Trabalho Final de Mestrado em Engenharia Ambiental
Modalidade: Dissertação

REÚSO DE ESGOTOS SANITÁRIOS TRATADOS PARA FINS DE ÁGUA DE REPOSIÇÃO EM TORRES DE RESFRIAMENTO – SISTEMAS SEMI-ABERTOS

Autora: *Lilian Pereira Machado*
Orientadora: *Thereza Christina de Almeida Rosso*
Co-orientadora: *Juacyara Carbonelli Campos*

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

Fevereiro de 2004

REÚSO DE ESGOTOS SANITÁRIOS TRATADOS PARA FINS DE ÁGUA DE REPOSIÇÃO EM TORRES DE RESFRIAMENTO – SISTEMAS SEMI-ABERTOS

Lilian Pereira Machado

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

Aprovada por:

_____

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

_____

Prof[a]. Juacyara Carbonelli Campos, D. Sc.
PEAMB/UERJ

_____

Prof. Renato Parkinson Martins, D.Sc.
PETROBRÁS

_____

Prof. Odir Clécio da Cruz Roque, D. Sc.
FIOCRUZ/PEAMB - UERJ

Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Fevereiro de 2004

MACHADO PEREIRA, LILIAN

Reúso de esgotos sanitários tratados para fins de água de reposição em torres de resfriamento – sistemas semi-abertos. [Rio de Janeiro] 2004.

xxii, 181 p. 29,7 cm (FEN/UERJ, Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental - Área de Concentração: Saneamento Ambiental - Controle da Poluição Urbana e Industrial, 2004.)

Dissertação - Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

1. Reúso de águas
2. Torres de refrigeração
3. Água de reposição
4. Clima

I. FEN/UERJ II. Título (série)

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

REÚSO DE ESGOTOS SANITÁRIOS TRATADOS PARA FINS DE ÁGUA DE REPOSIÇÃO EM TORRES DE RESFRIAMENTO – SISTEMAS SEMI-ABERTOS

Lilian Machado Pereira

Fevereiro de 2004

Orientadora: Thereza Christina de Almeida Rosso
Co-orientador: Juacyara Carbonelli Campos
Área de Concentração: Saneamento Ambiental - Controle da Poluição Urbana e Industrial

Considerando a atual divulgação das questões ambientais e as pressões econômicas e legais, muitos engenheiros têm almejado economizar água potável e limitar os despejos líquidos. A torre de resfriamento é tipicamente um dos maiores consumidores de água em várias indústrias e também em outros estabelecimentos. Conseqüentemente, esse é um dos locais mais prováveis para se aplicar o reúso de água. O aumento do reúso de água na substituição de água doce ou potável requer uma compreensão dos impactos potenciais como *fouling*, corrosão e depósito, além do conhecimento dos fatores que influenciam no comportamento da água de recirculação, tais como temperatura, tratamento químico, etc. Experiências desse tipo de reúso não têm sido muito comuns no Brasil e a tendência é copiar do exterior modelos de reúso e padrões de qualidade de água, acreditando que isso conduzirá a resultados bem sucedidos de reúso de água como água de reposição em torre de resfriamento. Embora o assunto não se esgote com esse trabalho, esse estudo identifica um parâmetro importante que pode modificar os resultados esperados para os usuários finais e provedores de tratamento químico. Trata-se do clima e da sua influência na taxa de evaporação e nos ciclos de concentração teóricos. Uma comparação desses ciclos entre cidades nacionais e internacionais é realizada, utilizando-se dados de uma torre em funcionamento que atende a um sistema de refrigeração de expansão indireta. Um estudo piloto para avaliar a possibilidade de se usar esgoto sanitário tratado a nível terciário como água de reposição nesse caso, também é apresentado.
Palavras-Chave: Reúso de Águas, Torres de Refrigeração, Água de Reposição, Clima.

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

REUSE OF TREATED SEWAGE EFFLUENT AS COOLING TOWER MAKEUP – OPEN RECIRCULATING COOLING SYSTEMS

Lilian Pereira Machado

February 2004

Advisors: Thereza Christina de Almeida Rosso
Juacyara Carbonelli Campos
Area: Environmental Sanitation - Urban and Industrial Pollution Control

Considering today`s widespread environmental issues and associated legal and economical driving forces, many engineers have aspired to conserve fresh water and limit wastewater. The cooling tower is typically one of the largest consumers of water within many industries and also within other establishments. Consequently, it`s one of the most likely place to reuse water. The increase in reuse waters replacing fresh water supplies in cooling tower systems requires an understanding of potencial impacts like fouling, corrosion and scale, as well as requires a knowledge of factors that can influence the recirculating water behavour such as temperature, chemical treatment, etc. Experiences in this kind of reuse has not been very usual in Brazil, and the tendency is to copy models and water quality standards from abroad, believing that it`s addressing to successfully reclaimed water utilization as makeup to cooling water systems. Though not all differences are discussed, this work identifies one important parameter that can possibly modify the results expected for the end users and water treatment suppliers. That's the climate and it`s influence in the evaporation rate and in the theoretical cycles of concentration. A comparison of those cycles between national and international cities is done. It`s based on informations of an operating cooling tower which serves an indirect expansive cooling system. A pilot study to evaluate the possibility of reusing a treated terciary sewage in this case, is also presented.
Key words: Water Reuse, Cooling Tower, Makeup Water, Climate.

Aos meus pais Janilse e Paulo

Ao meu marido João

À minha filha Déborah

AGRADECIMENTOS

- A Deus por sua infinita doação.
- Aos meus dedicados pais que sempre me apoiaram e que me incentivaram.
- Ao meu amado marido João e à minha doce filha Déborah pela compreensão demonstrada.
- Ao corpo docente do curso de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental – PEAMB / UERJ pelas aulas enriquecedoras e pela oportunidade de adquirir esse título.
- À orientadora Thereza Rosso e à co-orientadora Juacyara, pela extrema boa vontade demonstrada. Sem o incentivo de ambas seria impossível finalizar o trabalho.
- Ao Prof. Odir Clécio da Cruz Roque e ao Prof. Renato Parkinson Martins, por aceitarem participar da banca avaliadora.
- À Empresa AQUALAB Química e Serviços LTDA., na pessoa do Diretor, Engenheiro Irineu Afonso Machado pelo fornecimento do caso estudado e pelo fornecimento de fotografias.
- Ao Instituto Militar de Engenharia, na pessoa do Professor Antônio Luiz dos Santos, docente das cadeiras de Sistemas Térmicos 1 e 2 do Departamento de Mecânica e Materiais, pela extrema gentileza de ter cedido boa parte de seu tempo em elucidações sobre processos psicrométricos e sistemas de refrigeração.
- À empresa Alpina Equipamentos, pelo fornecimento de catálogos e informes técnicos e por informações transmitidas por e-mail e telefone.
- À empresa Delta Termo Engenharia LTDA, na pessoa do Engenheiro Arides Albizzat e na pessoa do Engenheiro Luiz Felipe de Carvalho Rocha, pelas informações técnicas transmitidas pessoalmente e por telefone.
- Ao Instituto Nacional de Meteorologia, na pessoa do Diretor, Meteorologista Luiz Carlos Austim e na pessoa do Meteorologista Armando Sá, pela disponibilidade em fornecer-me dados e acompanhar-me pelas dependências da Estação Meteorológica Principal do Rio de Janeiro, para que eu pudesse visualizar a estação e melhor compreender algumas técnicas utilizadas em meteorologia.
- Ao International Business Communications, por ter concedido acesso em 20/07/02 ao Work Shop “Estruturando um Plano de Ação para Racionalização e Reutilização da Água na Indústria, Reduzindo os custos e Adequando a Empresa à Legislação e contaminantes ambientais” e também por ter cedido o material do Work Shop e da Conferência Nacional (19/07/02) “Adotando as Melhores Práticas de Racionalização do Uso e Reúso da Água, Transformando Processos Industriais para Reduzir Custos e Minimizar os Impactos Ambientais”.

- A todos os colegas que comigo estudaram neste curso, pelos exemplos e pelo compartilhamento de experiências.

- A Giselle Honorio e Rodrigo Bessa por todo o auxílio na parte de digitação.

... Perdoai-nos, Senhor Misericordioso, pela contaminação

das águas, pelo desperdício e pelo egoísmo

que privam os irmãos desse bem tão necessário à vida.

Dai-nos, ó Espírito de Deus, um coração fraterno e solidário,

para usarmos a água com sabedoria e prudência

e para não deixar que ela falte a nenhuma de vossas criaturas ...

Oração da Campanha da Fraternidade - 2004

CNBB.

SUMÁRIO

RESUMO	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE TABELAS	xvi
RELAÇÃO DE SIGLAS E ABREVIATURAS	xix
1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	01
2. CLASSES, LEGISLAÇÕES, DEMANDAS E CUSTOS	07
2.1 A Lei das Águas	07
2.2 Classes	08
2.3 Portaria Nacional de Potabilidade	11
2.4 Usos Múltiplos, seus Critérios de Uso e Padrões	13
2.4.1 Padrões de Qualidade para Águas de Sistemas de Abastecimento Público	14
2.4.2 Padrões de Qualidade de Água para Usos Industriais	17
2.4.3. Outras Classificações de Consumo	23
2.4.4 Padrões de Qualidade para Águas de Reúso Industrial	24
2.5 Demanda e Custo de Água	28
2.5.1. Estatísticas de Usos Múltiplos	28
2.5.2. Demanda de Água dos Setores Industriais e Comerciais	29
2.5.2.1 Demanda de Água dos Setores Industriais sob a Perspectiva de Uso em Refrigeração	32
2.5.3 Custos da Água	36
2.5.3.1 Custo da Água no Mundo	36
2.5.3.2 Custo da Água na Bacia do Paraíba do Sul	37
3. SISTEMAS DE RESFRIAMENTO	39
3.1 Tipos de Sistemas de Resfriamento	39
3.1.1 Sistemas Abertos sem Recirculação de Água	39
3.1.2 Sistemas Fechados com Recirculação de Água Fria	40
3.1.3 Sistemas Abertos com Recirculação de Água ou Sistemas Semi-Abertos	41
3.2 Torres de Resfriamento: Aspectos Construtivos e Operacionais	43
3.2.1 Usos de Torres de Resfriamento	43
3.2.2 Funcionamento de uma Torre de Resfriamento	44

3.2.3 Tipos de Torres de Resfriamento 49
3.2.4 Enchimento de Contato para Torres de Resfriamento de Água 54
3.2.5 Manutenção das Torres de Resfriamento 57
3.3 Equações que Descrevem o Funcionamento de Torres de Resfriamento 58
3.3.1 Balanço Mássico 58
3.3.2 Aspectos Psicrométricos 61
3.3.3 Equações de Projeto de uma Torre de Resfriamento 67
3.4 Climatologia 76
3.4.1 Diversidade de Climas Brasileiros 76
3.4.2 Curvas e Tabelas Representativas do Comportamento Climatológico Brasileiro 78
4. QUALIDADE DA ÁGUA REQUERIDA PARA REPOSIÇÃO 86
4.1 Padrões Físico-Químicos Usuais em Literaturas sobre Reúso 86
4.2 Principais Problemas em Sistemas Semi-Abertos 91
4.2.1 Corrosão 91
4.2.2 Principais Tipos de Corrosão em Sistemas Abertos com Retorno 93
4.2.3 Conseqüência de Microorganismos Presentes em Água de Resfriamento 94
4.2.4 Formação de Incrustações e Depósitos 95
4.2.5 Principais Agentes Incrustantes 96
4.3 Índices de Corrosão e Incrustação 99
4.3.1 Índice de Saturação de Langelier (ISL) 100
4.3.2 Índice de Estabilidade de Ryznar (IR) 102
4.3.3 Índices Específicos para Água de Resfriamento 102
4.3.3.1 Índice de Larson-Skold (IL) 102
4.3.3.2 Índice de Estabilidade de Puckorius (IP) 103
4.3.4. Comentários a Respeito dos Índices Apresentados 103
4.4 Características Corrosivas das Águas Brasileiras 104
4.5 Tecnologias de Tratamento Utilizadas em Reúso de Efluentes e Esgotos Sanitários 106
4.6 Tratamentos e Pré-tratamentos para Minimizar a Incrustação e Corrosão 113
4.7 Controle e Monitoramento de Corrosão e Incrustação 117
4.7.1 Controle de Corrosão e Incrustação 117
4.7.2 Monitoramento de Corrosão 121
4.7.2.1 Perda de Massa 121

4.7.2.2 Detalhamento do Método para Determinação da Taxa de Corrosão 124
4.8 Considerações para Melhor Gestão dos Sistemas Semi-Abertos e Melhor Previsão dos Impactos do Reúso de Efluentes em Torres de Resfriamento 126
5. ESTUDO DE CASO 137
5.1 Descrição do Teste Piloto 139
5.1.1 FASE 1 - Ensaio em Branco 139
5.1.2 FASE 2 - Ensaio com Tratamento Químico 140
5.2 Resultados 140
5.2.1 Resultado das Análises Físico-Químicas 140
5.2.2 Medidas de Controle e Resultados da Taxa de Corrosão do Ensaio em Branco - FASE 1 141
5.2.3 Medidas de Controle e Resultados da Taxa de Corrosão do Ensaio com Tratamento Químico - FASE 2 143
5.3 Discussão dos Resultados 146
5.3.1. FASE 1 146
5.3.2. FASE 2 146
5.4 Considerações sobre o Consumo de Água e Produtos Químicos 147
5.5 Cálculo da Taxa de Evaporação em Cidades de Climas Variados e sua Respectiva Influência no Ciclo de Concentração da Água 148
5.5.1 Metodologia de Cálculo 149
5.5.2 Discussão de Resultados 164
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES 165
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 170
8. GLOSSÁRIO 180

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Distribuição espacial das indústrias no Brasil. 2

Figura 2.1. Usos da água no Brasil. 29

Figura 3.1. Sistema de água de resfriamento aberto sem recirculação de água. 40

Figura 3.2. Sistema de água de resfriamento fechado. 41

Figura 3.3. Sistema de água de resfriamento aberto com recirculação de água. 43

Figura 3.4. Eliminadores de gotas. 45

Figura 3.5. Esquema de torre de ventilação natural. 50

Figura 3.6. Esquema de torre mecânica de tiragem forçada. 52

Figura 3.7. Esquema de torre mecânica contracorrente. 53

Figura 3.8. Esquema de torre mecânica corrente cruzada. 54

Figura 3.9. Vários tipos de enchimento. 55

Figura 3.10. Psicrômetro. 65

Figura 3.11. Carta psicrométrica. 66

Figura 3.12. Balanço térmico em torre de resfriamento. 69

Figura 3.13. Curva de resfriamento. 70

Figura 3.14. Água evaporada expressa em percentual da vazão. 75

Figura 3.15. Percentual da carga térmica removida por evaporação. 75

Figura 3.16. Perfil climático brasileiro. 77

Figura 3.17. Comportamento típico da temperatura e umidade relativa, durante o dia. 78

Figura 3.18. Curvas climatológicas das cidades de Manaus, Belo Horizonte e Rio de Janeiro. 80

Figura 3.19. Curvas climatológicas das cidades de São Paulo, Porto Alegre e Campos do Jordão. 80

Figura 3.20. Curvas climatológicas das cidades de Brasília e Salvador. 81

Figura 3.21. Curvas climatológicas das cidades de Recife e Fortaleza. 81

Figura 3.22. Comportamento aproximado da variação mensal das temperaturas de bulbo úmido e seco das cidades de Manaus, Rio de Janeiro e São Paulo. 82
Figura 3.23. Comportamento aproximado da variação mensal das temperaturas de bulbo úmido e seco das cidades de Salvador, Brasília e Belo Horizonte. 82
Figura 3.24. Comportamento aproximado da variação mensal das temperaturas de bulbo úmido e seco das cidades de Porto Alegre, Recife e Fortaleza. 83
Figura 3.25. Comportamento aproximado da variação mensal das temperaturas de bulbo úmido e seco da cidade de Campos do Jordão. 83
Figura 3.26. Comportamento aproximado da variação mensal das temperaturas de bulbo úmido e seco das cidades de Nanci, München e Lisboa. 84
Figura 3.27. Comportamento aproximado da variação mensal das temperaturas de bulbo úmido e seco das cidades de Manchester, Montreal Dorval e Nova York. 84
Figura 3.28. Comportamento aproximado da variação mensal das temperaturas de bulbo úmido e seco das cidades de Paris, Helsinque e Berlin. 85
Figura 3.29. Comportamento aproximado da variação mensal das temperaturas de bulbo úmido e seco das cidades de Estocolmo e Roma. 85
Figura 4.1. Diagrama de Langelier. 101
Figura 4.2. Dimensões dos principais componentes microscópicos e moleculares presentes em águas naturais e tipos de membranas utilizáveis para a sua separação. 109
Figura 4.3. Árvore de teste 123
Figura 4.4. Diagrama de orientação para técnicas de simulações. 128
Figura 4.5. Esquema HERO PROCESS. 132
Figura 5.1. Diagrama simplificado do sistema de expansão indireta. 138
Figura 5.2. Cupom Nº 5. 143
Figura 5.3. Cupom Nº 24. 143
Figura 5.4. Cupom Nº 7. 145
Figura 5.5. Cupom Nº 8. 145
Figura 5.6. Cupom Nº 4. 145
Figura 5.7. Cupom Nº 3. 145
Figura 5.8. Esquema da dissipação de calor visto em carta psicrométrica. 150
Figura 5.9. Seqüência gráfica para elaboração das Tabelas 5.6 à 5.13. 151

Figura 5.10. Ciclos de concentração teóricos máximos - cidades nacionais - janeiro. 153

Figura 5.11. Ciclos de concentração teóricos máximos - cidades internacionais - janeiro. 154

Figura 5.12. Ciclos de concentração teóricos máximos - cidades nacionais - fevereiro. 156

Figura 5.13. Ciclos de concentração teóricos máximos - cidades internacionais - fevereiro. 157

Figura 5.14. Ciclos de concentração teóricos máximos - cidades nacionais - junho. 159

Figura 5.15. Ciclos de concentração teóricos máximos - cidades internacionais - junho. 160

Figura 5.16. Ciclos de concentração teóricos máximos - cidades nacionais - julho. 162

Figura 5.17. Ciclos de concentração teóricos máximos - cidades internacionais - julho. 163

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Classificação das águas (CONAMA N^{o}. 20). 9

Tabela 2.2. Usos preponderantes da água (CONAMA N^{o}. 20). 10

Tabela 2.3. Parâmetros de potabilidade de águas para consumo humano (Portaria 1469 de 29/12/2000, Ministério da Saúde). 15

Tabela 2.4. Características das águas purificadas e para injetáveis segundo a USP e a farmacopéia européia. 19

Tabela 2.5. Qualidade de água destinada aos processos industrias. 20

Tabela 2.6. Qualidade da água requerida para alimentação de caldeiras. 22

Tabela 2.7. Valores típicos a serem mantidos na água dos sistemas de ar condicionado. 23

Tabela 2.8. Qualidade da água industrial na Holanda com água do Rio Reno transportada a 70 quilômetros de distância. 26

Tabela 2.9. Requisitos da qualidade da água para reúso. 27

Tabela 2.10. Disponibilidade e estimativas de consumo hídrico no Brasil. 28

Tabela 2.11. Demanda de água dos setores industriais. 30

Tabela 2.12. Média de demanda de água de alguns setores industriais por unidade de produção. 30

Tabela 2.13. Média de demanda de água da categoria comercial. 31

Tabela 2.14. Consumo de água em diversos estabelecimentos de Denver, Colorado, USA. 33

Tabela 2.15. Desagregação do consumo (%) 34

Tabela 2.16. Preço por m^3 da tarifa de água em 15 países do mundo em setembro de 1999. 36

Tabela 2.17. Alternativas para água industrial em US$/$m^3$ 37

Tabela 2.18. Empresas que utilizam água reciclada. 38

Tabela 3.1. Características da água como função da concentração (ppm). 47

Tabela 3.2. Programa de manutenção preventiva para torre de resfriamento. 58

Tabela 3.3. Composição aproximada do ar seco. 62

Tabela 3.4. Perdas por evaporação. 72

Tabela 3.5. Fator F. 73

Tabela 4.1. Valores típicos máximos para água de recirculação em sistemas semi-abertos de metalurgia aço-carbono. 87

Tabela 4.2. Recomendações de parâmetros de recirculação de água em torres de resfriamento - processos aplicados para plantas químicas e petroquímicas. 88
Tabela 4.3. Diretrizes gerais do CTI – diretrizes gerais para água de recirculação. 89
Tabela 4.4. Qualidade de água de reposição ou *makeup* para uso em sistemas de resfriamento com circuitos semi-abertos, com recirculação de água. 90
Tabela 4.5. Fatores que afetam a corrosão. 92
Tabela 4.6. Tipos de corrosão. 93
Tabela 4.7. Avaliação do Índice de Ryznar. 102
Tabela 4.8. Avaliação dos índices de incrustação. 104
Tabela 4.9. Características de águas de *makeup* brasileiras. 105
Tabela 4.10. Índice de Langelier e Ryznar para água de *makeup* tipo II. 106
Tabela 4.11. Índice de Langelier e Ryznar para água de *makeup* tipo III. 106
Tabela 4.12. Possíveis contaminantes em refinaria e suas opções de tratamento. 114
Tabela 4.13. Diretrizes de água de resfriamento. 115
Tabela 4.14. Tempo de desconcentração dos biocidas para diversas reduções de dosagem. 119
Tabela 4.15. Taxa de corrosão do aço doce. 126
Tabela 4.16. Taxa de corrosão do cobre. 126
Tabela 4.17. Impactos potenciais dos constituintes da água. 134
Tabela 4.18. Impacto corrosivo dos constituintes da água em tubos de trocador de calor. 135
Tabela 4.19. Impacto da amônia sobre ligas de cobre. 135
Tabela 4.20. Impacto dos cloretos sobre aço inoxidável. 136
Tabela 5.1. Análises físico-químicas. 141
Tabela 5.2. Medidas de controle da Fase 1. 142
Tabela 5.3. Resultados obtidos com os cupons da Fase 1. 142
Tabela 5.4. Medidas de controle da Fase 2. 144
Tabela 5.5. Resultados obtidos com os cupons da Fase 2. 144
Tabela 5.6. Simulação de dissipação de calor em torre de resfriamento em cidades nacionais utilizando médias do mês de janeiro. 152
Tabela 5.7. Simulação de dissipação de calor em torre de resfriamento em outros países utilizando médias do mês de janeiro. 152
Tabela 5.8. Simulação de dissipação de calor em torre de resfriamento em 155

cidades nacionais utilizando médias do mês de fevereiro.
Tabela 5.9. Simulação de dissipação de calor em torre de resfriamento em outros países utilizando médias do mês de fevereiro. 155
Tabela 5.10. Simulação de dissipação de calor em torre de resfriamento em cidades nacionais utilizando médias do mês de junho. 158
Tabela 5.11. Simulação de dissipação de calor em torre de resfriamento em outros países utilizando médias do mês de junho. 158
Tabela 5.12. Simulação de dissipação de calor em torre de resfriamento em cidades nacionais utilizando médias do mês de julho. 161
Tabela 5.13. Simulação de dissipação de calor em torre de resfriamento em outros países utilizando médias do mês de julho. 161
Tabela 5.14. Comparação entre os ciclos mínimos e máximos encontrados nas cidades estudadas. 164

RELAÇÃO DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ANA - Agência Nacional de Águas.

ANVISA - Agência Nacional de Vigilância Sanitária.

ASHRAE - *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc*.

ASTM - *American Standards of Testing and Materials*.

ATP - Adenosina Trifosfato.

AWWA - *American Water Works Association*.

CEDAE - Companhia Estadual de Água e Esgoto.

CEIVAP - Comitê de Integração da Bacia do Paraíba do Sul.

CNBB - Conferência Nacional dos Bispos do Brasil.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente.

COT - Carbono Orgânico Total.

CTI - *Cooling Technology Institute*.

CTI - *Cooling Tower Institute*.

DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio.

DNA - Ácido Desoxirribonucléico.

D.O.U. - Diário Oficial da União.

DQO - Demanda Química de Oxigênio.

EPA - *Environmental Protection Agency*.

ETE - Estação de Tratamento de Esgotos.

FIESP - Federação das Indústrias do Estado de São Paulo.

FUNASA - Fundação Nacional de Saúde.

HERO - *High Efficiency Reverse Osmosis*.

ibc - *International Business Communications*.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

IL - Índice de Larson-Skold.

INT - Instituto Nacional de Tecnologia.

IP - Índice de Estabilidade de Puckorius.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas.

IR - Índice de Estabilidade de Ryznar.

ISL - Índice de Saturação de Langelier.

MARE - Ministério da Administração Federal e Reforma do Estado.

MBAS - Substâncias Reativas ao Azul de Metileno.

NACE - *National Association of Corrosion Engineers*.

NBR - Normas Brasileiras.

OMM - Organização Meteorológica Mundial (vide também WMO).

PDCA - *Plan – Do – Check – Act*.

PE - Farmacopéia Européia.

PW - Água Purificada.

RNA - Ácido Ribonucléico.

RUV - Radiação Ultravioleta.

SAAE - Serviço Autônomo de Água e Esgoto.

SABESP - Companhia de Saneamento do Estado de São Paulo.

SNGRH - Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

STD - Sólidos Totais Dissolvidos.

STS - Sólidos Totais Suspensos.

TBS - Temperatura de Bulbo Seco.

TBU - Temperatura de Bulbo Úmido.

THM - Trihalometanos.

TKN - Nitrogênio Total *Kjeldahl*.

TMG - Tempo Médio de *Greenwich*.

TR - Toneladas de Refrigeração.

USEPA - *United States Environmental Protection Agency* (Agência de Proteção Ambiental Norte Americana).

USP - Farmacopéia Americana.

USP - Universidade de São Paulo.

UV - Ultravioleta.

WFI - Água para Injetáveis.

WMO - *World Meteorological Organization*.

ZLD - Descarga Líquida Zero.

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Devido principalmente à má conservação dos mananciais e problemas de gerenciamento de recursos hídricos, incluindo os problemas de escassez em termos de quantidade e qualidade, o interesse por reúso de efluentes industriais e esgotos sanitários vem aumentando nos últimos anos. Em 1992, o documento consensual apresentado pelos 179 países participantes da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, a Agenda 21, recomendou a todos os países participantes a implementação de políticas de gestão, dirigidas para o reúso e reciclagem de efluentes, integrando proteção da saúde pública de grupos de risco, com práticas ambientalmente adequadas visando principalmente ao desenvolvimento sustentável.

A utilização da água em padrões insustentáveis em nível urbano e industrial certamente não se justifica nos dias atuais. Dentro desse contexto, o estudo da viabilidade técnica e sócio econômica do reúso de água nas suas várias possibilidades é hoje um ponto importante na preservação desse bem natural. Ressalta-se, entretanto, o fato de que, no Brasil, as técnicas de reúso, tanto de efluentes industriais como sanitários tratados não eram, até recentemente, uma prática comum no país. Dessa forma, detalhes técnicos e metodologias a serem aplicadas devem ser investigados com cuidado de forma a se evitarem enganos ao transportar modelos de reúso de efluentes que podem estar funcionando bem há 30 ou 40 anos em outros países, mas que talvez não se ajustem à realidade brasileira, podendo até mesmo trazer danos ambientais ou econômicos.

Segundo HESPANHOL (2003), as possibilidades e formas potenciais do reúso dependem de características, condições e fatores locais, incluindo decisão política, esquemas institucionais e disponibilidade. No contexto nacional, as formas mais significativas do reúso são: urbana, agrícola, industrial e recarga artificial de aqüíferos. Especificamente no âmbito industrial a prática de reúso pode ser aplicada na produção de água para caldeiras, em torres de resfriamento, lavagem de peças e equipamentos, processos industriais, irrigação de áreas verdes de instalações industriais e lavagens de pisos e veículos.

As atividades industriais no Brasil respondem atualmente por aproximadamente 20% do consumo de água, sendo que pelo menos 10% são extraídos diretamente de corpos d'água. Ressalta-se ainda que mais da metade da água utilizada no processo industrial é tratada de forma inadequada ou não recebe nenhuma forma de tratamento. Essas atividades industriais

distribuem-se de forma concentrada nas regiões Sul e Sudeste, apresentando também alguns pólos nas demais regiões, como pode ser observado na **Figura 1.1**.

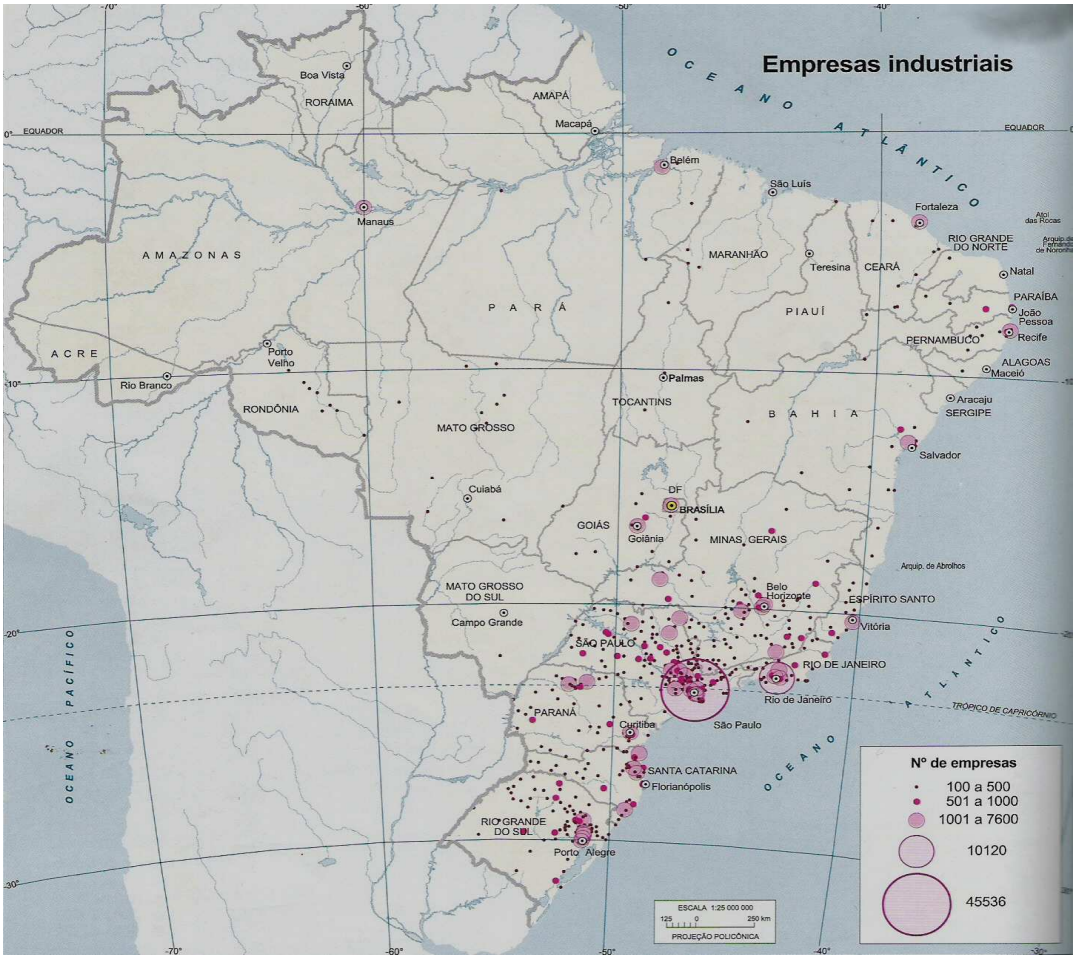


Figura 1.1. Distribuição espacial das indústrias no Brasil.

Fonte: IBGE (2002).

No caso brasileiro, além da pouca utilização das técnicas de reúso, devem ser observados ainda os baixos níveis de tratamento de efluentes sejam estes de origem doméstica ou industrial.

No que se refere ao tratamento de efluentes sanitários, ROQUE (1997), extrapolando a adoção pura e simples de normas técnicas de engenharia e incorporando mecanismos democráticos, apresentou vários processos alternativos de tratamento aplicáveis às condições sócio-ambientais brasileiras, gerando um bom subsídio para seleção e incentivos da prática de tratamento de esgotos no país.

No Brasil, com a recente criação da Agência Nacional de Água (ANA), através da Lei Federal nº 9.984 de junho de 2000, e face à sistemática de outorga e cobrança pelo uso da água apresentada pela Lei das Águas, Lei 9.433, de 08 de janeiro de 1997, atualmente em fase de implantação, a indústria deverá pagar pelo uso da água, tanto em termos de captação como também pela diluição de seus efluentes industriais. Dessa forma, o reúso e a reciclagem da água na indústria passam a constituir importantes ferramentas de gestão fundamentais para a sustentabilidade da produção industrial, levando-se em consideração que tais técnicas conduzem a uma redução na captação de água nos corpos d'água naturais, bem como diminuem a quantidade de efluentes a serem liberados posteriormente.

Nas indústrias que necessitam das torres de resfriamento, como, por exemplo, as indústrias farmacêuticas, metalúrgicas, têxteis etc., tais equipamentos consomem uma quantidade considerável de água, destacando-se o caso de algumas refinarias de petróleo, onde sua utilização pode chegar a até 70% do consumo global. Observa-se, assim, que a prática do reúso implica uma economia de água muito significativa.

O reúso de efluentes sanitários e industriais, especificamente com aplicações em torres de resfriamento, é uma prática que vem sendo realizada nos Estados Unidos desde a década de 60. Tais aplicações têm se mostrado bastante favoráveis conforme pode ser observado na revisão da maioria dos trabalhos publicados pelo *Cooling Tower Institute* (CTI) e pela *National Association of Corrosion Engineers* (NACE International). Entretanto, alguns cuidados devem ser tomados no transporte desses modelos para a realidade brasileira. Nesses casos, é importante ressaltar que um reaproveitamento mal planejado de água proveniente de estação de tratamento de esgoto pode não significar economia devido aos problemas que podem ocorrer caso essa água não seja devidamente condicionada em termos de carga orgânica e salinidade antes de servir ao resfriamento.

A partir da década passada, começa-se a observar com mais freqüência experiências de reúso de efluentes em torres de resfriamento no Brasil. Porém, num levantamento mais criterioso dos trabalhos publicados pela Associação Brasileira de Corrosão (ABRACO) relacionados ao uso de água de resfriamento dede a década de 70, observa-se que a quase totalidade das experiências brasileiras em torres de resfriamento baseia-se em consumo de água de concessionárias (na sua grande maioria), água de rios ou poços. Mesmo assim é notória a quantidade de testes pilotos realizados principalmente por refinarias e indústrias petroquímicas, para avaliação e otimização do pré-tratamento das águas e do tratamento químico contra corrosão e incrustação. Observa-se, também, que os níveis de salinidade usuais nas águas de recirculação são, de forma geral, muito mais baixos do que o que vem sendo preconizado em algumas lite-

raturas internacionais. Tais constatações sugerem sim a verdadeira necessidade de realização de testes pilotos, e não a aplicação direta de padrões internacionais.

