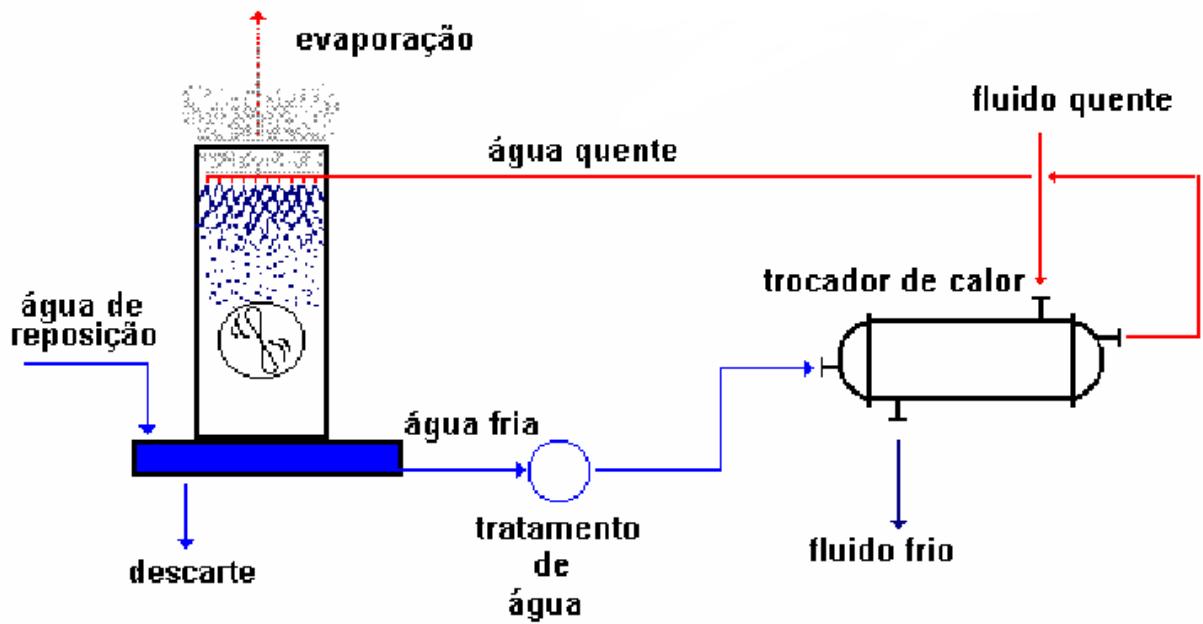


Figura 3.1- Sistema de água de resfriamento composto por trocador de calor e torres de resfriamento

### 3.2.1 Trocadores de Calor

Trocadores de calor são equipamentos nos quais ocorre troca térmica entre dois fluidos, normalmente separados por uma parede. Há diversos tipos construtivos, sendo que um dos mais usados industrialmente é o de feixe tubular, constituído por um conjunto de tubos envolto por um casco. Um dos fluidos circula no interior dos tubos e o outro fluido escoa no lado externo (SONG, s.d.).

A figura 3.2, adaptada de Haslego (2009), mostra um desenho esquemático de um trocador de calor de feixe tubular.

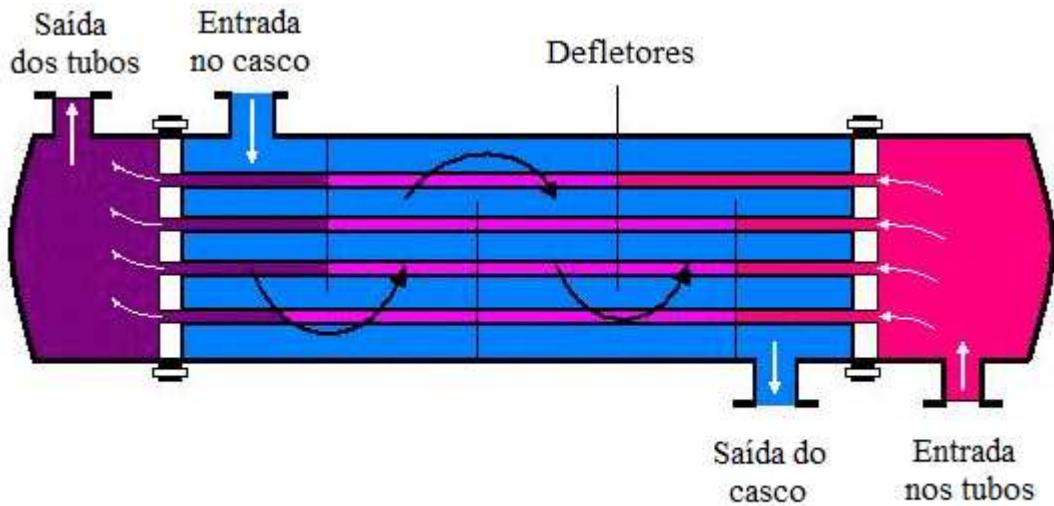


Figura 3.2 - Trocador de calor de feixe tubular

Segundo Song (s.d.), as principais variáveis no processo de troca térmica, são:

- Natureza dos fluidos: as propriedades físicas de maior interesse são a condutibilidade térmica, a densidade, a viscosidade e o calor específico;
- Temperaturas de operação: dependendo das temperaturas de entrada e saída, ou da diferença entre elas, devem ser usados materiais de construção mais nobres, juntas de expansão, etc;
- Velocidade de escoamento: a velocidade influí na eficiência da troca térmica, na perda de carga, na erosão e no depósito de sujeira;
- Fator de sujeira: depósitos de material indesejável na superfície de um trocador de calor aumentam a resistência à transferência de energia, diminuindo a eficiência de troca térmica e podendo obstruir a passagem do fluido, aumentando a sua perda de carga. Na prática, o aumento dos depósitos é observado através da ampliação da diferença entre a pressão de entrada e saída.

O processo de formação do depósito pode se dar devido à sedimentação, à polimerização, à cristalização, ao coqueamento, à corrosão, ou a causas de natureza orgânica (como algas). Esses mecanismos podem ser dependentes ou independentes.

A taxa de depósito é afetada pelas condições de processo do trocador, tais como a natureza dos fluidos, a velocidade de escoamento, as temperaturas dos fluidos, a temperatura na parede, o material de construção do equipamento, o grau de acabamento da superfície como a rugosidade ou tipo de revestimento interno.

- Localização dos fluidos: Os aspectos básicos levados em consideração referem-se à limpeza do equipamento, à manutenção, a problemas decorrentes de vazamento e à eficiência de troca térmica. Pelo fato de os tubos serem de mais fácil limpeza e de mais fácil construção com materiais mais resistentes, neles devem circular fluidos com maior pressão ou maior tendência à incrustação ou corrosão. Já os fluidos com menor velocidade de escoamento ou maior viscosidade, por prejudicarem a troca térmica, devem circular no lado do casco.

### 3.2.2 Torres de Resfriamento

Em sistemas evaporativos, a água que sai dos trocadores de calor é distribuída no topo das torres de resfriamento, onde há um enchimento interno para melhor espalhar a água. Ar ambiente é insuflado em contracorrente ou corrente cruzada com a água que desce. Por meio desse contato líquido-gás, parte da água evapora, e ocorre seu resfriamento. A evaporação causa o abaixamento da temperatura da água que escoa ao longo da torre de

resfriamento, pois para evaporar, a água precisa de calor latente, e esse calor é retirado da própria água que escoa pela torre (CORTINOVIS; SONG, 2005).

Além da evaporação, outros dois processos ocorrem simultaneamente. O primeiro é a transferência por convecção de calor sensível da água quente para o ar mais frio; o segundo é o movimento de calor da massa do líquido para sua superfície. Esse último efeito é considerado desprezível para o resfriamento (BROOKE; McKELVEY, 1959).

De acordo com Cortinovis e Song (2005), conceitos importantes para entender o funcionamento de torres de resfriamento são:

- Temperatura de bulbo seco do ar: é a própria temperatura do gás, pois o bulbo do termômetro usado na medição está “seco”;
- Temperatura de bulbo úmido: é a temperatura medida com o bulbo do termômetro envolto com uma gaze umidificada com água. É a temperatura atingida, em regime permanente (não de equilíbrio termodinâmico), por uma pequena porção de água em contato com uma corrente contínua de ar em condições adiabáticas, desprezando-se os efeitos da radiação térmica nessa troca. A temperatura de bulbo úmido é sempre menor ou no máximo igual à temperatura de bulbo seco porque, quando exposta a uma corrente de ar não saturado (umidade relativa menor que 100%), parte da água presente na gaze evapora e com isso a temperatura abaixa.
- *Range*: é a diferença de entre a temperatura da água quente (alimentação da torre) e a temperatura da água fria (saída da torre). O range varia conforme as condições climáticas e a vazão de água na torre. Para sistemas industriais, esse valor situa-se entre 5 e 30º C.
- *Approach*: é a diferença entre a temperatura da água fria (saída da torre) e a temperatura de bulbo úmido do ar na entrada da torre. Para torres de resfriamento industriais, esse valor gira em torno de 5 ºC.

Outros termos pertinentes para entender o funcionamento de uma torre de resfriamento, segundo Brooke e McKelvey (1959), são:

- Água de evaporação: é a água perdida por evaporação, principal responsável pelo rebaixamento da temperatura da água circundante;
- Água de arraste: é a água sob forma de gotas que sai junto o fluxo de ar e vapor;
- Purga (*blowdown*): é o descarte contínuo ou intermitente de uma porção da água para limitar a concentração de sais dissolvidos na água;
- Água de alimentação (*makeup*): é a vazão de água requerida para substituir as perdas por evaporação, purga e arraste;
- Ciclos de concentração: indica o número de vezes que uma dada porção de água se concentra num sistema evaporativo. É o valor da concentração de determinado íon na purga dividido pela concentração do mesmo íon na água de alimentação (*makeup*) do sistema.

Em uma torre de resfriamento, 85 a 95% do resfriamento deve-se à evaporação, sendo o resto atribuído a transferência de calor por convecção da água para o ar circundante. Genericamente, a quantidade de água perdida por evaporação pode ser avaliada aplicando-se um fator de 0,85 a 1% da vazão de recirculação para cada 5,55 °C de queda de temperatura ao longo da torre, sendo 1,0% geralmente adotado para aproximações. As atuais torres são projetadas de modo a minimizar as perdas de água pelo vento e arraste, mantidas entre 0,01 e 0,3% da vazão de recirculação (MANCUSO, 2001).

### 3.2.3 Problemas comuns nos sistemas de circuito semi-aberto, com recirculação

A seguir são apresentados os principais problemas a serem considerados em sistemas de resfriamento semi-abertos com recirculação, suas respectivas causas e possibilidades de prevenção:

- Corrosão (*corrosion*): nos sistemas evaporativos, o ar satura a água com oxigênio. Se o oxigênio contido na água entrar em contato com o metal, ele o corroerá. A corrosão pode ser evitada através da incrustação controlada, da adição de produtos químicos inibidores da corrosão ou da proteção catódica (BROOKE; McKELVEY, 1959).
- Crosta (*scale*): as crostas são formadas por sais precipitados graças ao contato da água com superfície cuja temperatura é superior à temperatura limite de solubilidade dos sais para a concentração existente. Os principais formadores de crostas são sais de magnésio e cálcio (BROOKE; McKELVEY, 1959). Pode-se evitar esse problema pela adição de reagentes químicos que mantenham os sais de magnésio e cálcio em suspensão ou pela aplicação de produtos químicos que removam as crostas já formadas.
- Fouling: é um tipo de depósito causado por partículas em suspensão. O fouling pode ser ocasionado por cinco tipos de material: silte ou outros sólidos em suspensão na água de alimentação; partículas trazidas pelo ar; óleo mineral ou fluidos de processo; partículas geradas pela deterioração e corrosão da própria torre; crescimento biológico na torre. O fouling pode ser prevenido pela proteção química do material da torre, pela filtração da vazão de recirculação ou pelo controle do crescimento biológico

(BROOKE; Mc KELVEY, 1959). Os organismos responsáveis pelo fouling biológico serão descritos mais adiante.

Em função dos problemas descritos, a Environmental Protection Agency dos Estados Unidos da América (U. S. EPA) desenvolveu padrões de qualidade para água de reposição em sistemas de resfriamento de circuitos semi-abertos, com recirculação.

Tabela 3.1 - Padrões de qualidade recomendados para águas de reposição em sistemas de resfriamento

Parâmetro	Unidade	Limite recomendado
Cloreto	mg/L	500
Sólidos totais dissolvidos	mg/L	500
Dureza	mg/L	650
Alcalinidade	mg/L	350
pH		6,9 - 9,0
DQO	mg/L	75
Sólidos em suspensão totais	mg/L	100
Turbidez	mg/L	50
DBO	mg/L	25
Material orgânico	mg/L	1,0
N-NH <sub>4</sub>	mg/L	1,0
PO <sub>4</sub>	mg/L	4
SiO <sub>2</sub>	mg/L	50
Al	mg/L	0,1
Fe	mg/L	0,5
Ca	mg/L	50
Mn	mg/L	0,5
Mg	mg/L	0,5
HCO <sub>3</sub>	mg/L	24
SO <sub>4</sub>	mg/L	200

Fonte: U. S. EPA, 1992

### 3.2.4 Microbiologia de Sistemas de Resfriamento

#### 3.2.4.1 Contaminação microbiológica

Todo sistema de resfriamento exposto ao ar está sujeito à contaminação microbiológica por bactérias e fungos provenientes do ar e pelas bactérias e algas oriundas das águas de reposição (MACÊDO, 2000). Brooke e McKelvey (1959) apontam que esses três grupos de organismos são os principais causadores de problemas nas torres de resfriamento.