O aumento da utilização de efluentes tratados em torres de resfriamento em substituição à água potável requer um entendimento dos impactos potenciais nas próprias torres como nos equipamentos de troca térmica.

SILVA *et al* (1987) apontam para um detalhe importante sobre as águas brasileiras destacando que estas possuem, de forma geral, uma característica muito mais corrosiva do que incrustante. Pode-se dizer também que elas possuem baixos teores de sílica quando comparadas, por exemplo, a algumas localidades no Sul dos Estados Unidos onde o teor de sílica é elevado e há grande preocupação com a característica incrustante de suas águas. Além da qualidade da água, a utilização de metais mais nobres em condensadores e tubulações, a utilização de tratamentos químicos diferenciados e o rigor do controle físico-químico e microbiológico podem, de forma sinérgica, provocar diferenças no comportamento final da água.

Ao se pensar em reúso de efluentes sanitários em torres de resfriamento, deve-se levar em consideração ainda os efeitos de impurezas que não eram comumente encontradas ou que eram encontradas em concentrações menores, tais como amônia, sulfetos, fósforo, matéria orgânica e outras. Como não se tem um histórico do efeito desses contaminantes nesse tipo de processo, deve-se recorrer a testes pilotos para reúso de efluentes em torres a fim de que se avaliem as possíveis taxas de corrosão e incrustação. Além desses, existem os inúmeros contaminantes provenientes de efluentes industriais.

PUCKORIUS (2002) confirma essa teoria, afirmando que geralmente as principais diferenças entre água potável e água reciclada são: *a*) maior salinidade; *b*) presença de amônia, fosfato, sólidos suspensos e carbono orgânico total. Afirma ainda que variações consideráveis podem ocorrer em locais específicos em maior ou menor grau. Recomenda ainda que esses constituintes sejam mais visados, pois guardam grande relação com os impactos dentro de um sistema de resfriamento.

Face ao contexto apresentado, este trabalho tem como objetivo geral o estudo do reúso de efluentes de estação de tratamento de esgotos como água de reposição em sistemas de resfriamento. Para isso, foi realizado um amplo levantamento teórico a respeito do tema reúso de águas e sistemas de resfriamento, levando-se em consideração os principais tipos e as variáveis mais significativas operacionalmente. Em termos práticos, será apresentado um estudo de caso: uma experiência piloto realizada pela empresa AQUALAB QUÍMICA E SERVIÇOS LTDA, com o objetivo de avaliar a possibilidade técnica e econômica do reúso de esgoto tra-

tado proveniente de uma estação de tratamento de esgotos por lodos ativados, com posterior filtração e ozonização diretamente no circuito de condensação do ar-condicionado central de um shopping.

Além disso, esta dissertação aponta para mais uma peculiaridade do processo de resfriamento: *o clima*. Face às dimensões continentais e variedades ambientais brasileiras, o clima promove uma troca térmica em torres de resfriamento de forma diferenciada. Observa-se que em alguns locais muito frios, em algumas épocas do ano, a parcela de calor removida sem evaporação, apenas por troca de calor sensível, é bem maior que no Brasil, fazendo com que, em tese, nessas condições, as concentrações salinas de uma água de resfriamento aqui no Brasil alcancem concentrações maiores.

Para se chegar à validade dessa hipótese, aborda-se ainda neste trabalho, com maior ênfase, a questão da taxa de evaporação de água em sistemas semi-abertos como um dos fatores que talvez possam trazer alguma diferença na apropriação de modelos estrangeiros de reúso. Nesse caso realiza-se uma pequena simulação em nível teórico, expondo-se uma mesma torre a várias condições climáticas e observando-se o efeito disso na evaporação e conseqüentemente nas concentrações salinas, aproveitando-se do estudo de caso cedido pela empresa AQUALAB QUÍMICA E SERVIÇOS LTDA.

Observa-se que tais detalhes podem modificar totalmente o comportamento de uma água para refrigeração no Brasil, pois trabalhando em sistemas semi-abertos a água evaporada é reposta e evaporada novamente. Esse processo é contínuo e, portanto, a concentração salina pode atingir níveis insuportáveis mesmo para uma água tratada com anticorrosivos e antiincrustantes e com isso provocar corrosão e/ou incrustação em vários equipamentos.

É óbvio que a simples questão da mensuração da água evaporada em uma torre de resfriamento não é a questão aqui abordada. A questão principal seria alertar que utilizar modelos de tratamento e de reúso entre locais onde haja diferenças climáticas aliadas a outras diferenças, já comentadas, pode alterar o resultado esperado de um projeto. Por esses motivos, apesar de acreditar que haja viabilidade na utilização de efluentes em sistemas de refrigeração, alguns estudos prévios devem ser realizados para que se possa maximizar a eficiência desse reaproveitamento, esclarecendo-se alguns pontos que podem levar a equívocos.

Para atingir o objetivo almejado por esta dissertação, partiu-se de uma visão global para uma visão específica. Os capítulos seguintes estudados apresentam de forma sumária o conteúdo descrito abaixo:

No capítulo 2, aborda-se de forma geral as várias conceituações e legislações pertinentes ao assunto reúso, sendo feita uma abordagem sobre usos múltiplos da água, seus diversos critérios de uso, padrões, demandas e custos. Enfatiza-se o uso industrial e dentro da modalidade industrial principalmente o uso em torres de resfriamento.

No capítulo 3, detalha-se todo o funcionamento do equipamento citado, o balanço mássico e equações de projeto para que se possam compreender melhor as relações psicrométricas envolvidas no sistema de resfriamento semi-aberto, obtendo-se clareza quanto ao processo de evaporação e suas implicações no comportamento físico-químico da água de recirculação.

No capítulo 4, estuda-se com um pouco mais de detalhe a qualidade da água para consumo como água de resfriamento, a fim de que se possa avaliar a importância de alguns parâmetros físico-químicos na qualidade final do efluente. Abordam-se também outros fatores importantes na definição de tratamentos e pré-tratamentos da água de reposição. O capítulo demandou uma vasta busca bibliográfica, onde se percebeu que problemáticas descritas em artigos da década de 80 tornam-se hoje atuais e em muitos casos devem ser apreciadas, pois nessa época percebe-se pela literatura que havia um interesse enorme na questão de otimização de tratamentos de água, realizando-se nas indústrias diversas experiências e projetos pilotos. O mesmo interesse em relação às investigações e aos ensaios pilotos deve estar presente hoje quando se pensa em reutilizar efluentes para torres de resfriamento.

No capítulo 5, encontra-se um estudo de caso pautado no reúso de efluente sanitário tratado por lodos ativados com posterior ozonização para futuro consumo como água de reposição em torre de resfriamento. Os resultados estão descritos e analisados do ponto de vista técnico, abordando-se também o aspecto do consumo de produtos químicos. Nesse mesmo capítulo, realiza-se uma simulação, na qual a torre que originou este estudo piloto, trabalhando em plena carga, é exposta a diferentes condições climáticas quando se calculam então as várias taxas de evaporação e os respectivos ciclos de concentração teóricos.

Conclui-se o trabalho no capítulo 6, analisando-se os dados obtidos e os argumentos apresentados durante o trabalho.

2. CLASSES, LEGISLAÇÕES, DEMANDAS E CUSTOS

2.1. A Lei das Águas

Em 08 de janeiro de 1997, foi publicada a Lei N^{o} 9.433/97, conhecida como Lei das Águas, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos - SNGRH. Os princípios desta Lei sugerem mudanças institucionais no intuito de tornar possível a gestão integrada dos recursos hídricos. Destacam-se entre os novos organismos institucionais: o Conselho Nacional de Recursos Hídricos, os Conselhos Estaduais de Recursos Hídricos, os Comitês de Bacia e as Agências de Água, considerando como unidade de gestão e planejamento a bacia hidrográfica.

Neste cenário, para atingir os objetivos propostos, surgem também instrumentos de gestão previstos na Lei (outorga de direitos, cobrança pelo uso da água, sistema de informações, planos diretores e enquadramento dos corpos de água).

No que se refere à cobrança pelo uso da água, subentendendo-se captação, uso e descarte, compreende-se que o objetivo desse instrumento está definido nesta lei, da seguinte forma:

- Reconhecer a água como bem econômico e dar ao usuário uma indicação do seu real valor;
- Incentivar a racionalização do uso da água;
- Obter recursos financeiros para o financiamento dos programas e intervenções contemplados nos planos de recursos hídricos.

No que se refere à outorga de direitos, que seria uma concessão para uso de água fornecida por órgãos estaduais (no caso de rios estaduais e poços) ou na ANA (no caso de rios federais), entende-se que os casos em que há necessidade de outorga são:

- Derivação ou captação de parcela da água existente em um corpo de água para consumo final, inclusive abastecimento público, ou insumo de processo produtivo;
- Extração de água de aqüífero subterrâneo para consumo final ou insumo de processo produtivo;
- Lançamento em corpo de água de esgotos e demais resíduos líquidos ou gasosos, tratados ou não, com o fim de sua diluição, transporte ou disposição final (um outro

caso não previsto na legislação em que a outorga é imprescindível seria o da dissipação da energia térmica através de lançamento em corpos d'água);

- Aproveitamento dos potenciais hidrelétricos;
- Outros usos que alterem o regime, a quantidade ou a qualidade da água existente em um corpo de água.

Não obstante os valores éticos que devem conduzir a práticas mais limpas nas indústrias, mas acreditando que o reúso seja um avanço na sustentabilidade do parque industrial brasileiro, é verdade que o início do processo de cobrança pelo uso da água por parte das agências de bacias representará mais um custo que será agregado ao produto final e "estimulará" práticas de economia de água e reciclagem de efluentes como forma de minimização dos custos adicionais deste insumo, para manutenção de sua competitividade.

Segundo ALVES (1995), no setor industrial, o aumento da consciência ambiental é reflexo das pressões ambientais que estimulam a busca de respostas para os problemas.

FINK e SANTOS (2003) destacam a importância da outorga para o reúso de água enfatizando que sua reutilização não se enquadra em nenhuma das hipóteses legais desse tipo de concessão e que portanto, a partir da implantação do reúso direto no processo produtivo, o usuário fica automaticamente dispensado de qualquer autorização por parte do poder público.

2.2 Classes

Os corpos hídricos no território nacional recebem classificações que definem a especificidade assim como a qualidade requerida para um determinado uso, ou seja, as águas podem ser destinadas para diversos usos, em função da classe em que estejam enquadradas e dos requisitos limitantes das atividades a que possam se destinar. As classes são determinadas pela Resolução CONAMA n^{o} 20, de 18 de julho de 1986. As águas são divididas em três categorias: doces, salinas e salobras. Estas, por sua vez, são subdivididas em nove classes: cinco para as águas doces (classes: especial, 1, 2, 3, e 4); duas para as águas salinas (classes: 5 e 6); e duas para águas salobras (classes: 7 e 8). Essas classificações, de certa forma, instrumentalizam a política de recursos hídricos, haja vista estar a questão do reúso implícita nas utilizações que não sejam a utilização primária.

A única água que não poderia ser indicada para reúso, dentro das águas doces, seria a classe especial já que elas são reservadas ao uso primário inicial "*destinadas ao abastecimento doméstico sem prévia ou com simples desinfecção, bem como à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas*" (Resolução CONAMA nº 20 de 1986, art. 1º, I).

FINK e SANTOS (2003) justificam essa afirmação apontando dois argumentos:

- Se reúso é o reaproveitamento de águas já utilizadas, qualquer utilização que não seja primária constitui reúso. Assim, classes inferiores de águas podem ser chamadas de águas para reúso.
- Se as águas comportam classes definidas segundo os usos preponderantes, se leva em consideração o reúso para estabelecer classes. Assim, a classificação das águas tem por objetivo: assegurar às águas qualidade compatível com os usos mais exigentes a que forem destinadas; determinar a possibilidade de usos menos exigentes por meio de reúso; diminuir os custos de combate à poluição das águas, mediante ações preventivas permanentes, inclusive por meio do reúso.

Pode-se verificar maior detalhamento sobre os uso e as classes, observando-se as **Tabelas 2.1** e **2.2**, ambas baseadas nas definições da Resolução CONAMA nº 20.

Tabela 2.1. Classificação das águas (CONAMA Nº 20).

Classificação	Salinidade (%)	Classes
Água doce	**≤ 0,5**	**Especial, 1, 2, 3 e 4**
Água salobra	**entre 0,5 e 30**	**5 e 6**
Água Salina	**≥ 30**	**7 e 8**

Tabela 2.2. Usos preponderantes da água (CONAMA Nº 20).

Classe	**Usos**

Especial	a) abastecimento doméstico sem prévia ou com simples desinfecção b) preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas
1	a) abastecimento doméstico após tratamento simplificado b) proteção das comunidades aquáticas c) recreação de contato primário (natação, esqui aquático e mergulho) d) irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película e) criação natural e/ou intensiva (aqüicultura) de espécies destinadas á alimentação humana
2	a) abastecimento doméstico, após tratamento convencional b) proteção das comunidades aquáticas c) recreação de contato primário (esqui aquático, natação e mergulho) d) irrigação de hortaliças e plantas frutíferas e) criação natural e/ou intensiva (aqüicultura) de espécies destinadas à alimentação humana
3	a) abastecimento doméstico, após tratamento convencional b) irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras c) dessedentação de animais
4	a) navegação b) harmonia paisagística c) usos menos exigentes
5	a) recreação de contato primário b) proteção das comunidades aquáticas c) criação natural e/ou intensiva (aqüicultura) de espécies destinadas à alimentação humana
6	a) navegação comercial b) harmonia paisagística c) recreação de contato secundário
7	a) recreação de contato primário b) proteção das comunidades aquáticas c) criação natural e/ou intensiva (aqüicultura) de espécies destinadas à alimentação humana
8	a) navegação comercial b) harmonia paisagística

c) recreação de contato secundário

2.3 Portaria Nacional de Potabilidade

A portaria que estabelece procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano bem como seu padrão de potabilidade é a Portaria n° 1469, de dezembro de 2000, do Ministério da Saúde. Esta substitui a Portaria n° 36/GM, de 19 de janeiro de 1990.

A legislação brasileira de qualidade de água para consumo humano não incorporou ainda os limites mais severos introduzidos na legislação norte-americana durante a última década. A atual portaria do Ministério da Saúde indica que, também no Brasil, a legislação de qualidade de água para consumo humano se tornará progressivamente mais restrita (FUNASA, 2000).

Essa portaria inclui recomendações para vários parâmetros que eventualmente poderão ser adotadas como limites em revisões futuras, tais como:

- Recomendação para análise de vírus (a redução significativa dos limites de detecção destes patógenos por novas metodologias baseadas em biologia molecular poderão eventualmente resultar na estipulação de limites específicos para estes patógenos em revisões futuras da legislação);
- Recomendação para análise das cianotoxinas microcistina, cilindrospermopsina e das saxitoxinas, com limites indicativos de 3 μg/L para saxitoxinas e 15 μg/L para cilindrospermopsina;
- Limites para metais pesados, organoclorados, pesticidas e outros compostos químicos potencialmente nocivos para a saúde, em faixas de poucos μg/L;
- Recomendação para análise de protozoários como Cryptosporidium e Giárdia (os limites para esses patógenos propostos nos EUA poderão eventualmente ser adotados no Brasil);
- Limite de 1 μg/L proposto para a microcistinas, sendo aceitável a concentração de até 10 μg/L de microcistinas em até 3 (três) amostras, consecutivas ou não, nas análises realizadas nos últimos 12 (doze) meses;

- Valor máximo permitido de trihalometanos totais: 100 μg/L.

A preocupação com os diversos contaminantes industriais e microbiológicos em águas potáveis com baixa ou nenhuma possibilidade de serem removidos pelo processo convencional de tratamento traz uma séria discussão sobre a introdução de novos métodos analíticos.

Atualmente não estão disponíveis padrões de potabilidade para todos os possíveis constituintes de uma água, não são conhecidos suficientemente os efeitos da associação de duas ou mais substâncias (efeitos sinérgicos) e não estão definidos métodos de análise para identificação e quantificação de outras. Além disso, ainda não são conhecidas quais as concentrações tóxicas para um grande número de compostos químicos presentes na água, especialmente os orgânicos sintéticos de formulação mais recente que podem provocar doenças crônicas por ingestão. A determinação dessas concentrações exige pesquisas epidemiológicas e/ou toxicológicas demoradas e muito caras, o que faz do reúso potável direto uma alternativa ainda pouco adotada no mundo e não recomendável no caso de os esgotos utilizados conterem parcelas significativas de efluentes industriais (BLUM, 2003).

Alguns poluentes apresentam como alternativa para sua eliminação o processo de membranas filtrantes.

Segundo SCHNEIDER (2001), a presente revisão da portaria de qualidade de água do Ministério da Saúde inclui recomendações para vários parâmetros, que se adotados como norma, poderão forçar a adoção da tecnologia de membranas nas estações de tratamento de água.

É importante citar, neste momento, o trabalho apresentado por D'AGUILA (1996) sobre Pseudomonas Aeroginosa como indicador em análises bacteriológicas de águas de abastecimento público. Nesse trabalho, o autor recomenda que as Pseudomonas Aeroginosa sejam incluídas como indicador bacteriológico nas águas de abastecimento público, principalmente quando o Índice Coli for igual a zero. Numa próxima revisão da portaria nacional, esse trabalho deveria ser considerado.

2.4 Usos Múltiplos, seus Critérios de Uso e Padrões

O uso primordial e mais nobre da água é o uso para abastecimento humano, entretanto são diversos os setores que se utilizam dos recursos hídricos como insumo básico para as suas atividades, logo a água possui muitos outros usos; essa utilização variada convencionou-se chamar de “usos múltiplos das águas”. Dentre eles estão: lazer e turismo, geração de energia elétrica, irrigação, navegação, medicinal, pesca, aqüicultura, saneamento, industrial e outros.

No que se refere à qualidade da água para os diversos usos vale ressaltar que o fim para o qual a água for destinada, o processo no qual será utilizada, é que ditará seus limites de tolerância, portanto a definição da qualidade baseada na adequação ao uso, implicitamente, permite uma classificação das águas: águas adequadas ou não a determinados usos. Por esse motivo, a classificação de própria ou imprópria para uma água só é passível de alguma discussão quando se leva em consideração o uso definido para ela.

Com relação ao termo padrão de água, este fica um tanto comprometido em nível industrial, haja vista em muitos casos não existirem normas oficiais, como o que ocorre, por exemplo, para caldeiras e torres de resfriamento. As boas práticas e a experiência profissional de diversas empresas do ramo acabam por definir limites usuais, mas que podem variar de acordo com o tipo de tratamento químico e/ ou físico-químico efetuado. Têm-se sim recomendações ou diretrizes, não exatamente padrões.

Outro fator a ser considerado é o desperdício, principalmente se a água necessitou de algum tratamento para atingir alguma qualidade específica. Isso é típico no uso da água potável em aplicações que dispensariam esse nível de qualidade, como irrigação e alguns usos industriais. Ao evitar seu uso impróprio e o desperdício, aumenta-se a possibilidade de preservar o estoque de água potável.

A questão do condicionamento da qualidade de água também exige não só um conhecimento suficiente sobre as características e os efeitos no processo, mas também sobre os riscos que podem apresentar para a saúde e o meio ambiente. Um exemplo disso seria o uso de uma água condicionada com cromato como inibidor de corrosão em águas de refrigeração, prática que em geral apresenta ótimo resultado, porém sabe-se da sua característica carcinogênica e de sua restrição ambiental que muitas vezes o inviabiliza em nível industrial.

Esse conhecimento global é vital para uma decisão sobre o uso e o condicionamento de uma água para determinado fim. É sempre bom ter em mente que a escassez de água é responsável pelos problemas mais graves de saúde pública.

De acordo com BLUM (2003), o conceito de qualidade é invariavelmente associado ao uso de um bem ou serviço nas atividades econômicas do homem. Dessa associação surgem as

definições de qualidade baseadas em adequação ao uso, satisfação do usuário etc., assim como o estabelecimento de padrões de qualidade, ou seja, características que definem um bem ou serviço que atende às necessidades do uso a que ele se destina. A adequação ao uso resulta da conformidade daquele bem ou serviço com essas características. A aplicação desses conceitos ao caso da água e seus diversos usos levou à definição dos padrões de qualidade de água. Dessa forma, a qualidade de uma água - entendendo-se a expressão "uma água" como uma porção limitada de água - pode ser avaliada a partir da sua comparação com esses padrões.

O conhecimento sobre os limites de alguns parâmetros para um determinado fim pode evitar tanto um uso impróprio como também pode evitar desperdícios. Serão abordadas neste capítulo, sucintamente, somente duas modalidades de uso: potável e industrial e dentro da modalidade industrial processo, caldeiras e torres de resfriamento.

2.4.1 Padrões de Qualidade para Águas de Sistemas de Abastecimento Público

Na **Tabela 2.3** são apresentados alguns dos parâmetros e seus respectivos limites de potabilidade da Portaria Nacional. Observa-se que, com relação à salinidade, posteriormente veremos que esses limites já seriam elevados para água de alimentação de uma torre de resfriamento.

Tabela 2.3. Parâmetros de potabilidade de águas para consumo humano (Portaria 1469 de 29/12/2000, Ministério da Saúde).

Parâmetros	Unidade	Limites
I – Físicos e organopépticos		
Cor Aparente	µH (1)	15
Odor	-	não objetável
Sabor	-	não objetável
Turbidez	µT (2)	5
pH	-	6 até 9,5
II – Químicos		
II - a) ***Compostos inorgânicos que afetam a saúde***		
Antimônio	mg/L Sb	0,005
Arsênio	mg/L As	0,01
Bário	mg/L Ba	0,7
Cádmio	mg/L Cd	0,005
Chumbo	mg/L Pb	0,01
Cianetos	mg/L CN	0,07
Cromo Hexavalente	mg/L Cr	-
Cromo Total	mg/L Cr	0,05
Cloro Residual	mg/L Cl2	2
Fluoreto	mg/L F	1,5
Mercúrio	mg/L Hg	0,001
Nitratos	mg/L N	10
Nitrito	mg/L N	1
Prata	mg/L Ag	-
Selênio	mg/L Se	0,01
II - b) ***Compostos orgânicos***		
Acrilamina	µg/L	0,5
Alaclor	µg/L	20
Aldrin e Dieldrin	µg/L	0,03
Atrazina	µg/L	2
Bentazona	µg/L	300
Benzeno	µg/L	5
Benzo-a-Pireno	µg/L	0,7
Cloreto de Vinila	µg/L	5
Clordano (Total de Isômeros)	µg/L	0,2
Clorobenzenos	µg/L	-
Clorofenóis	µg/L	-
Clorofórmio	µg/L	-
DDT (p-p'DDT; o-p"DDT; p-p'DDE; o-p'DDE)	µg/L	2
Diclorometano	µg/L	20

II - b) ***Compostos orgânicos***

Estireno	µg/L	20
Endossulfan	µg/L	20
Endrin	µg/L	0,6
Fenol	µg/L	-
Glifosfato	µg/L	500
Heptacloro e Heptacloro Epóxido	µg/L	0,03
Hexacloro Benzeno	µg/L	1
Lindano (Gama BHC)	µg/L	2
Metolacloro	µg/L	10
Metoxicloro	µg/L	20
Molinato	µg/L	6
Pendimentalina	µg/L	20
Pentaclorofenol	µg/L	9
Permetrina	µg/L	20
Propanil	µg/L	20
Simazia	µg/L	2
Trifuralina	µg/L	20
Tetracloreto de Carbono	µg/L	2
Toxafeno	µg/L	-
1,1,1 Tricloreteno	µg/L	70
Trihalometanos	µg/L	100
1,1 Dicloreteno	µg/L	30
1,2 Dicloretano	µg/L	10
2,4 D	µg/L	30
2,4,6 Triclorefenol	µg/L	0,2
Alumínio	mg/L Al	0,2
Amônia (como NH_3)	mg/L NH3	1,5
MBAS / Ag.s Tenso-ativos / Sufactantes	mg/L LAS	0,5
Cloretos	mg/L Cl	250
Cobre	mg/L Cu	-
Dureza Total	mg/L CaCO3	500
Etilbenzeno	mg/L	0,2
Ferro Total	mg/L Fe	0,3
Manganês	mg/L Mn	0,1
Sódio	mg/L Na	200
RFT (RTS) / Sólidos Totais Dissolvidos	mg/L	1.000
Sulfatos	mg/L SO4	250
Sulfetos de Hidrogênio	µg/L S	0,05
Tolueno	mg/L	0,17
Zinco	mg/L Zn	5
Xileno	mg/L	0,3
III- Microbiológico		
Coliformes Fecais	n^o/100 mL	0

Coliformes Totais	n^o/100 mL	0
DBO5 a 20 C	mg/L O2	
Bromato	mg/L	0,025
Clorito	mg/L	0,2
Cloro Livre	mg/L	5
Monocloramina	mg/L	3
V- Cianotoxinas		
Microcistina	µg/L	1(Obs-1)

Fonte: FUNASA (2003).

- **Obs. 1**: sendo aceitável a concentração de até 10 $\mu g/L$ de microcistinas em até 3 (três) amostras, consecutivas ou não, nas análises realizadas nos últimos 12 (doze) meses;

2.4.2 Padrões de Qualidade de Água para Usos Industriais

Segundo CHEREMISINOFF (1993), a utilização da água na indústria é empregada nas seguintes operações:

- Em torres de refrigeração: o sistema de água de refrigeração é um dos maiores consumidores de água na industria;
- Em geração de vapor: águas direcionadas para alimentar caldeiras geradoras de vapor;
- No processo: muitas indústrias requerem grandes quantidades de água, tais como: alimentícia, papeleira, petroquímica e química. Destacam-se os critérios da indústria farmacêutica por serem muito mais rigorosos e apresentarem parâmetros não muito divulgados;
- Água para diversos fins: o reúso pode ser utilizado para limpeza de pisos e rega de jardins;
- Tem-se também o uso industrial em condensadores evaporativos, águas de incêndio, águas para cabine de pintura, lavadores de gases, entre outros.

Segundo TOMAZ (2001), dentro da indústria, faz-se a seguinte distinção:

- Consumo doméstico: é o consumo usado em banheiros, chuveiros, torneiras, restaurantes e específicos para os empregados;
- Consumo industrial: é o consumo de água usado no resfriamento, lavagem de pátios, lavagem de máquinas, uso em caldeiras, lavagem de caminhões, rega de jardins, insumo, processos etc. A água usada como insumo industrial é incorporada ao

produto, tal como uma indústria de refrigerantes, papéis e outras. Existem indústrias, tais como de medicamentos, que necessitam de água industrial de qualidade especial.

- **Usos Farmacêuticos**

Não nos causa nenhuma estranheza o fato de que uma água para fins farmacêuticos, por exemplo, tenha limites de tolerância biológicos e físico-químicos ainda muito mais rigorosos do que a água potável. É realmente isso que acontece e, dentro do próprio setor farmacêutico, existem níveis de rigor diferentes, com relação à qualidade da água, o que dependerá do produto farmacêutico a ser processado. Uma água a ser utilizada em um produto injetável deverá ser submetida a testes mais rígidos do que uma água para um produto via oral, visto que para o injetável, não há muitas barreiras, ele entrará muito mais rapidamente na corrente sangüínea e, se houver algum potencial maléfico nessa água, certamente as conseqüências serão observadas com maior rapidez e as chances de reverter a situação serão menores. As farmacopéias trazem, detalhadamente, os limites e os testes a serem realizados em cada tipo de água farmacêutica. Em geral, a classificação mais utilizada para água com fins farmacêuticos pode ser considerada como sendo a utilizada pela USP (farmacopéia americana) ou PE (farmacopéia européia). Nestas, a água é classificada como água purificada (PW) e água para injetáveis (WFI) de acordo com o seu processo, apesar de existirem outras classificações, como a água estéril para injetáveis. Esses dois tipos principais de água PW e WFI possuem as características mostradas na **Tabela 2.4**.

Tabela 2.4. Características das águas purificadas e para injetáveis segundo a USP e a PE.

	USP 23		USP 25		PE 3ª Ed	
Características	**PW**	**WFI**	**PW**	**WFI**	**PW**	**WFI**
Condutividade	1,4 µS 30º C	1,4 µS 30º C	1,4 µS 30º C	0,3 µS 30º C	3,0 µS 25º C	3,0 µS 25º C
pH	5,0-7,0	5,0-7,0	xxxxx	xxxxx	5,0-7,0	5,0-7,0
Cloreto mg/mL	0,5	0,5	xxxxx	xxxxx	negativo	negativo
Sulfatos mg/mL	0,5	0,5	xxxxx	xxxxx	negativo	negativo
Amônio mg/mL	3,0	3,0	xxxxx	xxxxx	0,2	0,2
Cálcio mg/mL	1,0	1,0	xxxxx	xxxxx	Passa no teste	Passa no teste
CO_2 mg/mL	4,0	4,0	xxxxx	xxxxx	xxxxx	xxxxx
Metais pesados mg/mL	xxxxx	xxxxx	xxxxx	xxxxx	1 mg/L Pb	1 mg/L Pb
Alumínio	0,1	0,1	xxxxx	xxxxx	negativo	negativo
Oxidáveis mg/mL	Passar no Teste USP 23	Passar no Teste USP 23	xxxxx	COT 500 ppb	negativo	negativo
TDS mg/L (sólidos)	10,0	0,004%	xxxxx	xxxxx	xxxxx	0,003%
Contaminação	10 UFC/ 100mL	1 UFC/ 100mL	100UFC/ mL	Estéril	100UFC/ mL	Estéril
Pirogênio	xxxxx	Passar no teste de LAL[1]	xxxxx	0,25 I.U/mL	xxxxx	0,25 I.U/mL

Fonte: Adaptado de Águas para fins farmacêuticos, UFRJ Faculdade de Farmácia, 2002.

1- LAL: Teste “in vitro” para a detecção de pirogênio, constituído de um lisado de células de *aemebócitos* de caranguejo *Limulus polypHeno*, o qual, após incubação de 60 min à 37º C, produz um gel róseo firme caso a substância inoculada possua concentrações de endotoxina maiores que 0,2 EU.

- **Usos em Diversos Processos Industriais**

Nessa modalidade de uso, os padrões são diversos e dependem da peculiaridade de cada processo industrial. Estão descritos na **Tabela 2.5** alguns exemplos.

Tabela 2.5. Qualidade de água destinada aos processos industrias (mg/L).

Características	Água para processos industriais			
	Têxtil	**Comida**	**Bebidas**	**Química**
Sílica	-	50	-	50
Alumínio	-	-	-	-
Ferro	0,1	0,2	0,3	0,1
Manganês	0,01	0,2	0,05	0,1
Cobre	0,05	-	-	-
Cálcio	-	100	-	70
Magnésio	-	-	-	20
Sódio e Potássio	-	-	-	-
Amônia	-	-	-	-
Bicarbonato	-	-	-	130
Sulfato	-	250	500	100
Cloreto	-	250	500	500
Fluoreto	-	1	1,7	5
Nitrato	-	10	-	-
Fosfato	-	-	-	-
Sólidos Dissolvidos	100	500	-	1000

Fonte: Montgomery (1985).

- **Usos no setor de utilidades**

No ambiente industrial, o imprescindível setor de utilidades, sempre presente nos bastidores de todos os processos industriais, outrora não tão observado, atualmente assume um papel destacado dentro da indústria, tendo em vista principalmente a questão energética e a questão da escassez de água, haja vista seu gerenciamento sobre água para caldeiras e torres

de resfriamento. É de conhecimento público que os processos de resfriamento e o abastecimento de água resfriada são sérios problemas em plantas industriais. DREW (1979), muito antes de qualquer debate sobre a crise de escassez de água, já afirmava que em muitas indústrias a água de refrigeração era considerada uma utilidade, mas também afirmava que a torre de refrigeração era uma operação unitária que proporcionava a recuperação da água de refrigeração, reduzindo, portanto, as necessidades de água e energia.

Nos anos mais recentes, essa lógica parece ser também compartilhada por pessoas renomadas e militantes da área como GOMES (1997) quando afirma que, tanto do ponto de vista ecológico como econômico, a água de resfriamento não pode ser utilizada somente uma vez e descartada ao rio ou esgoto e que, partindo-se desse princípio, a recuperação da água tornou-se condição mandatória para os processos industriais, surgindo a necessidade de recirculá-la em circuito fechado, dando então lugar a um equipamento que tornasse essa operação possível de ser realizada – a torre de resfriamento de água. Ainda afirma que, como a escassez de água deverá continuar ou até agravar-se no futuro, a torre de resfriamento permanecerá em lugar de destaque na preservação e utilização consciente deste recurso natural essencial: a água.

- **Usos em Caldeiras**

Na **Tabela 2.6**, podemos verificar, por exemplo, que os valores dos parâmetros mudam conforme a sua pressão. Observa-se que, em relação ao ferro, quanto maior a pressão da caldeira, menor será o limite para a sua concentração na água de alimentação. A produção de vapor faz com que os sólidos se concentrem na água. A dureza, os cloretos e a sílica, aliados à alta temperatura e à alta pressão, fazem com que processos internos de corrosão e incrustação ocorram, necessitando essa água de ser condicionada a produtos químicos, além de ser recomendável o processo de abrandamento para a remoção da dureza presente na água e/ou desmineralização a fim de se otimizar a qualidade da água de alimentação, obtendo-se valores nulos ou praticamente nulos para cloretos, ferro, sílica, dureza e outros íons.

Tabela 2.6. Qualidade da água requerida para alimentação de caldeiras (mg/L).

Características	Água para alimentação de caldeiras na pressão psig			
	0 a 150	**150 a 700**	**700 a 1500**	**1500 a 5000**
Sílica	30	10	1,0	0,01
Alumínio	5	0,1	0,01	0,01
Ferro	1	0,3	0,05	0,01
Manganês	0,3	0,01	0,01	-
Cobre	0,5	0,05	0,05	0,01
Cálcio	-	0	0	-
Magnésio	-	0	0	-
Sódio e Potássio	-	-	-	-
Amônia	0,1	0,1	0,1	0,7
Bicarbonato	170	120	50	-
Sulfato	-	-	-	-
Cloreto	-	-	-	-
Flúor	-	-	-	-
Nitrato	-	-	-	-
Fosfato	-	-	-	-
Sólidos Dis.	700	500	200	0,5
Sólidos Susp.	10	5	0	0
Dureza	20	1,0	0,1	0,07
Alcalinidade	140	100	40	0
pH	8,0-10,0	8,0-10,0	8,2-9,2	5,0-8,3
Cor	-	-	-	-
Orgânico	-	-	-	-
MBAS	-	-	-	-
CCl_4	-	-	-	-
COD	5	5	0,5	0
Oxigênio Dis.	<0,03	<0,03	<0,03	<0,05
Temperatura °F	120	120	120	100
Turbidez (JTU)	10	5	0,5	0,05

Fonte: Montgomery (1985).

- **Usos em Torres de Resfriamento**

As águas para arrefecimento, que é o foco deste trabalho, também devem ser condicionadas a fim de que evitem a redução do tempo de vida útil dos diversos equipamentos com os quais essa água entre em contato, prevenindo conseqüentes prejuízos. Como a torre de refrigeração normalmente opera como um sistema fechado, pode-se ter uma rede de água independente com requisitos de qualidade de água específicos. O *makeup* de torres de refrigeração é relativamente simples, mas deve-se tomar cuidado com a formação de incrustações, corrosão e crescimento microbiológico. Para tanto, elas devem manter parâmetros físico-químicos e microbiológicos controlados, além do uso de produtos químicos e biocidas. Na **Tabela 2.7** a seguir, vemos valores típicos utilizados em circuito de ar-condicionado. No capítulo 4 serão apresentadas outras tabelas, com mais detalhes.

Tabela 2.7. Valores típicos a serem mantidos na água dos sistemas de ar condicionado.

Alcalinidade Total (ppm $CaCO_3$)	máximo de 250
Condutividade (Micro-Mhos/cm)	máximo de 2000
Cloreto (ppm Cl^-)	máximo de 150
Fosfonato (ppm PO_4^{-3})	10 a 20
Dureza Total (ppm $CaCO_3$)	máximo de 250
Dureza Permanente (ppm $CaCO_3$)	máximo de 250
Sol. Dissolvidos (ppm NaCl)	máximo de 1360
pH	6,5 a 8,0

Fonte: AQUALAB (2003).

2.4.3. Outras Classificações de Consumo

Existem algumas classificações práticas urbanas que trazem uma outra abordagem para o consumo. Em instalações prediais, TOMAZ (2000) categoriza como:

- Residencial - relativo à residências e edifícios multifamiliares;
- Comercial - relativo a hospitais, serviços de saúde, hotéis, lavanderias, auto-postos e lava-rápido, clubes esportivos, bares lanchonetes e lojas;

- Industrial - indústrias químicas e de produtos afins, indústria metalúrgica básica, indústria de papéis, indústria de alimentação, equipamentos elétricos e eletrônicos, equipamentos de transporte e indústrias têxteis;
- Público - todos os edifícios públicos municipais, estaduais e federais existentes.

Na maioria das classificações, a água de resfriamento é considerada apenas no setor industrial, mas, de fato, ela está muito presente no setor comercial, no setor público e até mesmo no setor residencial. Mesmo sendo o consumo de água em instalação de ar-condicionado sensivelmente menor do que em processos industriais por unidade instalada, observa-se que os estabelecimentos em que se utiliza ar-condicionado central com resfriamento à água não são poucos: escolas, hospitais, shoppings, repartições públicas, bancos etc. Dessa forma, essa abordagem nos permite perceber que a possibilidade desse tipo de reúso é muito ampla.

2.4.4 Padrões de Qualidade para Águas de Reúso Industrial

Neste tópico, faz-se necessário tecer alguns comentários a respeito do reúso de água em nível industrial, visto que, como já foi citado, as indústrias usam água para consumo doméstico e industrial. Para o consumo doméstico, existe necessidade de que a água seja potável e que, portanto, se enquadre nos parâmetros preconizados pela Portaria Nacional nº 1469 de dezembro de 2000 do Ministério da Saúde; no caso industrial não, o que não significa que qualquer qualidade de água sirva. Afirmar isso seria um erro grosseiro.

Segundo HESPANHOL (2003), sob diversos aspectos pode-se classificar as modalidades do reúso industrial. Dentro do reúso macroexterno, os usos industriais que apresentam possibilidade de viabilidade na área industrial são basicamente os usos em: torres de resfriamento, caldeiras, lavagem de peças e equipamentos, irrigação das áreas verdes e lavagem de pisos e veículos e alguns processos industriais. O autor se refere a uma demanda de água não potável industrial de apenas 17% para uso em sistemas de resfriamento e considera uma grande vantagem não se requerer uma qualidade independente do tipo de indústria, sendo os sistemas semi-abertos relativamente simples.

O sistema macroexterno seria concebido para o atendimento de uma grande demanda industrial, aumentando a possibilidade de viabilizar economicamente tais empreendimentos.

Dentro do reúso macrointerno está inserida a idéia de se estimularem indústrias nacionais a avaliar as possibilidades internas de reúso. Essa tendência pode se ampliar diante das novas legislações e dos instrumentos de outorga e cobrança pela utilização dos recursos hídricos, tanto na captação como nos despejos dos efluentes. A utilização de esgotos tratados em torres estaria de acordo com esse macro reúso interno.

Dentro do reúso interno específico estaria a idéia de se efetuar a reciclagem de efluentes de quaisquer processos industriais nos próprios processos nos quais são gerados. (HESPANHOL, 2003).

Na Conferência Racionalização do Uso e Reúso da Água Transformando Processos Industriais para Reduzir Custos e Minimizar os Impactos Ambientais, oferecida pelo *International Business Communications*, ibc, realizada em São Paulo de 19 a 20 de Junho de 2002, foram apresentados diversos estudos de casos de minimização do uso de água e geração de efluentes líquidos em nível macroexterno e macrointerno. Também foi apresentada a proposta da cobrança de uso da água pelo Comitê de Integração da Bacia do Paraíba do Sul, CEIVAP.

Neste sentido, pode-se citar como exemplo de reúso interno específico, por exemplo, a recuperação das purgas da torre de refrigeração como apresentado por NATHAN (2001). Nesse estudo de caso, apresentado nesta dissertação, o reúso é de um efluente tratado proveniente de estação de tratamento de esgoto que sofre processo terciário para ser utilizado em torres de resfriamento. Segundo TOMAZ (2001), quando o efluente de uma estação de tratamento de esgoto, após o tratamento secundário e terciário, pode abastecer indústrias e servir como água não potável, tem-se o reúso não potável industrial. Esse caso poderia ser classificado então como reúso não potável industrial dentro de uma filosofia macrointerna.

Nos Estados Unidos, existem legislações específicas para o reúso de águas. O manual *Guidelines for Water Reuse* publicado pela USEPA - Agência de Proteção Ambiental Norte Americana (do inglês *United States Environmental Protection Agency*) descreve os resultados de levantamento sobre os sistemas existentes, legislações estaduais, dados consolidados etc., bem como critérios recomendados para o reúso de águas naquele país (BLUM, 2003). Essas legislações ainda não existem no Brasil, mas terão de ser regulamentadas no futuro.

Na Holanda, a água industrial é levada a 70 quilômetros de distância para suprimento industrial na parte oeste de Amsterdã. A água potável de poços artesianos só pode ser usada para fins domésticos e para processos industriais que necessitem de água de alta qualidade. Para outros fins, deverá ser utilizada água industrial. Na **Tabela 2.8** está apresentada a qualidade da água entregue na Holanda. A técnica empregada é coagulação, sedimentação e filtração rápida com areia.

No Brasil a Companhia de Saneamento do Estado de São Paulo, SABESP, é pioneira na técnica do reúso, já fornece água industrial a partir do efluente tratado de duas de suas estações de tratamento, localizadas nos municípios de São Caetano e Barueri. A técnica empregada é uma floculação com polímero seguida de filtração com areia, antracito e membrana. O suprimento é feito por caminhão-tanque e a água está sendo utilizada na lavagem de caminhões, de ruas e no desentupimento de bocas-de-lobo.

SHELEF (1992) apresentou uma síntese dos requisitos da qualidade de água para reúso, onde apresenta para reúso industrial critérios mais moderados do que os critérios para reúso urbano, como descargas sanitárias e jardinagem. Esses requisitos podem ser vistos na **Tabela 2.9**. Como pode ser observado, dependendo da finalidade específica do reúso na indústria, muitas vezes os critérios devem ser mais rigorosos como, por exemplo, a utilização de reúso específico para caldeiras ou para determinados tipos de processos. A **Tabela 2.9** apresentada a seguir mostra o que é reflexo da pouca ênfase que é dada para a qualidade de água industrial.

Tabela 2.8. Qualidade da água industrial na Holanda com água do Rio Reno transportada a 70 quilômetros de distância.

Parâmetro (média de valores em 1993)	**Unidades**	**Rio Reno**
Temperatura	° C	13
Turbidez	FTU	0,17
Sólidos em suspensão	mg/L	< 0,5
Condutividade	MS/m	79
Cloreto	mg/L	141
Dureza	Mmol/l	2,45
Amônia	mg/L	0,04
Ferro	mg/L	< 0,06
Alumínio	mg/L	18
Carbono Orgânico Dissolvido	mg/L	3,4
Coliformes	N/100 mL	8

Fonte: Montgomery (1995)

Tabela 2.9. Requisitos da qualidade da água para reúso.

Utilização	Remoção de patogênicos	Cloro residual ou outro desinfetante	Remoção de sólidos em suspensão e turbidez	Presença de Oxigênio dissolvido	Remoção de DBO e DQO	Remoção de nutrientes	Remoção de odor, cor e sabor	Remoção de traços de metais e componentes orgânicos	Remoção de excesso de salinidade
Irrigação Paisagística ou Florestal	X	--	X	X	X	--	X	X	0
Irrigação para Agricultura	XXX	XXX	XXX	XX	XXX	--	XX	XXX	X
Recarga de Água Subterrânea	XXX	XX	XXX	XX	XXX	XXX	XXX	XXXX	--
Reúso Industrial	XX	XX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XX	XX
Reúso Urbano (Descargas Sanitárias e Jardinagem)	XXXX	XXXX	XXXX	XXXX	XXXX	XXX	XXXX	XXXX	XX
Reúso de Água Potável	XXXX	XXXXX	XXXXX	XXXX	XXXXX	XXXX	XXXXX	XXXXX	XXX

(--) Não Necessário (0) Normalmente não necessário (X) Levemente necessário (XX) Moderadamente Necessário (XXX) Fortemente Necessário (XXXX) Requisito Rigoroso (XXXXX) Requisito muito Rigoroso.

Fonte: Adaptação de SHELEF, Gedaliah - Wastewater Reclamation and Water Resourcer Management (1992).

A adoção de qualquer uma das tecnologias de reúso deverá passar antes por ensaios de tratabilidade em testes pilotos visando à obtenção de subsídios para a especificação dos processos e equipamentos mais adequados a determinados fins específicos. O primeiro passo para a definição de um processo terciário de tratamento de água visando ao reúso é conhecer as características qualitativas almejadas pelo usuário para o fim específico. Uma vez estabelecidos esses padrões e conhecendo-se as características qualitativas do efluente tratado da Estação de Tratamento de Esgotos - ETE, é possível definir, com base nos ensaios de tratabilidade, o processo de tratamento terciário mais adequado em termos técnicos e econômicos.

2.5 Demanda e Custo de Água

2.5.1. Estatísticas de Usos Múltiplos

Encontram-se estatísticas bastante diferentes em relação à distribuição dos usos múltiplos e geralmente não se leva em consideração a água reservada para geração de eletricidade – porque ela passa pelas turbinas sem ser propriamente consumida – nem outros usos em que não haja propriamente um consumo. São apresentadas a seguir algumas estatísticas:

A **Tabela 2.10** abaixo mostra claramente como se situa a Região Sudeste: possui uma das menores disponibilidades e o maior consumo de água, portanto se faz mister um melhor gerenciamento dessa água.

Tabela 2.10. Disponibilidade e estimativas de consumo hídrico no Brasil.

Região	Disponibilidade (m^3/s) (1)	Consumo							Balanço (%) (2/1) x100
		Urbano		Indústria		Irrigação		Total	
		m^3/s	%*	m^3/s	%*	M^3/s	%*	m^3/s (2)	
Norte	121,847	9,3	58,1	4,0	25,0	2,7	16,9	16,0	0,01
Nordeste	5,900	42,9	17,3	31,6	12,8	173,2	69,9	247,7	4,20
Centro-Oeste	27,842	16,1	34,6	5,8	12,5	24,6	52,9	46,5	0,17
Sudeste	10,589	144,7	29,3	148,3	30,0	201,6	40,8	494,6	4,67
Sul	11,578	42,0	11,9	25,4	7,2	284,8	80,9	352,5	3,04
Brasil	**177,757**	**255,1**	**22,1**	**215,0**	**18,6**	**686,9**	**59,4**	**1157,0**	**0,65**

Fonte: BARTH, F.T. (1991).

* Percentagem sobre o total do consumo da região.

Segundo BEZERRA *et al* (2000), a irrigação é o uso que mais consome água. Estima-se ser da ordem de 70% a parcela da irrigação no uso consuntivo total de água.

De acordo com B.P.F.Braga, em trabalho apresentado sobre uso múltiplo das águas no Brasil, disponível no site da Agência Nacional de Vigilância Sanitária - ANVISA e acessado no dia 30 de março de 2003, a distribuição abaixo é apresentada:

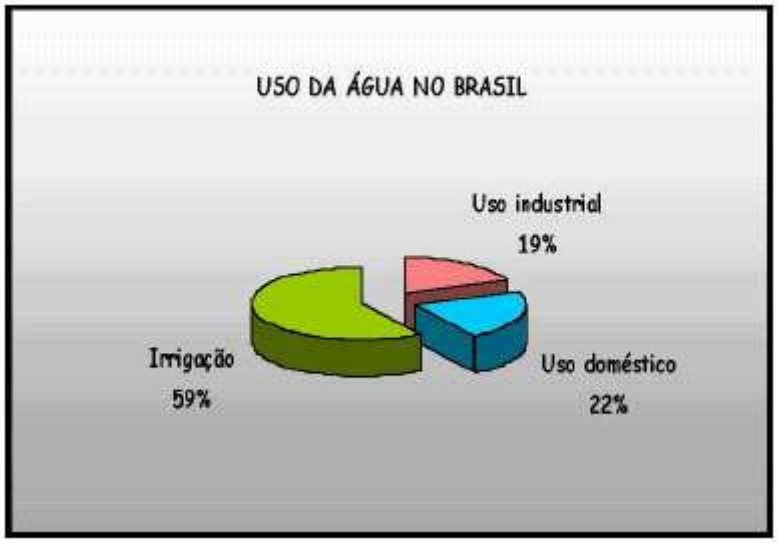


Figura 2.1. Uso da água no Brasil.

Fonte: Agência Nacional de Águas (2003).

Segundo Malvezzi e Reis (2003), a proporção do uso da água no Brasil seria de 63% para irrigação, 18% para consumo humano, 14% para consumo animal e 5% para indústria.

2.5.2. Demanda de Água dos Setores Industriais e Comerciais

Segundo THAME *et al* (2000), em relação à demanda industrial de água no estado de São Paulo, os sete primeiros setores produtivos da tabela abaixo respondem por mais de 90% da captação de água. A forma de captação deriva principalmente de mananciais superficiais (92,2%), mananciais subterrâneos (5,9%) e da rede pública (1,9 %). A **Tabela 2.11** nos mostra esse panorama. A **Tabela 2.12** nos mostra dados por unidade de produção de alguns setores. Esse trabalho foi apresentado na Federação das Indústrias do Estado de São Paulo - FIESP, pela vice-presidência de produção da SABESP, no seminário “A Crise de Água” em 15/06/02. A **Tabela 2.13** nos mostra um panorama em nível comercial.

Tabela 2.11. Demanda de água dos setores industriais.

Atividade industrial	Nº Ind.	Água Subt. m^3/s	Rede Pub. m^3/s	Água Superficial m^3/s	TOTAL m^3/s	% Dem. SP	Média m^3/s
Usinas Açúcar e Álcool	92	0,875	0,001	41,393	42,64	42,64	0,459
Química	187	0,691	0,397	14,783	15,871	16,01	0,085
Papel e Celulose	88	0,158	0,067	11,340	11,564	11,67	0,131
Metalúrgica	150	0,321	0,102	6,577	7,000	7,06	0,047
Alimentos	217	0,492	0,149	4,599	5,240	5,29	0,024
Bebidas	161	0,333	0,051	4,070	4,453	4,49	0,028
Têxtil	151	0,502	0,431	3,096	4,029	4,07	0,027
Material de Construção	146	0,361	0,045	1,981	2,388	2,41	0,016
Cervejarias	16	0,370	0,038	1,107	1,515	1,53	0,095
Abatedouro	59	0,333	0,021	0,539	0,893	0,90	0,015
Automotiva	63	0,312	0,308	0,051	0,671	0,68	0,011
Eletro-Eletrônica	64	0,332	0,074	0,218	0,624	0,63	0,010
Outras Atividades	370	0,772	0,188	1,649	2,609	2,632	0,007
Total	**1764**	**5,851**	**1,872**	**91,402**	**99,125**	**100,0**	**0,056**

Fonte: Adaptado Consórcio CNEC / FIPE (1995).

Tabela 2.12. Média de demanda de água de alguns setores industriais por unidade de produção.

Espécie	Quantidade	Consumo em m^3
Plástico e fibras artificiais	1 ton	750 a 2300
Papel	1 ton	60 a 380
Aço	1 ton	60 a 150
Algodão	1 Kg	10
Caminhão	1 unidade	21*

Fontes: SABESP (2002).

* Valor Daimler Chrysler, referência 2001.

Tabela 2.13. Média de demanda de água da categoria comercial.

Fonte	Unidade	Vazão em litros/unid./dia
Bar	Cliente	8
Bar	Empregado	50
Cafeteiras	Cliente	6
Cafeteiras	Empregado	40
Country clubs - não residentes	Membros	95
Country clubs - residentes	Membros	380
Loja de café	Cliente	20
Loja de café	Empregado	40
Lojas	Por banheiros	1520
Restaurantes	Cliente	30
Salão de bailes	Pessoa	8
Aeroporto	Passageiro	10
Barbearia	Cadeira	210
Cinema	Assento	8
Drive-in	Por espaço de carro	19
Edifício de Escritório	Empregado	65
Edifício Industrial	Empregado	55
Fábrica com chuveiros	Empregado	133
Fábrica sem chaveiros	Empregado	95
Lavagem de carro	Carro lavado	209
Lavanderia-comercial	Máquina	3000
Lavanderia-*Laundromat*	Máquina	2200
Lojas	Empregado	40
Lojas de departamento	Por m^2 de área de piso	8
Lojas de Departamento	Empregado	40
Posto de Gasolina	Primeiro lavador	3800
Posto de Gasolina	Lavador adicional	1900
Posto de Gasolina	Empregado	190
Shopping Center	Por m^2 de área de piso	6
Shopping Center	Empregado	40

Fonte: Qasim, Syed R (1994).

2.5.2.1 Demanda de Água dos Setores Industriais sob a Perspectiva de Uso em Refrigeração

Em 1995, a American Water Works Association - AWWA apresentou pesquisa de 1991 feita em Denver, Colorado, Estados Unidos na qual foram verificados os consumos de água de seis indústrias da região, quatro engarrafadoras, cinco fábricas de alimentos, quatro estabelecimentos de saúde, quatro lavanderias, três universidades. Foram selecionados conforme **Tabela 2.14**.

Deve-se observar que do consumo total de água em indústrias pesquisadas, 48,1% correspondem a água para resfriamento além dos 6,6% para resfriamento sem aproveitamento (sem recirculação) e 17,1%, a água para consumo. Outro tópico que nos chama a atenção seria o caso dos edifícios comerciais, com um uso de aproximadamente 28,2 % para resfriamento. Essa informação se aproxima bastante das experiências brasileiras, pois, segundo dados da empresa AQUALAB QUÍMICA E SERVIÇOS LTDA, observa-se atualmente que em alguns estabelecimentos comerciais, como shoppings, cerca de 40 % da água total consumida se destina a torres de arrefecimento.

A princípio, o consumo para fins de refrigeração total deveria corresponder à soma das parcelas comercial e industrial. Para se saber aproximadamente o quantitativo de prédios que utilizam ar-condicionado central refrigerado à água e dessa forma tentar estimar a quantidade de água usada em refrigeração no setor comercial do Rio de Janeiro, o órgão responsável da prefeitura que confere o licenciamento para todos os estabelecimentos que utilizam torres de resfriamento foi procurado, mas infelizmente seus arquivos não estavam em condições de fornecer essa informação.

Para se ter uma exatidão sobre o consumo em refrigeração nesta cidade, seria necessário se preparar um questionário específico e aplicá-lo nas indústrias e nos estabelecimentos comerciais em questão de uma determinada área geográfica, o que não foi possível ser feito neste trabalho. São apresentados, portanto, os dados já tabelados por alguns autores.

Tabela 2.14. Consumo de água em diversos estabelecimentos de Denver, Colorado, USA.

Uso de água	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Resfriamento e aquecimento	48,1	11,3	19,1	10,8	1,6	26,2	18,4	0,1	5,4
Resfriamento sem reaproveitamento	6,6	2,6	14,4	8,8	0,3	1,6	10,1	3,2	5,2
Processo	7,6	56,0	12,7	7,5	-	-	-	-	-
Rega de jardins	4,6	1,4		3,8	-	21,6	-	4,3	29,5
Lavagem e limpeza	0,9	11,1	41,9	4,8	0,5	-	6,4	4,4	-
Cozinha	0,6	-	-	4,5	-	1,0	3,1	48,5	3,9
Lavanderia	-	-	0,1	12,4	89,8	-	17,2	0,7	2,9
Doméstico	17,1	3,3	3,3	39,6	3,5	40,4	30,6	27,8	47,8
Outros usos	3,0	3,9	0,9	2,4	0,7	-	-	2,3	0,8
Vazamentos	2,7	0,9	1,6	-	0,3	0,5	0,6	-	0,7
Perdas	8,8	9,5	6,0	5,4	3,3	8,7	13,6	8,7	3,8
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Fonte: AWWA (1995).

(1) Uso de água em seis indústrias; (2) Uso da água em quatro engarrafadoras; (3) Uso da água em cinco indústrias de alimentos; (4) Uso da água em quatro estabelecimentos de saúde; (5) Uso da água em quatro lavanderias; (6) Uso da água em três edifícios comerciais; (7) Uso da água em dois hotéis; (8) Uso da água em três restaurantes; (9) Uso da água em cinco escolas e universidades.

A **Tabela 2.15**, conforme SANTOS (1984), apresenta em porcentagem a desagregação da água de doze categorias de indústrias. Estão tabeladas água para alimentação de caldeiras, água para resfriamento, água para lavagem do produto e água para uso doméstico. A **Tabela 2.15** deverá ser usada com bastante critério, devendo-se considerar que inovações tecnológicas podem aumentar ou até diminuir o consumo de água. De forma geral, ela mostra perfeitamente um panorama da enorme parcela usada no setor de utilidades, bem como especificamente no setor de refrigeração.

Tabela 2.15. Desagregação do consumo (%)

Tipo de Utilização da água	Abate de Animais	Conservação de Peixe	Refinação de óleo	Confeitaria	Chocolates	Destilaria
Alimentação de Caldeiras	10	36	14	1	70	6
Arrefecimento por submersão	-	-	-	-	-	23
Arrefecimento por recirculação	-	-	48	46	-	17
Arrefecimento direto	-	-	-	-	-	25
Total	10	36	62	47	70	71

Tabela 2.15. (continuação)

Tipo de Utilização da água	Refrigerantes	Engarrafamento	Tecelagem e tintura-ria	Fábrica de telas imper-meáveis	Indústria de curtume	Indústria de papel
Alimentação de Caldeiras	10	-	13	9	1	25
Arrefecimento por submersão	-	-	-	-	-	-
Arrefecimento por recirculação	-	-	2	-	-	-
Arrefecimento direto	-	48	4	85	-	-
Total	10	48	19	94	1	25

Tabela 2.15. (continuação)

Tipo de Utilização da água	Indústria química de tintas e Resinas	Indústria química de sabões	Indústria de borracha	Indústria de cimento	Indústria Metalúrgica Básica
Alimentação de Caldeiras	-	4	25	-	-
Arrefecimento por submersão	10	80	8	-	-
Arrefecimento por recirculação	7	-	15	-	7
Arrefecimento direto	13	-	51	-	13
Total	30	84	99	-	20

Tabela 2.15. (continuação)

Tipo de Utilização da água	Indústria de maquinário e equipamentos	Indústria de transformação diversa	Estações e serviço de reparações	Porcentagem global na indústria de transformação	Porcentagem global
Alimentação de Caldeiras	1	-	-	9	7,5
Arrefecimento por submersão	-	-	-	6	5,4
Arrefecimento por recirculação	-	25	-	7,5	6,2
Arrefecimento direto	2	-	-	9,1	7,6
Total	3	25	-	31,6	26,7

Fonte: Adaptado de AWWA (1995).

2.5.3 Custos da Água

2.5.3.1 Custo da Água no Mundo

TOMAZ (2001) apresenta o resultado de pesquisa publicada em setembro de 1999, realizada pela *National Utility Service* sobre o custo do m^3 da tarifa de água no mundo. Esse resultado encontra-se na **Tabela 2.16**. O custo da água potável no Japão não fez parte deste estudo específico, mas ele afirma que é de US$ de 3,73/m^3, enquanto a água de reúso nesse país é de US$ 2,99 (dados de 1998). No Brasil, a média nacional no ano de 1999 foi de US$ 0,47/m^3 (R$ 0,99/m^3), todavia sabe-se que muitas concessionárias praticam tarifas diferenciadas de acordo com o uso (uso residencial, comercial, industrial, entre outros). No caso específico do estado de São Paulo, com relação aos municípios relacionados à diretoria metropolitana de distribuição da SABESP e considerando-se o setor industrial com consumo acima de 50 m^3/mês a água tratada e distribuída pela concessionária custa em média R$ 7,52/m^3, sem contar a coleta de esgotos que custa o mesmo valor da tarifa de água (dados de 29/08/2003).

Em Guarulhos, o SAAE (Serviço Autônomo de Água e Esgoto) fornece água potável a elevado custo US$ 3,05/m^3 e normalmente cobra a mesma tarifa para o esgoto, gerando um custo total de US$ 6,10/m^3 (em 13/01/2000).

Em seu estudo, na cidade de Guarulhos, o autor apontou várias alternativas de fornecimento de água para as indústrias da região e chegou ao resultado da **Tabela 2.17**, concluindo que reciclar esgoto sanitário e industrial parece ser uma das boas alternativas.

Tabela 2.16. Preço por m^3 da tarifa de água em 15 países do mundo em setembro de 1999.

País	Custo (em US$) / m^3 de água
Alemanha	1,83
Dinamarca	1,62
Bélgica	1,53
Holanda	1,24
França	1,22
Inglaterra	1,17
Itália	0,75
Finlândia	0,68
Irlanda	0,62
Suécia	0,57
Espanha	0,56

Austrália	0,49
Estados Unidos	0,47
África do Sul	0,45
Canadá	0,4

Fonte: Revista Water Conditioning & Purification Magazine (1999).

Tabela 2.17. Alternativas para água industrial em US$/$m^3$.

Alternativas	**Custo do m^3 da água em dólar incluso amortização e energia elétrica**
Usar água potável do SAAE; água industrial: R$ 5,50/m^3 para água e R$5,50/$m^3$ para esgoto	US$ 3,05/ m^3
Usar água de poço tubular profundo	US$ 1,55/ m^3
Reciclar esgoto sanitário e industrial de uma fábrica vizinha	US$ 1,05/ m^3
Retirar água de um córrego ou rio próximo	US$ 1,05/ m^3
Reciclar o esgoto sanitário e industrial	US$ 1,05/ m^3
Usar água de chuva	US$ 2,50/m^3
Adquirir água industrial por tubulação e medidor (reúso)	US$ 1,05/ m^3
Adquirir água por caminhão tanque. Janeiro/2000 R$ 2,50/m^3	US$ 1,38/ m^3
Conservação da água: novos dispositivos e campanha educativa	Economia até 30%

Fonte: Tomaz (2001).

US$ 1,00=R$ 1,81 (13/01/2000).

2.5.3.2 Custo da Água na Bacia do Paraíba do Sul

A proposta da cobrança de uso da água pelo CEIVAP, descreve-se da seguinte forma:

$$C = \underbrace{\left[Q_{CAP} * K_0 * PPU\right]}_{1^a.Parcela} + \underbrace{\left[Q_{CAP} * K_1 * PPU\right]}_{2^a.Parcela} + \underbrace{\left[Q_{CAP} * (1-K_1) * (1-K_2 K_3) * PPU\right]}_{3^a.Parcela}$$

onde:

1ª. Parcela: cobrança pelo volume de água captada;

2ª. Parcela: cobrança pelo consumo (incorporação);

3ª. Parcela: cobrança pelo despejo do efluente no corpo receptor;

C = cobrança mensal total;

Q_{CAP} = volume de água captada durante um mês;

K_0 = multiplicador de preço unitário para captação (≤ 1) = 0,4;

K_1 = coeficiente de consumo (este índice corresponde à parte do volume captado que não retorna ao manancial e é informado pelo usuário);

K_2 = percentual de volumes de efluentes tratados e volume de efluentes produzidos (informado pelo usuário);

K_3 = nível de eficiência de redução de DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio (informado pelo usuário);

PPU: Preço Público Unitário, corresponde à cobrança pela captação, pelo consumo e pela diluição de efluentes para cada m^3 de água captada = R$ 0,02.

Muitos setores vêm fazendo simulações e verificando dentro de um determinado cenário qual será o impacto dessa cobrança nos seus investimentos. Vários exemplos de simulação foram apresentados na Conferência Nacional sobre reúso de água realizada em 19/06/2002 e pelo que se pode perceber várias empresas já investem em reúso ou reciclagem de forma pesada com alta porcentagem de reaproveitamento. Dentre elas estão as empresas abaixo representadas na **Tabela 2.18**, por VALEZI (2002):

Tabela 2.18. Empresas que utilizam água reciclada.

Empresas	Porcentagem de água reciclada
Usina de Belgo Mineira (MG)	95,4%
Cia Siderúrgica Tubarão (ES)	94,0%
Cosipa (SP)	93,0%
Fiat (MG)	92,0%
Usina de Ipatinga (MG)	91,2%
Usina Presidente Vargas (RJ)	86,0%
Panomco Spal (SP)	70,0%

Fonte: revista Meio ambiente Industrial, edição 16, nº15, nov/dez/98.

A tendência será explorar cada vez mais todas as potencialidades de reúso e entre elas, sem dúvida alguma, está o reúso em torres de resfriamento.

3. SISTEMAS DE RESFRIAMENTO

3.1 Tipos de Sistemas de Resfriamento

Os sistemas de refrigeração à água classificam-se basicamente em três tipos: *a*) sistemas abertos sem recirculação de água; *b*) sistemas fechados com recirculação de água; *c*) sistemas abertos com recirculação de água ou sistemas semi-abertos. A aplicação de cada um deles dependerá de alguns condicionantes, tais como: tipo de processo, temperatura da água, qualidade da água, disponibilidade de água, custo da água e limitações ambientais para descarte de efluente, entre outros. Apresenta-se, a seguir, uma breve descrição de cada um desses sistemas.

3.1.1 Sistemas abertos sem recirculação de água

Nos sistemas abertos sem recirculação de água, também chamados *sistemas de uma única passagem*, a água é imediatamente descarregada após absorção do calor. É um sistema não evaporativo, mas, devido ao grande consumo de água, somente indústrias localizadas próximo aos grandes mananciais possuem condição de usá-lo. Refinarias de petróleo, indústrias químicas e petroquímicas, usinas termoelétricas e nucleares, quando localizadas próximo às zonas litorâneas, muitas vezes utilizam água do mar. Nesses casos, é praticamente impossível o tratamento da corrosão (GENTIL, 2001).

Esse sistema, apesar de sua aparente simplicidade prática, possui algumas desvantagens. A primeira grande desvantagem é decorrente das dificuldades práticas para o tratamento da corrosão e incrustação. Nesses casos seria necessária uma enorme quantidade de produtos químicos adicionados à água de resfriamento, podendo causar grandes impactos ambientais.

Outra desvantagem que merece ser citada é a poluição térmica que pode provocar conseqüências ecológicas desastrosas em alguns sistemas aquáticos. Em determinadas situações, mesmo as pequenas variações de temperatura são suficientes para a alteração de todo o ecossistema natural e organismos presentes. A necessidade de utilização de equipamentos e tubulações constituídos de materiais metálicos mais resistentes à corrosão, tais como aços inoxidáveis mais nobres, titânio etc., principalmente nos tubos de trocadores de calor, também passa a ser fator limitante para o uso desse sistema. Nesses casos, os produtos da corrosão podem se acumular na superfície metálica, obstruindo a passagem da

água, podendo ocasionar necessidade de limpezas químicas e mecânicas com muita freqüência como forma de evitar o aumento nas pressões de bombeamento. Outros problemas que merecem ser apresentados incluem o *fouling* biológico e as incrustações que podem acarretar também uma resistência maior na troca térmica. A **Figura 3.1** apresenta o esquema desse tipo de sistema.

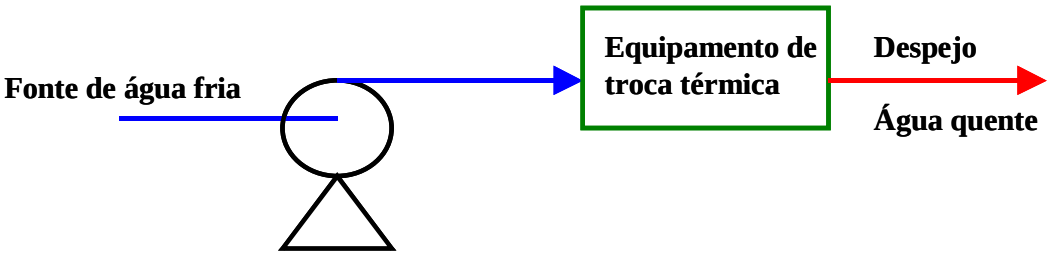


Figura 3.1. Sistema de água de resfriamento aberto sem recirculação de água.

3.1.2 Sistemas Fechados com Recirculação de Água Fria

Nos *sistemas fechados com recirculação de água fria*, a dissipação do calor pode ser feita através de um radiador ou em trocadores de calor refrigerados por um gás, como amônia ou *freon*, ou outro circuito de água. Não havendo evaporação, o ciclo de concentração se mantém praticamente constante. Esse sistema é denominado não evaporativo, conforme apresentado em GENTIL (2001).

Esses sistemas são usados, na maioria das vezes, para determinados processos de pequena capacidade, como resfriamento de motores diesel, mancais de bombas, camisas do cilindro de compressor, turbinas a gás e sistemas de ar-condicionado. Geralmente o sistema fechado transfere o calor absorvido através de um trocador de calor para um sistema aberto, de onde será rejeitado para a atmosfera. Devido a essa característica esses sistemas são muitas vezes considerados como uma pequena parte de um sistema aberto de recirculação. Nesse sistema fechado, a água de resfriamento não tem contato com o fluido refrigerante; por não haver evaporação nem respingos, praticamente não há perda de água. A única perda que pode ocorrer será devido a algum vazamento em alguma gaxeta ou conexão. Tais perdas geralmente são pouco significativas e a reposição de água é geralmente muito pequena, fazendo com que também seja pequena a reposição de produtos químicos para tratamento da água. Esse sistema é vantajoso, pois, como os sais não se concentram, não há necessidade de

purgas para ajustar as concentrações salinas e em conseqüência também não existem muitos problemas de depósitos e incrustações.