O crescimento de algas se dá em ambientes com disponibilidade de ar, água e luz; nos sistemas de resfriamento, isso pode ocorrer na superfície da água, nas paredes de reservatórios ou na própria torre (MACÊDO, 2000). Esse crescimento pode causar os seguintes problemas: restrição do fluxo de ar e água, aumento do peso a ser suportado por estruturas e formação de lodo.

Os principais tipos de algas encontrados em sistemas de resfriamento e as condições ideais para seu crescimento são apresentados na tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Principais tipos de algas encontrados em sistemas de resfriamento e condições ideais para seu crescimento

Grupo	Exemplos	Condições de crescimento	
		Temperatura (°C)	pH
Diatomáceas	<i>Flagilaria</i> (longa e fina)		
	<i>Cyclotella</i> (forma de roda)	18 a 36	5,5 a 8,9
	<i>Diatoma</i> (retangular ou afunilada)		
Verde	<i>Chlorella</i> (unicelular)		
	<i>Ulothrix</i> (filamentosa)	30 a 35	5,5 a 8,9
	<i>Spirogyra</i> (filamentosa)		
Verde-azulado	<i>Anacystis</i> (unicelular)		
	<i>Prormidium</i> (filamentosa)	35 a 40	6,0 a 8,9
	<i>Oscillatoria</i> (filamentosa)		

Fonte: BROOKE; McKELVEY, 1959; DREW, 1979.

Os fungos requerem umidade e oxigênio atmosférico para crescerem, e por isso são encontrados acima do nível da água ou associados ao lodo bacteriano (MACÊDO, 2000). A tabela 3.3 apresenta os principais gêneros de fungos encontrados em águas de resfriamento, as condições de crescimento com relação à temperatura e pH e os problemas gerados por eles.

Tabela 3.3 – Gêneros dos principais fungos encontrados em águas de resfriamento, condições de crescimento com relação à temperatura e pH e problemas associados à proliferação de fungos nessas águas

Tipo	Exemplos	Condições de crescimento		Problemas gerados
		Temperatura (°C)	pH	
Mofo filamentososo	<i>Aspergillus</i>	0 a 38	2 a 8 ótimo: 5,6	Ataque superficial de madeira; lodos
	<i>Penicilinium</i>			
	<i>Mucor</i>			
	<i>Fusarium</i>			
Levedura	<i>Alternaria</i>	0 a 38	2 a 8 ótimo: 5,6	Lodos
	<i>Torula</i>			
	<i>Sacaromices</i>			
Basidiomicetes	<i>Poria</i>	0 a 38	2 a 8 ótimo: 5,6	Ataque interno de madeira
	<i>Lenzites</i>			

Fonte: DREW, 1979.

Os crescimentos limosos nas tubulações e nos trocadores de calor geralmente resultam de crescimentos bacterianos (BROOKE; McKELVEY, 1959). A tabela 3.4 apresenta as principais bactérias encontradas em águas de resfriamento, as condições de crescimento com relação à temperatura e pH e os problemas gerados por esses organismos.

Tabela 3.4 - Principais bactérias encontrados em águas de resfriamento, condições de crescimento com relação à temperatura e pH e problemas associados à proliferação de bactérias nessas águas

Tipo	Exemplos	Condições de crescimento		Problemas gerados
		Temperatura (°C)	pH	
Aeróbias	<i>Aerobacter aerogenes</i>			
	<i>Flavobacteria</i>			
	<i>Proteus vulgaris</i>	20 a 40	4 a 8 ótimo: 7,4	Grande formação de lodos
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>			
	<i>Serratia</i>			
Aeróbias esporuladas	<i>Alcaligenes</i>			
	<i>Bacillus mycoides</i>	20 a 40	5 a 8	Lodos; esporos produzidos de difícil destruição
	<i>Bacillus subutilis</i>			
Aeróbias enxofre	<i>Thiobacillus Thiooxidans</i>	20 a 40	0,6 a 6	Oxidação de enxofre e sulfeto a ácido sulfúrico
Aeróbias redutoras de sulfato	<i>Desfovibrio desulficans</i>	20 a 40	4 a 8	Corrosão
Ferro	<i>Crenothrix</i>			
	<i>Leptothrix</i>	20 a 40	7,4 a 9,5	Precipitação de hidróxido de ferro; depósitos volumosos de lodo
	<i>Gallionella</i>			

Fonte: BROOKE; Mc KELVEY, 1959; DREW, 1979.

### 3.3 Reuso de Água

Segundo Burton, Stensel e Tchobanoglous (2003) e Asano et al. (2006), recuperação de água é o tratamento ou processamento de águas residuárias de forma a torná-las reutilizáveis de acordo com um padrão de qualidade requerido; e reuso de água é o uso de esgotos tratados para fins benéficos, tais quais irrigação e resfriamento industrial.

Para sua definição, Asano et al. (2006) sugerem que os benefícios potenciais da recuperação e do reuso de água são:

- Conservação das fontes de água potável;
- Gerenciamento de nutrientes que poderiam resultar em degradação ambiental;
- Proteção de ambientes aquáticos sensíveis através da redução da descarga de efluentes;
- Vantagens econômicas pela redução da necessidade de novas fontes de água e a infra-estrutura associada a elas. A água de reuso geralmente está disponível próximo aos centros urbanos, onde as tarifas cobradas pela água são maiores;
- Os nutrientes presentes na água de reuso podem reduzir a necessidade de fertilizantes agrícolas, resultando em conservação de fontes de matéria-prima e diminuição da quantidade de nutrientes que afluirá aos rios.

Nos Estados Unidos da América, país dos autores supracitados, os programas de reuso planejado de esgotos tratados começaram em 1918, ano no qual o Governo lançou uma Norma para Uso de Esgoto na Irrigação. Esses programas tomaram maior força na década de 70, quando foram lançados o *Water Pollution Control Act* (CWA) e o *Safe Drinking Water Act* (SDWA). O CWA determinou o tipo e o grau de tratamento dos efluentes para que alcançassem padrões de qualidade compatíveis com seu destino final – recuperação, reutilização, ou descarga em corpo d’água receptor. O SDWA foi designado para assegurar a segurança e a qualidade da água potável, através da identificação de contaminantes e do estabelecimento de limites máximos aceitáveis para a presença dos mesmos em águas de abastecimento (ASANO et al., 2006).

Embora nos EUA não haja Normas Federais regulamentando a qualidade das águas de reuso de acordo com os usos, a U. S. EPA (2004) estabeleceu diretrizes para encorajar os

estados a desenvolverem suas próprias Leis (EVANYLO et al., 2009). Essas diretrizes foram instituídas de forma a proteger a saúde humana e a qualidade da água.

Atualmente, Hammer e Hammer Jr. (2002) indicam que os tipos de reuso de água mais frequentes nos EUA são: irrigação agrícola, irrigação urbana, reuso industrial e recarga de aquíferos subterrâneos.

No Brasil, a definição de reuso de água adotada é mais abrangente que a seguida nos EUA. De acordo com Lavrador Filho (1987), reuso de água é o aproveitamento de águas previamente utilizadas, uma ou mais vezes, em atividades humanas, para suprir a necessidade de outros usos benéficos, inclusive o original. Pode ser direto ou indireto, potável ou não-potável, decorrente de ações planejadas ou não.

Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS, 1973), reuso indireto ocorre quando a água já usada para fins domésticos ou industriais é descarregada nas águas superficiais ou subterrâneas e utilizada novamente à jusante, de forma diluída; reuso direto é o uso de esgotos tratados para certas finalidades como irrigação, uso industrial, recarga de aquífero e água potável; e reciclagem interna é o reuso da água internamente à instalações industriais, antes de sua descarga em um sistema geral de tratamento ou disposição, tendo como objetivo a economia de água e o controle da poluição - um caso particular do reuso direto.

Reuso planejado de água ocorre quando o reuso resulta de uma ação humana consciente, pressupondo um sistema de tratamento que atenda os padrões de qualidade requeridos; e reuso não planejado de água ocorre quando a água previamente utilizada em atividades humanas é descarregada no meio ambiente e novamente utilizada a jusante, de maneira não intencional e não controlada (LAVRADOR FILHO, 1987).

Flores et al. (2003) referem-se ao reuso potável de água como o reuso direto ou indireto do esgoto, após tratamento, para atender a população; e ao reuso não potável como aquele que tem como objetivo atender demandas que toleram águas com qualidades

inferiores, tais quais algumas atividades industriais, recreacionais, agrícolas, domésticas, entre outras.

De acordo com a definição de Lavrador Filho (1987), o conceito de reuso de água de Burton, Stensel e Tchobanoglous (2003) e Asano et al. (2006) pode ser classificado como reuso planejado de água.

Apesar da legislação brasileira ainda não prever o reuso de água, é explícita sua disseminação na Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei 9433/97), a qual acena em vários momentos para a necessidade de se racionalizar o uso da água (Artigos 2º e 7º), inclusive criando o instrumento de cobrança pelo uso da água como forma de cumprir esse objetivo (FLORES et al., 2003). O que ainda falta é instituir padrões de qualidade de água para todas as formas de reuso, uma vez que a Resolução CONAMA 357/05 pode ser usada somente para reuso indireto.

Mancuso (2003) estabelece cinco critérios gerais de qualidade no planejamento de sistemas de reuso, sendo eles:

- Questão da saúde pública: quanto maior a exposição ou nível de contato humano com a água recuperada, maior deve ser a sua segurança sanitária, ou seja, mais importante a desinfecção e a manutenção de um residual de cloro adequado;
- Aceitação da água pelo usuário: a água deve apresentar uma qualidade estética que não cause nenhum tipo de objeção para seu uso pretendido;
- Preservação do ambiente: o sistema de reuso não pode comprometer a qualidade ambiental de uma forma geral, como ocorreria na alimentação de lagos paisagísticos com águas contendo elevadas concentrações de nutrientes, o que causaria a proliferação excessiva de algas, e com isso gerar-se-iam odores e possível morte de peixes;

- Qualidade da fonte da água para o reuso: o esgoto deve apresentar qualidades mínimas tais que possibilitem seu tratamento de forma a alcançar os padrões de reuso estabelecidos;
- Adequação da qualidade ao uso pretendido: um nível mínimo necessário de qualidade deve ser estabelecido considerando-se não só os aspectos sanitários e de aceitação pelo usuário, mas também as necessidades do uso pretendido.

Segundo Crites e Tchobanoglous (1998), as evoluções tecnológicas, como dos sistemas com membranas, resultarão, no futuro, em maior reuso de água, uma vez que os custos de tratamento serão reduzidos.

### 3.3.1 Reuso para irrigação agrícola

As variáveis importantes em águas de reuso para irrigação agrícola são: salinidade, substâncias tóxicas, sódio, cloro e nutrientes (MANCUSO, 2003).

- Salinidade: os sais presentes nas águas aplicadas para irrigação tendem a se acumular na zona das raízes das plantas. A presença de sais afeta o crescimento das plantas de três formas: efeito osmótico, causado pelos sais dissolvidos presentes na umidade do solo; toxicidade, causada pela concentração de íons específicos; dispersão das partículas do solo, causada pela alta concentração de sódio e baixa salinidade. Se o volume aplicado de água superar o volume utilizado pelas plantas somado à evaporação, o excesso de água percolará abaixo da zona das raízes, carregando consigo parte dos sais acumulados, processo conhecido como lixiviação.

Conseqüentemente, a salinidade do solo alcançará um valor constante, que dependerá da quantidade de água aplicada (BURTON; STENSEL; TCHOBANOGLOUS, 2003).

- Compostos tóxicos: podem causar nas plantas a inibição do crescimento celular e queda da produtividade, entre outros problemas. Esses compostos podem ainda ser cumulativos nas plantas, e por isso gerar problemas de saúde em humanos e animais. Alguns exemplos são os metais pesados e os compostos orgânicos.
- Nutrientes: os de maior interesse para as plantas são o nitrogênio, o fósforo, o potássio, o zinco e o boro. Em excesso, o nitrogênio pode prejudicar a qualidade e reduzir a massa das plantas, enquanto o fósforo não traz nenhum prejuízo (MANCUSO, 2003).

A tabela 3.5, adaptado de EPA (2004), apresenta recomendações para águas de irrigação agrícola.