Ambientalmente, não existe preocupação com descartes contínuos, podendo-se inclusive aumentar a concentração de produtos químicos a fim de se obter maior controle das taxas de corrosão e incrustação, além de aumentar a vida útil dos equipamentos. Uma outra vantagem da aplicação desse sistema é a inibição de processos de crescimento biológicos devido ao fato de não haver contato com o ar, embora se encontre presença da bactéria *nitrobacter winogradsky* em alguns sistemas tratados à base de nitrito, que em sua via metabólica utiliza o nitrito como fonte de energia, oxidando nitrito a nitrato, utilizando o oxigênio solúvel na água. Na **Figura 3.2** encontra-se o esquema desse tipo de sistema.

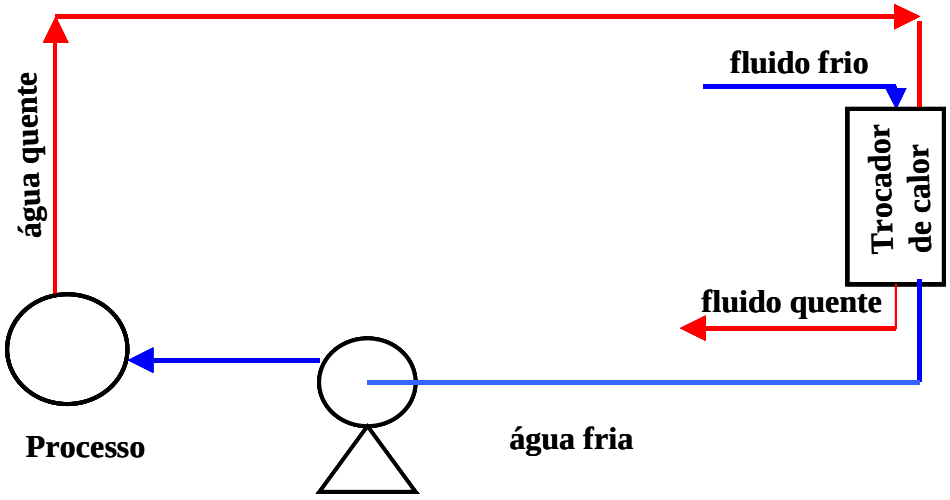


Figura 3.2. Sistema de água de resfriamento fechado.

3.1.3 Sistemas Abertos com Recirculação de Água ou Sistemas Semi-abertos

Estes são utilizados com a finalidade primordial de economizar água e possibilitar um tratamento adequado contra corrosão, incrustações e, conseqüentemente, tomar medidas adequadas que os sistemas abertos não permitem, tais como: clarificação da água de alimentação, uso econômico de inibidores de corrosão e agentes dispersantes e controle microbiológico rígido, a fim de evitar o aparecimento de pilhas de aeração diferencial e controlar a corrosão microbiológica. A água aquecida nos equipamentos de troca térmica tem seu calor dissipado em torres de refrigeração de diferentes tipos, piscinas com e sem borrifadores.

Esse sistema é utilizado quando se requer grande vazão de água e, sem dúvida, pode-se

dizer que é o mais incentivado nos projetos modernos para a maioria das indústrias e estabelecimentos comerciais, pois é econômico e é o que mais atende às necessidades técnicas operacionais quanto às atuais necessidades de redução de consumo de água, pois ele reutiliza a mesma água várias vezes. Assim que o calor é dissipado na torre, a água fria retorna ao equipamento de troca térmica para novamente se aquecer e ser resfriada na torre. Segundo ELKIND (1996), o consumo de água numa refinaria típica é da ordem de 0,8 m^3 de água/m^3 de petróleo (utilizando sistemas de circuito semi-aberto). Se o sistema fosse aberto, o consumo poderia atingir 38 m^3 de água/m^3 de petróleo. Outras vantagens seriam a possibilidade de utilização de equipamentos e tubulações constituídos de materiais mais baratos sem severas exigências de resistência à corrosão, tipo aços carbono, haja vista ser absolutamente exeqüível o tratamento químico da água.

De certa forma, o tratamento dessa água torna-se absolutamente necessário, pois, durante o funcionamento da torre nesse sistema, ocorrerá aumento da concentração de sólidos dissolvidos na água e absorção de gases da atmosfera, o que aumenta o risco de corrosão, de incrustações e depósitos, por isso lança-se mão de anticorrosivos e dispersantes; estes atuam mantendo os sólidos dissolvidos no meio líquido, evitando assim uma possível precipitação e corrosão por depósito.

A temperatura elevada da água, aliada a um alto tempo de detenção e a um contato direto com o ar atmosférico, propicia o crescimento microbiológico e este deve ser combatido com biocidas.

Ressalta-se ainda que os aparelhos de rejeição de calor evaporativos, tais como as torres, são comumente usados para prover temperaturas de água menores do que as alcançáveis com resfriamento a ar. O potencial de resfriamento de uma superfície molhada é muito maior do que uma superfície seca.

Adiante o funcionamento da torre será mais detalhado e aprofundado em termos de ciclo de concentração, evaporação, respingos, arrastes e purgas. No momento, vale lembrar que esse sistema sim é objeto deste estudo, visto que está se estudando reúso de efluentes como água de reposição em torres de resfriamento. Na **Figura 3.3** encontra-se o esquema desse tipo de sistema utilizando torre de resfriamento.

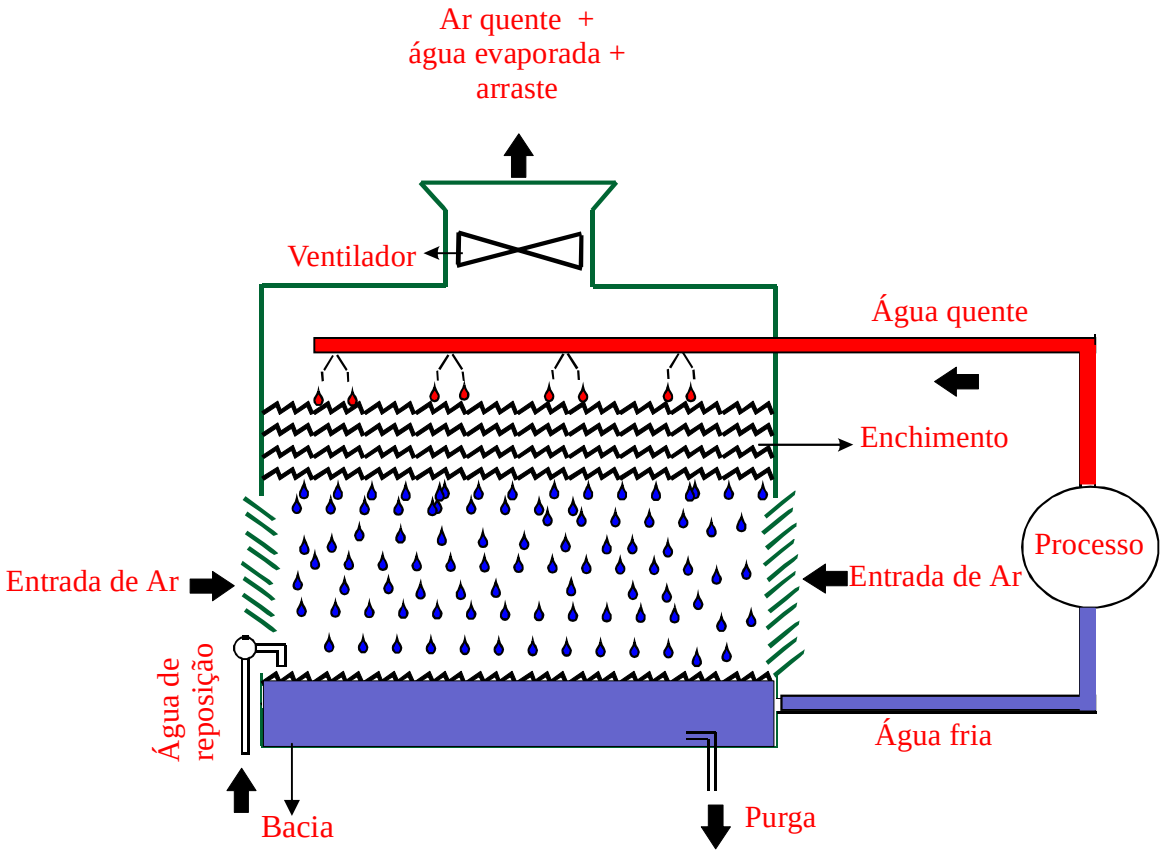


Figura 3.3. Sistema de água de resfriamento aberto com recirculação de água.

3.2 Torres de Resfriamento: Aspectos Construtivos e Operacionais

3.2.1 Usos de Torres de Resfriamento

As torres de resfriamento podem ser consideradas os mais importantes equipamentos dissipadores de calor por contato direto. GOMES (1997) cita alguns usos típicos de torres de refrigeração:

1. Usinas termoelétricas e usinas nucleares, na condensação de vapor;
2. Instalações de ar-condicionado (comerciais e industriais) e instalações frigoríficas: refrigeração de equipamentos;
3. Usinas de álcool, indústrias de bebidas, indústrias alimentícias: processos de fermentação;
4. Indústrias químicas e petroquímicas: processo de compressão de gases.

A autora também cita que as primeiras torres em escala industrial foram criadas há 100 anos, na Europa.

3.2.2 Funcionamento de uma Torre de Resfriamento

Observando ainda a **Figura 3.3**, é possível entender que uma torre de resfriamento, arrefecimento ou refrigeração é um equipamento cuja função é rejeitar calor, liberando energia térmica para a atmosfera através do arrefecimento de uma corrente de água aquecida inicialmente a uma determinada temperatura até uma temperatura menor, através da troca de calor dessa água com uma corrente de ar.

A água é resfriada ao cair na torre após ser pulverizada pelos bicos pulverizadores que aumentam a área exposta da água em contato com o ar. O resfriamento acontece principalmente pela evaporação de um baixo percentual de água aquecida que ocorre quando a água cai pela torre e entra em contato com o ar por um certo tempo até ser coletada numa bacia de água fria na base da torre.

A corrente de ar faz com que as forças atrativas da água no estado líquido sejam superadas e então as moléculas mais superficiais se vaporizam. Esse processo de vaporização é um processo físico e só ocorre absorvendo do meio, ou seja, da água restante, uma energia correspondente a 9,72 Kcal por molécula grama de água (18g). Essa energia é chamada de calor latente de vaporização. Esse calor retirado do meio, segundo DANTAS (1988), corresponde a 75 a 90% do calor total perdido. O restante do calor perdido ocorre pela própria diferença entre a temperatura da água e a temperatura de bulbo úmido do ar. Nas regiões de clima frio, essa parcela perdida por calor sensível pode ser maior.

A água da bacia é bombeada de volta ao processo para absorver mais calor. O calor da corrente de água, transferido para a corrente de ar, aumenta a temperatura do ar e eleva a sua umidade relativa a 100% no caso ideal. Esse ar é descarregado para a atmosfera e a força motriz desse fenômeno é a diferença entre a temperatura de bulbo úmido do ar ambiente e a temperatura da água.

Muitas vezes, o ciclo de concentração, que é o número de vezes que uma água se concentra num sistema, fica bastante elevado e, portanto, a concentração salina também fica bastante elevada e os sais existentes na água poderão provocar corrosão e incrustações nos sistemas, portanto suas concentrações devem ser reduzidas. Nesses casos, há necessidade da realização de purgas.

Junto com a água evaporada, gotículas de água do sistema são arrastadas com o ar (arraste). Para compensar a água evaporada, a água arrastada, as eventuais purgas e os respingos, uma nova quantidade de água deverá entrar no sistema, como água de reposição ou *makeup*, mantendo assim o ciclo de concentração no valor desejado.

Nesta etapa, serão descritos com mais detalhe alguns termos apresentados na descrição

feita anteriormente.

***a*) Arraste -** gotículas de água que são arrastadas para a atmosfera pelo ar que sai da torre de resfriamento. Esta água arrastada (respingos), diferentemente da água evaporada, contém a mesma concentração de sais e de produtos químicos que a água da bacia da torre.

Nas torres atuais, o arraste é cerca de 0.01 a 0.05% da vazão de recirculação, mas em torres antigas, as perdas atingiam até 0.3% da vazão.

Para evitar o arraste existem nas torres atuais sistemas de chicanas, projetados para coletar a quantidade de água perdida na forma de gotículas misturada com o ar efluente e dessa forma, ajudam a reduzir o arraste. São os chamados eliminadores de gotas. Veja a **Figura 3.4.** As venezianas também são destinadas a minimizar essas perdas.

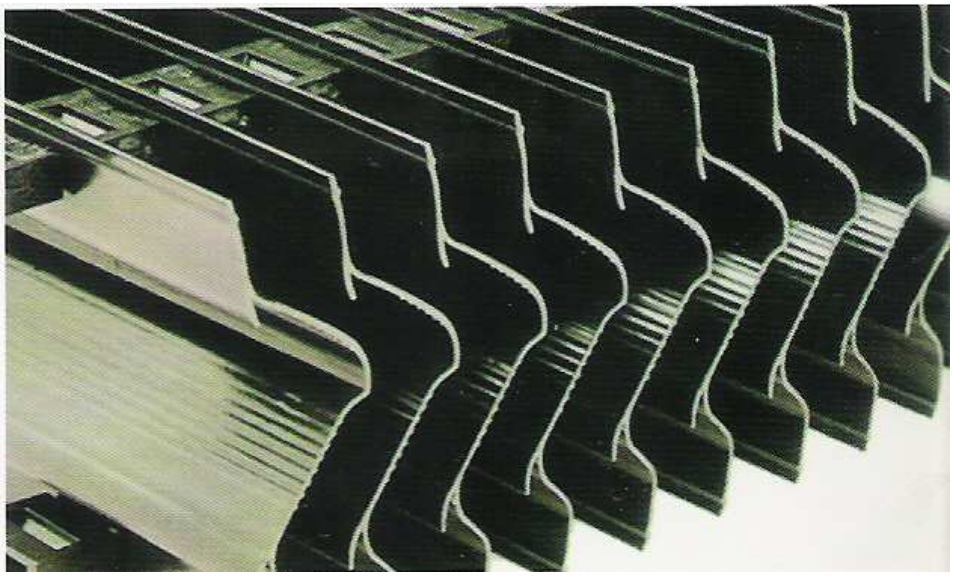


Figura 3.4. Eliminadores de gotas.

Fonte: Catálogo técnico da ALPINA.

***b*) Purga -** Água descarregada do sistema, para controlar a concentração de sais ou outras impurezas da água circulante. São aplicadas de forma contínua ou intermitente nestes sistemas.

***c*) Vazão de água de reposição (água de *makeup*) -** Água adicionada ao sistema de água circulante com o objetivo de repor as perdas do sistema causadas por evaporação, arraste, purga e vazamentos. É adicionada continuamente à bacia da torre, através de um sistema de controle de nível.

***d*) Ciclo de concentração -** É o número de vezes que a água de resfriamento se concentra num sistema devido aos processos de evaporação e reposição contínuos que ocorrem na torre. Essa concentração é em relação às concentrações iniciais das impurezas da água de alimentação, pois a água disponível na natureza não é pura, por sua própria característica de solvente universal, ela tende a dissolver várias substâncias (orgânicas, inorgânicas e gasosas), além de também apresentar sólidos em suspensão e sólidos coloidais, ou seja, ela contém impurezas. Quando ocorre a evaporação, que é um processo físico, somente água pura, sem impurezas, é liberada da solução, os sais permanecem nessa solução. No entanto, a água que será usada para repor essa parcela de perda devido à evaporação também contém sais e outras impurezas. Dessa forma, se um programa de tratamento específico exigir uma concentração máxima de 1000 ppm (parte por milhão) de cloreto no sistema os ciclos máximos sob os quais a torre deverá operar será igual 1000 dividido pelo teor de cloreto na água de reposição.

ROZENTAL (1999) ressalta que na implementação de tratamento químico à base de inibidores de corrosão, o ciclo é um parâmetro de extrema relevância, sendo seu valor constantemente acompanhado e rigorosamente mantido dentro dos padrões pré-determinados antes da implantação do tratamento. Geralmente referindo-se à concentração de determinado sal de referência ou íon solúvel típico, desde que seja estável tal como o cloreto.

Segundo DREW (1979), a determinação adequada dos ciclos de concentração necessários para a operação ótima na torre de refrigeração envolve a análise rigorosa de alguns fatores: projeto de todo o sistema de refrigeração, temperatura, análise de disponibilidade da água de reposição, vazamentos, contaminantes trazidos pelo ar, tempo de retenção e limitações do efluente que muitas vezes implicam tratamentos que podem requerer modificação na operação da torre. Ressalta também que a composição química da água de reposição domina a escolha de ciclos de concentração, especialmente porque ela se relaciona com o controle de incrustações, pois, uma vez que os sais dissolvidos têm um limite máximo de solubilidade, ocorre a formação de depósitos, se a concentração dos sais na água de refrigeração não for controlada. Nessa situação, os sais de menor solubilidade, como carbonato, sulfatos ou silicatos, de cálcio ou magnésio, são os primeiros a precipitar. Qualquer matéria em suspensão na torre será concentrada de maneira análoga à dos sais dissolvidos. As concentrações de detritos presentes no ar ou na água podem acelerar essa sedimentação de sólidos em suspensão, causando eventualmente sérios problemas de formação de depósitos. Os íons de cálcio, magnésio, sílica, carbonato, bicarbonato e sulfato são constituintes típicos que devem ser controlados na torre. A **Tabela 3.1** está reproduzida abaixo para melhor elucidação com relação aos efeitos dos ciclos de concentração sobre as incrustações.

Tabela 3.1. Características da água como função da concentração (ppm).

Constituinte Químico	Reposição Disponibilidade (16ºC)	Água de Refrigeração Ciclos de Concentração (49ºC)		
		2	**3**	**4**
Dureza Total ($CaCO_3$)	160	320	480	640
Dureza Cálcio ($CaCO_3$)	120	240	360	480
Dureza Magnésio ($CaCO_3$)	40	80	120	160
Alcalinidade Total ($CaCO_3$)	100	200	300	400
Cloretos (Cl^-)	50	100	150	200
Sulfato (SO_4^{-2})	40	80	120	160
Sílica (SiO_2)	25	50	75	100
pH	7,3	(7,6)	(7,7)	(7,9)
Sólidos Totais Dissolvidos (NaCl)	500	1000	1500	2000
Índice de Langelier [1]	-0,60	+0,81	+1,25	+1,68

Fonte: Adaptado de DREW (1979).

1 - Observar que, nesse caso, a água de reposição é moderadamente corrosiva; o aumento dos ciclos de concentração reduziu esse potencial, promovendo, entretanto, uma tendência à formação de incrustações. O controle de incrustações de carbonato de cálcio unicamente por ciclos de concentração exigiria um nível operacional seguro máximo de apenas 2 ciclos para essa torre de refrigeração.

***e*) Enchimento -** Componente interno da torre de resfriamento de H_2O para aumentar o tempo e a superfície de contato entre a água e o ar, incrementado assim, a transferência de massa e calor.

***f*) Temperatura de água quente -** Temperatura de água ao entrar no sistema de distribuição.

***g*) Temperatura de água fria -** Temperatura média da água circulante na bacia de água fria.

***h*) Aproximação (*approach*) -** Diferença entre temperatura da água fria e a temperatura de bulbo úmido de ar afluente.

***i*) Diferencial de temperatura (*Range*) -** Diferença entre as temperaturas de água quente e fria.

***j*) Ar afluente -** Ar que entra na torre de resfriamento de água, pode ser uma mistura do ar ambiente e ar efluente.

***l*) Ar efluente -** Mistura de ar e vapor de água na saída da torre de resfriamento de água.

***m*) Volume efetivo de resfriamento -** Parte do volume total da torre de resfriamento de água e em cujo espaço a água circulante entra em contato íntimo com o ar fluindo através da mesma a partir do nível da bacia de água fria até os bicos de pulverização ou bacia de distribuição.

***n*) Temperatura bulbo úmido -** Temperatura indicada pelo termômetro de bulbo úmido do psicrômetro. Também conhecida como a temperatura na qual o ar pode ser resfriado adiabaticamente até a saturação do ar.

***o*) Temperatura de bulbo úmido ambiente -** Temperatura de bulbo úmido do ar medida na entrada da torre de resfriamento de água e livre de efeitos de recirculação.

***p*) Temperatura de bulbo úmido do ar afluente -** Temperatura média de bulbo úmido do ar afluente (inclui eventuais efeitos de recirculação).

***q*) Temperatura de bulbo úmido do ar efluente -** Temperatura média de bulbo do ar efluente da torre de resfriamento de água.

***r*) Temperatura nominal de bulbo úmido do ar afluente -** Média aritmética das medições tomadas de 1,5 e 2,0 m acima da bacia a ambos os lados da torre de resfriamento de água, ou em posições diametralmente opostas, se tratar de torre circular.

***s*) Célula -** Menor subdivisão de uma torre de resfriamento de água limitada pelas paredes exteriores e paredes divisórias; cada célula pode funcionar como uma unidade independente com respeito aos fluxos de ar e água.

***t*) Carga térmica -** Quantidade de calor removida da água em circulação pela torre de resfriamento de água.

***u*) Pluma -** A corrente de ar saturado que deixa a torre. A pluma é visível quando o vapor da água que ela contém condensa em contato com o ar ambiente mais frio. Sob certas condições, uma pluma de torre de resfriamento pode apresentar riscos de congelamento nos arredores da torre.

3.2.3 Tipos de Torres de Resfriamento

De acordo com a maneira em que há movimentação do ar, as torres podem ser classificadas em:

a) Torre de ventilação natural (ou atmosférica) - Torre de resfriamento de água através da qual a movimentação do ar é induzida pelo jato de água produzido por bicos de pulverização. É a mais simples de todas, o ar passa horizontalmente pela torre, enquanto a água cai verticalmente. Pode apresentar ou não enchimento. As perdas por arraste são enormes. Possui bicos pulverizadores e venezianas para reduzir os respingos. A quantidade de bicos e a altura da torre irão determinar seu desempenho. O esquema dessa torre encontra-se ilustrado na **Figura 3.5**.

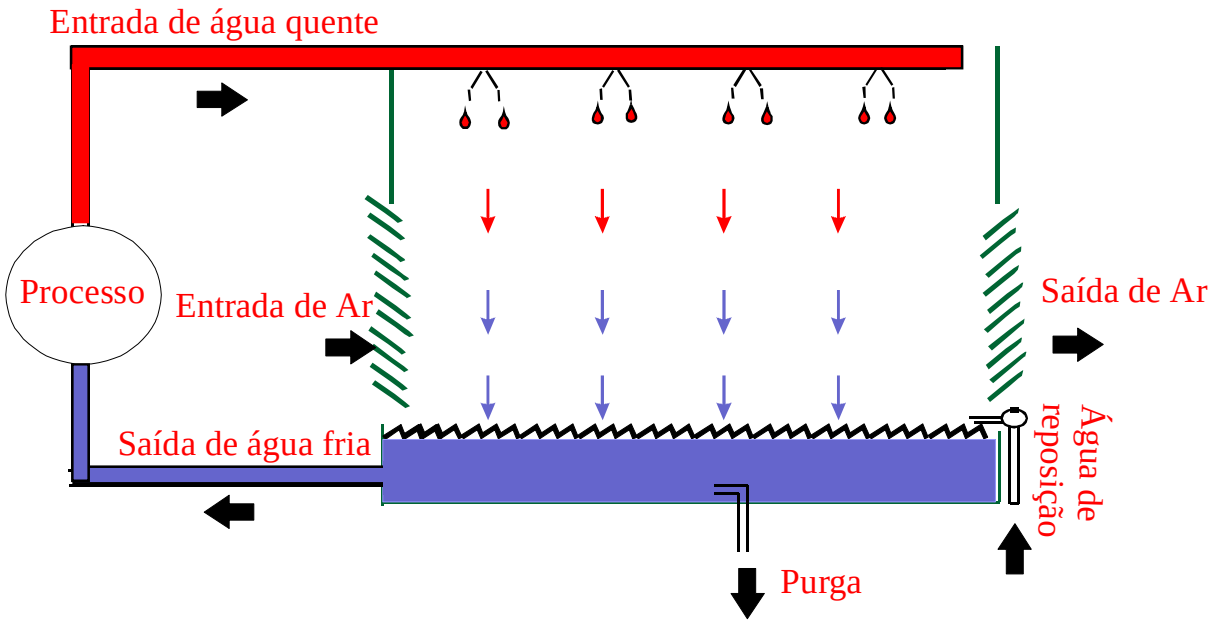


Figura 3.5. Esquema de torre de ventilação natural.

b) Torre de tiragem natural (torre hiperbólica) – Torre de resfriamento de água através da qual a movimentação do ar é obtida por meio da diferença de densidade entre o ar no interior da mesma e o ar no exterior, também sem a presença de ventiladores, o que resulta em custo operacional menor que o das torres convencionais, porém geralmente são de concreto e apresentam dimensões gigantescas de dezenas de metros de altura e de igual largura da bacia. Nesse tipo de torre, constrói-se uma chaminé no topo da torre, de modo a proporcionar uma melhor tiragem do ar quente, que por apresentar uma densidade reduzida tende a subir. É utilizada em regiões de clima frio. É extremamente alta e, às vezes, apresenta a altura de dezenas de metros e largura na bacia de dimensões similares, muito comum na Europa, mas de uso limitado nos Estados Unidos, salvo para grandes termelétricas.

As torres hiperbólicas podem ser de concepção em contracorrente ou em fluxo cruzado. Elas serão econômicas quando uma fábrica puder amortizar os custos de construção num período mais longo. As usinas termelétricas têm-se utilizado com vantagem das torres hiperbólicas em áreas onde a altura das torres eleva a coluna de vapor para eliminar a recirculação e contato com as áreas de carga próximas. Por outro lado, as unidades industriais que têm tempos de amortização mais reduzidos e cargas térmicas muito menores e conseqüentemente menores colunas de vapor constroem geralmente unidades de tiragem mecânica.

c) Torre de tiragem mecânica – Ao contrário das torres de tiragem natural que são utilizadas para grandes capacidades e em clima frio, principalmente na Europa, as torres de resfriamento

com tiragem mecânica são hoje largamente utilizadas no Brasil (GOMES,1997) e não possuem restrição para localização. A vazão de ar é facilmente controlada, o que proporciona maior controle da temperatura de água fria. É definida como torre de resfriamento através da qual a movimentação do ar é obtida por meio de um ou mais ventiladores ou outro processo mecânico. O ar que deixa a torre é descarregado em um ponto longe o bastante da entrada de ar para evitar que ele seja conduzido novamente à torre de refrigeração. As dimensões da torre dependem de:

1. Faixa de resfriamento (diferença entre as temperaturas da água quente e fria);
2. Aproximação (*approach*) em relação à temperatura de bulbo úmido (diferença entre a temperatura de água quente e a temperatura de bulbo úmido);
3. Quantidade de água a ser resfriada;
4. Temperatura de bulbo úmido;
5. Quantidade de ar através do enchimento;
6. Altura da torre

Quanto ao arranjo construtivo classificam-se em:

a) Torre de tiragem forçada - com um ou mais ventiladores localizados na entrada de ar onde o ar é insuflado na torre por ventiladores na sua base ou nos lados. Dessa forma, o ar é obrigado a entrar horizontalmente e depois subir para encontrar as gotículas descendentes de água. Não há muito problema de corrosão nas pás do ventilador por ele não estar na zona de contato ar-água. A **Figura 3.6** ilustra a torre de tiragem forçada.

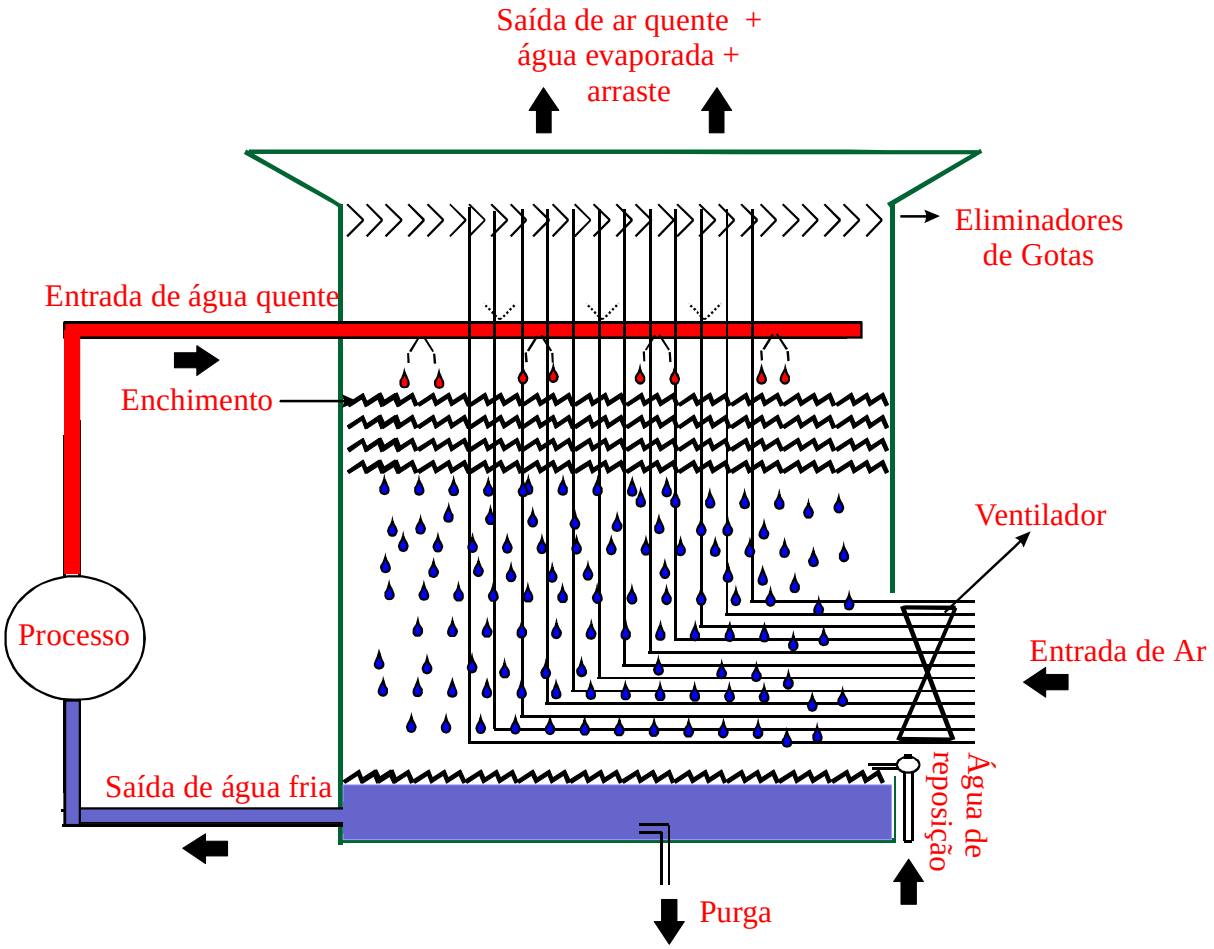


Figura 3.6. Esquema de torre mecânica de tiragem forçada.

b) Torre de tiragem induzida - o ar é aspirado na torre por exaustores no topo do equipamento, na saída de ar. Nessa configuração a corrosão nas hélices é mais preocupante.

Quanto aos movimentos relativos entre o ar e a água, classificam-se em:

a) Torre em contracorrente - Torre de resfriamento de água através da qual o ar flui em sentido contrário à corrente de água. Esse projeto utiliza venezianas na entrada de ar. Os eliminadores de gotas são colocados no topo da torre. A **Figura 3.7** ilustra uma torre contracorrente.

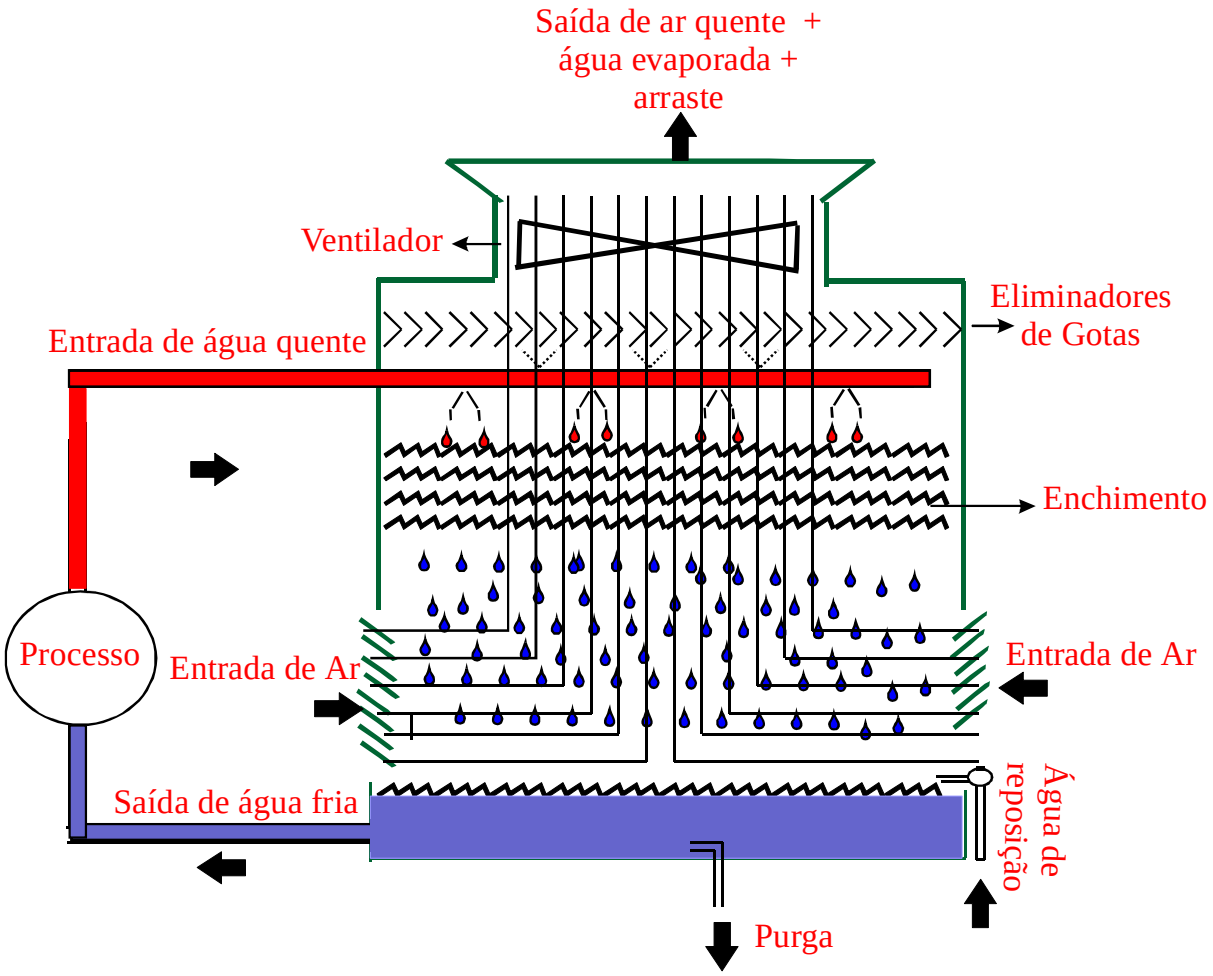


Figura 3.7. Esquema de torre mecânica contracorrente.

b) Torre em corrente cruzada – Torre de resfriamento de água através da qual o ar flui perpendicularmente à corrente da água. Esse projeto utiliza venezianas ao longo das paredes da torre e os eliminadores de gotas são colocados no centro da torre. A **Figura 3.8** ilustra uma torre corrente cruzada.