Tabela 3.5 – Recomendações da U. S. EPA (2004) para águas de irrigação agrícola

Tipo de reuso	Tratamento	Qualidade da água	Distância de proteção	Monitoramento
Contato humano				
Irrigação de áreas públicas, tais quais parques, cemitérios, campos de golfe, entre outros; irrigação de produtos agrícolas não processados industrialmente ou a serem comidos crus	Secundário, Filtração e Desinfecção	ph: 6-9 DBO $\leq$ 10 mg/L Turbidez $\leq$ 2 NTU Coliformes fecais: não detectáveis/100 mL Cloro residual: 1 mg/L	17 metros de poços de água potável	Semanalmente: pH, DBO Diariamente: Coliformes Continuamente: Turbidez, Cloro residual
Contato humano restrito				
Irrigação de áreas de acesso restrito, tais quais silvicultura e outras; irrigação de produtos agrícolas a serem processados industrialmente, pastagens e outros não alimentícios	Secundário e Desinfecção	ph: 6-9 DBO $\leq$ 30 mg/L SST $\leq$ 30 mg/L Coliformes fecais $\leq$ 200/100 mL Cloro residual: 1 mg/L	100 metros de poços de água potável 30 metros de áreas de acesso público (se for usada irrigação por aspersão)	Semanalmente: pH, DBO Diariamente: Coliformes, Turbidez Continuamente: Cloro residual

### 3.3.2 Reuso para fins industriais

O reuso industrial de água pode se dar em caldeiras, irrigação de áreas verdes, lavagens de pisos e alguns tipos de peças, torres de resfriamento e processos industriais (HESPAÑOL, 2002). Dentre essas aplicações, as torres de resfriamento representam um uso considerável de água por grande parte das indústrias e é atualmente a forma de reuso predominante (BURTON; STENSEL; TCHOBANOGLOUS, 2003).

Como já dito anteriormente, nos processos de troca de calor, a água aquecida pode ser descartada – sistemas de resfriamento sem recirculação – ou liberar o calor por evaporação ou em lagoas de resfriamento e voltar ao processo – sistemas de resfriamento com recirculação semi-aberto e fechado, respectivamente. Devido aos grandes volumes de água relativos consumidos pelos sistemas de resfriamento sem recirculação, o reuso de água pode ser inviável economicamente em razão dos custos de recuperação da água (MANCUSO, 2003).

Nos sistemas de resfriamento com recirculação, uma parte da água é perdida por evaporação e arraste, e outra parte deve ser descartada (*blowdown*) para evitar um aumento excessivo da concentração de sais, que pode danificar os equipamentos. Isso obriga a introdução contínua de água de alimentação (*make-up*). O número de ciclos na recirculação pode ser avaliado pelo quociente entre as concentrações de um determinado íon na água de *blowdown* em relação à água de alimentação, ficando geralmente entre 5 e 10 para sistemas alimentados com águas de abastecimento (KEEN; PUCKORIUS; STRAUSS, 1987). Para sistemas alimentados com água de reuso, Asano et al. (2006) recomendam número de ciclos de recirculação entre 2 e 5.

Os problemas associados à qualidade das águas observados nos sistemas de resfriamento compostos por trocador e calor e torres de resfriamento são as incrustações,

corrosões, crescimento biológico e formação de espuma. Os dois fatores principais que devem ser controlados são a qualidade da água de reposição e o número de ciclos de recirculação (MANCUSO, 2003). As substâncias possivelmente presentes em águas de reuso e seus problemas potenciais em sistemas de resfriamento são apresentados na tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Substâncias presentes nas águas de reuso e seus problemas potenciais em sistemas de resfriamento

Substância	Problemas potenciais
Amônia	<i>Fouling</i> biológico, corrosão de tubulações de cobre
Carbonatos e bicarbonatos	Corrosão, incrustação
Magnésio	Incrustação
Microorganismos	<i>Fouling</i> biológico
Material orgânico	<i>Fouling</i> biológico
Fosfatos	Incrustação
Sílica	Incrustação
Sólidos dissolvidos totais	Corrosão, incrustação

Na tabela 3.1 estão os padrões de qualidade recomendados pela U. S. EPA (2004) para águas de alimentação de sistemas de resfriamento.

### 3.3.3 Reuso para recarga de lençóis subterrâneos de água

Quando comparada ao lançamento em corpos d'água superficiais, a disposição de águas recuperadas em aquíferos subterrâneos apresenta diversas vantagens, sendo a maior delas o ganho de qualidade que ocorre durante a recarga do aquífero. Essa melhora na qualidade advém de mecanismos de filtração, biotransformação, adsorção e hidrólise, que ocorrem durante o escoamento sub-superficial (ASANO et al., 2006).

Sob o ponto de vista do gerenciamento de águas subterrâneas, Asano et al. (2006) indicam que a recarga artificial de aquíferos apresenta as seguintes vantagens:

- Redução do rebaixamento do nível do lençol de água subterrâneo;
- Proteção da água subterrânea em aquíferos costeiros contra a intrusão de água salgada;
- Reservação de água para futuros usos;
- Redução de problemas de subsidência do solo.

As duas formas mais comuns de recarregar aquíferos com águas recuperadas é o espalhamento superficial em áreas específicas para isso e a injeção direta nos aquíferos (BURTON; STENSEL; TCHOBANOGLOUS, 2003).

### 3.3.4 Reuso para fins recreacionais e ambientais

O crescimento populacional, a urbanização e o aumento na demanda de água têm causado diminuição da qualidade e quantidade de água dos rios, e assim a deterioração do ambiente aquático. Recentemente, manter o volume mínimo de água em rios, córregos e áreas alagadas (*wetlands*) para manutenção do ecossistema vem se tornando um dos grandes desafios na gestão de recursos hídricos. (ASANO et al., 2006).

Nesse contexto, Burton, Stensel e Tchobanoglous (2003), consideram que as águas recuperadas podem ser utilizadas para aumentar a vazão de corpos d'água, auxiliar no desenvolvimento e restauração de áreas alagadas naturais ou construídas e na construção de lagos para usos recreacionais e/ou conservação de espécies.

Segundo Asano et al. (2006), o reuso de água para fins recreacionais e ambientais demanda mais atenção se comparado com os outros tipos de reuso, pois é necessário

considerar a saúde pública e a proteção dos ecossistemas. Dessa forma, a tecnologia e o grau de tratamento do esgoto dependem do tipo de corpo d'água no qual o mesmo será lançado e o nível de exposição humana a água recuperada.

### 3.4 Tratamento de Esgotos – Sistemas de Lodos Ativados

Os sistemas de lodos ativados são sistemas aeróbios de tratamento de esgotos basicamente formados por tanque de aeração (reator), unidade de clarificação (tanque de sedimentação ou flotação) e recirculação de lodo. No reator ocorrem reações bioquímicas de remoção da matéria orgânica e possivelmente da matéria nitrogenada. A biomassa atuante no processo utiliza o substrato presente no esgoto bruto para se desenvolver e é separada nas unidades de clarificação. Parte desses sólidos é retornada para o reator, aumentando a concentração de biomassa no mesmo, o que é responsável pela alta eficiência do sistema (VON SPERLING, 2002).

A biomassa consegue ser facilmente separada do lodo devido a sua propriedade de formar flocos (JORDÃO; PESSOA, 1995). Esse fenômeno será detalhado mais adiante, no item 3.4.1 desse trabalho.

No sistema de lodos ativados, o tempo de detenção do líquido é baixo, da ordem de horas, implicando em baixos volumes do tanque de aeração. Entretanto, devido à recirculação dos sólidos, o tempo de detenção de sólidos (idade do lodo), é maior, permitindo que a biomassa tenha tempo suficiente para metabolizar a matéria orgânica dos esgotos (VON SPERLING, 2002), e garantindo maior eficiência do tratamento.

Para a efetiva degradação da matéria orgânica, Jordão e Pessoa (1995) indicam que é necessário:

- Uma população de microorganismos ativos: a finalidade do lodo no processo é a de estabilizar a matéria orgânica pela ação dos microorganismos que formam os flocos. Assim, a recirculação do lodo é praticada de forma controlada para que se mantenha no sistema lodo em quantidade suficiente para degradar a matéria orgânica, mas não a ponto de prejudicar a aeração. A concentração média de sólidos suspensos totais no tanque de aeração varia de 3000 a 4500 mg/L. A vazão de recirculação de lodo varia de 25 a 100% da vazão de esgoto tratado, sendo que esse lodo possui concentração média de SST situada entre 7500 a 15000 mg/L.
- Disponibilidade de oxigênio: o oxigênio, além de suprir as necessidades metabólicas dos organismos, deve permitir agitação completa no tanque de aeração, para que haja contato entre o esgoto e a biomassa. A quantidade necessária de oxigênio é função, portanto, da concentração de DBO (e de NTK, quando se quiser nitrificar) afluente e das configurações físicas do tanque. Usualmente, deve-se manter a concentração de OD entre 1,5 e 2,0 mg/L.
- Disponibilidade de nutrientes: os microorganismos responsáveis pela estabilização da matéria orgânica necessitam, além do carbono, de outros nutrientes, sendo que os principais são nitrogênio e fósforo. A quantidade de N e P requerida depende da composição típica das células da biomassa, que pode ser, em termos de fórmulas empíricas,  $C_5H_7O_2N$  ou  $C_{60}H_{87}O_{23}N_{12}P$ . Portanto, a biomassa sintetizada no tratamento contém aproximadamente 12,3% de nitrogênio e 2,6% de fósforo. O resíduo celular após a respiração endógena possui em torno de 7% de nitrogênio e 1% de fósforo. Para sistemas de lodos ativados convencional, indica-se a relação DBO<sub>5</sub>:N:P de 100:5:1 (VON SPERLING, 2002).

### 3.4.1 Microbiologia de Lodos Ativados

Nos processos de crescimento disperso, os microorganismos responsáveis pelo tratamento dos esgotos são mantidos em suspensão através de métodos apropriados de mistura. (BURTON, STENSEL, TCHOBANOGLOUS, 2003). Em alguns processos desse tipo, como o de lodos ativados, os organismos se concentram, formando uma unidade estrutural denominada floco (VON SPERLING, 1996).

O floco apresenta estrutura heterogênea que contém material orgânico adsorvido, material inerte dos esgotos, material microbiano e células vivas e mortas. Embora os microorganismos sejam os agentes da remoção da DBO, o que torna o processo de lodos ativados eficiente é a propriedade dos flocos de se separarem do líquido por simples mecanismos físicos de sedimentação, em unidades de clarificação separadas (VON SPERLING, 1996). De acordo com La Rivière (1977), o tamanho do floco é regulado pelo balanço entre as forças de coesão e as de cisalhamento causadas pela aeração artificial e agitação.

Segundo Horan (1990), a população microbiana nos reatores de lodos ativados é altamente especializada e possui uma pequena diversidade de espécies, na qual predominam bactérias gram-negativas. Com exceção das bactérias nitrificantes, todos os outros organismos são heterotróficos. Os principais gêneros encontrados nos sistemas de lodos ativados e suas respectivas funções são apresentados na tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Gêneros dos principais organismos encontrados nos lodos ativados e suas respectivas funções no processo de tratamento de esgoto

Gênero	Função
<i>Pseudomonas</i>	Remoção de carboidratos; produção de muco; desnitrificação
<i>Zooglea</i>	Produção de muco; formação do floco
<i>Bacillus</i>	Degradação de proteínas
<i>Athrobacter</i>	Degradação de carboidratos
<i>Microthrix</i>	Degradação de gorduras; crescimento filamentoso
<i>Nocardia</i>	Crescimento filamentoso; formação de espuma e escuma
<i>Acinetobacter</i>	Remoção de fósforo
<i>Nitrosomonas</i>	Nitrificação
<i>Nitrobacter</i>	Nitrificação
<i>Achromobacter</i>	Desnitrificação

Fonte: HORAN (1990)

Além desses organismos, observam-se grande número de protozoários ligados ao floco e organismos ciliados e flagelados livres tanto em suspensão quanto dentro da matriz do floco. Os fungos são ocasionalmente observados e possuem papel pequeno no tratamento (HORAN, 1990).

### 3.5 Nitrificação e Desnitrificação

#### 3.5.1 Nitrificação

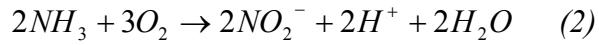
O nitrogênio está presente no esgoto bruto sob forma de nitrogênio orgânico (proteínas, aminoácidos e uréia), amônia, nitrito, nitrato e gás nitrogênio (JORDÃO E PESSOA, 2005). Esse elemento também é liberado nos reatores aeróbios como resultado da

oxidação do material celular, de acordo com a equação (1), na qual  $C_5H_7NO_2$  representa a constituição média de uma célula bacteriana.

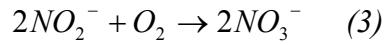


Em sistemas aeróbios, a degradação da amônia ocorre em dois passos: primeiramente a amônia é oxidada a nitritos, e em seguida os nitritos são oxidados a nitratos. Os organismos que atuam nesse processo são autótrofos quimiossintetizantes, ou seja, utilizam o gás carbônico como principal fonte de carbono e um substrato inorgânico – nesse caso a amônia – como principal fonte de energia.

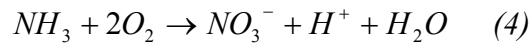
A transformação da amônia a nitritos é realizada por bactérias, principalmente do gênero *Nitrosomonas*. A reação de oxidação da amônia é dada a seguir:



A transformação do nitrito em nitrato é realizada por bactérias, principalmente do gênero *Nitrobacter*. A reação de oxidação do nitrito é dada a seguir:



Combinando as equações (2) e (3), tem-se:



Em adição, a forma em que o nitrogênio se encontra depende do pH:

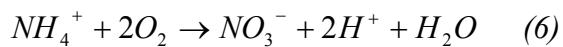


pH < 8: Praticamente toda a amônia na forma de  $NH_4^+$

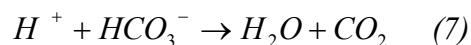
pH = 9,5: Aproximadamente 50%  $NH_3$  e 50%  $NH_4^+$

pH > 11: Praticamente toda a amônia na forma de  $NH_3$

Considerando que o pH do esgoto sanitário situa-se em torno de 6,5 e 7,5 (VON SPERLING, 1996), a reação global de nitrificação pode ser escrita:



No entanto, os íons  $H^+$  formados reagem com a alcalinidade do meio, resultando na reação:



Juntas, as equações (6) e (7) fornecem duas importantes informações:

- Para que haja remoção de amônia, grande quantidade de oxigênio é requerida. Para cada mol de  $NH_4^+$ , são necessários dois mols de oxigênio ( $O_2$ ). Sendo a massa molar do nitrogênio 14 g/mol, e a do oxigênio gasoso, 32 g/mol, são necessários 4,57 g/L de oxigênio para oxidar cada 1 g/L de N- $NH_4^+$ .

- A oxidação da amônia e a formação de íons  $H^+$  durante a nitrificação é associada com a redução da alcalinidade do sistema. A oxidação de 1 mol de  $NH_4^+$  implica no consumo de 2 mols de  $HCO_3^-$  (bicarbonato). Sendo a massa molar do bicarbonato igual a 61 g/mol, para oxidar 1 g/L de  $NH_4^+$ , são consumidos 8,7 g/L de  $HCO_3^-$ . Segundo Schippers (1981), a alcalinidade é igual a  $[HCO_3^-]/1,2$ . Portanto, para cada 1 g/L de  $NH_4^+$ , são consumidos 7,1 g/L de alcalinidade. Assim, tem-se que se o esgoto bruto não fornecer essa alcalinidade, haverá queda do pH da solução de esgoto em decorrência do processo de nitrificação.

A taxa de crescimento dos microorganismos nitrificantes é bastante baixa, se comparada à dos microorganismos heterotróficos responsáveis pela degradação da matéria orgânica. Por isso, em sistemas que objetivam nitrificar, é necessário manter um tempo de detenção celular (idade do lodo) suficiente para que as bactérias nitrificantes não sejam varridas do sistema (VON SPERLING, 2002). Na tabela 3.8 encontram-se as indicações para tempos de detenção celular para a nitrificação (VON SPERLING, 2002).

Tabela 3.8 – Tempos de detenção celular para garantir a nitrificação

Temperatura do líquido no reator (°C)	$\theta_c$ para nitrificação completa (dias)
5	12
10	9,5
15	6,5
20	3,5

Fonte: VON SPERLING, 2002.

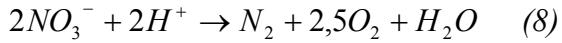
As bactérias do gênero *Nitrosomonas* têm crescimento mais lento que as do gênero *Nitrobacter*, razão pela qual quase não há acúmulo de nitritos no sistema (VON SPERLING, 2002).

Além da idade do lodo, os seguintes fatores ambientais influenciam a taxa de crescimento dos organismos nitrificantes (VON SPERLING, 2002):

- Temperatura: afeta a taxa de crescimento máxima dos organismos e também as concentrações de saturação da amônia e do oxigênio no esgoto. Observa-se a ocorrência de nitrificação numa faixa de 5 a 50 °C, mas as temperaturas ótimas encontram-se entre 25 e 36 °C;
- pH: para estabilidade do desempenho da nitrificação, é desejável que se mantenha na faixa de 6,5 a 8,0, apresentando-se em valor ótimo entre 7,2 e 8,0;
- Oxigênio dissolvido: é um pré-requisito indispensável para a ocorrência da nitrificação. Barnes e Bliss (1983) indicam que a concentração crítica abaixo da qual a nitrificação cessa encontra-se em torno de 0,2 mg/L. Valores mais elevados que isso devem ser mantidos no tanque de aeração para garantir que nos pontos de mais difícil acesso, como no interior dos flocos do lodo ativado, a concentração de OD seja superior à crítica. Por isso, a faixa de concentração de oxigênio dissolvido necessária para sistemas com biomassa em suspensão é de 0,5-2,5 mg.L-1; em sistemas com biomassa fixa, onde a transferência de massa e resistência à difusão são fatores que devem ser levados em consideração, o nível de oxigênio requerido é maior (FIGUEROA; SILVERSTEIN, 1992).
- Substâncias tóxicas ou inibidoras: substâncias tóxicas podem inibir o crescimento das bactérias nitrificantes, principalmente das *Nitrosomonas*, que são mais sensíveis. No entanto, raramente esses compostos estão presentes nos esgotos sanitários.

### 3.5.2 Desnitrificação

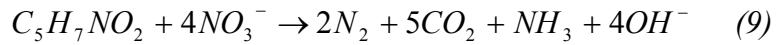
Na ausência de uma fonte de oxigênio dissolvido, é impossibilitada a utilização do oxigênio como acceptor final de elétrons na respiração celular (HORAN, 1971). Em condições anóxicas, nas quais não existe oxigênio, mas existem nitratos, os nitratos são utilizados por microorganismos heterotróficos como acceptor final de elétrons, enquanto a matéria orgânica carbonácea rapidamente biodegradável (solúvel) é a fonte de carbono (VON SPERLING, 2002). Nesse processo denominado desnitrificação, o nitrato é reduzido a nitrogênio gasoso, segundo a reação:



Essa equação fornece duas importantes informações:

- Para cada mol de nitrato reduzido, é produzido 1,25 mol de oxigênio. Sendo assim, a cada 1 g/L de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> reduzido, há liberação de 2,86 g/L de oxigênio gasoso. Portanto, se for induzida a desnitrificação total após a nitrificação, há economia teórica de 62,5% (2,85/4,57) de oxigênio no processo.
- Para cada mol de nitrato reduzido há consumo de 1 mol de H<sup>+</sup>, implicando na economia de alcalinidade e no aumento da capacidade tampão do meio. Uma vez que a formação de 1 mol de nitrato implica na formação de 2 mols de H<sup>+</sup>, pode-se ter economia de 50 % no consumo de alcalinidade caso a desnitrificação seja incorporada no processo.

A reação mais completa de desnitrificação, considerando o esgoto como fonte de carbono, é:



Na reação acima,  $C_5H_7NO_2$  corresponde à composição típica da célula bacteriana. Incluindo assimilação, o consumo na desnitrificação é de aproximadamente 3 g  $C_5H_7NO_2$ / g  $N-NO_3^-$  ou 4,5 g DBO/ g  $N-NO_3^-$ .

### 3.6 Fósforo no Esgoto Sanitário

O fósforo está presente nos esgotos sob forma de ortofosfato, polifosfato e fósforo orgânico (JORDÃO e PESSOA, 2005).

Assim como o nitrogênio, o fósforo é fundamental para o crescimento de microorganismos, plantas e animais, sendo um nutriente ou bio-estimulante (BURTON; STENSEL; TCHOBANOGLOUS, 2003).

Sua presença em corpos d'água pode gerar a eutrofização, que é o crescimento excessivo das algas. Por isso, há grande interesse em se controlar a quantidade de fósforo lançada nas águas superficiais, seja ele proveniente de águas residuárias domésticas, industriais ou poluição difusa (BURTON; STENSEL; TCHOBANOGLOUS, 2003).

A remoção do fósforo pode ser feita por processo físico-químico (coagulação e floculação) ou diretamente no tratamento biológico (JORDÃO e PESSOA, 2005).

Através da análise de diversas tecnologias de tratamento existentes, Von Sperling (2002) demonstra que a remoção biológica do fósforo em um processo de lodos ativados exige a existência de uma fase anaeróbia, e por isso não pode ocorrer em um sistema de mistura completa, requerendo um fluxo sequencial em pistão.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1. Descrição do sistema de tratamento de esgoto

O sistema de tratamento de esgoto sanitário para produção de água de reuso objeto desse estudo foi construído na cidade de São Paulo, entre janeiro e abril de 2008. A construção desse sistema foi contratada por uma empresa do ramo de Edição e Impressão de Jornais que tinha como objetivos reutilizar água em descargas de sanitários e na alimentação de torres de resfriamento. O presente estudo foi realizado nos meses maio, junho e julho de 2009, sendo que as coletas foram realizadas em São Paulo, e as análises laboratoriais, no Laboratório de Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-ESP).

Nessa Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), afluem esgotos sanitários provenientes de dois prédios: o administrativo e o industrial. A tecnologia empregada para o tratamento dos esgotos é a de lodos ativados com remoção biológica de nitrogênio e precipitação química de fósforo.

Na figura 4.1, é mostrado um fluxograma ilustrativo das unidades constituintes do sistema de tratamento de esgoto e a localização dos pontos de amostragem 1, 2 e 3, os quais correspondem, respectivamente, à coleta de esgoto sanitário do prédio administrativo, à coleta de esgoto sanitário do prédio industrial e à coleta de água de reuso.

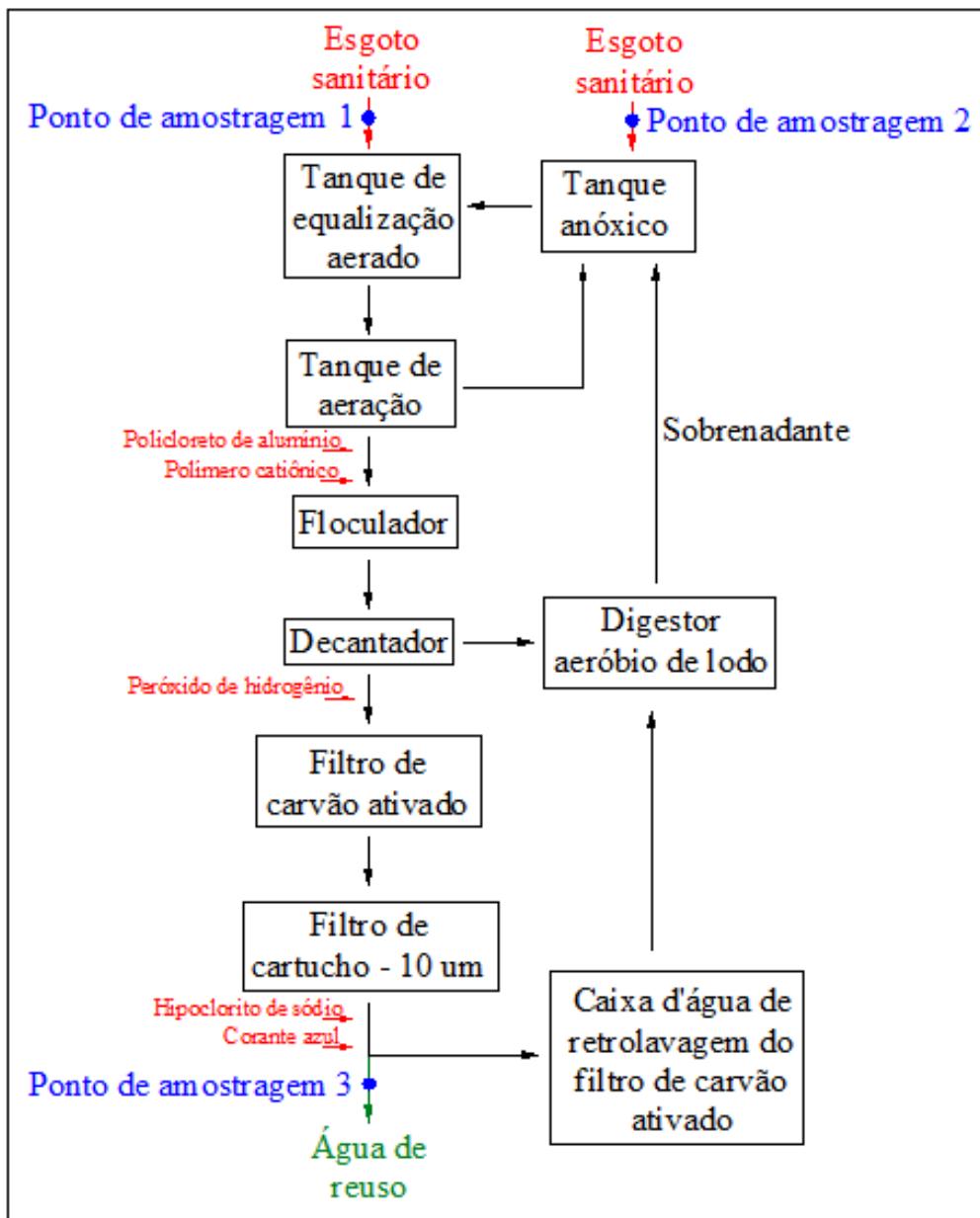


Figura 4.1 - Fluxograma ilustrativo das unidades constituintes do sistema de tratamento de esgoto e localização dos pontos de amostragem 1, 2 e 3

Portanto, o sistema em operação é basicamente constituído das seguintes unidades:

- Tanque de equalização do efluente bruto: tem formato cilíndrico com eixo horizontal, de diâmetro 3,10 m e comprimento 5,40 m; possui volume útil de 38 m<sup>3</sup>. Para homogeneização do efluente líquido acumulado no tanque, encontra-se instalada uma bomba de 2,6 kW (3,5 CV) acoplada a um Venturi para sucção de ar. Conta ainda com

duas bombas (1 + 1 reserva) posicionadas em sua base para recalque de 13 m<sup>3</sup>/h de esgoto bruto para o tanque de aeração.