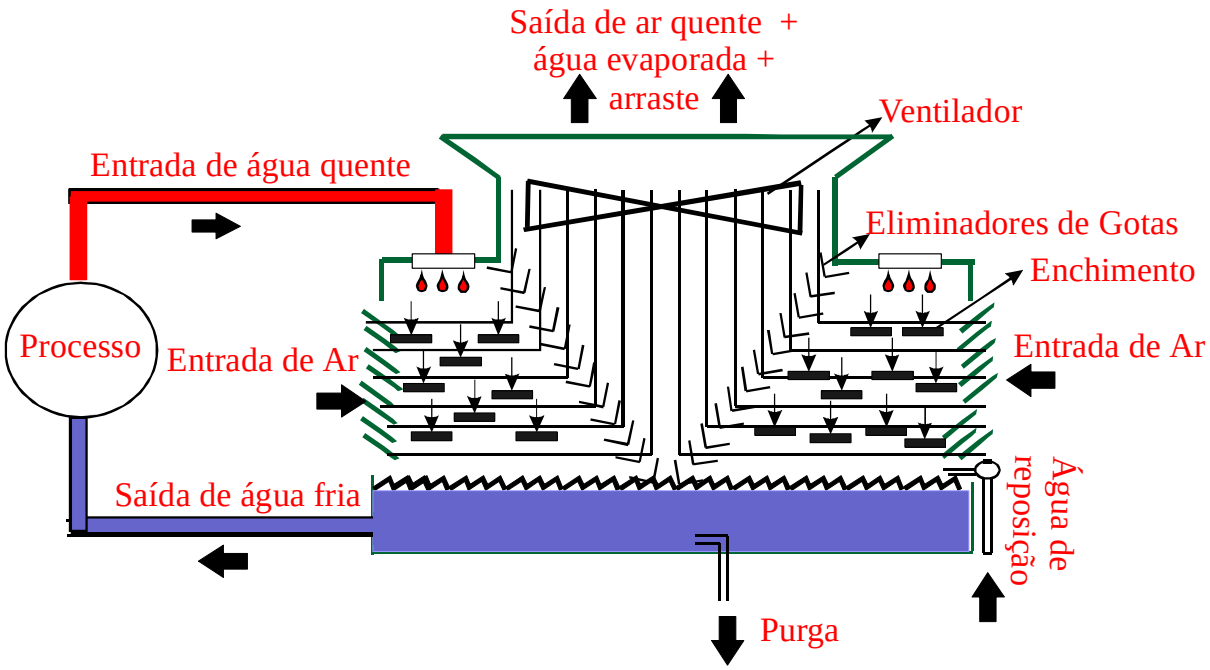


Figura 3.8. Esquema de torre mecânica corrente cruzada.

Quanto ao número de células, podem ser classificadas em:

a) Unicelulares – Possuem apenas uma célula, que é a menor subdivisão de uma torre de resfriamento de água limitada pelas paredes exteriores e paredes divisórias; cada célula pode funcionar como uma unidade independente com respeito aos fluxos de ar e água.

b) Multicelulares – Possuem várias células.

3.2.4 Enchimento de Contato para Torres de Resfriamento de Água

O enchimento é um componente interno da torre de resfriamento de água para aumentar o tempo e a superfície de contato entre a água e o ar. Dessa forma, ficam incrementadas as transferências de massa e calor. A **Figura 3.9** apresenta exemplos de diversos tipos de enchimentos que são utilizados no projeto de torres.

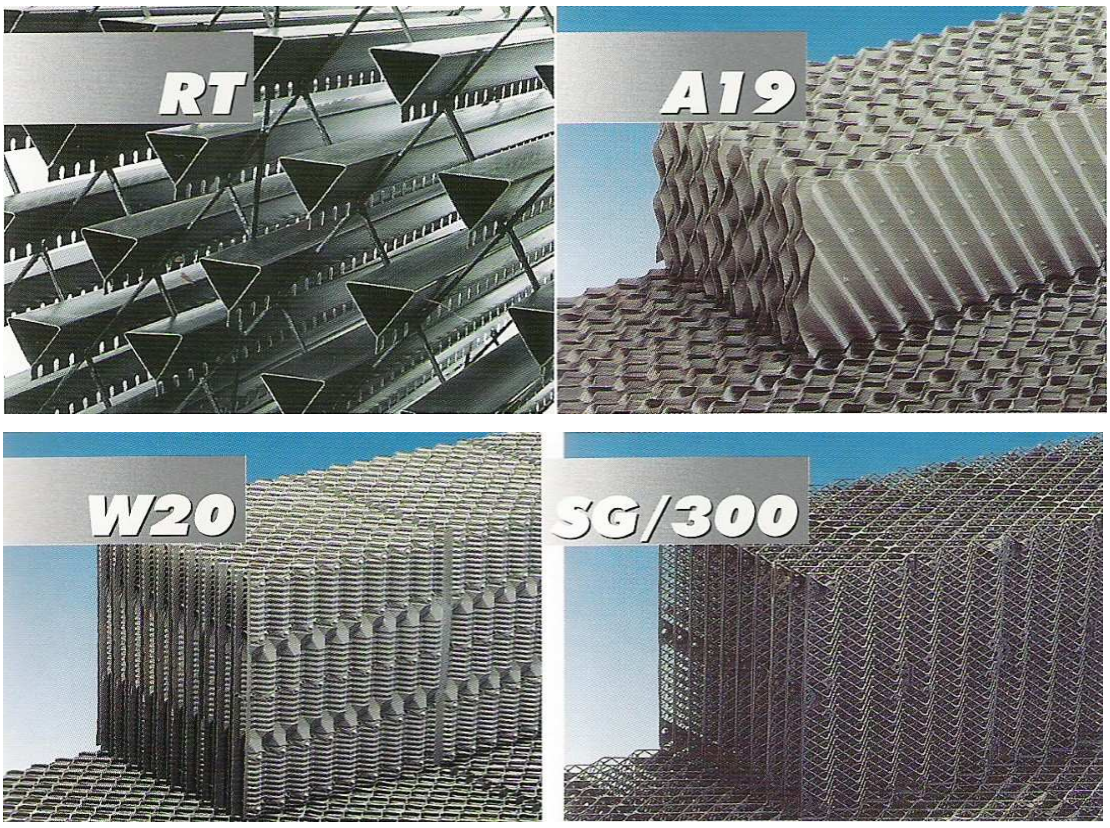


Figura 3.9. Vários tipos de enchimento.

Fonte: Catálogo técnico da ALPINA.

A escolha do enchimento adequado deverá basear-se no conhecimento das características da água e do ar ambiente.

Segundo WIESER (1997), a capacidade específica de troca térmica de um enchimento de torre de resfriamento de água por evaporação atmosférica, depende dos seguintes fatores:

- Área de troca por unidade de volume;
- Fluxos, laminar ou turbulento, de gás e líquido (ar/água);
- Intensidade do contato;
- Perda de pressão estática do ar na passagem;
- Capacidade de distribuir uniformemente água e ar.

Ainda segundo o autor, na prática, quanto maior a capacidade específica de troca térmica de um enchimento, maior também será sua tendência à obstrução. Em outras palavras, aquele tipo de enchimento que tem o maior coeficiente de troca térmica também sofre mais rápido irrecuperável deteriorização na sua capacidade de trocar calor, por aglutinação e incrustação de sólidos presentes na água. As suas “passagens” restritas para ar e água e a geometria das superfícies de contato favorecem a sedimentação de camadas de sólidos.

O material e a configuração do enchimento a ser escolhido para uma determinada torre dependem da característica da água que circulará e das propriedades físicas dos sólidos nela suspensos ou dissolvidos (WIESER, 1997).

Um enchimento de grande capacidade de troca térmica por evaporação resulta em uma torre de dimensões, consumo de energia e custo, menores que um outro com enchimento de menor capacidade. Porém, em nada adianta instalar uma torre de menor custo comparativo se, após breve período de operação com água rica em sólidos, a capacidade de troca térmica reduzir-se gradativamente pela acumulação destes no enchimento (WIESER, 1997).

Na avaliação dos diversos tipos de enchimentos, observam-se muitas características, dentre elas:

a) Com relação à água

- Presença ou ausência de sólidos suspensos, pois estes se acumulam por deposição em superfícies horizontais ou formam “feutros” (ex. bagacilio em usinas de álcool, industriais de celulose etc.) ou formam aglutinações (ex. biolimo). Para água com concentração de sólidos dissolvidos ou emulsões com substâncias gordurosas, geralmente não há enchimento apropriado. Nesses casos usam-se torres vazias, com a água pulverizada. Também se utilizam torres vazias em circuitos de resfriamento de siderúrgicas em alguns processos.
- Temperatura da água.

b) Com relação à lavabilidade

- Geralmente são consideradas como: baixa lavabilidade, média, alta ou alto lavável.

c) Com relação à resistência química

- São caracterizados como: baixa, média e alta dependendo do material de construção.

d) Com relação a sua resistência mecânica

- A resistência ao suporte de homem é um fator é importante na avaliação das tarefas de manutenção. Geralmente são caracterizadas como nula, média ou alta.

e) Com relação ao material

- Geralmente são de PVC ou polipropileno, estando disponíveis em diversas geometrias. Ainda se encontram torres com enchimento de madeira.

f) Com relação ao custo

- O custo depende das características das torres; geralmente quanto maior sua resistência mecânica, sua resistência a altas temperaturas e sua capacidade de trabalho com águas contendo impurezas, maior será seu custo.

3.2.5 Manutenção das Torres de Resfriamento

Entrou em vigor no dia 1º de março de 1999, a Portaria 3.523 da Secretaria de Vigilância Sanitária do Ministério da Saúde, que exige das empresas medidas de manutenção dos sistemas de ar-condicionado para o controle da qualidade do ar interno. A norma foi promulgada no dia 28 de agosto de 1998 e publicada no D.O.U. (Diário Oficial da União) no dia 31 de agosto de 1998. A Portaria aprova Regulamento Técnico que contém medidas básicas referentes aos procedimentos de verificação visual do estado de limpeza, remoção de sujidades (por métodos físicos) e manutenção do estado de integridade e eficiência de todos os componentes dos sistemas de climatização com capacidade acima de 5TR, 60.000 ou 15.000 kcal, inclusive as torres de refrigeração.

Segundo informações obtidas em Itarcon (2003), as práticas de manutenção acima devem ser aplicadas em conjunto com as recomendações de manutenção mecânica das Normas Brasileiras NBR 13.971 - Sistemas de Refrigeração, Condicionamento de Ar e Ventilação - Manutenção Programada da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, assim como os edifícios da Administração Pública Federal, o disposto no capítulo Práticas de Manutenção, Anexo 3, itens 2.6.3 e 2.6.4 da Portaria nº 2296/97, de 23 de julho de 1997, Práticas de Projeto, Construção e Manutenção dos Edifícios Públicos Federais, do Ministério da Administração Federal e Reforma do Estado, MARE. O somatório das práticas de manutenção para garantia do ar e manutenção programada visando ao bom funcionamento e desempenho térmico dos sistemas permitirá o correto controle dos ajustes das variáveis de manutenção e controle dos poluentes dos ambientes.

Todos os produtos utilizados na limpeza dos componentes dos sistemas de climatização devem ser biodegradáveis e estar devidamente registrados no Ministério da Saúde para esse fim, além disso toda verificação deve ser seguida dos procedimentos necessários para o funcionamento correto do sistema de climatização.

A **Tabela 3.2** contém um programa de manutenção preventiva para torres de resfriamento citado na referência.

Tabela 3.2. Programa de manutenção preventiva para torre de resfriamento.

Atividade	Período
• Verificar o termostato da torre	Mensal
• Verificar corrente (amperagem) do motor	Mensal
• Verificar as correias do ventilador	Mensal
• Anotar as temperaturas de entrada e saída da água	Mensal
• Coletar água da bandeja para análise	Mensal
• Desobstruir tomada do ladrão da bacia	Mensal
• Checar funcionamento da bóia de nível	Mensal
• Testar os registros (abrir e fechar)	Mensal
• Desobstruir os dispersores de água (bicos)	Trimestral
• Reapertar os parafusos (fixação do ventilador, pás e motor - e sapatas de chumbamento)	Semestral
• Verificar o sistema de distribuição de água	Semestral
• Limpeza externa da torre	Anual
• Verificar resistência de isolamento do motor	Anual
• Drenar água e limpar bacia	Anual
• Verificar estado do enchimento de contato	Anual
• Adicionar produto de tratamento de água	Conforme a necessidade

Fonte: www.itarcon.com.br acessado em 21/06/03.

3.3 Equações que Descrevem o Funcionamento de Torres de Resfriamento

3.3.1 Balanço Mássico

O balanço mássico desse sistema já está desenvolvido em várias obras como em DANTAS (1988), METCALF & EDDY (1991), BETZ (1980) e outros. Será adotada aqui a terminologia usada por Dantas (1988), onde:

A = vazão de água de alimentação

E = vazão de água de evaporação

R = vazão de água de respingo ou arraste

P = vazão de água de purga

C = ciclos de concentração

V = volume estático do sistema. É a soma do volume da bacia do sistema, das tubulações e dos trocadores de calor (m^3)

T = temperatura (ºC)

c_a = concentração iônica na alimentação

c_e = concentração iônica na água evaporada

c_p = concentração iônica nas purgas

c_r = concentração iônica no respingo

c_c = concentração iônica na circulação

A equação básica do balanço material desse sistema é:

$$A = E + R + P \tag{3.1}$$

Em termos de concentração salina, tem-se:

$$Ac_a = Ec_e + Rc_r + Pc_p \tag{3.2}$$

Na evaporação não há arraste de sal, então c_e = 0; e as concentrações iônicas dos respingos (c_r) e das purgas (c_p) são iguais e serão chamadas de concentrações salinas c_s. Portanto, $c_r = c_p = c_s$. Desta forma:

$$Ac_a = Rc_r + Pc_p \tag{3.3}$$

$$Ac_a = Rc_s + Pc_s \tag{3.4}$$

$$Ac_a = (R + P)c_s \tag{3.5}$$

Da equação (3.5), obtém-se:

$$\frac{c_s}{c_a} = \frac{A}{(R + P)} \tag{3.6}$$

Portanto,

$$\frac{c_s}{c_a} = \frac{(E+R+P)}{(R+P)} \tag{3.7}$$

Quando o sistema entra em operação, as adicionais cargas salinas introduzidas pela água de reposição devem ser iguais às removidas. Dessa forma:

c_s/c_a = constante =C = Ciclo de concentração da torre

Essa constante representa o número de vezes que a água de alimentação se concentrou no sistema.

$$C = \frac{(E+R+P)}{(R+P)} \tag{3.8}$$

ou

$$C = \frac{E}{(R+P)} + \frac{(R+P)}{(R+P)} \tag{3.9}$$

$$C = \frac{E}{(R+P)} + 1 \tag{3.10}$$

Através dessa equação, calcula-se o ciclo em função dos respingos, das purgas e da água evaporada e observa-se também que, quando se necessita limitar o ciclo de concentração, através de purgas, pode-se fazê-lo desde que se conheça os valores da evaporação e dos respingos. Tomando-se purga igual a zero, obtém-se o número de ciclos teóricos.

Novamente manipulando-se a equação 3.8 tem-se:

$$C(R+P) = E + R + P \tag{3.11}$$

$$CR + CP = E + R + P \tag{3.12}$$

$$CP - P = E - CR + R \tag{3.13}$$

$$P(C-1) = E - R(C-1) \tag{3.14}$$

$$P(C-1)/(C-1) = E/(C-1) - R(C-1)/(C-1) \tag{3.15}$$

$$P = \left[E/(C-1)\right] - R \tag{3.16}$$

Para calcular a água de reposição e colocá-la em função do ciclo de concentração e da evaporação, basta substituir o valor das purgas dado pela relação (3.16) na equação (3.1).

$$A = E + R + \left[E/(C-1)\right] - R \tag{3.17}$$

$$A = E + E/(C-1) \tag{3.18}$$

$$A(C-1) = E(C-1) + \left[E(C-1)/(C-1)\right] \tag{3.19}$$

$$A(C-1) = EC - E + E \tag{3.20}$$

$$A(C-1) = EC \tag{3.21}$$

$$A = EC/(C-1) \tag{3.22}$$

3.3.2 Aspectos Psicrométricos

A psicrometria é o estudo das propriedades de misturas de gás e vapor. O sistema ar-vapor de água é o mais freqüentemente encontrado, pois o ar ambiente não é seco.

O ar é constituído por uma mistura de gases, como: nitrogênio, oxigênio, dióxido de carbono, vapor de água e uma série de contaminantes, como partículas sólidas em suspensão etc. Em alguns processos a água é removida do ar, enquanto em outros é adicionada. Em alguns equipamentos ocorrem processos com transferência de calor e massa simultâneos entre o ar e uma superfície molhada. Exemplos de tais processos podem ser encontrados em alguns tipos de umidificadores, em serpentinas de desumidificação e resfriamento e em equipamentos de dispersão da água, como torres de resfriamento e condensadores evaporativos. Será mostrada nesse caso a psicrometria em torres de resfriamento.

O ar seco existe quando, do ar natural, removem-se todo o vapor de água e os contaminantes. A composição do ar seco é relativamente constante apesar das pequenas variações em função da localização geográfica e altitude. A composição média percentual é apresentada na **Tabela 3.3**.

Tabela 3.3. Composição aproximada do ar seco.

Componente	Conteúdo (% por volume)
Nitrogênio	78,084
Oxigênio	20,948
Argônio	0,934
Dióxido de carbono	0,033
Outros	0,001

Fonte: Silva, Lacerda Filho, Afonso (2000).

Faz-se necessário definir algumas propriedades e expressões importantes em psicrometria (PERRY, 1988; STOECKER, 1985; SANTOS, 2003).

a) Umidade relativa (ϕ)

A umidade relativa é definida como sendo a razão entre a fração molar do vapor de água no ar úmido e a fração molar máxima de vapor d'água que o ar úmido pode conter à mesma temperatura e pressão; em termos de pressão parcial, seria a pressão parcial do vapor de água no ar.

$$\phi = \frac{\text{pressão parcial do vapor d´água}}{\text{pressão de vapor d´água na temperatura do ar}} \tag{3.23}$$

Geralmente trabalha-se com porcentagem multiplicando-se este valor por 100.

b) Umidade absoluta (w)

A umidade absoluta é a relação entre a massa de vapor de água e a massa de ar seco existentes em um mesmo volume de ar úmido.

$$w = \frac{\text{massa de vapor d´água}}{\text{massa de ar seco}} \tag{3.24}$$

De acordo com ASHRAE (1992) a umidade absoluta definida dessa forma é conhecida por **razão de umidade**.

c) Entalpia do ar úmido

A entalpia de uma mistura de ar seco e vapor de água é a soma das entalpias dos componentes. Os valores da entalpia são sempre referidos a um estado de referência. Assim, o ar é admitido com entalpia nula à temperatura de 0ºC. Para vapor de água o estado de referência (valor nulo da entalpia) é o da água, líquido saturado a 0ºC, coincidente com aquela das tabelas de vapor. Uma equação para a entalpia poderia ser escrita na forma:

$$H = m_a h_a + m_v h_v \tag{3.25}$$

Dividindo-se ambos os membros por m_a, obtém-se:

$$h = c_p t + w h_g \tag{3.26}$$

Onde:

c_p = calor específico à pressão constante do ar seco
t = temperatura da mistura
h_g = entalpia do vapor saturado à temperatura da mistura
m_a= massa de ar seco

d) Volume úmido

É o volume de ar seco somado ao volume do vapor de água que ele contém.

e) Volume específico

É o volume por unidade de massa de ar seco.

$$v = \frac{V}{m_a} \tag{3.27}$$

f) Temperatura de bulbo úmido

É a temperatura de equilíbrio dinâmico que uma superfície de água atinge quando a taxa de transferência de calor para a superfície por convecção iguala o consumo de calor, por transferência de massa da superfície para o ambiente.

Segundo SANTOS (2003), a temperatura de bulbo úmido é a temperatura indicada por um termômetro cujo bulbo está envolvido em uma gaze molhada com água. Esse termômetro é chamado de termômetro de bulbo úmido.

Medindo-se então a temperatura de uma corrente de ar com dois termômetros, um seco e outro úmido, poderia parecer que os dois indicariam a mesma temperatura, isto é, que a gaze molhada também indicaria a temperatura da corrente de ar. Isso ocorreria se a água da gaze não se evaporasse no ar. A água, no entanto, se evapora, absorvendo calor do ar e em conseqüência a camada de ar em contato térmico com a superfície externa da gaze se resfria, fazendo com que o termômetro de bulbo úmido indique uma temperatura menor que o termômetro de bulbo seco.

A quantidade de água que se evapora depende da quantidade de vapor d'água presente no ar. Se o ar estiver saturado, a água não se evapora e as temperaturas indicadas por ambos os termômetros serão iguais. Inversamente, quanto mais seco estiver o ar, maior a quantidade de água evaporada e menor a temperatura do bulbo úmido.Chama-se depressão de bulbo úmido a diferença entre as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido de uma corrente de ar. Ou seja, quanto menor o valor da depressão de bulbo úmido, maior a umidade relativa do ar. Portanto, a depressão de bulbo úmido está relacionada com a umidade relativa do ar. Fisicamente a temperatura de bulbo úmido representa a temperatura de equilíbrio alcançada pela gaze quando todo calor perdido pelo ar é igual ao calor necessário para evaporar a água. (SANTOS, 2003). No equilíbrio, supondo-se que a variação de calor foi desprezível, pode-se escrever:

$$k_g \lambda (p_s - p) = h_c (t - t_w) \qquad (3.28)$$

Onde:

k_g = coeficiente de transferência de massa

λ = calor latente de vaporização

p_s = pressão de vapor da água à temperatura de bulbo úmido

p = pressão parcial do vapor de água no ambiente

h_c = coeficiente de transmissão de calor

t = temperatura de bulbo seco da mistura ar- vapor de água

t_w = temperatura de bulbo úmido.

g) Psicrômetro

Esse instrumento é composto de um termômetro de bulbo úmido e outro de bulbo seco, montados em uma alça que é girada manualmente para produzir a velocidade do gás desejado ao passar pelo bulbo. Se o processo é adiabático, o bulbo do termômetro atinge a temperatura de bulbo úmido.

Na falta de um psicrômetro, a temperatura deve ser obtida com o bulbo do termômetro de bulbo envolvido numa mecha de algodão saturado com água. A leitura é feita pendurando-se o termômetro assim preparado num suporte e girando-o por dois minutos. Se o ar não estiver saturado de umidade, a água é evaporada da mecha, esfriando o bulbo, e a temperatura de bulbo úmido é indicada pelo termômetro.

Quanto mais seco o ar, maior a diferença entre a temperatura de bulbo úmido e a temperatura do ar medida por um termômetro ordinário. Quando a umidade do ar é de 100%, as duas temperaturas são iguais. Na **Figura 3.10**, encontra-se o psicrômetro de uma das estações meteorológicas do Rio de Janeiro.

Figura 3.10. Psicrômetro.

Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia (2003).

h) Carta psicrométrica

Através da carta psicrométrica (**Figura 3.11**), podem ser facilmente obtidas as propriedades do ar úmido. Existem cartas para pressões de 101,325 KPa e existem também para outras pressões barométricas e outras faixas de temperatura. A carta apresenta uma

precisão bastante razoável para a maioria das aplicações em engenharia. Vários processos podem ser representados e interpretados graficamente através de suas *iso-linhas*. Ela pode ser utilizada na determinação da variação de propriedades, tais como temperatura, umidade absoluta e entalpia que ocorrem em processos tais como aquecimento e resfriamento, umidifcação diabática e adiabática, resfriamento e desumidificação, desumidificação química e mistura. Em torres de resfriamento, os processos geralmente envolvem resfriamento e desumidificação, resultando em uma redução da temperatura de bulbo seco e da umidade absoluta.

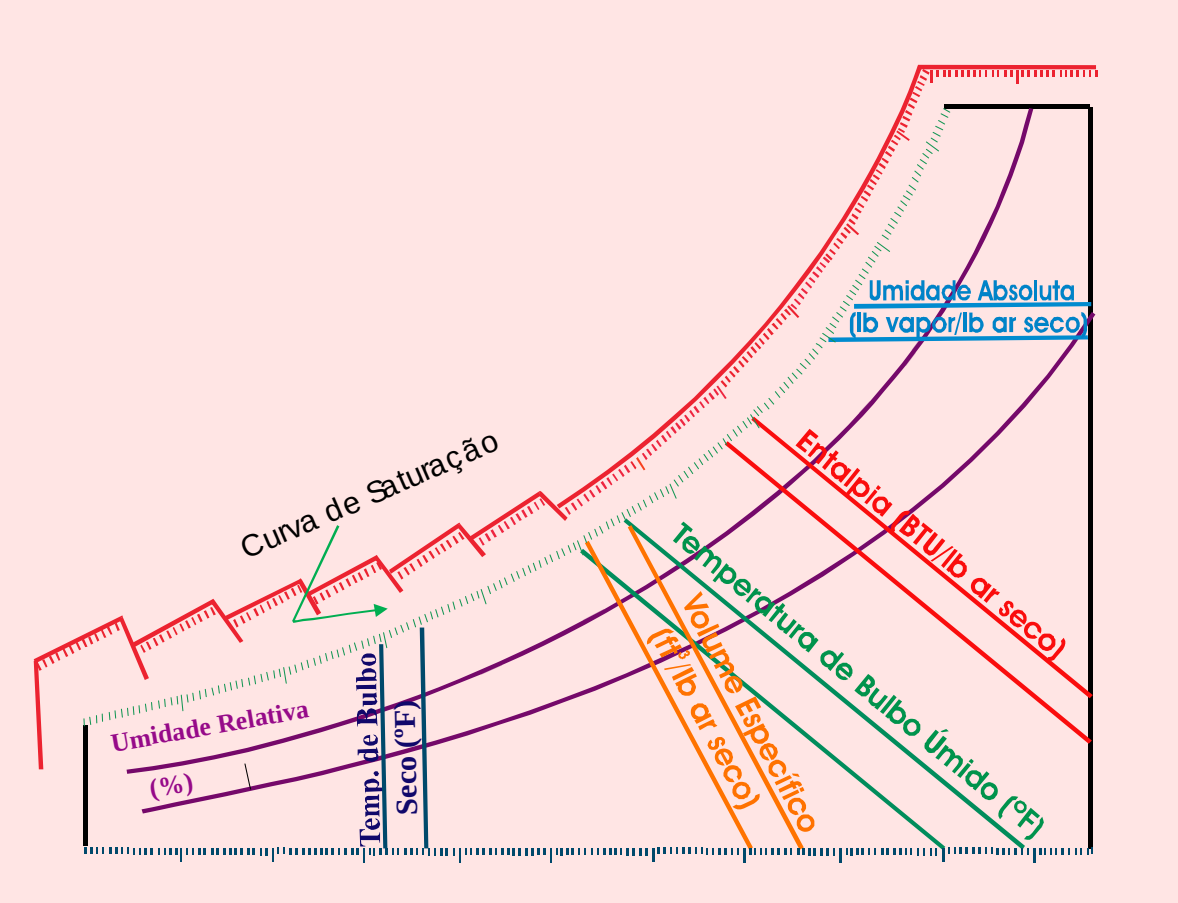


Figura 3.11. Carta psicrométrica.

Fonte: Adaptado de Moreira (1999).

i) Temperatura de orvalho

É a temperatura ou ponto de orvalho do ar úmido no qual se inicia a condensação do vapor d'água. É então a temperatura de saturação correspondente à pressão parcial do vapor d'água no ar úmido.

3.3.3 Equações de Projeto de uma Torre de Resfriamento

As informações abaixo estão baseadas em DANTAS (1988), PERRY (1988), LUDWING (1997), ALPINA (1972), Gomes (1997), CTI (1990,1998 e 1999).

A taxa de transferência de calor nas torres de resfriamento depende, essencialmente, de quatro fatores:

- Área máxima de superfície de contato entre o ar e a massa de água;
- Velocidade relativa do ar e da água, que são controladas por regulagem dos ventiladores ou exaustores;
- Tempo de contato entre o ar e a água que é função da altura da torre;
- Diferença da temperatura de bulbo úmido do ar, na entrada da torre, e da temperatura da água quente em retorno.

Os fatores citados acima merecem os seguintes comentários: os borrificadores para pulverizar a água e os diversos tipos de enchimento possuem o objetivo de aumentar a área de contato, mas existe um limite teórico de quantidade de calor que pode ser removido da torre por unidade de massa de ar circulado; esse limite dependerá da temperatura de bulbo úmido e do teor de umidade do ar. O ar de entrada não suportará absorver mais água do que sua capacidade de saturação. Se o ar de entrada estiver com quase 100% de umidade, sua capacidade de absorção de mais um incremento de água será muito pouca, portanto pouca água irá evaporar e, em conseqüência, pouca caloria será liberada da água restante devido ao calor latente. O calor retirado da água e cedido ao ar faz com que a temperatura do ar aumente e em conseqüência também aumente sua entalpia.

A relação (vazão de água circulante/vazão de ar circulante) ou **L/G** é um parâmetro extremante usual para diversos gráficos e cálculos utilizados em torres, como será visto a seguir. É claro que, como as temperaturas do ar de entrada e da água quente são diferentes, ocorrerá sim a parcela de troca por calor sensível.

Teoricamente, a mais baixa temperatura à qual se poderia resfriar a água numa torre de resfriamento seria a temperatura de bulbo úmido do ar. Na prática, a temperatura da água fria se **aproxima**, mas nunca atinge a temperatura de bulbo úmido do ar, e isso se deve por ser impossível o contato de toda a água com o ar fresco do ambiente, quando esta cai pela superfície do enchimento molhado até a bacia de água fria. Uma torre ideal lançaria o ar à

atmosfera com a mesma temperatura da água quente, completamente saturado com vapor d'água e a resfriaria até uma temperatura igual à temperatura de bulbo úmido do ar. É nesse sentido que uma das medidas de eficiência de uma torre é o *approach*, que é a diferença entre a temperatura da água fria na bacia e a temperatura de bulbo úmido da atmosfera. O *approach* depende do projeto da torre. Na prática as torres são projetadas para *approach* maior que 5ºF.

No Rio de Janeiro, para torres de ar-condicionado os projetistas estabelecem normalmente a Temperatura de Bulbo Úmido - TBU de 26,7°C ou, conforme a ABNT NBR-6401 de dezembro de 1980, 26,5°C. Não há distinção por bairros. O *approach* é determinado pela temperatura de saída da torre, exigida pelo processo, que é normalmente de 29,5°C em torres para ar-condicionado (conforto).

Outra medida de eficiência é o *range*, que é a diferença entre as temperaturas das águas de retorno para a torre e sua água de reposição. O *range* de uma torre industrial está entre 8,5 e 17ºC.

A teoria mais aceita do processo de transferência de calor em torres de resfriamento é a desenvolvida por Merkel em 1925. Essa teoria considera que numa torre contracorrente, quando as gotículas de água são suficientemente finas, existe uma fina película de ar saturado que envolve a gota e que possui a mesma temperatura da gota. Dessa forma, o ar que envolve a gota está a uma temperatura diferente da temperatura do ar ambiente das proximidades da gota. Essa diferença potencial de entalpia gera a força motriz do processo de resfriamento. A forma integrada da Equação de Merkel é:

$$\frac{KaV}{L} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{(h' - h)} \qquad (3.29)$$

Onde:

$\frac{KaV}{L}$ = Característica da torre ou unidades de transferência (adimensional)

a = área de contato por unidade de volume

L = vazão em massa de água

T_1 = temperatura de água na entrada

T_2 = temperatura de água na saída

h = entalpia do ar saturado na temperatura da água

h' = entalpia da corrente de ar

K= coeficiente global de transferência de massa

V = volume efetivo de resfriamento (volume/unidade de área plana)

O segundo membro da equação só depende das propriedades do ar e da água e é independente das dimensões da torre. Abaixo, a **Figura 3.12**, adaptada do PERRY (1988), ilustra melhor o balanço térmico em torre de resfriamento.

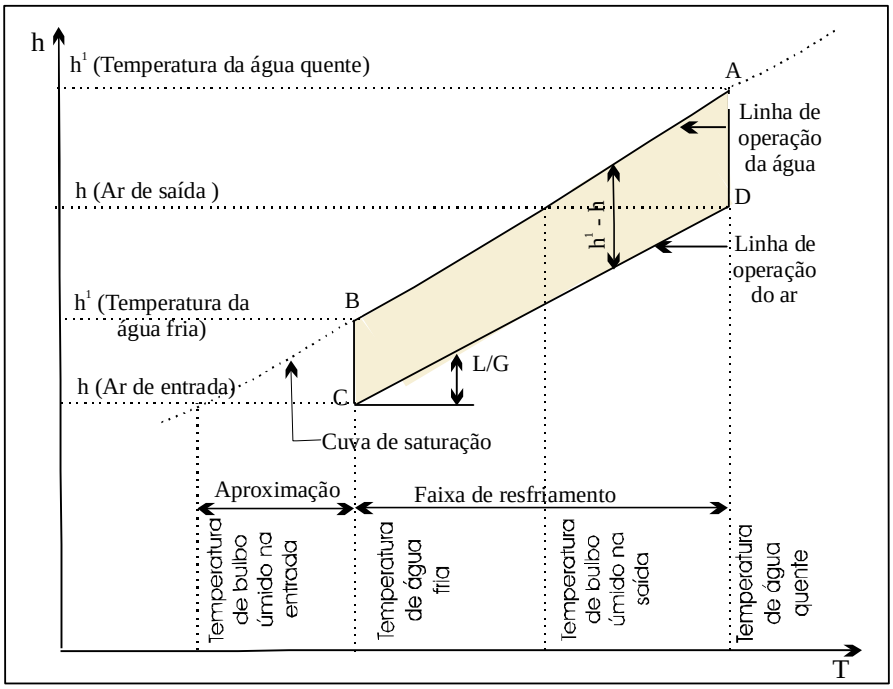


Figura 3.12. Balanço térmico em torre de resfriamento.