- Tanque anóxico: tem formato cilíndrico com eixo vertical, de diâmetro 1,20 m e altura 3,00 m; possui volume útil de 3,30 m<sup>3</sup>. As tubulações de entrada afluem pela base do tanque para gerar turbulência e evitar a sedimentação de lodo.
- Tanque de aeração: tem formato cilíndrico com eixo horizontal, de diâmetro 3,10 m e comprimento 6,65 m; possui volume útil de 48 m<sup>3</sup>. Para aeração do efluente líquido proveniente do tanque de equalização, encontra-se instalada uma bomba de 3,2 kW (4,3 CV) acoplada a um Venturi com capacidade de succão de ar de 32,1 m<sup>3</sup>/h ou 0,53 m<sup>3</sup>/min. Conta ainda com uma bomba situada no fundo do tanque e próximo à entrada de esgoto bruto, para retorno de 6,5 m<sup>3</sup>/h de esgoto pré-tratado para o tanque anóxico. Essa mesma bomba pode ser utilizada para descarte de lodo sedimentado no tanque de aeração para o digestor de lodo.

Na saída do tanque de aeração há um decantador lamelar constituído por 15 placas paralelas de largura 0,63 m e altura 0,80 m, espaçadas de 5 cm e inclinadas de 60°. Esse dispositivo foi instalado para impedir a perda de parte do lodo contido no tanque de aeração para o floculador; no entanto, devido à turbulência gerada pelo aerador, o decantador lamelar não cumpre sua função.

- Unidade de floculação: tem formato cilíndrico com eixo vertical, de diâmetro 0,90 m e altura 3,10 m; possui volume útil de 1,46 m<sup>3</sup>. No seu interior há 3 placas (distribuídas ao longo da altura) distanciadas de 0,50 m, cada uma com 72 orifícios de 1". O gradiente de velocidade, calculado pelo autor em função das características da unidade, é de 11 s<sup>-1</sup>.
- Unidade de decantação: tem formato cilíndrico com eixo vertical, de diâmetro 2,00 m e altura 2,55 m; possui volume útil de 6 m<sup>3</sup> e área superficial útil de 2,96 m<sup>2</sup>. A

entrada situa-se na parte inferior e a saída, na parte superior. O descarte de lodo é realizado duas vezes por dia (em batelada), e para isso todo o volume do tanque é bombeado para o digestor de lodo. Não há retorno de lodo diretamente para o tanque de aeração.

- Filtro de carvão ativado: tem formato cilíndrico com eixo vertical, de diâmetro 0,90 m e altura 2,00 m. O meio filtrante é uma camada de 1,05 m de carvão ativado. A retrolavagem é realizada duas vezes ao dia, representando gasto total de 6 m<sup>3</sup>/d de água de reuso.
- Filtros de cartucho: três filtros tipo cartucho de abertura 10 micrômetros, com eixo vertical, operando em paralelo. O diâmetro de cada um deles é 0,16 m e a altura, 0,60 m.
- Caixa d'água de retrolavagem dos filtros: tem formato cilíndrico com eixo vertical, de diâmetro 2,00 m e altura 2,55 m.
- Tanque de diluição de dosagem do policloreto de alumínio (PAC): tem formato cilíndrico com eixo vertical, com volume útil de 200 L.
- Tanque de diluição de dosagem do polímero catiônico: tem formato cilíndrico com eixo vertical, com volume útil de 200 L.
- Tanque de diluição de dosagem do peróxido de hidrogênio: tem formato cilíndrico com eixo vertical, com volume útil de 200 L.
- Tanque de diluição de dosagem do hipoclorito de sódio: tem formato cilíndrico com eixo vertical, com volume útil de 200 L.
- Tanque de dosagem do corante azul: tem formato cilíndrico com eixo vertical, com volume útil de 200 L. O corante é alimentício e é empregado para que os usuários reconheçam a água de reuso em caso de contaminação da água potável.

Embora a vazão de tratamento seja de 6,5 m<sup>3</sup>/h, durante o período de estudo a estação permaneceu fora de funcionamento em média 8,7 horas/dia, resultando no volume diário de tratamento de 100 m<sup>3</sup>. Isso ocorreu devido às baixas vazões de esgoto afluente, as quais foram praticamente nulas durante a noite.

Durante o período de realização do estudo não houve controle de temperatura do sistema. Por isso, na tabela 4.1 são apresentadas as temperaturas média, máxima e mínima na cidade de São Paulo para os respectivos meses.

Tabela 4.1 - Temperaturas média, máxima e mínima na cidade de São Paulo durante o período de realização do estudo

Mês	Temperatura (°C)		
	Média	Máxima	Mínima
Maio	17,8	27,9	12,1
Junho	16,7	25,6	7,7
Julho	15,9	26,8	8,5

Fonte: CPTEC/INPE

#### 4.2. Descrição do sistema de resfriamento

Parte da água de reuso produzida na ETE alimenta um sistema de água de resfriamento, composto por torres de resfriamento e trocadores de calor (circuito semi-aberto).

Na figura 4.2, é mostrado um fluxograma ilustrativo das unidades constituintes do sistema de água de resfriamento e a localização do ponto de amostragem 4, correspondente à coleta de água do tanque central.

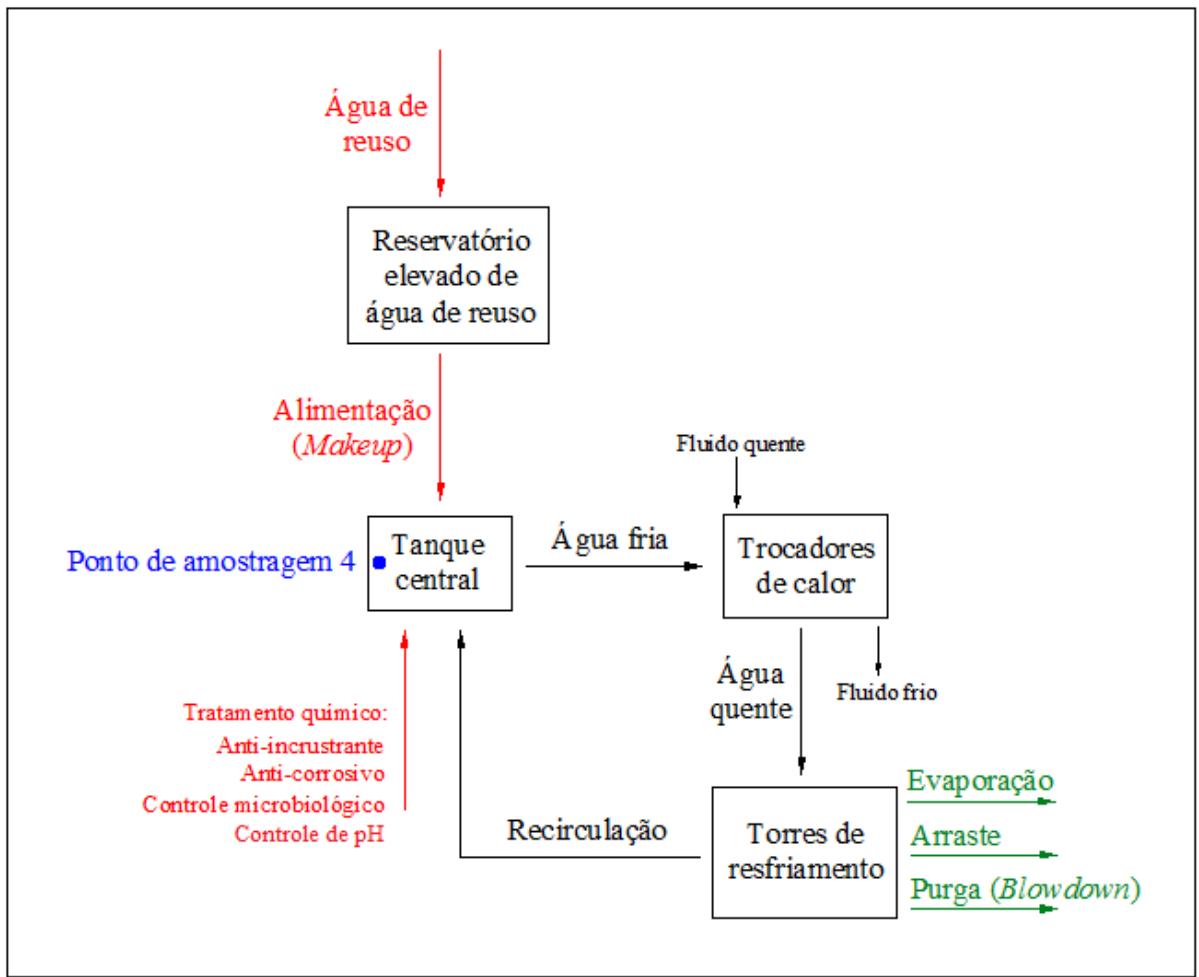


Figura 4.2 - Fluxograma ilustrativo das unidades constituintes do sistema de água de resfriamento e localização do ponto de amostragem 4

Portanto, o sistema de resfriamento é basicamente constituído das seguintes unidades:

- Reservatório elevado de água de reuso: com volume útil de  $100\text{ m}^3$ , armazena água de reuso a ser distribuída para vasos sanitários e sistema de resfriamento.
- Tanque central: tem volume útil de  $20,2\text{ m}^3$  para mistura de água de alimentação e água de recirculação proveniente das torres de resfriamento. Esse reservatório tem altura útil de  $0,75\text{ m}$  e as localizações das entradas e saídas de água são mostradas a seguir.

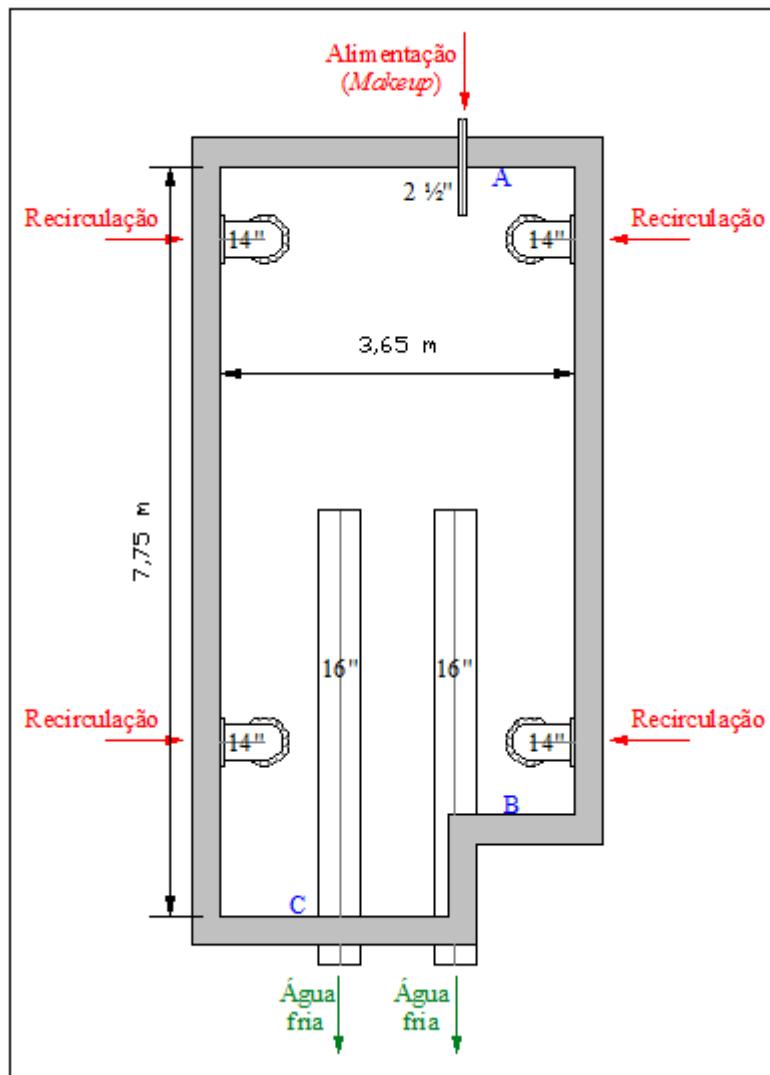


Figura 4.3 – Vista em planta do tanque central do sistema de resfriamento

- Trocadores de calor: unidades do tipo feixe tubular compostas por tubos de cobre de 1,0 cm de diâmetro e 3,00 m de comprimento por onde passa a água fria.
- Torres de resfriamento: 4 torres de lado 3,20 m e altura 4,05, sendo a altura da água nas bacias igual a 0,60 m.

#### 4.3. Análises físico-químicas

Para caracterizar o esgoto sanitário que serviu como matéria-prima para a produção de água de reuso, foram coletadas duas amostras de esgoto – uma colhida no ponto 1, e a outra no ponto 2 – e analisadas para determinação das seguintes características: pH, DQO, NTK, N -  $\text{NH}_4^+$  e  $\text{PO}_4^{3-}$ . As coletas foram realizadas na data de início das análises experimentais, às 13h. Os métodos de análise foram os mesmos apresentados na tabela 4.2.

Para estudar os efeitos da alimentação do sistema de resfriamento com água de reuso, foram realizadas 20 análises de amostras colhidas nos pontos 3 e 4. As características analisadas e a freqüência dessas análises são apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Frequência das análises físico-químicas e características analisadas

Parâmetro	Método	Frequência	Referência
Cloro (mg/L)	Espectofotométrico	2 x por semana	APHA (1998)
T °C	Termométrico	2 x por semana	-
OD (mg/L)	Óptico	2 x por semana	-
pH (unidade)	Potenciométrico	2 x por semana	-
DQO bruta (mg/L)	Espectrofotométrico	2 x por semana	APHA (1998)
NTK (mg/L)	Macro-Kjeldahl	2 x por semana	APHA (1998)
N - $\text{NH}_4^+$ (mg/L)	Titulométrico	2 x por semana	APHA (1998)
N - $\text{NO}_3^-$ (mg/L)	Colorimétrico	2 x por semana	APHA (1998)
N - $\text{NO}_2^-$ (mg/L)	Espectofotometria	2 x por semana	APHA (1998)
$\text{PO}_4^{3-}$ (mg/L)	Ultravioleta-Visível	2 x por semana	APHA (1998)
	Ácido ascórbico	2 x por semana	APHA (1998)

Nas mesmas datas dessas análises, foram medidas a vazão de alimentação (*makeup*) e a vazão de purga do sistema de resfriamento, pelo método volumétrico.

#### 4.4. Exames Microscópicos

Para avaliar a composição do lodo aderido nas paredes internas do tanque central do sistema de resfriamento e do lodo incrustado nos tubos do trocador de calor, foi realizada a microscopia óptica e a microscopia óptica de contraste de fases de amostras coletadas nesses dois locais. Essa análise foi realizada na data de início das análises físico-químicas das amostras colhidas nos pontos 3 e 4.

Primeiramente, quatro amostras de lodo foram coletadas e armazenadas em frascos, sendo três delas do tanque central de coleta do sistema de resfriamento, e uma dos tubos internos de um dos trocadores de calor.

No tanque central de coleta do sistema de resfriamento, foram coletadas as amostras A, B e C, cujas localizações estão indicadas na figura 4.3. As amostras A e C foram coletadas na parede do tanque a 10 cm de profundidade, e a amostra B, na espuma sobrenadante (a qual contém lodo misturado).

Em seguida, os frascos foram homogeneizados durante 5 minutos. Lâminas de vidro previamente limpas com álcool receberam a adição de uma camada de Agar 2%. Após a solidificação desse, uma gota da amostra microbiana de cada frasco foi adicionada e recoberta com a lâminula. As lâminas foram examinadas em microscópio Leica de contraste de fase e fluorescência, acoplado à câmera Optronics com captura de imagem e software Pro-Plus.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Análises físico-químicas

Foram realizadas análises físico-químicas dos esgotos sanitários brutos afluentes à ETE. Os resultados encontram-se na tabela a seguir.

Tabela 5.1 – Características dos esgotos afluentes à ETE

Parâmetro	Ponto 1	Ponto 2
pH	8,10	8,35
DQO (mg/L)	410	620
NTK (mg/L)	34	95
N - NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	27	85
N-orgânico (mg/L)	3	6
PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> (mg/L)	9,7	8,6

De acordo com Von Sperling (1995), o esgoto coletado no ponto 1 apresentou características típicas de esgoto sanitário, e o coletado no ponto 2, concentração de nitrogênio amoniacal mais alta que o normal. O pH das duas amostras se encontrou fora da faixa esperada. Usualmente, esgotos sanitários possuem pH entre 6,7 e 8 (VON SPERLING, 1995). Portanto, os esgotos afluentes à ETE foram mais alcalinos que o usual, e isso provavelmente deveu-se às características da água potável utilizada no empreendimento.

Foram analisadas amostras coletadas nos pontos 3 e 4. Os resultados encontram-se na tabela 5.2, na qual o nitrato e o nitrito são apresentados sob forma de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, respectivamente.

Tabela 5.2 – Características da água de reuso e água do tanque central do sistema de resfriamento

Parâmetro	Ponto 3			Ponto 4		
	Média	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo
Cloro (mg/L)	0,8 ± 0,1	0,6	1,2	0,7 ± 0,2	0,4	1,0
T °C	22,2 ± 2,2	18,9	26,8	21,6 ± 2,1	18,4	26,6
OD (mg/L)	3,8 ± 0,6	2,9	4,7	5,0 ± 0,9	3,7	6,2
pH	7,10 ± 0,33	6,30	7,68	7,10 ± 0,71	6,10	8,33
DQO (mg/L)	63 ± 16	38	85	225 ± 48	146	305
NTK (mg/L)	55 ± 9	37	71	22 ± 12	10	49
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	52 ± 9	33	67	19 ± 12	6	46
N-orgânico (mg/L)	3 ± 2	1	6	3 ± 1	2	5
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	0,09 ± 0,05	0,01	0,17	65,2 ± 16,8	86,6	31,7
N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	0,005 ± 0,006	0,001	0,022	2,47 ± 2,03	0,31	6,18
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/L)	3,6 ± 0,9	2,0	6,1	17,9 ± 1,8	15,1	22,3

Comparando-se as tabelas 5.1 e 5.2, nota-se que no sistema de tratamento de esgoto praticamente não ocorreu remoção de nitrogênio amoniacal e a remoção de fosfato total foi baixa. A deficiência na nitrificação pode ter se dado em função do baixo tempo de detenção celular, uma vez que não há retorno do lodo sedimentado no decantador para o sistema, e devido ao fornecimento insuficiente de oxigênio. O sistema de aeração foi re-dimensionado para remoção de 95% da matéria orgânica carbonácea e 95% de remoção de amônia, e a vazão de ar encontrada foi de 120 m<sup>3</sup>/h, aproximadamente quatro vezes maior que a vazão que é fornecida. A ineficiente remoção de fosfato pode estar ligada a dois fatores: dosagem

insuficiente de coagulante (PAC); inexistência de um dispositivo de mistura rápida que promovesse a distribuição uniforme do coagulante no esgoto.

Em relação ao sistema de resfriamento, a vazão de alimentação (*makeup*) foi de  $40,86 \pm 13,89 \text{ m}^3/\text{d}$ , e a vazão de purga,  $3,76 \pm 0,00 \text{ m}^3/\text{d}$ .

A vazão média de alimentação variou 34% durante o período de estudo. Essa inconstância ocorreu devido às variações da temperatura ambiente no mesmo período, conforme apresentado na tabela 4.1. Quanto mais alta a temperatura ambiente, maior é a quantidade de água evaporada para alcançar baixas temperaturas. Por consequência, maior é o volume de água reposição.

A vazão de purga não variou conforme a vazão de alimentação, tampouco com a qualidade da água, tendo se mantida constante durante o período de estudo.

Observou-se que a concentração de  $\text{N-NO}_2^-$  no ponto 3 foi de  $0,005 \pm 0,006 \text{ mg/L}$ , ou seja, o desvio padrão superou o valor médio. Essa grande inconstância nas concentrações de  $\text{N-NO}_2^-$  pode ter ocorrido em função das variações do pH, temperatura e OD no período de estudo, uma vez que o nitrito é um composto intermediário no processo de nitrificação e a taxa de crescimento das bactérias nitrificantes depende de fatores ambientais. Nesse ponto de coleta, os parâmetros citados apresentaram valores médios de  $7,10 \pm 0,33$ ,  $22,2 \pm 2,2 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $3,8 \pm 0,6 \text{ mg/L}$  respectivamente.

Entre os pontos 3 e 4, foram grandes as diferenças nas concentrações dos parâmetros químicos da água, com exceção das concentrações de cloro e N-orgânico e do pH, que se mantiveram praticamente iguais. Como não houve aumento ou diminuição na concentração de N-orgânico, a concentração de NTK acompanhou a de  $\text{N-NH}_4^+$ . Deste modo, no ponto 4 houve aumento das concentrações de DQO, OD,  $\text{N-NO}_3^-$ ,  $\text{N-NO}_2^-$  e  $\text{PO}_4^{3-}$ , e diminuição da concentração de  $\text{N-NH}_4^+$ . Para entender os ciclos de concentração das substâncias no sistema de resfriamento, a seguir é apresentado o balanço de massa do sistema.

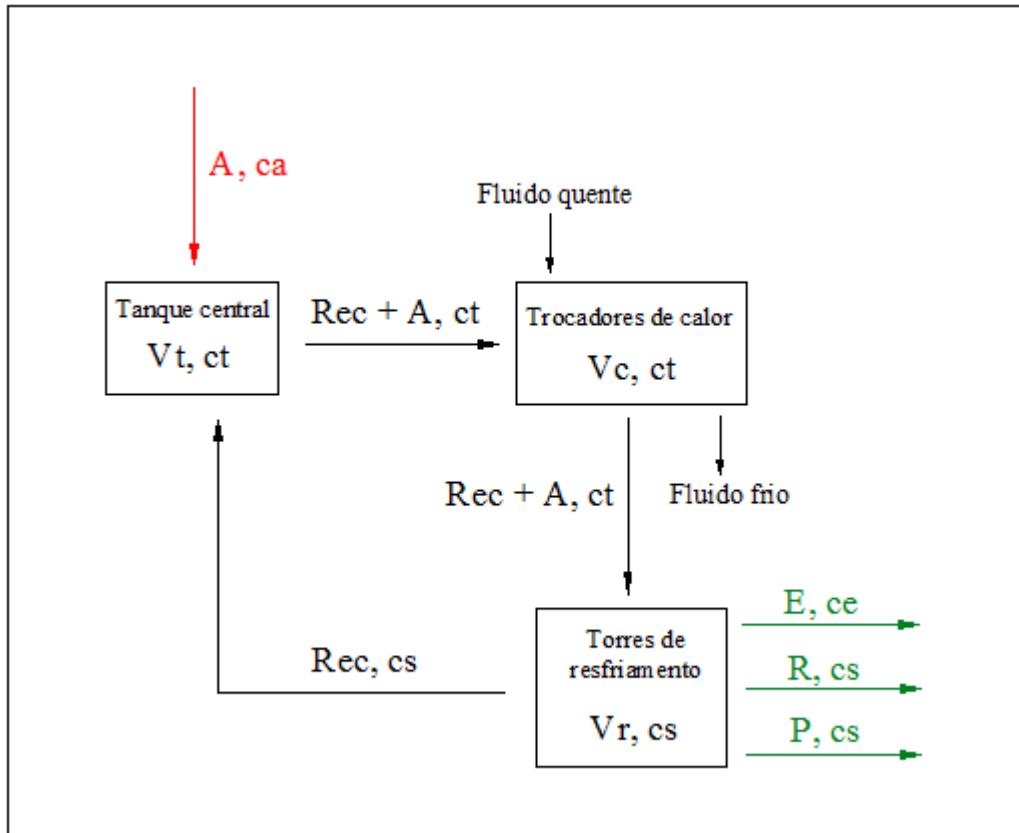


Figura 5.1 – Balanço de massa do sistema de resfriamento

Para elaboração do balanço de massa são adotadas as seguintes terminologias:

$A$ : Vazão de alimentação,  $m^3/d$ ;

$E$ : Vazão de evaporação,  $m^3/d$ ;

$R$ : Vazão perdida por arraste (respingos),  $m^3/d$ ;

$P$ : Vazão de purga e vazamentos em tubulações,  $m^3/d$ ;

$Rec$ : Vazão de recirculação,  $m^3/d$ ;

$C$ : ciclo de concentração, indicador do número de vezes que uma dada porção de água se concentra num sistema evaporativo;

$V_t$ : Volume do tanque,  $m^3$ ;

$V_c$ : Volume dos trocadores de calor,  $m^3$ ;

$V_r$ : Volume das bacias das torres de resfriamento,  $\text{m}^3$ ;

$ca$ : concentração da substância na alimentação,  $\text{mg/L}$ ;

$ce$ : concentração da substância na evaporação,  $\text{mg/L}$ ;

$cs$ : concentração da substância nos respingos, purga, vazamentos e água de recirculação,  $\text{mg/L}$ ;

$ct$ : concentração da substância no tanque central,  $\text{mg/L}$ ;

Em termos de vazão, o balanço material é dado pela equação (10).

$$A = E + R + P \quad (10)$$

Uma vez atingido o equilíbrio, as cargas salinas introduzidas pela água de alimentação (reposição) são removidas na medida em que entram. Portanto, em termos de carga salina, tem-se:

$$A \cdot ca = E \cdot ce + R \cdot cs + P \cdot cs \quad (11)$$

A concentração iônica na evaporação  $ce = 0$ ; e a concentração nos respingos, purga e vazamentos são iguais a  $cs$ . Reescrevendo a equação (11):

$$A \cdot ca = cs \cdot (R + P) \quad (12)$$

No equilíbrio, a carga salina de alimentação é igual à carga salina removida. Conseqüentemente,  $cs/ca = \text{constante} = C = \text{ciclos de concentração na torre}$ .