Fonte: Adaptado de Perry (1988).

Observando a **Figura 3.12**, pode-se fazer os seguintes comentários:

- Chama-se linha de operação da água a curva AB (curva de saturação); ela é fixada pelo *range* da torre. Chama-se linha de operação do ar (projetada sobre o eixo de temperatura, fornece a faixa de resfriamento) a reta CD. Essa linha começa em *C*, verticalmente abaixo de *B* e num ponto que tem entalpia correspondente à da temperatura de bulbo úmido.
- A temperatura de bulbo úmido correspondente a qualquer ponto de CD e é determinada projetando-se o ponto horizontalmente sobre a curva de saturação e descendo-se verticalmente até o eixo das temperaturas.
- A razão líquido-gás L/G é a inclinação da linha de operação.
- A linha *BC* representa a força motriz inicial ($h' - h$).

- A integral da equação anterior é representada pela área ABCD no diagrama. Esse valor é conhecido como a **característica da torre** e varia com a razão L/G (água/ar). Para prever a eficiência de uma torre, é necessário conhecer a sua característica para uma dada condição de ar ambiente e água.
- A aproximação da torre de resfriamento aparece no diagrama como a diferença entre a temperatura da água fria que sai da torre e a temperatura de bulbo úmido do ambiente.
- Para um conjunto de condições de projetos, ou seja, *range* e temperatura de bulbo úmido, pode-se resolver a integral de Merkel para vários valores de L/G e obter-se a curva característica do resfriamento, plotando-se em escala log-log KaV/L x L/G (CTI, 1998), conforme descrito na **Figura 3.13**.

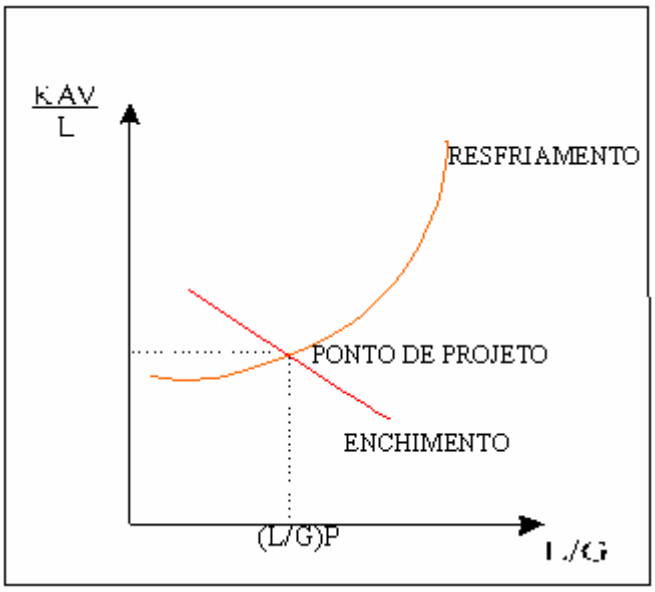


Figura 3.13. Curva de resfriamento.

No Brasil, para testes de verificação de desempenho em torres de tiragem mecânica, de acordo com a NBR 9792 de março de 1987, para resolver essa equação integral utiliza-se o método de integração numérica de Tchebycheff.

O CTI publica em seus livros curvas para as mais diversas condições, feitas mediante uso de programas de computador, utilizando também esse método.

a) Cálculo de KaV/L

O método de integração numérica de Tchebycheff na sua forma de quatro pontos é o descrito abaixo:

$$\frac{KaV}{L} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{h_w - h_a} \cong \frac{T_1 - T_2}{4} = \left(\frac{1}{\Delta h_1} + \frac{1}{\Delta h_2} + \frac{1}{\Delta h_3} + \frac{1}{\Delta h_4} \right) \qquad (3.30)$$

Onde:

h_w = entalpia da mistura ar-vapor de água à temperatura da massa de água.

h_a = entalpia da mistura ar-vapor de água à temperatura de bulbo úmido.

Δh_1 = valor de (h_w - h_a) na Temperatura (T_2 + 0,1 (T_1 - T_2)) (3.31)

Δh_2 = valor de (h_w - h_a) na Temperatura (T_2 + 0,4 (T_1 - T_2)) (3.32)

Δh_3 = valor de (h_w - h_a) na Temperatura (T_1 – 0,1 (T_1 - T_2)) (3.33)

Δh_4 = valor de (h_w - h_a) na Temperatura (T_1 – 0,4 (T_1 - T_2)) (3.34)

Utilizando-se a linha de operação do ar, tem-se que a entalpia de saída do ar à temperatura de bulbo úmido (h_s) pode ser determinada pela equação dessa reta, conhecendo-se a entalpia do ar ambiente de entrada à temperatura de bulbo úmido (h_e) e o *range* da torre. Logo:

$$h_s = h_e + \frac{L(\Delta T)}{G} \qquad (3.35)$$

Encontramos todo o desenvolvimento analítico que leva à mesma equação de Merkel em Kern (1950). Um trabalho mais atual, descrito em MOREIRA (1999), apresenta uma variação em relação ao trabalho de Merkel com o desenvolvimento de uma equação para a característica da torre um pouco diferente. Observa-se que o autor preocupa-se em realizar a integral tanto analítica como numericamente.

Um trabalho de LEFREVE (1984) aponta uma série de erros devido a aproximações realizadas durante o desenvolvimento da teoria de Merkel e na finalização pela integração numérica. Ele mostra que os resultados do diferencial de entalpia estimados por essa teoria difeririam dos reais principalmente a altas temperaturas e mostra uma série de correções nas curvas características, mas para a finalidade deste trabalho será adotada a própria teoria de Merkel.

b) Perdas por evaporação

Existem várias expressões para se estimar a quantidade de água evaporada em uma torre de resfriamento, algumas delas estão enumeradas na **Tabela 3.4**.

Tabela 3.4. Perdas por evaporação.

Equação matemática	Restrições	Fonte
E = 0,185 x (ΔTxQ)/100 E = evaporação (m^3/h) Q = vazão de alimentação (m^3/h) Δt = *range* (ºC)	Empírica. Leva em consideração apenas o calor latente. Climas quentes	DANTAS (1988)
E = [(1.8 T_{ar} - 3) x F + 0.1098 x ΔT]x Q / 100 E = evaporação (m^3/h) Q = vazão de alimentação (m^3/h) Δt =*range* (ºC) T_{ar} = temperatura do ar seco (ºC) F = Fator encontrado na **Tabela 3.5**	Empírica. Aplicada em regiões onde é possível a existência do calor sensível. F é um fator que depende da umidade relativa e da temperatura	THOMAS EATON em DANTAS (1988)
E = 0,001 Q (ΔT) f E = evaporação (gal/min) ΔT = *range* (ºF) Q = vazão de alimentação (gal/min) f = fator de contribuição (%) da evaporação no resfriamento	Empírica. Esse fator representa porcentagem de contribuição do calor latente com relação ao calor total, pois a contribuição do calor sensível pode variar entre 40% no inverno e 10 % no verão. De tal modo que (f) variará entre 0,6 e 0,9.	Manual CTI (1990)
$E = \frac{cp \times Q \times \Delta T}{\frac{\Delta h}{\Delta w} \times 10^3}$ E = evaporação (m^3/h) ΔT = *range* (ºC) Δh = diferencial de entalpia do ar na entrada e na saída da torre (kcal/kg de ar seco) Δw = diferencial do conteúdo de vapor do ar úmido na entrada e na saída (g/kg de ar seco)		Analítica, obtida por balanço térmico

Q = vazão de alimentação (m^3/h) cp = 1cal /g º C		
E = 0,00085 Q (ΔT) E = evaporação (gal/min) ΔT = *range* (ºF) Q = vazão de alimentação (gal/min)	Empírica	PERRY (1988)
$E = W_2 - W_1$ E = evaporação W = massa de umidade por massa de ar seco	Bom grau de precisão. As unidades variam em função do fabricante da carta psicrométrica	Carta psicrométrica

Tabela 3.5. Fator F.

ΔT (ºC)	**Umidade Relativa (%)**	**F**
< 4	< 30	0.00324
	30 – 90	0.0018
	> 90	0.00054
4 – 7	< 30	0.00162
	30 – 90	0.00108
	> 90	0.00054
> 7	–	0.00072

Fonte: Rozental (1999).

De acordo com o Manual CTI (1998), quando a água é resfriada numa torre de refrigeração, uma parte do calor é removida por evaporação de uma parte da água circulante. O resto é removido pelo aumento do calor sensível do ar em contato com a água. E ainda, um aumento na temperatura de bulbo úmido aumenta a taxa de evaporação ***levemente***, tornando-a relativamente fácil de ser calculada.

Alguns casos práticos onde a perda de água em relação à vazão é considerável, estão abaixo exemplificados com dados fornecidos pela Empresa ALPINA.

1º Caso:

vazão de água = 2000 m³/h

diferencial de temperatura = 30°C

temperatura de bulbo úmido = 25°C

KaV/L = 1,797

perda por evaporação = 4,56%

2º Caso:

vazão de água = 2200 m³/h

diferencial de temperatura = 40°C

temperatura de bulbo úmido = 28 °C

KaV/L = 1,075

perda por evaporação = 6,28%

No Manual CTI (1998), é feita uma consideração sobre a substancial perda por evaporação que poderia ocorrer em um ambiente desértico com alta temperatura de bulbo seco e baixa umidade. Nesse mesmo trabalho, ilustram-se os efeitos da depressão do bulbo úmido e da razão L/G para uma torre que opera a um *range* de 20ºF e 70ºF de bulbo úmido sobre a água evaporada expressa em percentual da vazão de circulação e sobre o percentual da carga térmica removida por evaporação. As duas situações estão ilustradas nas **Figuras 3.14** e **3.15**.

Assim, o termo ***levemente*** supracitado tem um significado econômico, hoje em dia, tanto diretamente pelo consumo da água, quanto indiretamente através do ciclo de concentração e tempo de residência. Dessa forma, essa pequena variação deveria ser levada em consideração nos projetos de reúso. O alto consumo de água utilizado em torres de resfriamento é a justificativa para a realização de reúso em torres de refinarias de petróleo (PHILLIPS e STRITTMATTER, 1994).

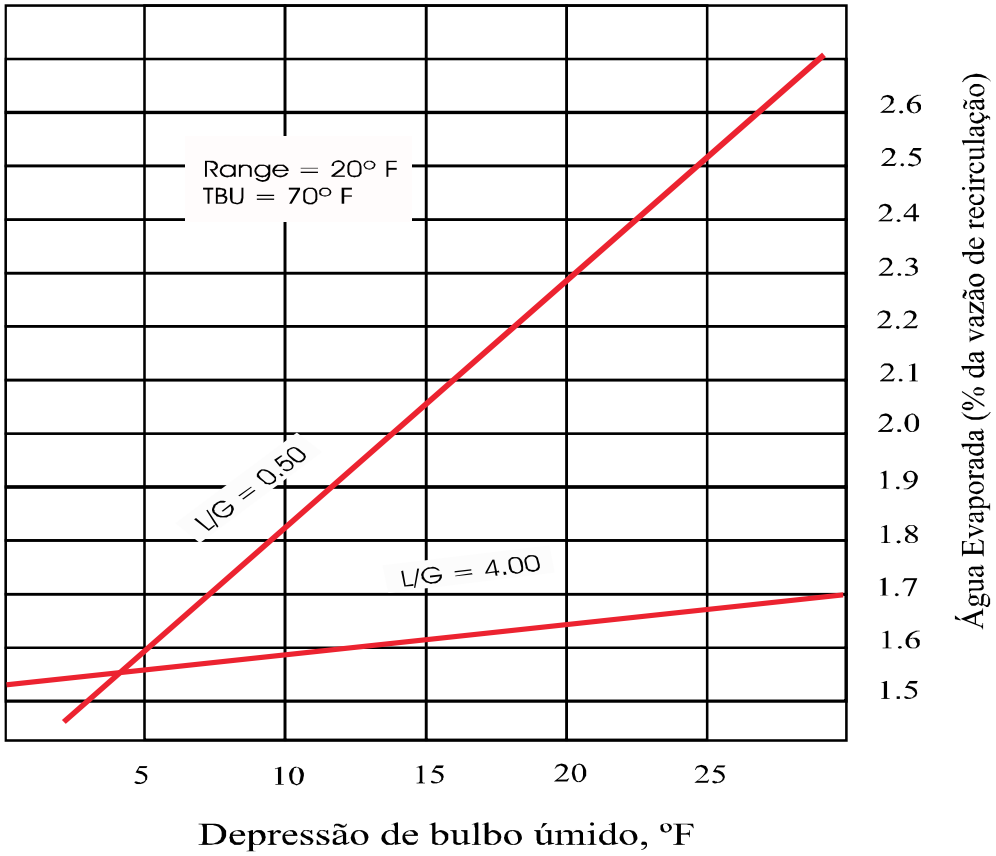


Figura 3.14. Água evaporada expressa em percentual da vazão.

Fonte: Adaptado de Cooling Tower Manual (1988).

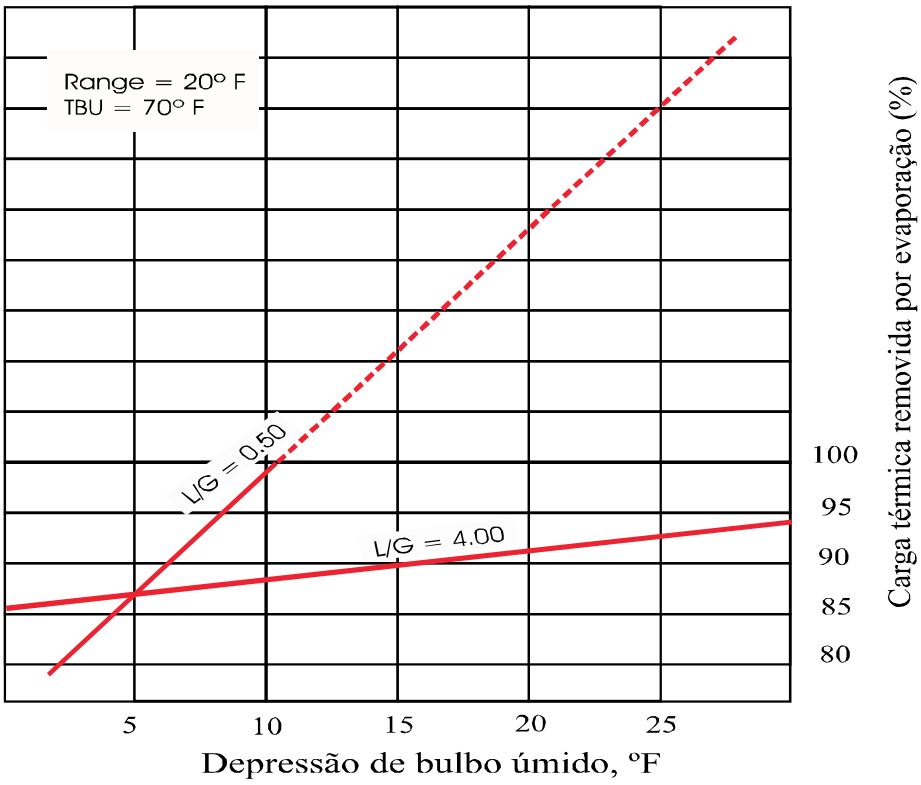


Figura 3.15. Percentual da carga térmica removida por evaporação.

Fonte: Adaptado de Cooling Tower Manual (1988).

3.4 Climatologia

O conhecimento de comportamentos climatológicos é essencial para o projeto de uma torre de refrigeração, principalmente para a área de conforto térmico. Na indústria, o estudo do projeto leva em conta parâmetros como época (sazonalidade do consumo de alguns produtos) ou horário de funcionamento de um determinado equipamento, portanto é provável que os projetos de torre de resfriamento na indústria possam ser diferenciados do conforto. Dessa maneira, a seguir são relacionados alguns conceitos importantes referentes à climatologia.

3.4.1 Diversidade de Climas Brasileiros

A terra está dividida em cinco grandes conjuntos climáticos, chamados zonas térmicas: zona polar ou glacial ártica, zona polar ou glacial antártica, zona temperada do sul, zona tropical e zona temperada do norte. Alguns fatores influenciam o clima, tais como: proximidade ao mar, latitude e longitude.

Por essas razões e devido à grande extensão do nosso território, o Brasil apresenta diferentes tipos de clima, porém, como a maior parte do território brasileiro está localizada na zona tropical, entre o Equador e o Trópico de Capricórnio, no Brasil os climas quentes são mais freqüentes e de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2002) nossa diversidade climática possui um comportamento de acordo com a **Figura 3.16**:

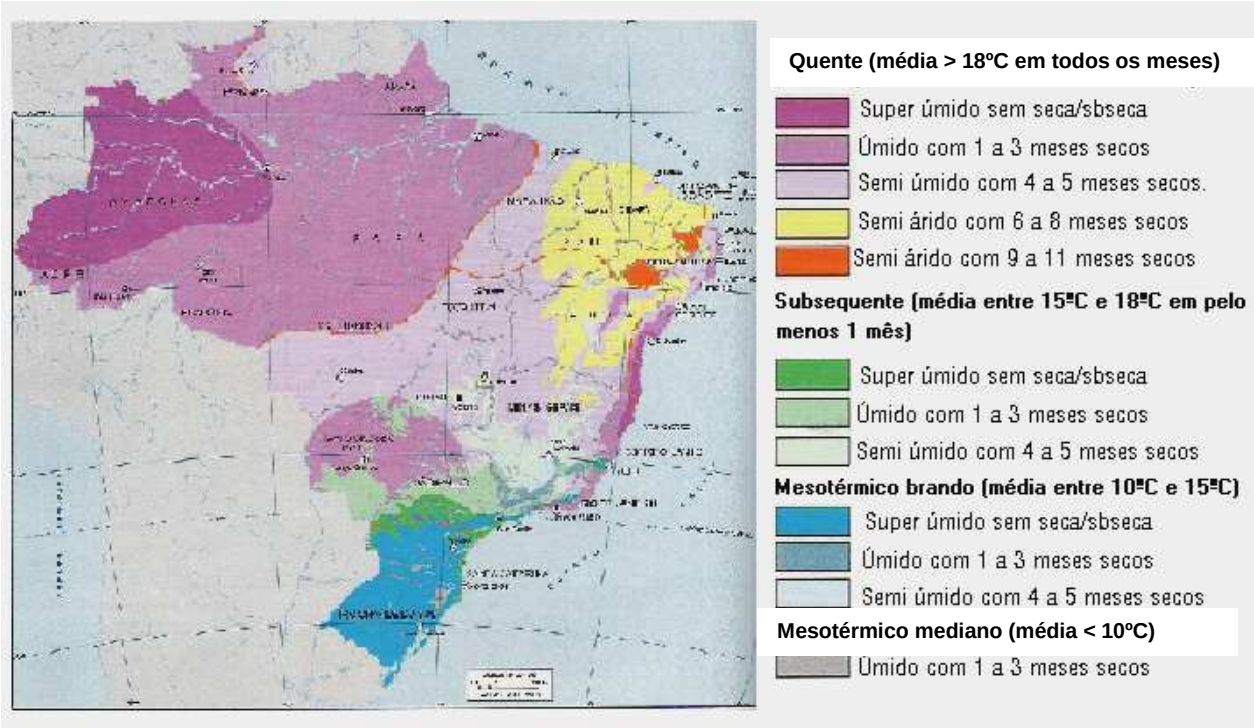


Figura 3.16. Perfil climático brasileiro.

Fonte: IBGE (2002).

Pode-se classificar a diversidade de climas brasileiros em:

Equatorial úmido – Apresenta elevadas temperaturas. As chuvas são abundantes;

Equatorial semi-úmido – Bastante semelhante ao equatorial-úmido, diferenciando-se apenas pela ocorrência de uma estação seca entre os três últimos meses do ano;

Semi - árido – Clima quente, com poucas chuvas, o que causa secas;

Tropical – Apresenta duas estações, uma chuvosa e outra seca. No litoral faz muito calor e chove mais, ocorrendo o clima tropical úmido;

Tropical de altitude – É uma variação do clima tropical. Ocorre nas regiões mais elevadas, apresentando temperaturas mais baixas;

Subtropical – Apresenta temperaturas agradáveis, com chuvas bem distribuídas durante todo o ano. Faz muito calor no verão e muito frio no inverno, ocorrendo até geadas e neve.

Observa-se que exceto na ocorrência de chuvas, de um modo geral, durante o dia a temperatura de bulbo seco (ºC) e a umidade relativa (%) comportam-se como na **Figura 3.17**, que ilustra os comportamentos horários destas variáveis durante um acompanhamento semanal.

Figura 3.17. Comportamento típico da temperatura e umidade relativa, durante o dia.

Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia -Estação Principal.

3.4.2 Curvas e Tabelas Representativas do Comportamento Climatológico Brasileiro

Segundo o Instituto de Meteorologia, para que sejam consideradas como normais climatológicas todas as médias climatológicas devem referir-se a períodos padronizados de trinta anos. No Brasil, o primeiro período padrão possível de ser calculado foi o de 1931-1960. De maneira geral, os dados do clima têm maior utilidade quando comparados com valores padrões ou normais. Daí a necessidade de estabelecimento de períodos padronizados, seguidos por todos os países. As normais são obtidas através de cálculos das médias, obedecendo a critérios recomendados pela Organização Meteorológica Mundial (OMM).

Esses critérios, porém, não são claros no que diz respeito a períodos inferiores a 30 anos. Para tentar suprir essa deficiência, uma equipe de técnicos reuniu-se em Washington D.C. em março de 1989 e elaborou um documento que procurava estabelecer procedimentos padronizados para cálculo das normais climatológicas. Deu-se, assim, uma orientação sobre como proceder em relação às estações cujas séries não alcançavam o período padronizado, mas ficavam acima de dez anos. Nesse caso convencionou-se que seriam denominadas "Normais Provisórias". O Brasil, porém, para maior validade adotou somente séries superiores a 15 anos.

O Departamento Nacional de Meteorologia do Ministério da Agricultura e Reforma Agrária editou a publicação das "Normais Climatológicas" (1961-1990), que reúne 209 estações meteorológicas. As médias mensais e anuais de todos os parâmetros foram obtidas a partir das médias mensais e anuais dos valores diários. Para avaliação dos valores de temperatura média e umidade relativa, foram usadas as seguintes fórmulas:

$$T = \frac{T_{12} + 2 \times T_{00} + T_{\max} + T_{\min}}{5} \tag{3.36}$$

$$U = \frac{U_{12} + U_{18} + 2 \times U_{00}}{4} \tag{3.37}$$

Os índices indicam as horas das observações: 12:00, 18:00 e 00:00 TMG (Tempo médio de Greenwich). Aqui no Brasil esses horários correspondem a: 9:00, 15:00 e 21:00 h.

Da publicação citada foram retirados os dados para realização de curvas representativas do comportamento climatológico de algumas cidades brasileiras. As curvas elaboradas mostram a variação mensal do comportamento das temperaturas mínima, média compensada e máxima, sendo apresentadas nas **Figuras 3.18**, **3.19**, **3.20** e **3.21**.

Utilizando-se dados meteorológicos de temperatura média de bulbo seco e umidade relativa média do período de 1931 a 1960 da OMM - Organização Meteorológica Mundial (do inglês World Meteorological Organization - WMO), foram elaboradas curvas específicas apenas para se observar com melhor clareza a variação mensal do comportamento das temperaturas médias de bulbo úmido e seco em algumas cidades, tanto nacionais quanto internacionais. A elaboração destas curvas possui caráter ilustrativo e para realização das curvas foi assumida pressão barométrica de uma atmosfera ao nível do mar. As curvas portanto mostram um comportamento bastante próximo ao comportamento real, podendo haver algumas divergências em casos de altitudes elevadas. As curvas estão apresentadas nas **Figuras 3.22**, **3.23**, **3.24**, **3.25, 3.26**, **3.27**, **3.28**, e **3.29**.

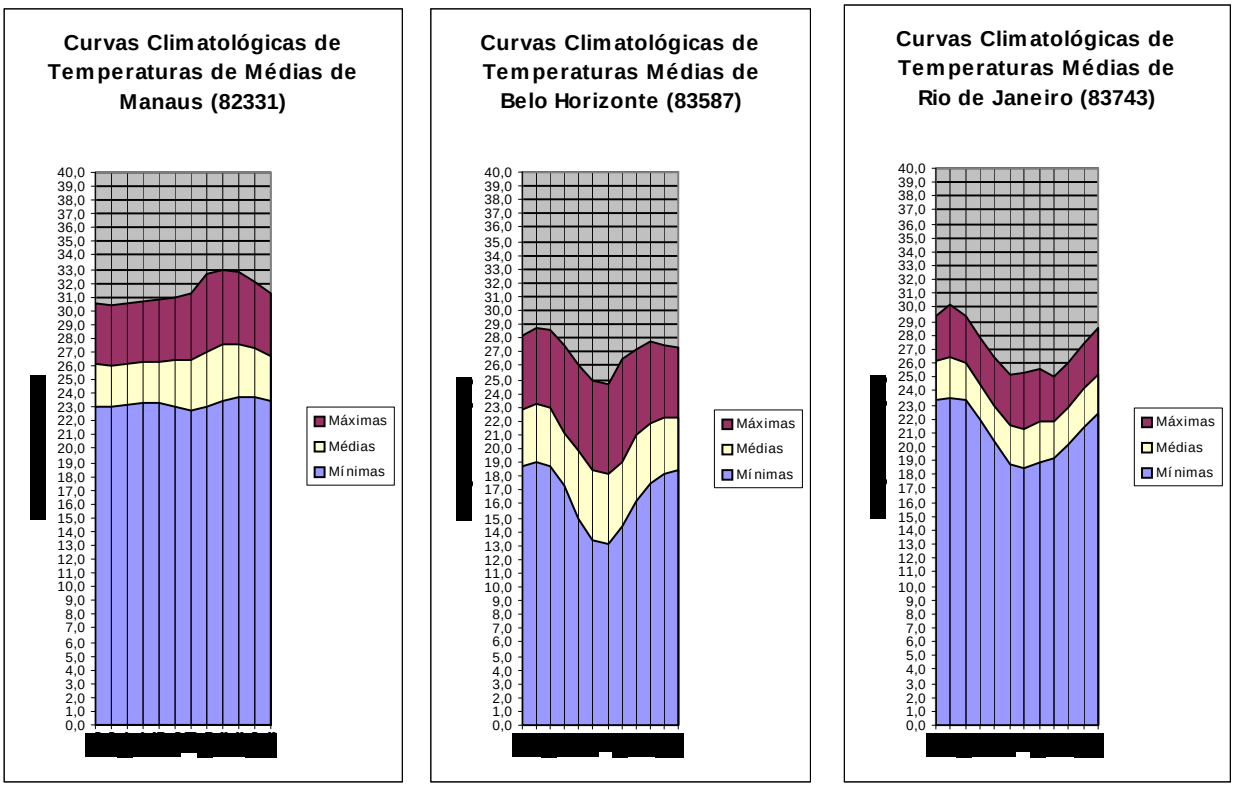


Figura 3.18. Curvas climatológicas das cidades de Manaus, Belo Horizonte e Rio de Janeiro.

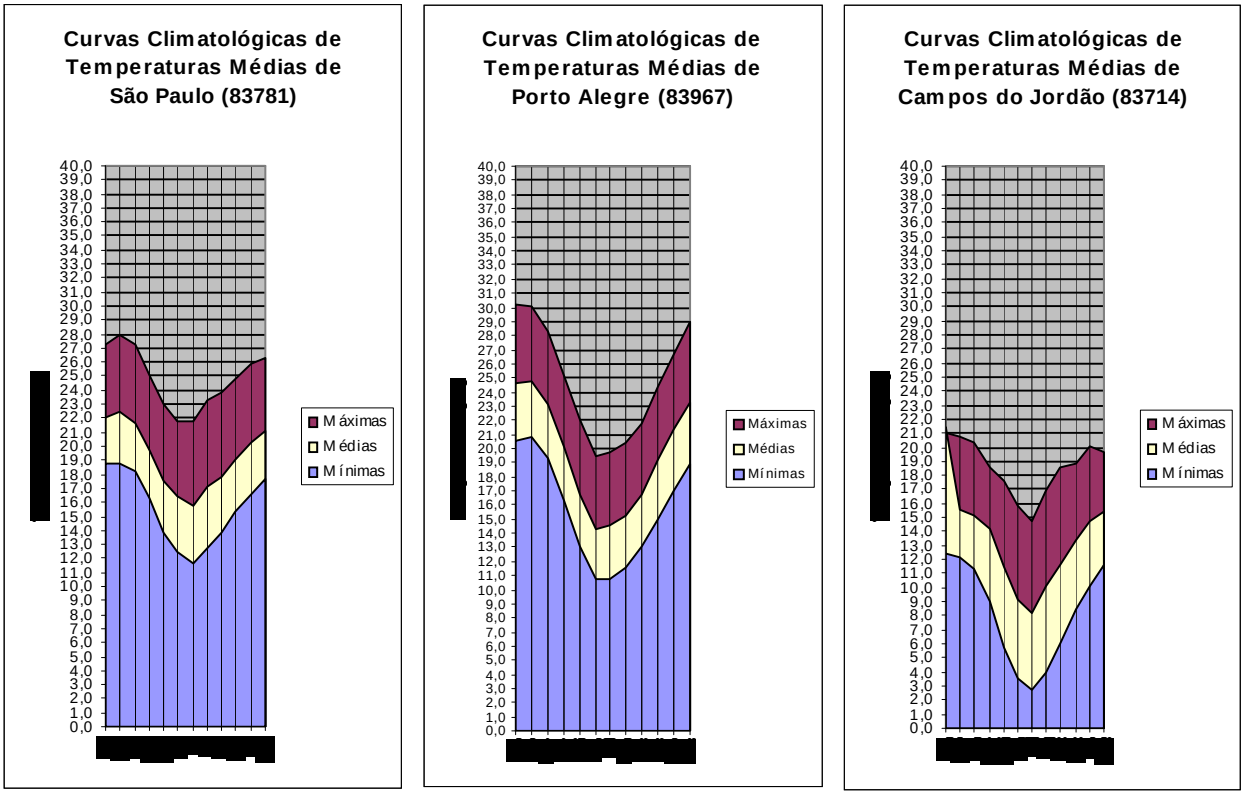


Figura 3.19. Curvas climatológicas das cidades de São Paulo, Porto Alegre e Campos do Jordão.

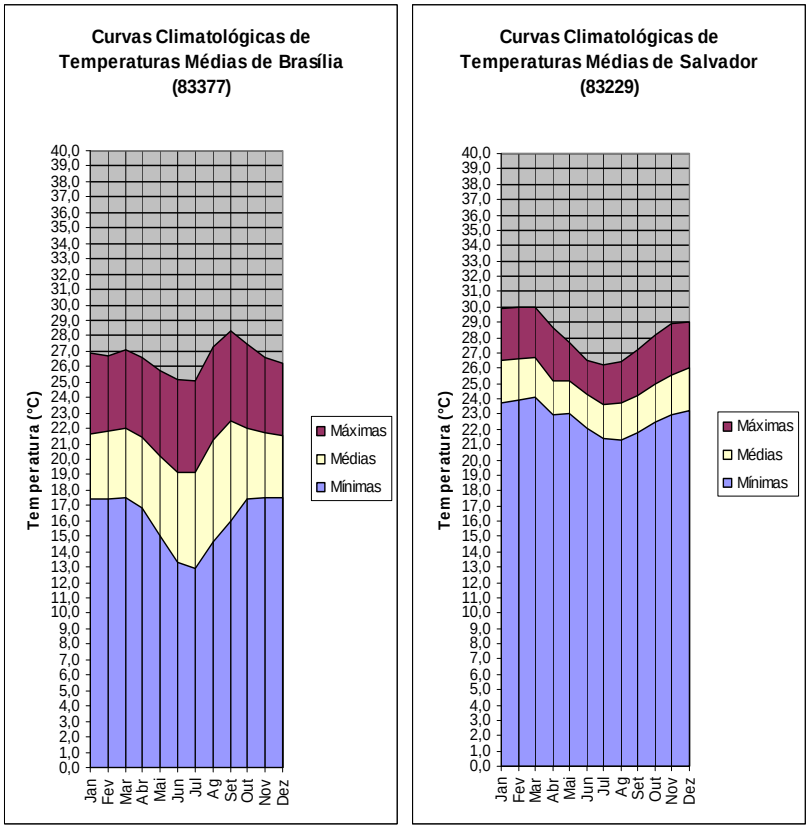


Figura 3.20. Curvas climatológicas das cidades de Brasília e Salvador.

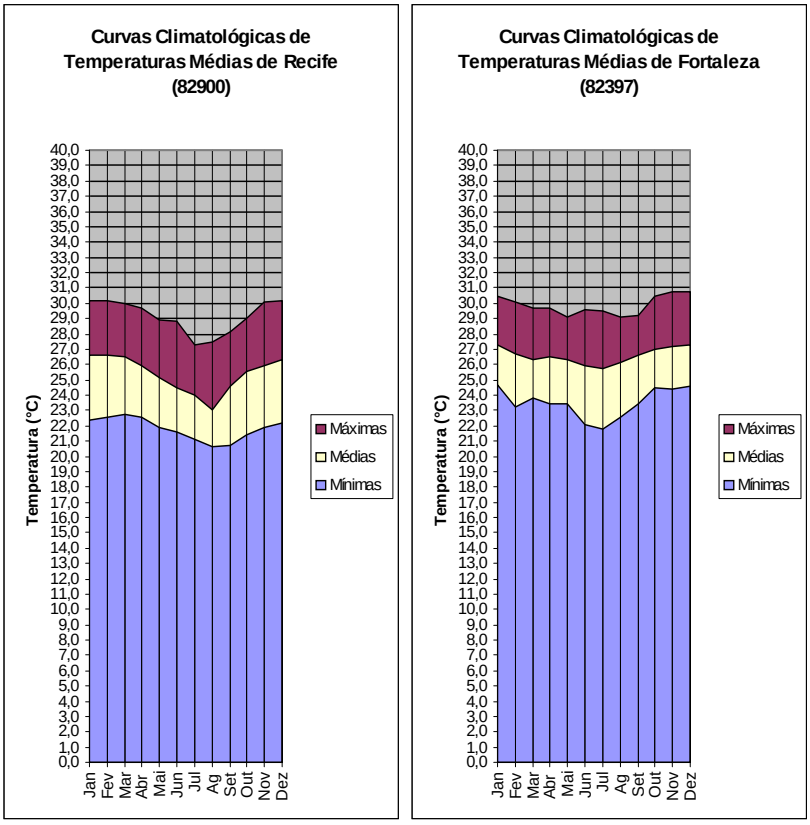


Figura 3.21. Curvas climatológicas das cidades de Recife e Fortaleza.

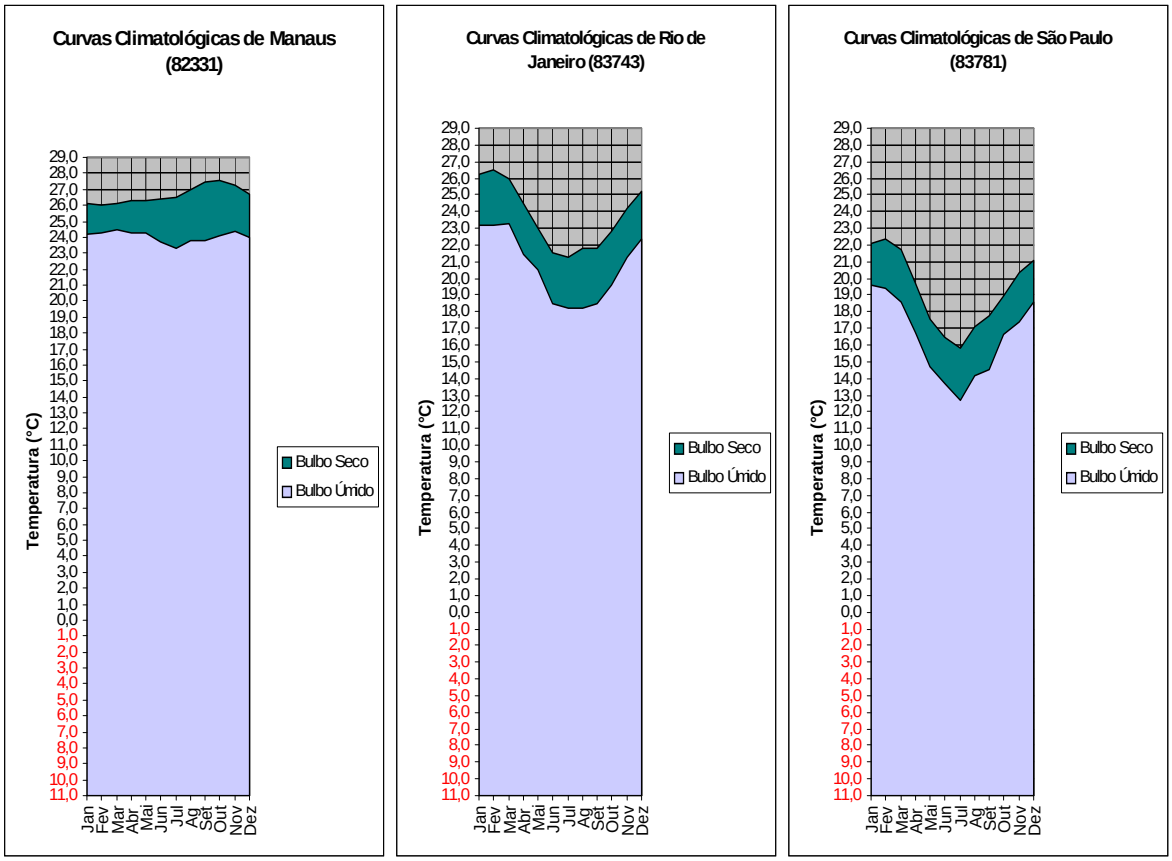


Figura 3.22. Comportamento aproximado da variação mensal das temperaturas de bulbo úmido e seco das cidades de Manaus, Rio de Janeiro e São Paulo.

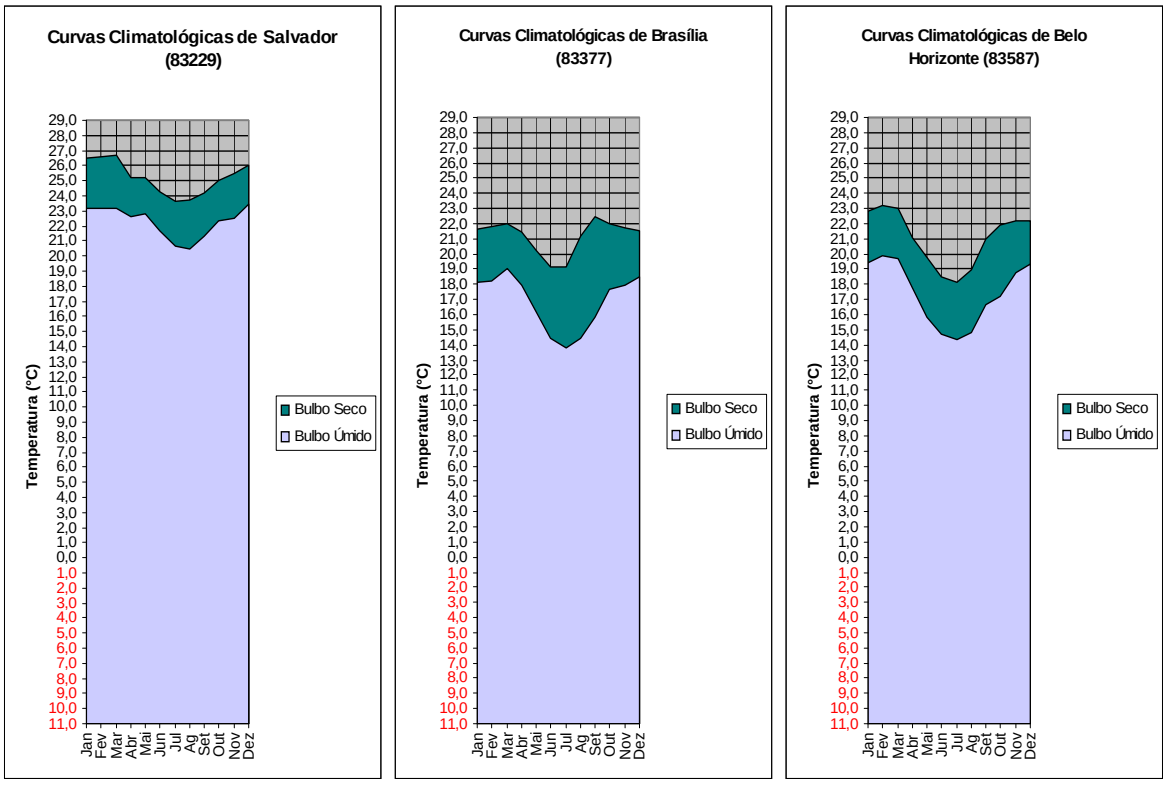


Figura 3.23. Comportamento aproximado da variação mensal das temperaturas de bulbo úmido e seco das cidades de Salvador, Brasília e Belo Horizonte.

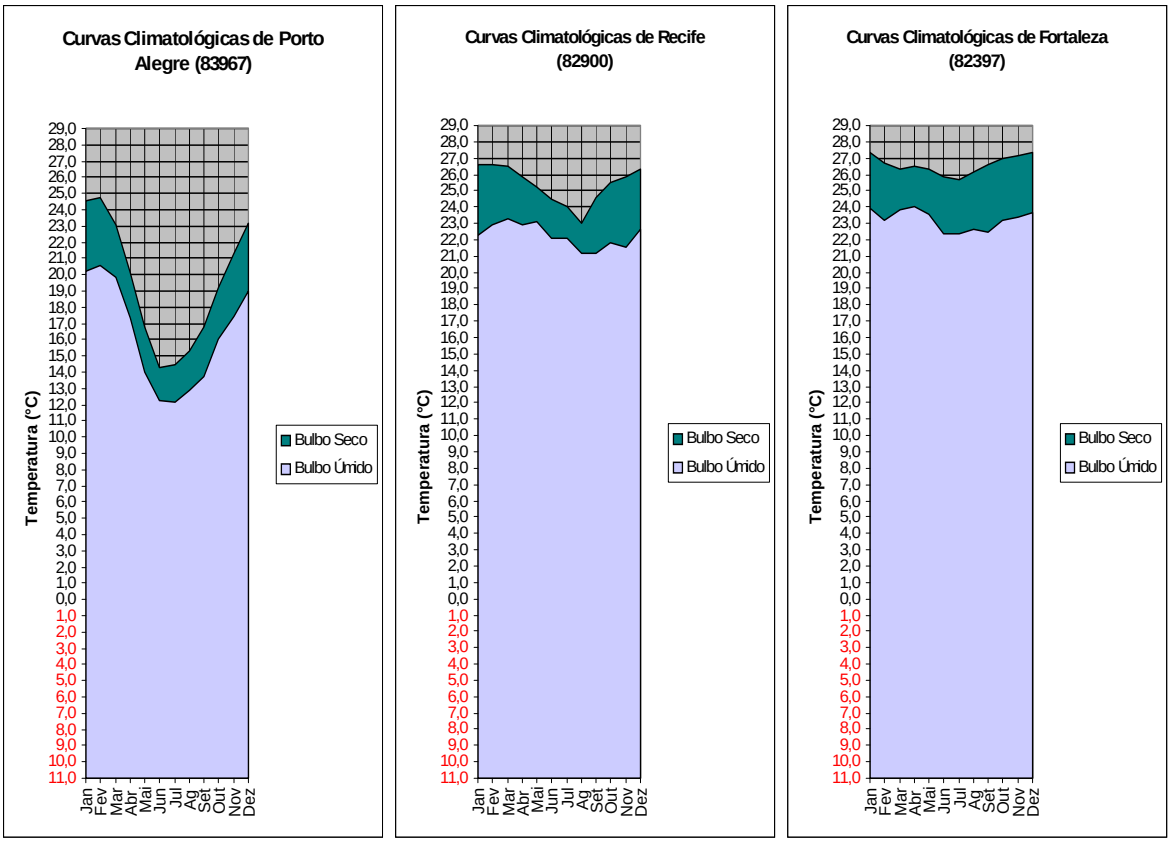


Figura 3.24. Comportamento aproximado da variação mensal das temperaturas de bulbo úmido e seco das cidades de Porto Alegre, Recife e Fortaleza.

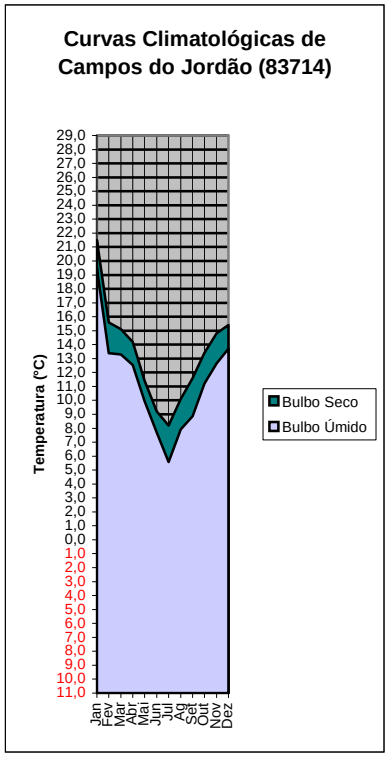


Figura 3.25. Comportamento aproximado da variação mensal das temperaturas de bulbo úmido e seco da cidade de Campos do Jordão.

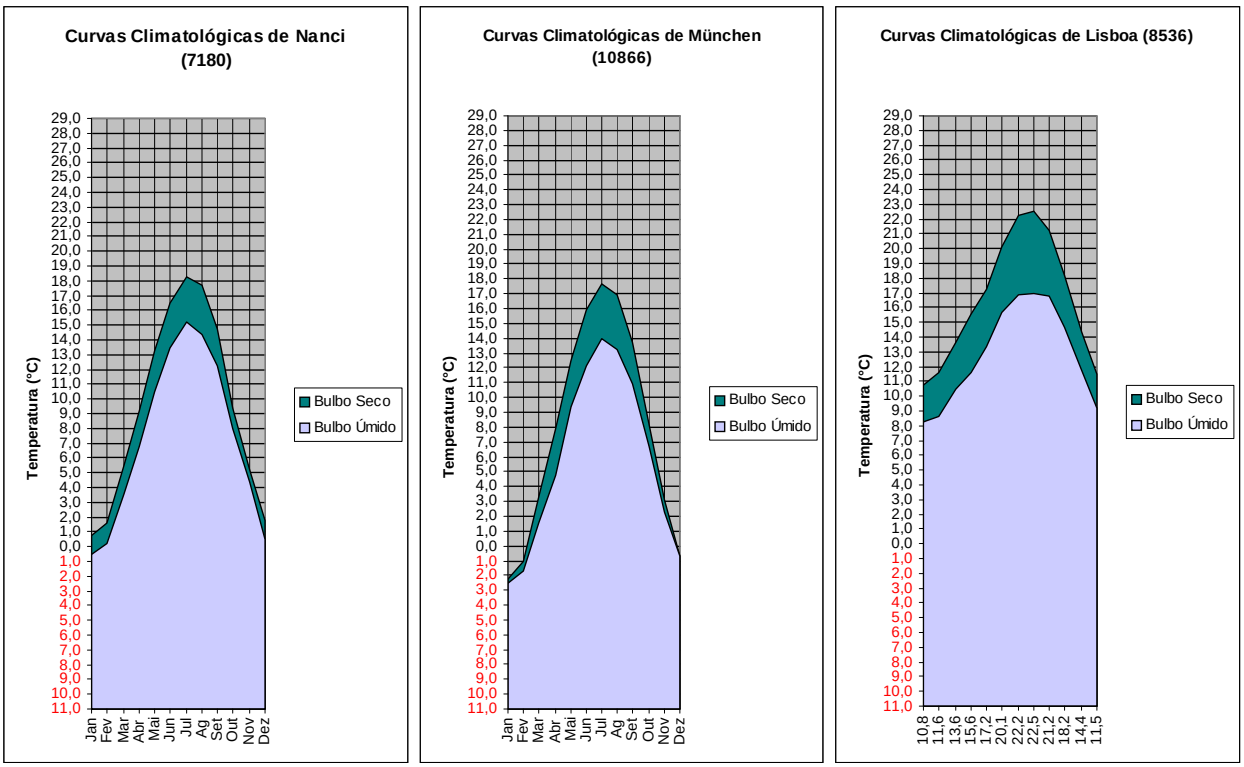


Figura 3.26. Comportamento aproximado da variação mensal das temperaturas de bulbo úmido e seco das cidades de Nanci, München e Lisboa.

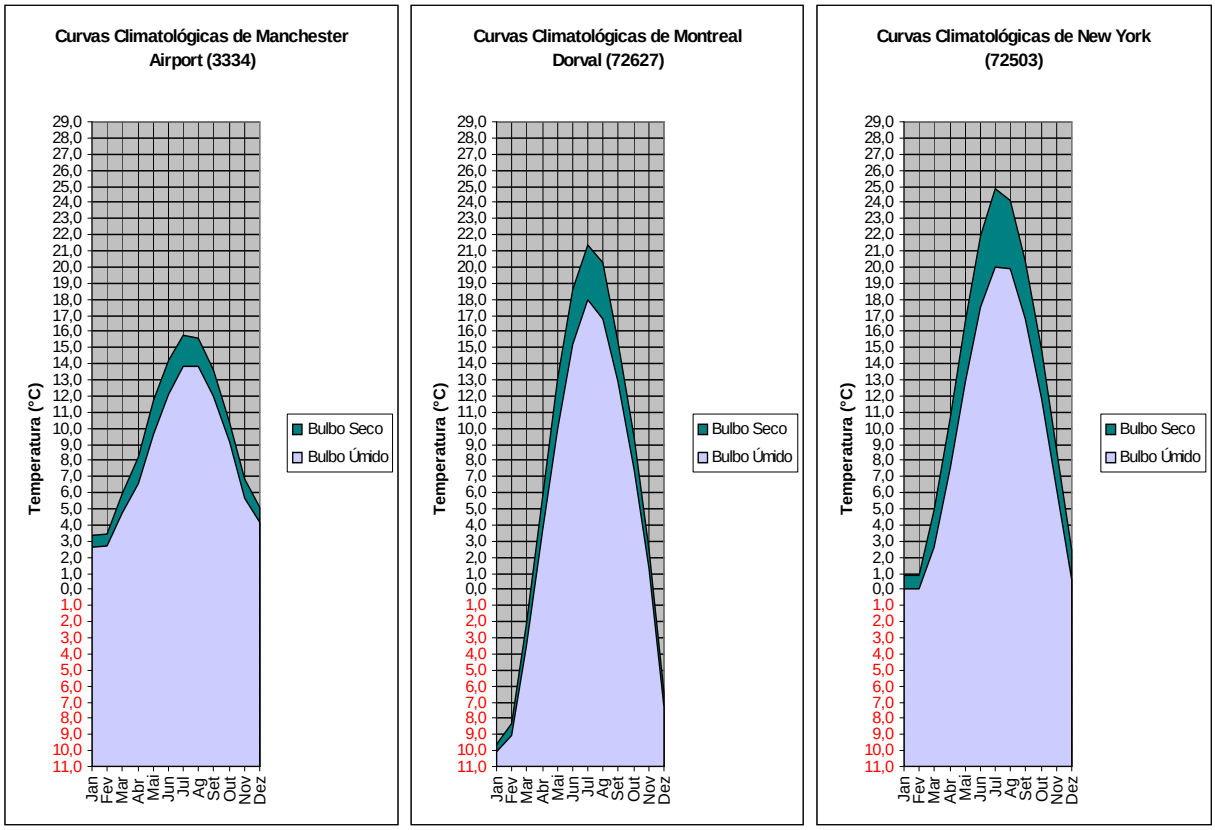


Figura 3.27. Comportamento aproximado da variação mensal das temperaturas de bulbo úmido e seco das cidades de Manchester, Montreal Dorval e Nova York.

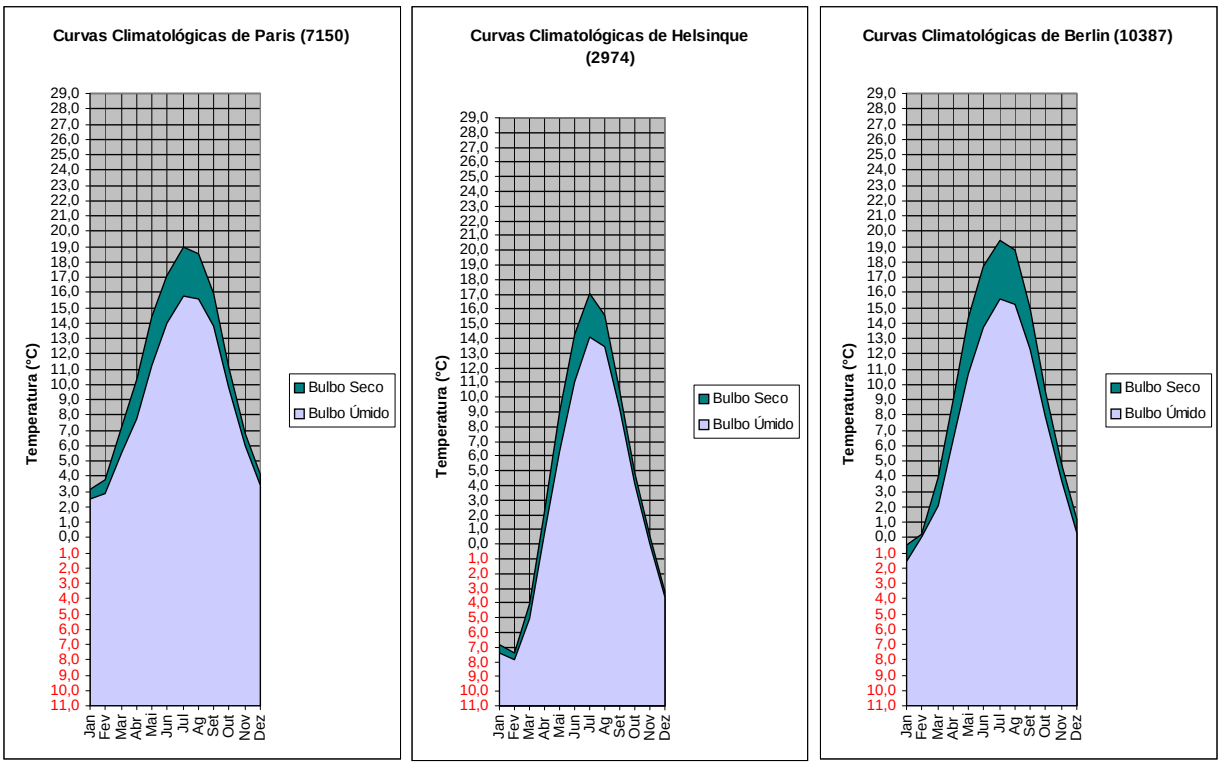


Figura 3.28. Comportamento aproximado da variação mensal das temperaturas de bulbo úmido e seco das cidades de Paris, Helsinque e Berlin.

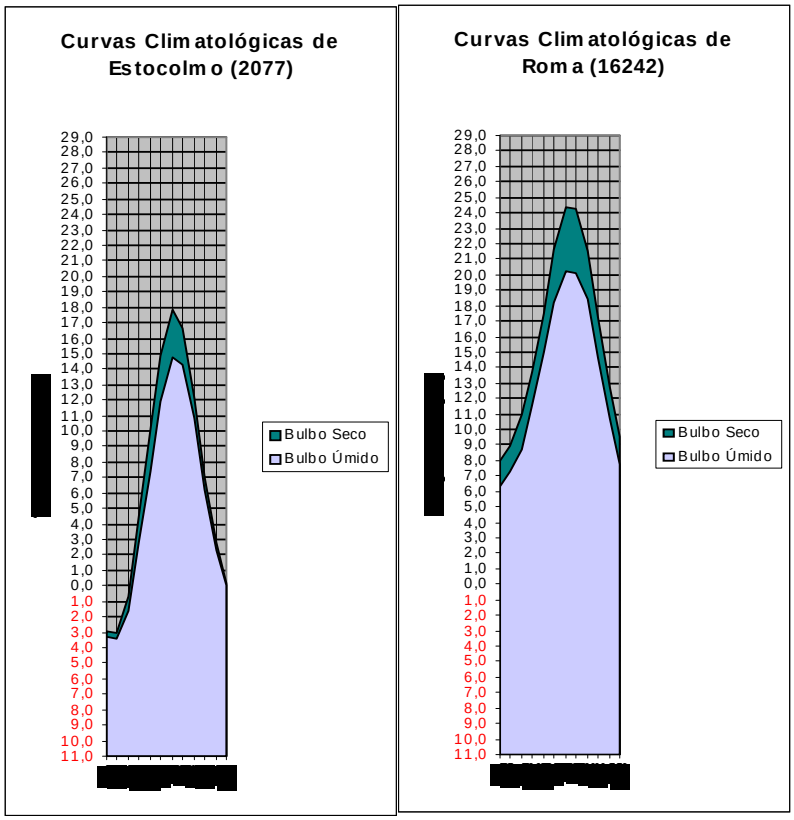


Figura 3.29. Comportamento aproximado da variação mensal das temperaturas de bulbo úmido e seco das cidades de Estocolmo e Roma.

4. QUALIDADE DA ÁGUA REQUERIDA PARA REPOSIÇÃO

4.1 Padrões Físico-Químicos Usuais em Literaturas sobre Reúso

Os parâmetros físico-químicos de importância, quando se trata de água de reposição em torres de resfriamento, considerando sua origem natural ou clarificada são: pH, sólidos totais dissolvidos, sólidos em suspensão, alcalinidade, sulfato, ferro, cloreto, sílica, dureza total e dureza cálcio entre outros, que podem variar em função da região ou da procedência da água ou ainda da metalurgia do sistema. Chama-se a atenção para o cloreto e para a dureza tal a importância desses parâmetros no comportamento incrustante ou corrosivo de uma água. A dureza pela sua potencialidade na formação de incrustação e o cloreto pela sua potencialidade corrosiva e principalmente pela formação de pites, que são pontos de corrosão com característica profunda, sendo esses pites bastantes danosos para os equipamentos metálicos. Por ser um íon muito pequeno, possuir alta mobilidade e alta capacidade de penetração, o cloreto é considerado um *vilão da corrosão*, portanto em geral não se discute tratamento químico de água de resfriamento sem falar nesses dois parâmetros. Em locais onde as fontes de água apresentam altos teores de sílica, esse parâmetro também assume enorme importância.

Para o cloreto, por exemplo, observamos em algumas literaturas valores extremamente elevados na água de recirculação para sistemas semi-abertos, o que não condiz com a nossa experiência, já que usualmente trabalha-se no Brasil com bem menos de 1000 ppm na água circulante, significando com isso que a água de reposição deve apresentar valores ainda menores por conta do ciclo de concentração. Existem sistemas que trabalham num limite maior, mas, considerando uma metalurgia à base de aço-carbono e os tratamentos químicos usuais anticorrosivos, antiincrustantes e biocidas, não entrando nesse momento no detalhe específico do programa químico de tratamento, mas deixando uma margem para a variação que ele pode causar, esse valor encontra-se até superavaliado. Numa avaliação global, baseando-se na leitura de diversos artigos, pode-se dizer que em nível nacional, considerando-se metalurgia de aço-carbono, valores típicos máximos de alguns parâmetros são apresentados na **Tabela 4.1**.

Tabela 4.1. Valores típicos máximos para água de recirculação em sistemas semi-abertos de metalurgia aço-carbono.

Parâmetros	Limites
Cloreto (ppm Cl-)	máx. 400
Dureza total (ppm $CaCO_3$)	máx. 500
Ferro (ppm Fe)	máx. 2,0
STD (ppm NaCl)	máx. 1500
Sílica (ppm SiO_2)	máx. 100
pH	6,5 a 8,5
Taxa de corrosão do aço-carbono (mpy*)	máx. 2,0
Taxa de corrosão do cobre (mpy*)	máx. 0,5
Nº colônias/mL	máx. 10^5

* milésimo de polegada de penetração por ano.

Um detalhe importante que se observa nas literaturas internacionais é que já existem limitações para parâmetros típicos de efluentes como DBO, sulfetos, Substâncias Reativas ao Azul de Metileno (MBAS) etc. Talvez isso ocorra em função das práticas de reúso. No Brasil, ainda não se percebe com freqüência essas limitações, a não ser em plantas específicas onde possa existir esse tipo de contaminante, por exemplo, as refinarias. Isso se deve ao fato de haver no Brasil uma tradição de uso de água natural ou potável para essa finalidade, onde essas preocupações não existiam. Deve-se atentar também para o detalhe das unidades. A concentração do cloreto, por exemplo, em algumas literaturas está expressa em ppm de cloreto de sódio (NaCl), em outras em ppm de cloreto (Cl^-), o que implica uma diferença muito grande em termos numéricos, merecendo algum cuidado ao se comparar dados. Às vezes, os valores de STD também geram alguma confusão, pois na prática de algumas empresas de tratamento de água de refrigeração, não é usual se realizar análise gravimétrica para se determinar STD. Essa técnica, apesar de correta é mais demorada, faz-se então uma estimativa através da leitura da condutividade, que guarda uma relação com STD sob determinadas condições. Para que haja uma padronização, quando os STD são estimados através da condutividade os valores são geralmente expressos em ppm de NaCl.

Das literaturas internacionais são citadas três que não extrapolam muito apesar de ainda apresentarem limites altos para a nossa experiência. Seriam as sugeridas pelo CTI (2002) (www.cti.org.br, acessado em 20/08/02), por LUDWIG (1979) e pela Environmental Protection Agency - EPA (1992), reproduzidas nas **Tabelas 4.2**, **4.3** e **4.4** abaixo. Os dois primeiros referem-se à água de recirculação e o terceiro à água de reposição.

Tabela 4.2. Recomendações de parâmetros de recirculação de água em torres de resfriamento processos aplicados para plantas químicas e petroquímicas.

Parâmetro	Unidade	Limite/Comentário
pH	-	6,5 - 8,0 pH = 5,0 – aceitável na ausência de aço galvanizado
Cloretos (NaCl)	ppm	máx. 750 – aço galvanizado máx. 1500 – aço inoxidável tipo 300 máx. 4000 – aço inoxidável tipo 316 > 4000 – bronze siliconizado
Cálcio ($CaCO_3$)	ppm	Se < 800 – não deve resultar em incrustação de $CaSO_4$. Em climas áridos, normalmente, o nível crítico deve ser muito menor. Para tendências de incrustação de carbonato de cálcio, calcular o Índice de Saturação de Langelier ou o Índice de Estabilidade de Ryznar.
Sulfatos	ppm	Se Ca > 800 – SO_4^{-2} < 800 Em outros casos, um nível de SO_4^{-2} em torno de 5000 é aceitável.
Sílica (SiO_2)	ppm	máx.= 150
Ferro	ppm	máx. =3
Magnésio	ppm	máx. = 0,1
Sólidos em Suspensão	ppm	máx. 150 Evite enchimento se os sólidos forem fibrosos ou gordurosos.
Óleos e Graxas	ppm	máx.= 10 causa sensível perda de performance térmica.
Nutrientes	ppm	Nitratos, amônia, óleos, glicóis, álcoois, açúcares, e fosfatos podem promover o crescimento de algas e lodo. Este crescimento pode causar problemas à torre, particularmente, torres com enchimento.
Amônia	ppm	máx . = 50 – em presença de ligas de cobre
Solventes Orgânicos	-	Estes podem atacar plásticos e devem ser evitados.
DBO	ppm O_2	máx. =25 ppm Particularmente se os sólidos suspensos > 25 ppm.
Sulfetos	ppm	máx. = 1
Índice de Saturação de Langelier (ISL)	-	-0,5 a + 0,5 Um ISL negativo indica tendência à corrosão. Um ISL positivo indica tendência à incrustação de $CaCO_3$.

Fonte: Adaptado de LUDWIG (1979).

Tabela 4.3. Diretrizes gerais do CTI – diretrizes gerais para água de recirculação.

Parâmetro	Unidade	Limite/ Comentário
Temperatura	º F	< 120º F (≅ 49 ºC)
pH	-	6,5 – 9,0
Cloreto	ppm	< 750 – aço galvanizado
		< 1500 – para aço inoxidável série 300
Cálcio (como $CaCO_3$)	ppm	< 800 – não deve resultar em depósito de sulfato de cálcio
Sulfato	ppm	Se Ca > 800, sulfato < 800 para limitar depósitos.
		Em outros casos < 5.000 é aceitável.
Sílica (SiO_2)	ppm	< 150 – para evitar depósito
Ferro	ppm	< 3
Manganês	ppm	< 0,1
STS	ppm	< 25 - para torre com enchimento
STD	ppm	< 5000 – para performance térmica
Óleos e Graxas	-	Devem ser evitados em torres com enchimento – provoca entupimento
Amônia	ppm	Máx. 50 – se ligas de cobre estiverem presentes

Fonte: Adaptado do www.cti.org acessado em 20/08/2002 .

Tabela 4.4. Qualidade de água de reposição ou *makeup* para uso em sistemas de resfriamento com circuitos semi-abertos, com recirculação de água.

Parâmetro [a]	Limite Recomendado [b]
Cl^-	500
STD	500
Dureza	650
Alcalinidade	350
pH	6,9 – 9,0
DQO	75
STS	100
Turbidez	50
DBO	25
Material orgânico [c]	1,0
$N\text{-}NH_4^+$	1,0
PO_4^{-3}	4
SiO_2	50
Al^{+3}	0,1
Fe^{+2}	0,5
Mn^{+2}	0,5
Ca^{+2}	50
Mg^{+2}	0,5
HCO_3^-	24
$SO_4^=$	200

[a] - Todos os valores em mg/L, exceto pH
[b] - Water Pollution Control Federation, 1989
[c] - Substâncias ativas ao azul de metileno
***Fonte**: Environmental Protection Agency (1992).*

Deve-se tomar muito cuidado com os limites para a amônia, ao tentar trabalhar nesses valores altos (50 ppm) recomendados pelas tabelas acima. Em sistemas de ar-condicionado, provavelmente surtirão resultados desanimadores. Outras literaturas sugerem trabalhar com até 2 ppm, nesse sentido o padrão EPA está mais próximo, o que é mais seguro. PUCKORIUS, HELM e SPURRELL (1995) relatam que, mesmo com 2 ppm de amônia, experiências catastróficas podem ocorrer. Com relação ao cloreto, os padrões da EPA podem induzir a valores até maiores que os dois outros, visto que seu padrão é para água de *makeup* e não de recirculação. Os Índices de Saturação de Langelier (ISL) ou o Índice de Estabilidade de Ryznar (IR) recomendados referem-se a índices de corrosão que serão detalhados adiante.

4.2 Principais Problemas em Sistemas Semi-Abertos

Os principais problemas em sistemas semi-abertos são: corrosão, incrustação e depósitos. A corrosão pode ser devido aos microorganismos (corrosão microbiológica ou não). O depósito de sólidos em suspensão inorgânico, juntamente com biomassa pode ser denominado *fouling*, que é extremamente prejudicial aos trocadores de calor pela perda de eficiência de troca térmica e pelo processo corrosivo que pode advir do depósito. A seguir esses fenômenos serão descritos em detalhes.

4.2.1. Corrosão

A deterioração do material metálico em sistemas abertos com retorno ocorre devido a diversos fatores que DREW (1979) resumiu estando representado na **Tabela 4.5**. Esses sistemas funcionam como lavadores de ar, incorporando à sua água gases e poeiras, sendo que grande quantidade de microorganismos encontra-se incorporada à poeira e, ao se desenvolverem na água, algumas espécies são capazes de proliferar e crescer, ocasionando diversos problemas. De todas as formas de corrosão, a que mais se evidencia é a corrosão sob depósitos, pois representa mais de 70% da corrosão encontrada em sistemas de água de refrigeração.

Tabela 4.5. Fatores que afetam a corrosão.