Para que ocorra remoção biológica do fósforo, é necessário uma fase anaeróbia no sistema de tratamento. No sistema de resfriamento, o OD manteve-se alto, constituindo-se ambiente desfavorável para tal processo. Também não houve dosagem de coagulantes químicos. Portanto, presume-se que entre os pontos 3 e 4, o aumento da concentração de fosfato tenha se dado em função somente de fenômenos físicos. Por isso, esse íon será usado para calcular a razão de reconcentração salina no sistema de resfriamento devido às perdas por evaporação e arraste, assim como a vazão de recirculação ( $Q_{rec}$ ) no sistema. Para tanto, adota-se vazão de arraste igual a 0,3% $Q_{rec}$  (valor de projeto da torre), e vazão de evaporação igual a 3,60% $Q_{rec}$ , uma vez que a diferença de temperatura entre a entrada e a saída da torre foi de 19,9°C (temperatura média da entrada na torre igual a 41,5 °C); a vazão de purga foi igual a 3,76 m<sup>3</sup>/d e a perda por vazamentos em tubulações foi igual a 0,8 m<sup>3</sup>/dia, totalizando  $P = 4,56 \text{ m}^3/\text{d}$ .

Reescrevendo-se a equação (10) para as vazões médias de alimentação e purga, tem-se:

$$40,86 = 3,60\% \cdot Q_{rec} + 0,3\% \cdot Q_{rec} + 4,56 \leftrightarrow Q_{rec} = 930,7 \text{ m}^3 / \text{d}$$

$$E = 33,5 \text{ m}^3 / \text{d}$$

$$R = 2,8 \text{ m}^3 / \text{d}$$

Substituindo na equação (12), tem-se:

$$40,86 \cdot 3,6 = cp \cdot (2,8 + 4,56) \leftrightarrow cs = 20,0 \text{ mg/L}$$

O número de ciclos de concentração na torre  $C = cp/ca = 5,6$ .

A concentração salina da vazão de recirculação é igual a concentração salina da vazão de purga ( $cs$ ), uma vez que as duas linhas saem do mesmo tanque, que é a bacia da torre de resfriamento.

Sendo assim, o balanço de massa salina para o tanque central, uma vez atingido o equilíbrio, fica:

$$A \cdot ca + Re c \cdot cs = (A + Re c) \cdot ct \quad (13)$$

Substituindo os valores:

$$3,6 \cdot 40,86 + 930,7 \cdot 20 = ct \cdot 971,1 \leftrightarrow ct = 19,3 \text{ mg/L}$$

Considerando os fenômenos físicos de transferência de massa no sistema de resfriamento, a concentração calculada de fosfato no tanque é de 19,3 mg/L e a relação  $R = ct/ca = 5,41$ . Entretanto, a concentração real de fosfato aferida no tanque (ponto 4) foi de  $17,9 \pm 1,8$ , e  $ct/ca = 5,21 \pm 1,26$ . Apesar das diferenças entre os valores calculados e aferidos em campo, tecnicamente pode-se dizer que eles são iguais. Essa diferença entre os valores médios teórico e prático pode ter ocorrido em função de problemas analíticos, pela assimilação de fósforo por células bacterianas possivelmente presentes no sistema (células bacterianas são constituídas, em média, de 2,6% de fósforo), ou, ainda, devido à precipitação química e retenção de fósforo no lodo. A localização do ponto de amostragem no tanque central provavelmente não afetou os resultados, pois, devido à alta turbulência gerada pela vazão de recirculação afluente, e pelo fato de essa vazão ser muitas vezes maior que a vazão de alimentação ( $Re >> A$ ), pode-se considerar regime de mistura completa no tanque.

Analogamente, para os outros parâmetros, tem-se:

Tabela 5.3 – Razão de concentração dos parâmetros químicos da água

Parâmetro	R = P4/P3	
	Calculada	Aferida em campo
OD	5,41	$1,33 \pm 0,13$
DQO	5,41	$3,91 \pm 1,52$
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	5,41	$0,35 \pm 0,19$
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	5,41	$1280,2 \pm 1306,7$
N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	5,41	$846,0 \pm 810,1$
PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>	5,41	$5,21 \pm 1,26$

A razão de concentração de oxigênio dissolvido aferida em campo foi menor que a esperada. No entanto, esse parâmetro não é conservativo, e sua concentração pode variar de acordo com a temperatura e o grau de agitação da água, fatores não controlados no experimento (e não só pelo consumo em reações de degradação da matéria orgânica e oxidação da amônia). Portanto, a razão de concentração de OD não será considerada no estudo do aumento da concentração de parâmetros químicos da água nas torres de resfriamento.

A DQO também apresentou razão de concentração menor que a esperada. Isso indica que no tanque central do sistema de resfriamento podem ter ocorrido reações de degradação da matéria orgânica, resultando na diminuição da DQO. Essa hipótese é reforçada pelo fato de que as condições de temperatura, pH e OD no tanque eram favoráveis para tal processo.

Quanto às concentrações de nitrogênio, nota-se redução acentuada da concentração de nitrogênio amoniacal, e grande aumento nas concentrações de N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup> e N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> entre os pontos 3 e 4. Considerando o OD de  $5,0 \pm 0,9$  mg/L, o pH de  $7,10 \pm 0,71$  e a temperatura de  $21,6 \pm 2,1$  °C no tanque central do sistema de resfriamento, tem-se um ambiente favorável para a ocorrência de reações de nitrificação. Portanto, conclui-se que nesse tanque tenha ocorrido processo de nitrificação, no qual a amônia afluente se transformou em nitrito e o nitrito em nitrato. A razão de concentração de nitrito foi menor que a de nitrato, pois as

bactérias do gênero *Nitrobacter*, que oxidam nitrito a nitrato, possuem cinética de crescimento mais acelerada que as do gênero *Nitrosomonas*, que oxidam amônia a nitrito, resultando em menor acúmulo de nitrito do que de nitrato no sistema.

As reações de nitrificação praticamente não afetaram o pH pois no sistema de resfriamento há um dispositivo de medição on-line do pH conectado a duas bombas dosadoras (de ácido ou base) que o mantiveram em torno de 7,0.

O reservatório de acumulação de água de reuso anterior à distribuição para as torres de resfriamento tem 100 m<sup>3</sup>. Considerando que esse reservatório trabalhe sempre cheio e que a vazão de alimentação da torre é de 6,5 m<sup>3</sup>/h, o tempo de detenção hidráulico da água no reservatório é de 15,4 h. Nesse tempo em que a água fica parada, podem se iniciar as reações de nitrificação, o consumo de OD, a degradação da matéria orgânica, entre outros processos.

## 5.2 Exames microscópicos

As microscopias de contraste de fase foram realizadas para avaliar a diversidade microbiana das amostras A, B, C e D.

As amostras A B e C, apesar de coletadas em pontos diferentes no tanque central do sistema de resfriamento, eram muito semelhantes. Nas três amostras foi identificada a presença de biomassa e de uma pequena quantidade de matéria orgânica, indicando lodo estabilizado.



Figura 5.2 – Amostra de lodo coletada no ponto A – parede do tanque central do sistema de resfriamento

Em relação a biomassa, observou-se presença rara de algas, fungos e bactérias do gênero *Nocardia*, presença frequente de bacilos e cocos e predomínio de bactérias nitrificantes. A presença de bactérias nitrificantes indica nitrificação no tanque central do sistema de resfriamento; a presença de bacilos pode estar relacionada à degradação da matéria orgânica.

A Figura 5.3 destaca as morfologias predominantes nas amostras do lodo.

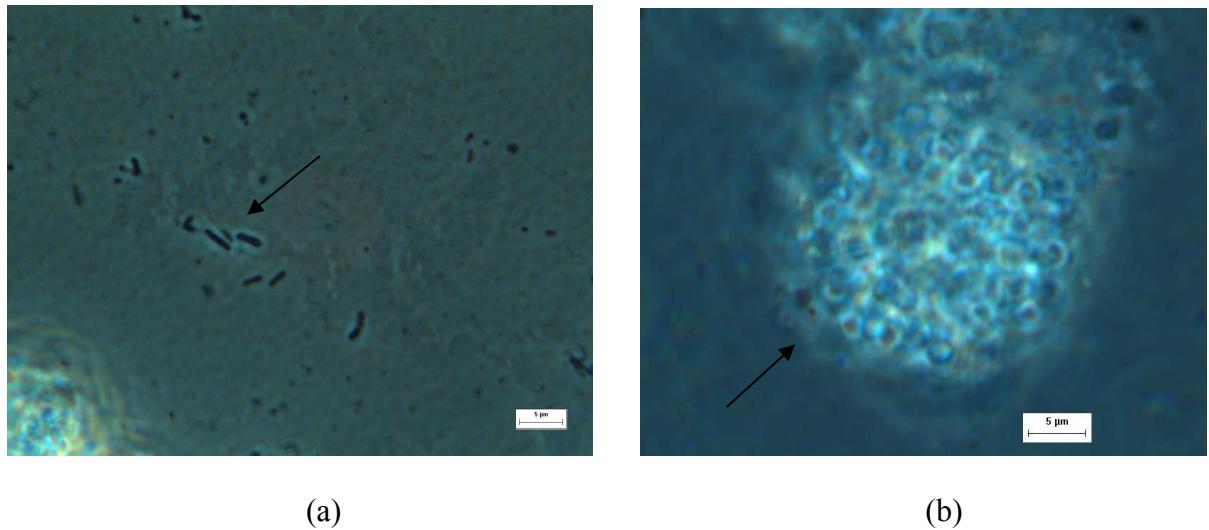


Figura 5.3 – Microscopia óptica de contraste de fase das morfologias microbianas: (a) bacilos, (b) bactérias nitrificantes

A amostra D, coletada dentro dos tubos de um dos trocadores de calor, apresentou predominância de material inerte, pouca matéria orgânica e pouca biomassa. Em relação à biomassa, predominaram os bacilos. Dentro dos tubos dos trocadores de calor, a temperatura pode chegar até 42 °C, tornando-se um ambiente não-propício para o crescimento de algumas espécies de microorganismos.

A grande quantidade de material inerte provavelmente deve-se principalmente à presença de sais incrustados e partículas em suspensão.

A Figura 5.4 destaca o material inerte e as morfologias microbianas predominantes na amostra.

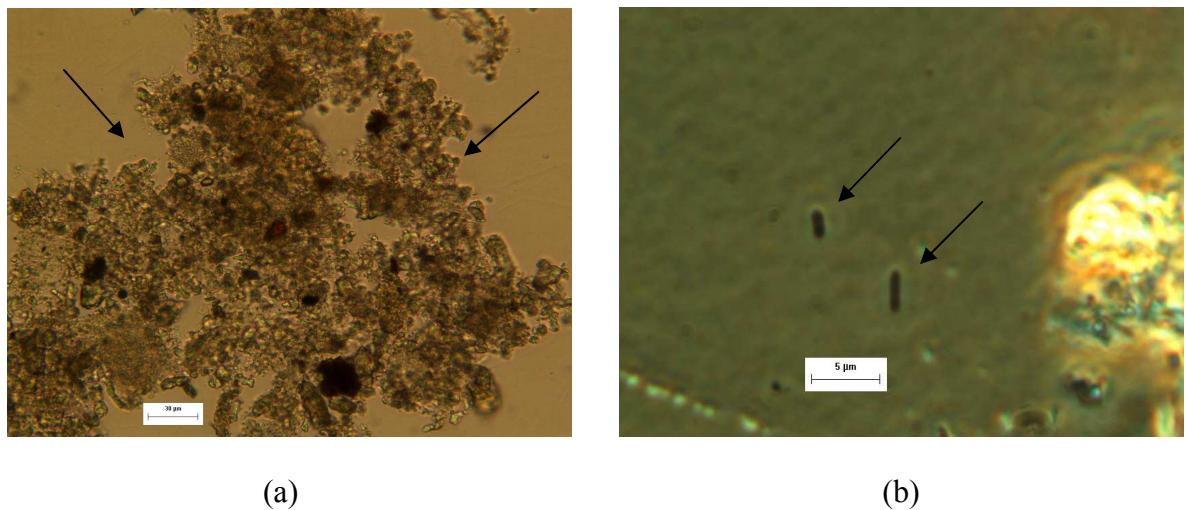


Figura 5.4 – (a) Microscopia óptica: material inerte; (b) Microscopia óptica de contraste de fase das morfologias microbianas: bacilos

## 6. CONCLUSÕES

A água de reuso apresentou valores maiores que os recomendados pela U. S. EPA para uso em torres de resfriamento para os parâmetros nitrogênio amoniacal e fosfato. No sistema de tratamento de esgoto, a quase ausente nitrificação provavelmente deveu-se à deficiência de aeração e ao baixo tempo de detenção celular do lodo no sistema, enquanto a baixa remoção de fosfato pode ter ocorrido devido à inexistência de mistura rápida para dispersar o coagulante (PAC) e/ou dosagem insuficiente do mesmo.

Devido às características de projeto e operação do sistema de resfriamento, a água de alimentação se concentrou 5,6 vezes, e a razão de concentração entre a água presente no tanque central e a água de alimentação (R) foi de 5,4 vezes. No entanto, apenas o fosfato apresentou R próximo a esse valor. Os parâmetros DQO e o nitrogênio amoniacal apresentaram  $R < 5,4$ , enquanto o nitrito e o nitrato,  $R > 5,4$ . Para a DQO, essa diferença está ligada à ocorrência de degradação de matéria orgânica no tanque central; e para os compostos nitrogenados, à nitrificação, ou seja, conversão de amônia a nitrito e nitrato.

O lodo coletado no tanque central do sistema de resfriamento apresentou baixa quantidade de matéria orgânica, indicando sua estabilização, e quantidade significativa de biomassa. Os organismos predominantes na biomassa foram os bacilos e as bactérias nitrificantes. O crescimento desses organismos esteve ligado à presença de matéria orgânica e nitrogênio amoniacal ( $52 \pm 9$  mg/L) na água de reuso afluente ao sistema de resfriamento e ao fato de que o tanque central apresentou condições ambientais (OD, pH e temperatura) favoráveis para ocorrência de processos de degradação da matéria orgânica e nitrificação.

O lodo coletado nos tubos de um dos trocadores de calor apresentou alta quantidade de material inerte e pouca biomassa. O material inerte provavelmente constituiu-se de sais

incrustados e sólidos suspensos fixos, pois a temperatura alta, próxima aos 42°C, favoreceu a precipitação de alguns sais (como por exemplo os carbonatos), e a evaporação de grande parte da água resultou no aumento da concentração dos sólidos suspensos presentes na água de alimentação. A escassez de biomassa possivelmente deveu-se à alta temperatura, uma vez que a temperatura de 42°C é desfavorável para o crescimento de boa parte dos organismos aeróbios presentes nos sistemas de tratamento de esgotos.

A partir dessas conclusões, recomendam-se as seguintes ações para projeto e operação do reuso de água em sistemas de água de resfriamento:

- Promover a nitrificação no sistema de tratamento de esgoto, evitando a afluência de amônia ao sistema de resfriamento (amônia é corrosiva para o cobre) e o crescimento de biomassa para sua degradação (biomassa pode prejudicar a troca térmica nas torres de resfriamento e nos trocadores de calor);
- Promover a desnitrificação no sistema de tratamento de esgoto (nitrato possibilita o crescimento biológico, principalmente de algas);
- Estabelecer um tratamento intermediário entre as torres de resfriamento e o recalque da vazão de recirculação para o trocador de calor. Valores de turbidez e SST poderiam ser diminuídos através de processos físicos de separação; e a DQO e o fósforo poderiam ser reduzidos através da coagulação química e floculação, seguidos de separação física;
- Variar a vazão de purga conforme a vazão de alimentação, evitando assim riscos de a concentração salina no sistema aumentar acima do valor de projeto quando a vazão de alimentação foi mais alta que a média;
- Manter o ciclo de concentração do sistema de resfriamento entre 2 e 5, seguindo a recomendação de Asano et al. (2006).

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APHA/AWWA/Water Environment Federation. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 20th ed. Washington, DC, USA, 1998.

ASANO, T. *et al.* Water Issues: Current Status and the Role of Water Reclamation and Reuse. In: \_\_\_\_\_. **Water Reuse: issues, tecnologies, and applications**. United States of America: Metcalf & Eddy, 2007. Cap. 1, p.4-33.

BARNES, D.; BLISS, P.J. **Biological control of nitrogen in wastewater treatment**. Great Britain: Cambridge University, 1983.

BRAGA, B; REBOUÇAS, A. DA C.; TUNDISI, J.G. A reforma institucional do setor de recursos hídricos. In: BRAGA, B; REBOUÇAS, A. DA C.; TUNDISI, J.G. (Organizadores). **Águas Doces no Brasil. Capital Ecológico, Uso e Conservação**. São Paulo: Escrituras, 2006. Cap. 20, p.639-675.

BRAGA, B; LANNA, A.E. Hidroeconomia. In: BRAGA, B; REBOUÇAS, A. DA C.; TUNDISI, J.G. (Organizadores). **Águas Doces no Brasil. Capital Ecológico, Uso e Conservação**. São Paulo: Escrituras, 2006. Cap. 19, p.607-637.

BURTON, F.L.; STENSEL, H.D.; TCHOBANOGLOUS, G. Water Reuse. In: \_\_\_\_\_. **Wastewater Engineering. Treatment and Reuse**. New York: McGraw-Hill, 2003. Cap. 13, p.1345-1443.

CRITES, R; TCHOBANOGLOUS, G. **Small and Decentralized Wastewater Management Systems**. United States of America: McGraw-Hill, 1998.

\_\_\_\_\_. Water Reuse Applications: An Overview. In: \_\_\_\_\_. **Water Reuse: issues, tecnologies, and applications**. United States of America: Metcalf & Eddy, 2007. Cap. 16, p.930-947.

\_\_\_\_\_. Agricultural Uses of Reclaimed Water. In: \_\_\_\_\_. **Water Reuse: issues, tecnologies, and applications**. United States of America: Metcalf & Eddy, 2007. Cap. 17, p.947-1038.

\_\_\_\_\_. Industrial Uses of Reclaimed Water. In: \_\_\_\_\_. **Water Reuse: issues, tecnologies, and applications**. United States of America: Metcalf & Eddy, 2007. Cap. 19, p.1103-1165.

CLARKE, R.; KING, J. **The Atlas of Water**. Tradução de Anna Maria Quirino. São Paulo: Publifolha, 2005.

CORTINOVIS, G.F.; SONG, T.W. **Funcionamento de uma Torre de Resfriamento de Água**. Revista de Graduação da Engenharia Química, São Paulo, v. 14, p. 5-10, 2005.

DREW PRODUTOS QUÍMICOS LTDA. **Princípios de tratamento de água industrial**. Rio de Janeiro: Drew, 1979.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **Guidelines for water reuse**. Washington (DC): 1992.

\_\_\_\_\_. **Water Reuse Regulations and Guidelines in the U.S.** Washington (DC): 2004.

EVANYLO, G.K. et al. **Water Reuse: Using Reclaimed Water for Irrigation**. Virgínia: 2009. Disponível em: <http://pubs.ext.vt.edu/452/452-014/452-014.html>. Acesso em 15 set. 2009.

FIGUEROA, L.A.; SILVERSTEIN, J. **The effect of particulate organic matter on biofilm nitrification**. Colorado: Water Environment Research, 1992.

FLORES, L.C. et al. **Reuso de água e suas implicações jurídicas**. São Paulo: Navegar, 2003.

HASLEGO, C.M.A. **Basics of industrial heat transfer**. Disponível em: [www.cheresources.com/heat\\_transfer\\_basics.shtml](http://www.cheresources.com/heat_transfer_basics.shtml). Acesso em: 20 set. 2009.

HESPANHOL, I. Potencial de reuso de água no Brasil: agricultura, indústria, municípios, recarga de aquíferos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, dez. 2002. ed. Comemorativa, v.7, n.4.

HORAN, N.J. **Biological Wastewater Treatment Systems: Theory and Operation**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 1990.

MACHADO DA CUNHA, P.; WHATELY, M. **Guarapiranga 2005: como e porque São Paulo está perdendo esse manancial: Resultados do diagnóstico socioambiental participativo da bacia hidrográfica da Guarapiranga**. São Paulo: Instituto Socioambiental, 2006.

JORDÃO, E.P.; PESSOA, C.A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 3. ed. Rio de Janeiro: ABES, 1995.

KEEN, S.; PUCKORIUS, P.; STRAUSS, D.S. **Boiler water treatment for low and moderate-pressure plants**. 1987.

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

LA RIVIÈRE, J.W.M. **Advances in Microbial Ecology**. New York: Plenum Press, 1977.

MACÊDO, J.A.B. **Águas & Águas**. Juiz de Fora: Ortofarma, 2000.

MANCUSO, P.C.S. **Reuso de Água para Torres de Resfriamento**. São Paulo: Biblioteca Virtual da Fsp Usp. 2001.

McKELVEY, K.K.; BROOKE, M. **The Industrial Cooling Tower**. New York: Elsevier, 1959.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). **Regulamento Sanitário Internacional da Organização Mundial de Saúde (OMS)**. Boston: Assembléia Geral da OMS, 1973.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PROTEÇÃO AMBIENTAL (PROAM). **Termo de referência para metrópoles saudáveis**. São Paulo: dez. 2007.

REBOUÇAS, A.C. Água Doce no mundo e no Brasil. In: BRAGA, B; REBOUÇAS, A. DA C.; TUNDISI, J.G (Organizadores). **Águas Doces no Brasil. Capital Ecológico, Uso e Conservação**. São Paulo: Escrituras, 2006. Cap. 1, p.1-35.

REY, L. **Planejar e Redigir Trabalhos Científicos**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 1993.

SONG, T.W. **Condições de Processo num Trocador de Calor**. Mauá: EPUSP, s.d.

UNITED NATIONS. **Water for industrial use economic and social council**. New York: United Nations, 1958.

VON SPERLING, M. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais; 1995.

\_\_\_\_\_. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias. Princípios básicos do tratamento de esgotos.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais; 1996.

\_\_\_\_\_. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias. Lodos ativados.** 2.ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais; 2002.

## ANEXO A - Análises Físico-químicas

Tabela A.1 – Valores de vazão de alimentação, vazão de purga, cloro, temperatura e OD

Coleta	Vazão de alimentação (m <sup>3</sup> /d)	Purga (m <sup>3</sup> /d)	Cloro (mg/L)		T °C		OD (mg/L)	
			Ponto 3	Ponto 4	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 3	Ponto 4
1	82	3,76	0,9	0,4	22,2	23	3,1	4,4
2	81	3,76	1,2	0,5	23,4	22,8	2,9	4,5
3	67	3,76	1	0,4	22,9	21,6	3,3	4,4
4	60	3,76	0,5	0,4	24,1	23,7	3,0	3,7
5	51	3,76	0,8	0,5	25	23,8	3,2	4,0
6	46	3,76	0,8	0,6	25,5	24,4	2,7	3,8
7	67	3,76	1	0,8	21,5	21,5	3,4	3,9
8	63	3,76	0,8	0,6	21,6	21,4	3,7	4,2
9	24	3,76	0,8	0,5	22	21,6	3,5	4,4
10	34	3,76	0,6	0,5	21,8	21,7	3,6	5,8
11	31	3,76	0,8	0,8	23,6	20,9	3,7	5,7
12	24	3,76	0,8	0,8	22,9	19,9	4,7	6,2
13	24	3,76	0,8	0,8	19,8	19,1	4,5	6,1
14	26	3,76	0,8	0,8	20	20	4,6	5,4
15	36	3,76	0,8	0,8	19,2	18,5	4,2	5,6
16	42	3,76	0,8	0,8	18,9	18,4	4,4	5,5
17	37	3,76	0,8	0,8	19,3	18,7	4,2	5,6
18	43	3,76	0,8	1	21,1	21,9	4,5	5,8
19	33	3,76	0,8	0,8	22,8	22,4	4,3	5,7
20	58	3,76	0,8	0,8	26,8	26,6	4,2	5,9

Tabela A.2 – Valores de pH, DQO, NTK e N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>

Coleta	pH		DQO (mg/L)		NTK (mg/L)		N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	
	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 3	Ponto 4
1	7,18	7,90	84	157	45	18	41	15
2	7,20	7,01	83	160	37	18	33	16
3	7,13	6,56	83	164	63	22	58	18
4	7,01	6,58	85	175	65	32	61	28
5	7,23	6,30	53	202	71	15	67	13
6	7,20	6,14	55	262	64	25	62	21
7	7,11	6,74	42	276	54	26	51	23
8	7,68	6,27	61	305	57	24	53	22
9	7,25	6,10	38	277	59	47	58	45
10	7,40	6,56	59	253	64	49	62	46
11	7,16	7,32	50	240	62	35	58	32
12	7,00	6,87	51	242	61	24	55	22
13	7,16	7,01	60	262	59	12	53	10
14	7,29	7,54	76	219	56	17	52	15
15	6,30	7,22	35	146	39	10	37	6
16	6,47	7,52	78	185	42	11	39	8
17	6,75	7,90	81	204	49	12	45	7
18	6,83	8,01	50	245	57	10	55	7
19	7,08	8,20	63	267	46	12	45	9
20	7,63	8,33	70	258	59	15	58	10

Tabela A.3 – Valores de N-orgânico, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup> e PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>

Coleta	N-orgânico (mg/L)		N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)		N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/L)		PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> (mg/L)	
	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 3	Ponto 4
1	4	3	0,02	68,9	0,009	0,44	3,6	15,6
2	4	2	0,02	74,2	0,002	0,44	3,2	22,3
3	5	4	0,15	77,9	0,022	1,85	4,2	19,5
4	4	4	0,15	81,1	0,019	4,79	3,7	17,5
5	4	2	0,13	72,7	0,002	1,18	4,0	14,9
6	2	4	0,14	77,3	0,002	2,47	3,2	17,5
7	3	3	0,02	74,0	0,002	4,84	3,0	16,7
8	4	2	0,14	86,6	0,003	6,18	4,3	18,1
9	1	2	0,14	85,1	0,002	1,30	2,8	19,0
10	2	3	0,15	83,8	0,003	1,05	4,4	16,9
11	4	3	0,11	62,3	0,009	1,47	6,1	18,4
12	6	2	0,09	69,2	0,002	2,16	3,7	19,7
13	6	2	0,07	63,4	0,001	1,58	3,2	20,4
14	4	2	0,11	57,3	0,004	1,96	4,4	18,9
15	2	4	0,01	36,2	0,001	0,31	2,0	15,1
16	3	3	0,02	32,6	0,001	0,49	2,3	16,1
17	4	5	0,02	31,7	0,003	0,77	2,9	17,6
18	2	3	0,07	57,5	0,009	4,84	4,0	17,5
19	1	3	0,17	56,0	0,003	5,48	3,4	18,5
20	1	5	0,09	56,1	0,004	5,84	4,0	17,4