Químicos	Físicos
***a*) pH** ➢ Metais solúveis em ácido – óxidos mais solúveis à medida que baixa o pH. Aumento da corrosão. ➢ Metais anfóteros – óxidos solúveis em pH alto ou baixo. Proteção favorecida em pH intermediário. ➢ Metais nobres – óxidos insolúveis com qualquer pH. Inertes à corrosão. ***b*) Sais Dissolvidos** ➢ Cloreto e sulfato podem penetrar camadas passivas de óxido e promover ataque localizado. ➢ Cálcio, magnésio e alcalinidade podem precipitar-se formando depósitos protetores. ***c*) Gases Dissolvidos** ➢ Dióxido de carbono – baixa o pH e promove o ataque ácido. ➢ Oxigênio – despolariza a reação de corrosão no cátodo, áreas deficientes em oxigênio tornam-se anódicas (células de aeração diferencial). ➢ Nitrogênio – agrava a corrosão por cavitação. ➢ Amônia – corrói seletivamente os metais cuprosos. ➢ Sulfeto de hidrogênio – promove o ataque ácido; forma depósitos que promovem corrosão galvânica. ➢ Cloro – promove ataque ácido, remove filmes de inibidor de corrosão. ***d*) Sólidos Suspensos** ➢ Lama, areia, aluvião, sujeira, etc. sedimentam-se formando depósitos, promovendo corrosão por célula de aeração diferencial. ***e*) Microorganismos** ➢ Promovem ataque ácido, corrosão por célula de aeração diferencial, despolarização catódica, corrosão galvânica.	***a*) Áreas Relativas** ➢ Em um par galvânico, a corrosão aumenta com o aumento da razão entre a área catódica e a área anódica. ***b*) Temperatura** ➢ O aumento da temperatura favorece a despolarização do oxigênio, abaixa a sobrevoltagem, de hidrogênio, a corrosão aumenta. Áreas de temperatura mais elevada tornam-se anódicas em relação a outras áreas. ➢ Temperaturas mais elevadas mudam os potenciais dos metais (p. ex., galvanização inversa). ***c*) Velocidade** ➢ A alta velocidade promove a corrosão por erosão, removendo certos produtos de corrosão passivantes. ➢ A baixa velocidade aumenta a sedimentação e a corrosão por células de aeração diferencial; diminui a quantidade de inibidor de corrosão, que atinge e passiva superfícies metálicas. ***d*) Transferência de Calor** ➢ Favorece a despolarização por oxigênio através do "efeito de parede quente". Favorece a formação de células de aeração diferencial, aumentando a precipitação e sedimentação dos sólidos. ***e*) Metalurgia** ➢ Irregularidades da superfície, cortes, arranhões, etc. favorecem a formação de pontos anódicos; ➢ Tensões – tensões internas promovem a formação de pontos anódicos. ➢ Microestrutura – inclusões metálicas, precipitação em fronteiras granulares, grãos contíguos diferentes, etc. promovem a formação de células galvânicas.

Fonte: Adaptado de DREW (1979).

4.2.2 Principais Tipos de Corrosão em Sistemas Abertos com Retorno

DANTAS (1988) classifica os vários tipos de corrosão de acordo como está apresentado na **Tabela 4.6**.

Tabela 4.6. Tipos de corrosão.

Tipos de Corrosão	Características
Aeração diferencial sob Depósitos.	➢ O principal agente causador destas pilhas é a deposição de matéria orgânica na superfície metálica, na forma de biofilme. Além do biofilme, a poeira do meio ambiente, os sólidos em suspensão na água de alimentação e a lama de fosfato de cálcio são também causadores deste tipo de corrosão. ➢ O processo corrosivo se inicia por que a parte mais aerada comporta-se como catodo em relação às partes menos aeradas, abaixo dos depósitos que comportam-se como anodos. Os produtos de corrosão oriundos do anodo se avolumam sob o depósito inicial, formando os tubérculos. Após formados, o seu crescimento independe das concentrações de inibidores de corrosão, existentes na água de refrigeração, o que evidencia a gravidade da sua presença para os metais dos sistemas.
Aeração diferencial por Frestas	➢ No interior de uma fresta, devido ao acesso limitado de eletrólito para o seu interior, pode ocorrer, um gradiente de concentração salina e de concentração de oxigênio, resultando na formação de pilhas, sendo a pilha por aeração diferencial predominante sobre a pilha de concentração iônica diferencial.
Galvânica	➢ O contato entre metais com potenciais de oxi-redução diferentes propicia a formação de pilhas galvânicas nos equipamentos utilizados nestes sistemas. ➢ As pilhas com maior diferença de potencial, mais encontradas nestes equipamentos são cobre-ferro, onde o cobre é o catodo e o ferro, o anodo.
Ácida	➢ Decorre da utilização de água de alimentação com valores de pH menores que 6 ou absorção pela água, na torre, de gases ácidos como CO_2, SO_2 e SO_3, normalmente, provenientes de chaminés de caldeiras. ➢ A corrosão ácida se apresenta na forma uniforme na superfície do aço-carbono e na forma localizada na superfície do cobre e suas ligas, onde pequenos alvéolos aparecem com diâmetro superior à sua profundidade.
Alcalina	➢ Ocorre quando o valor do pH da água de refrigeração excede 9,0, atacando os seguintes metais: alumínio, zinco, estanho e antimônio com a formação dos produtos de corrosão aluminatos, zincatos, estanatos e antimoniatos de sódio. ➢ As seguintes condições são propicias para estabelecer este valor de pH. Alcalinidade total > Dureza total. • Água abrandada, no ciclo sódio. • Cloração excessiva com hipoclorito de sódio.
Por cloretos	➢ O íon cloreto nas águas, dependendo da sua concentração, interfere nas áreas anódicas, onde se forma um óxido de ferro cúbico, γFe_2O_3 protetor, e nas áreas catódicas, onde se formam as camadas aderentes e contínuas dos inibidores, associados a cálcio e zinco. O cloreto tem a capacidade de romper os filmes protetores com o aparecimento de pites.

	➢ A corrosão pelos cloretos é acelerada em meio ácido, nos metais aço-carbono, aço inox 304, cobre e suas ligas, etc.
Por Ácido Sulfídrico	➢ Este ácido é extremamente reativo, atacando todos os metais utilizados em sistemas de refrigeração, com a formação dos seus sulfetos metálicos.
Por Amônia	➢ Amônia, em meio aerado, ataca o cobre e suas ligas, formando o complexo azul de fórmula $Cu(NH3)_4(OH)_2$.
Por Tensões Fraturantes	➢ É um processo de corrosão localizada, iniciada na área anódica. Este tipo de corrosão se refere ao aparecimento de trincas, causadas pelas presenças simultâneas de esforço de tração e de um meio corrosivo específico ao metal fraturado. Casos comuns de corrosão por tensão fraturante são: cobre e suas ligas, na presença de amônia ou aminas e aços inoxidáveis, na presença de halogenetos principalmente os cloretos (aços inoxidáveis 304, 316 e variantes, como os estabilizados com nióbio e titânio). ➢ Este tipo de corrosão pode ser intercristalina (as trincas propagando-se nos limites dos grãos da rede cristalina) ou intracristalina (propagando-se sem preferência para os limites dos grãos), podendo fraturá-los ou secioná-los.
Seletiva Grafítica	➢ É uma corrosão seletiva. Ocorre quando um agente corrosivo remove um dos elementos de uma liga. O ferro fundido cinzento que possui alto teor de carbono (2,5%), sofre corrosão seletiva, em meios corrosivos específicos, tais como: ácidos fracos, água salobra, água do mar e quando enterrado em solos ricos em sulfatos (propícios ao aparecimento de bactérias do ciclo do enxofre). Neste meio corrosivo, o ferro é atacado, aparecendo, na sua superfície, uma camada de grafite, facilmente, removida com uma lâmina de faca. ➢ Esta aparência apresentada pelo metal deu ao fenômeno a denominação de corrosão grafítica. A grafite se comporta catodicamente com relação ao ferro, e aí uma corrosão galvânica se estabelece, agravando a corrosão inicial, com formação de óxido de ferro como produto de corrosão e o aparecimento de uma massa porosa de grafite, vazios e ferrugem.
Dezincificação	➢ É uma corrosão seletiva que ocorre quando o zinco presente em latões (ligas de zinco metálicas de cor amarela, com constituição média de 70% de cobre e 30% de zinco). Quando o ataque ao zinco acontece, o problema é visto a olho nu, porquanto manchas avermelhadas do cobre poroso aparecem, em contraste com o amarelo do metal. Muitas vezes, depósitos brancos de óxido de zinco, produto de corrosão, mascaram o aparecimento de cor avermelhada do cobre. ➢ Os meios propícios para a dezincificação são: água ácida com alto teor de CO_2, águas alcalinas, águas salobras, temperaturas elevadas.

Fonte: Adaptado de DANTAS (1988).

4.2.3 Conseqüência de Microorganismos Presentes em Água de Resfriamento

São diversas e danosas as conseqüências dos microorganismos presentes em água de resfriamento, algumas delas estão pontuadas abaixo:

- Bloqueio de tubulações;
- Redução no coeficiente de troca térmica;
- Aumento na perda de carga;

- Corrosão induzida por microorganismos;
- Corrosão sob depósito - aeração diferencial;
- Formação de tubérculos - magnetita e goetita;
- Perfuração sob os tubérculos;
- Meio anaeróbico sob o biofilme.

O biofilme é uma película sobre a superfície metálica formada por bactérias sésseis e planctônicas, fungos e algas, aprisionadas dentro do produto do metabolismo da própria colônia, uma substância denominada glicocálix, que serve como um adesivo capaz de encapsular as células, evitando que a colônia seja arrastada com o fluxo da água. Esses biofilmes podem causar os mais graves problemas em sistemas semi-abertos:

- Formação de pilhas de aeração diferencial nos metais utilizados;
- Aglutinação de sólidos em suspensão na água, formando *fouling*, que são capazes de bloquear trocadores de calor e outros equipamentos dos sistemas;
- Crescimento de microorganismos causadores de processos corrosivos nos metais utilizados nos diferentes sistemas;
- Crescimento de algas, fungos e bactérias nas torres de resfriamento, capazes de interferir na eficiência de seu funcionamento.

4.2.4 Formação de Incrustações e Depósitos

A incrustação é definida como a precipitação de sais dissolvidos da solução. O potencial para formação de incrustações em sistemas de resfriamento aberto é alto por duas razões:

- Os sólidos dissolvidos na água de resfriamento são concentrados devido ao processo de evaporação, mas cada composto tem a sua máxima solubilidade para uma dada temperatura. Quando essa concentração máxima é atingida, a água está saturada para aquele composto. Depois disso uma concentração maior irá resultar em precipitação desse composto. O limite de solubilidade para qualquer composto químico pode ser definido pela constante Kps (produto de solubilidade) que é a constante de equilíbrio entre um sólido iônico e sua solução saturada. A solubilidade de um produto A_X B_Y seria escrita aproximadamente como $[A]^X[B]^Y$ onde [A] e [B] são as concentrações

molares dos íons A e B na solução. Quando o produto de $[A]^X[B]^Y$ exceder o Kps, o A_XB_Y irá precipitar.

- Muitos dos compostos formadores de incrustações encontrados na água de resfriamento não apresentam relações convencionais entre temperatura e solubilidade, ou seja, nem sempre o aumento da temperatura promove o aumento da solubilidade dos sais. Na faixa de temperatura típica desses sistemas, muitos compostos se tornam menos solúveis com aumento da temperatura (efeito chamado de solubilidade inversa). As áreas mais quentes do sistema são as superfícies do trocador de calor e esses são os lugares mais prováveis de aparecer precipitação de compostos de solubilidade inversa.

Existe diferença entre incrustação e depósito. Um processo incrustante passa necessariamente por uma etapa de nucleação (formação do cristal semente), a partir da qual ocorrerá o surgimento da formação da chamada incrustação verdadeira. Na maioria dos casos de águas superficiais as deposições observadas são de natureza sedimentar, gerando então os depósitos sedimentares. Existem casos em que ocorrem os dois mecanismos, como nos casos que envolvem produtos de corrosão como o óxido férrico.

Pode-se dizer que os depósitos são oriundos de uma ou mais causas, abaixo relacionadas:

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

Geralmente as incrustações resultantes da precipitação de sais inorgânicos possuem resistência à transferência térmica. Quando a espessura do depósito é significante a corrosão sob depósito pode ser favorecida.

4.2.5 Principais Agentes Incrustantes

Alguns dos mais importantes agentes incrustantes em sistema de resfriamento são:

- Carbonato de cálcio, $CaCO_3$;
- Sulfato de cálcio, $CaSO_4$;
- Fosfato de cálcio, $Ca_3(PO_4)_2$;
- Sílica.

As recomendações e observações descritas por CTI (1990) e DREW (1977) são fundamentais para se avaliar limites. Abaixo encontram-se algumas:

a) **Carbonato de cálcio ($CaCO_3$):** o carbonato de cálcio pode existir em três estruturas cristalinas diferentes. O tipo que normalmente se forma nos sistemas é a calcita, embora a aragonita e vaterita também possam ocorrer. Ela forma um cristal de estrutura bem definida e normalmente ocorre na superfície do trocador de calor como uma incrustação muito dura. A maioria das águas de *makeup* contém concentrações apreciáveis de íons cálcio e bicarbonato. O carbonato de cálcio é o principal agente causador de incrustações em sistemas de resfriamento. A concentração de carbonato é normalmente baixa. Um equilíbrio químico existe entre as concentrações do íon carbonato, íon bicarbonato, ácido carbônico em solução e o dióxido de carbono.

$$CO_3^{-2} + 2H^+ \rightleftharpoons H^+ + HCO_3^- \rightleftharpoons H_2CO_3 \rightleftharpoons CO_2 + H_2O$$

Em pH elevado o equilíbrio tende para a esquerda e em baixo pH para a direita. O sistema aberto tende a volatilizar o dióxido de carbono. O resultado é que uma parte do bicarbonato se transforma em carbonato.

$$2\ HCO_3^- \rightleftharpoons CO_3^{-2} + CO_2 + H_2O$$

O $CaCO_3$ precipita em função de sua baixa solubilidade em locais com temperaturas mais elevadas, principalmente em tubos de troca térmica, mas também pode se formar no próprio enchimento da torre.

$$Ca(HCO_3)_2 \xrightarrow{\text{calor}} CaCO_3 \downarrow + CO_2 \uparrow + H_2O$$

O aumento da concentração do íon cálcio que ocorre devido à evaporação, faz com que o Kps seja excedido em baixo ciclo de concentração na maioria de sistemas abertos.

***b)* Sulfato de cálcio ($CaSO_4$):** o sulfato é mais solúvel do que o carbonato de cálcio, porém nos sistemas em que a concentração de sulfato é muito alta existirá uma certa tendência para sua formação. O gesso é o tipo que mais aparece em equipamentos de troca térmica dos sistemas abertos com recirculação. A anidrida também aparece, pode se formar em altas temperaturas no trocador de calor. Ambas as estruturas são bem definidas, extremamente difíceis de serem removidas e ambas possuem solubilidade inversa. Os sistemas que usam água de *makeup* com altas concentrações de bicarbonato e cálcio podem empregar ácido sulfúrico para evitar a formação do carbonato de cálcio. Além disso, os íons SO_4^{2-} estão presentes originalmente na água bruta e também podem ser incorporados durante a clarificação (como sulfato de alumínio).

Os fatores acima descritos podem resultar em um aumento das concentrações de íons fazendo com que o produto $[Ca^{2+}]x[SO_4^{2-}]$ seja suficiente para exceder o Kps do $CaSO_4$, provocando sua precipitação.

O limite superior para o produto das concentrações de íons de cálcio (expresso como ppm de $CaCO_3$) e sulfato (expresso como ppm de SO_4^{2-}) na ausência de inibidores é estimado pela equação 4.1 (CTI, 1990):

$$[Ca^{2+}]x[SO_4^{2-}] = 500\,000 \qquad (4.1)$$

O $CaSO_4$ também forma incrustações por aumento de temperatura, quando isso ocorre sua solubilidade cai rapidamente com a temperatura, tornando-o supersaturado.

***c)* Fosfato de cálcio ($Ca_3(PO_4)_2$):** as concentrações dos íons ortofosfato são suficientes para formar depósito de fosfato de cálcio e podem provir de várias fontes. Se a água de *makeup* provier de esgoto doméstico ou agricultura, poderá formar incrustação de fosfato de cálcio, quando a água for concentrada em uma torre. Produtos químicos adicionados à água de recirculação para controle da corrosão e depósito freqüentemente formam compostos de fósforo que podem ser convertidos a ortofosfato em sistemas de refrigeração. O potencial para formação de incrustação de fosfato de cálcio é sempre alto quando se usam inibidores à base de fosfato.

Um equilíbrio químico existe entre as várias espécies de íon fosfato e íon H^+, o que pode ser ilustrado pela dissociação do ácido fosfórico.

$$H_3PO_4 \rightleftharpoons H_2PO_4^- + H^+ \rightleftharpoons HPO_4^{-2} + 2H^+ \rightleftharpoons PO_4^{-3} + 3H^+$$

Quando a concentração do íon H^+ aumenta (o pH decresce), o equilíbrio da reação é deslocado da direita para a esquerda. Quando o pH aumenta, os íons H^+ são consumidos e o equilíbrio é deslocado para direita, aumentando a concentração dos íons ortofosfatos. O fosfato de cálcio precipita em sistemas com recirculação como um ou mais compostos com pouca definição cristalina. O fosfato de cálcio freqüentemente se forma em combinação com o carbonato de cálcio. Às vezes é difícil determinar até onde a incrustação do trocador de calor é devida ao fosfato de cálcio. O fosfato de cálcio é menos facilmente removido do que o carbonato de cálcio.

d) **Incrustações de sílica**: a incrustação de sílica pode resultar da polimerização da sílica em sistemas abertos. A *sílica polimerizada* é uma incrustação muito dura, amorfa e é incentivada em pH baixo, mas não possui solubilidade inversa e conseqüentemente tende a precipitar em superfícies de baixa temperatura do sistema.

O íon silicato (SiO_3^{-2}) pode reagir com qualquer dos vários íons metálicos da água de circulação para formar silicatos metálicos insolúveis, que são extremamente incrustantes e de difícil remoção. Entre estes silicatos destacam-se: silicato de magnésio, de zinco e de alumínio.

$$Na_2SiO_3 + Ca^{2+} \longrightarrow CaSiO_3 \downarrow + 2Na^+$$

$$Na_2SiO_3 + Mg^{2+} \longrightarrow MgSiO_3 \downarrow + 2Na^+$$

O potencial de formação dos silicatos metálicos é maior em água de refrigeração de pH alto e esses compostos apresentam solubilidade inversa. Recomenda-se observar os limites abaixo para evitar a formação destas incrustações.

- Concentração de sílica inferior a 150-200 ppm;
- Produto $[Mg]x[SiO_3]$ menor que 35 000 ppm;
- Concentração de Al^{3+} inferior a 1 ppm.

4.3 Índices de Corrosão e Incrustação

Existem basicamente quatro índices utilizados em água de resfriamento para se avaliar a tendência corrosiva ou incrustante da água.

Como já explicado, os depósitos podem ocorrer em água de resfriamento com recirculação quando o produto de solubilidade de um composto específico é alcançado. Carbonato de cálcio é um dos mais preocupantes. O produto de solubilidade varia com a temperatura, pH e concentração iônica na solução. Fica muito difícil afirmar com certeza se haverá precipitação ou não, principalmente porque variáveis tais como velocidade de circulação, temperatura e ação mecânica não são levadas em consideração. Vários métodos empíricos têm sido desenvolvidos para predizer se haverá formação de incrustação num dado sistema de água de resfriamento com recirculação. Abaixo serão apresentados alguns índices utilizados para prever a tendência da ocorrência das precipitações. A seguir são detalhados alguns índices específicos para água de abastecimento, porém largamente utilizados em água de resfriamento.

4.3.1 Índice de Saturação de Langelier (ISL)

Esse índice prevê incrustações de carbonato de cálcio em água de abastecimento. Pode ser definido como a diferença algébrica entre o pH medido de uma água e o pH calculado dessa mesma água, à saturação com $CaCO_3$. É baseado no efeito do pH e na solubilidade do $CaCO_3$. Calcula-se esse índice pela seguinte expressão:

$$ISL = pH\ água - pH\ saturação \qquad (4.2)$$

Para calcular pHs (pH de saturação) é necessário conhecer algumas variáveis, a saber:

- Alcalinidade total (em ppm como $CaCO_3$);
- Dureza cálcio (em ppm como $CaCO_3$);
- Sólidos totais dissolvidos em ppm;
- pH;
- Temperatura.

Dependendo do valor de ISL, algumas tendências podem ser observadas:

- Se ISL> 0 – tendência a depositar Carbonato de Cálcio (incrustante);
- Se ISL< 0 – tendência a dissolver Carbonato de Cálcio existente (corrosiva);
- Se ISL = 0 – há equilíbrio de saturação não havendo formação de crosta.

O pHs pode ser obtido de expressões matemáticas, tabelas e diagramas, como o diagrama de Langelier, ilustrado na **Figura 4.1**.

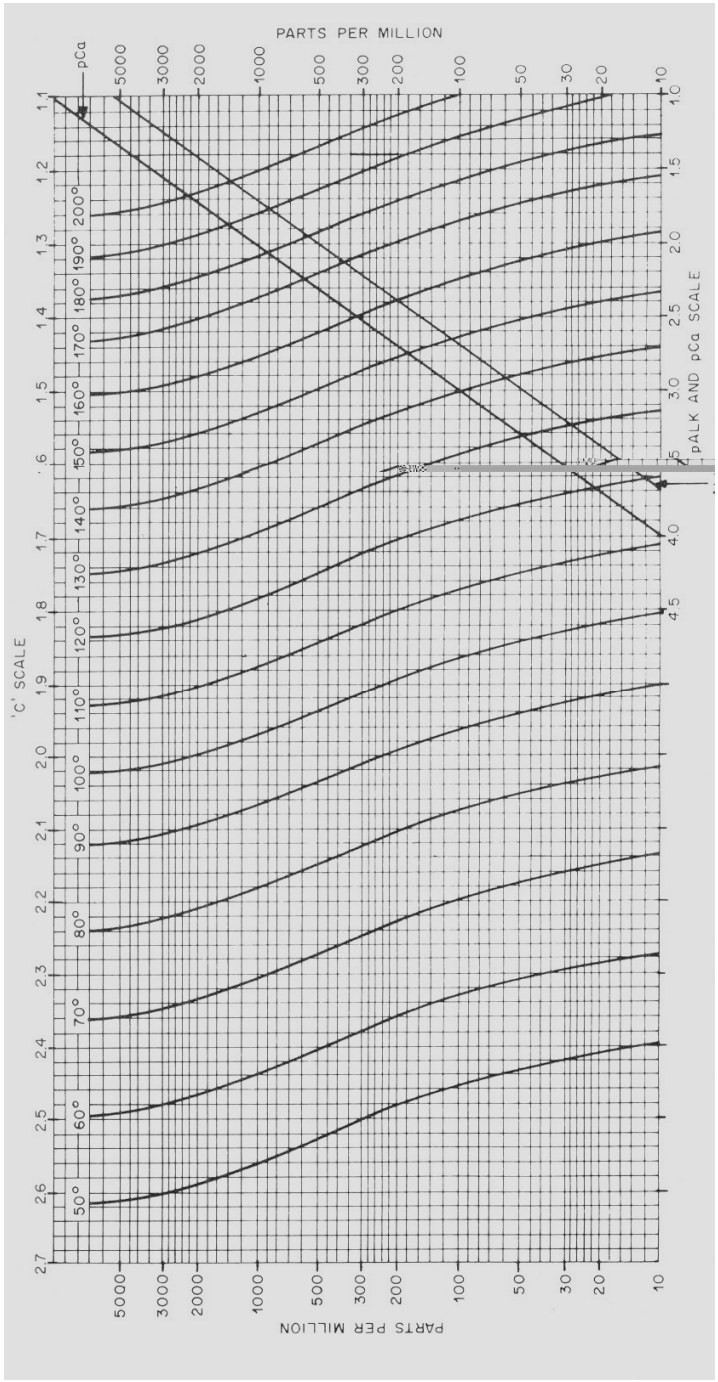


Figura 4.1. Diagrama de Langelier.

Fonte: BETZ (1980).

4.3.2 Índice de Estabilidade de Ryznar (IR)

Esse índice prevê incrustações de carbonato de cálcio em água de abastecimento com um pouco mais de precisão. Calcula-se com os mesmos parâmetros da equação anterior, através da seguinte expressão:

$$IR = 2\ (pHs) - pH\ água \tag{4.3}$$

Dantas (1988) apresenta a avaliação desse índice, ilustrada na **Tabela 4.7**.

Tabela 4.7. Avaliação do Índice de Ryznar.

Índice	Tendência
4 – 5	Forte incrustação
5 – 6	Pequena incrustação
6 – 7	Equilíbrio
7 – 7,5	Ligeira corrosividade
7,5 – 8,8	Elevada corrosividade

Obs. valores para temperaturas entre 0ºC e 60ºC.

4.3.3 Índices Específicos para Água de Resfriamento

4.3.3.1 Índice de Larson-Skold (IL)

Esse índice prevê a corrosividade de água em sistema de refrigeração, em função de seus valores de cloreto, sulfato e alcalinidade. Existe uma relação para se estimar a tendência à corrosão de água que é função de alcalinidade, cloreto e sulfato, e é expressa pelas equações:

$$IL = \frac{me/L(Cl^- + SO_4^{-2})}{me/L(alc.CaCO_3)} \tag{4.4}$$

$$meCl^- / L = ppmCl^- \times 0{,}0282 \tag{4.5}$$

$$meSO_4^{-2} / L = ppmSO_4^{-2} \times 0{,}0208 \quad (4.6)$$

$$meAlc.total / L = ppmAlc.total \times 0{,}02 \quad (4.7)$$

Sendo *me* igual a miliequivalente-grama. Na faixa neutra de pH e em presença de oxigênio dissolvido, taxas iguais ou menores do que cerca de 0,1 indicam tendência não-corrosiva, ao passo que valores mais elevados geralmente indicam águas mais agressivas.

4.3.3.2 Índice de Estabilidade de Puckorius (IP)

De acordo com GENTIL (2001), esse índice modifica a maneira de calcular os índices existentes, com a finalidade de melhorar sua exatidão, na previsão de incrustações. Sua determinação consiste na determinação dos pHs, de maneira idêntica aos cálculos feitos para os índices de Langelier ou Ryznar. É específico para sistemas abertos com recirculação e sistemas fechados. É compatível com águas de torres em níveis de pH maiores que 7,5 e tão altos quanto 9. Recomendado em tratamentos à base de fosfatos, a fim de acusar deposições. É expresso pelas seguintes equações:

$$IP = 2\ pHs - (pHeq) \quad (4.8)$$

Onde pHeq é o pH de equilíbrio, calculado pela equação:

$$pHeq = 1{,}465 \times \log(alcalinidade.total) + 4{,}54 \quad (4.9)$$

4.3.4 Comentários a Respeito dos Índices Apresentados

De posse desses índices, pode-se aprimorar os resultados. Na **Tabela 4.8**, encontra-se avaliação mais precisa desses índices, segundo BETZ in ROZENTAL (2002).

Tabela 4.8. Avaliação dos índices de incrustação.

ISL	IR/IP	Condição
3,0	3,0	incrustação extremamente severa
2,0	4,0	incrustação muito severa
1,0	5,0	incrustação severa
0,5	5,5	incrustação moderada
0,0	6,0	água estável
-0,2	6,5	sem incrustação, tendência muito leve para dissolver
-0,5	7,0	sem incrustação, tendência leve para dissolver
-1,0	8,0	sem incrustação, tendência moderada para dissolver
-2,0	9,0	sem incrustação, tendência forte para dissolver
-3,0	10,0	sem incrustação, tendência muito forte para dissolver

Pode-se observar que os índices descritos acima incorporam somente alguns parâmetros de salinidade e pH, para a previsão do comportamento incrustante ou corrosivo da água. Isso se deve ao fato de esses índices terem sido elaborados para águas de origem natural que não apresentam as características dos efluentes. No caso dos efluentes, poderão estar presentes várias outras substâncias, tais como amônia, sulfetos, além de inúmeros compostos orgânicos que influenciariam certamente na corrosividade da água. Os índices descritos acima provavelmente não se aplicarão perfeitamente aos esgotos sanitários. Seria bom se estudar um novo índice que contemplasse também parâmetros comuns aos esgotos como por exemplo, DBO, sulfetos, amônia etc. Dessa forma, a estimativa do grau de corrosividade de esgotos ficaria mais aproximada.

4.4 Características Corrosivas das Águas Brasileiras

SILVA *et al* (1987) deixavam claro que as águas brasileiras geralmente usadas para torres de resfriamento, tanto subterrâneas como superficiais, possuíam algumas características comuns bem definidas na maioria das regiões industrializadas e que uma das características das águas de *makeup* era a dureza baixa que minimizava o potencial de deposição de sais de cálcio como carbonato de cálcio. Ainda afirmavam, que esse problema raramente acontecia no Brasil, o que na realidade poderia conter um pouco de exagero, pois existem águas bastante duras no Nordeste, por exemplo. Outra característica marcante das águas brasileiras,

apontada pelos autores, seria o alto teor de ferro. O alumínio também era citado como bastante comum devido ao nosso processo de clarificação das águas de abastecimento com sulfato de alumínio. Os autores apresentavam uma tabela onde dividiam em 4 grupos as principais águas de reposição para sistemas de resfriamento e classificavam as águas em vários tipos, afirmando ainda que, nas regiões mais industrializadas do Brasil, 5% são do tipo I, 65% são do tipo II, 25% são do tipo III e 5% são do tipo IV. Na **Tabela 4.9** estão enumeradas as características da classificação citada. Sendo as do tipo II e III referentes às regiões mais industrializadas, eles provavam que mesmo quando concentradas, a vários ciclos de concentração, elas permaneciam corrosivas, como mostram as **Tabelas 4.10** e **4.11**. Isso chamava a atenção para o tipo de tratamento químico a ser utilizado nessas águas. Diante desse resultado, os autores discutiam a necessidade de um programa de tratamento ideal para as águas brasileiras.

O trabalho acima, embora não sendo recente e não contemplando algumas regiões industrializadas que certamente àquela época não existiam, se aplica perfeitamente aos dias atuais. Esse trabalho ressalta peculiaridades do nosso solo, da nossa água e sem dúvida chama a atenção da importância de se conhecer detalhes da região para se indicar soluções adequadas e evitar equívocos.

Tabela 4.9. Características de águas de *makeup* brasileiras.

Item	**I**	**II**	**III**	**IV**	**Unidade**
pH	5 a 6	6.5 a 7.5	6.5 a 7.5	6.5 a 7.5	
Alcalinidade Total	8 a 10	20 a 30	40 a 60	60 a 80	mg/L $CaCO_3$
Dureza Total	5 a 10	20 a 40	90 a 100	90 a 100	mg/L $CaCO_3$
Dureza Cálcio	5 a 10	15 a 30	40 a 50	60 a 80	mg/L $CaCO_3$
Cloreto	5 a 10	10 a 20	10 a 20	20 a 40	mg/L Cl^-
Sílica	10 a 15	5 a 15	10 a 15	20 a 40	mg/L SiO_2
Ferro Total	0.3 a 0.5	0.3 a 1.0	0.3 a 0.5	0.1 a 0.5	mg/L Fe
Alumínio	-	0.3 a 1.0	0.3 a 0.5	0.1 a 0.5	mg/L Al
Sulfato	10 a 15	10 a 15	10 a 20	10 a 20	mg/L SO^{-2}_4
STD	40 a 50	80 a 100	80 a 100	150 a 250	µS
ISL a 25ºC	-5.08 a -3.75	-2.78 a -17.5	-2.06 a -0.8	-1.73 a 0.5	

Tabela 4.10. Índice de Langelier e Ryznar para água de *makeup* tipo II.

Ciclos de Concentração	Índice de Saturação de Langelier (ISL)	Índice de Estabilidade de Ryznar (IR)
2	-1,74 a -0,78	10,48 a 9,06
4	-1,29 a -0,29	9,56 a 8,08
6	-1,02 a -0,05	9,04 a 7,6

Tabela 4.11. Índice de Langelier e Ryznar para água de *makeup* tipo III.

Ciclos de Concentração	Índice de Saturação de Langelier (ISL)	Índice de Estabilidade de Ryznar (IR)
2	-0,94 a -0,14	8,82 a 7,78
4	-0,56 a +0,13	8,12 a 7,24
6	-0,35 a +0,39	7,7 a 6,72

AMARAL *et al* (1987) realizaram um trabalho de amostragem representativa da média brasileira, apontaram as características das águas de resfriamento por setores industriais brasileiros e àquela época constataram que a maioria dos setores trabalhava com águas corrosivas, o que era uma conseqüência direta das características das fontes brasileiras que em 80% também apresentam características corrosivas, o que também foi comprovado por estudo estatístico.

PEREIRA (1988) também apontava para a prioridade dos tratamentos anticorrosivos na prevenção do aço-carbono nos grandes centros industriais brasileiros no centro-sul do país, onde as águas de reposição se apresentavam com características altamente corrosivas.

4.5 Tecnologias de Tratamento Utilizadas em Reúso de Efluentes e Esgotos Sanitários

Acredita-se que as práticas de reúso para fins de refrigeração podem aproveitar um efluente tratado em nível secundário, mas, dependendo da metalurgia do sistema e do tipo dos contaminantes, elas terão de ser levadas em nível terciário para remoção de contaminantes específicos, como, por exemplo, amônia. Como se sabe, os processos de corrosão sempre são passíveis de ocorrer quando se tem um meio líquido (eletrólito) e componentes metálicos em contato. Existem materiais mais ou menos resistentes à corrosão, pois os metais apresentam

diferentes potenciais de oxidação. No caso dos aços existe uma diversidade enorme de composições e tratamentos térmicos na sua fabricação, que lhes conferem diferentes propriedades com relação à dureza, resistência à corrosão e outras.

Não serão aqui detalhadas as operações unitárias utilizadas nesses tipos de águas residuárias, mas serão feitas algumas considerações tendo em vista que o tipo de tratamento de esgotos e efluentes tem implicação direta na qualidade de água de *makeup*.

Segundo JORDÃO (1995), os processos de tratamento dos esgotos domésticos são formados por uma série de operações unitárias para remoção de substâncias indesejáveis ou para transformação dessas substâncias em outras aceitáveis.

As mais importantes operações nos sistemas de tratamento são: gradeamento, sedimentação, flotação, coagulação química, precipitação química, filtração, desinfecção e oxidação biológica. Sendo que os processos de tratamento podem ser: físicos, químicos e biológicos.

Os físicos caracterizam-se principalmente nos processos de remoção das substâncias fisicamente separáveis dos líquidos ou que não se encontram dissolvidas. Os químicos são os processos em que há utilização dos produtos químicos, mas raramente são adotados isoladamente. Geralmente, são utilizados quando os processos físicos e biológicos não atuam eficientemente nas características que se deseja reduzir ou remover. Os biológicos são os processos que dependem da ação de microorganismos presentes nos esgotos.

Dentro dos processos físicos incluem-se: remoção de sólidos grosseiros, remoção de sólidos sedimentáveis, remoção de sólidos flutuantes, remoção da umidade do lodo, filtração dos esgotos, incineração do lodo, diluição dos esgotos e homogeneização dos esgotos ou do lodo.

Dentro dos processos químicos, os mais adotados em tratamento de esgotos são: floculação, precipitação química, oxidação química, cloração e neutralização ou correção de pH.

Dentro dos processos biológicos, os principais são: digestão do lodo (aeróbia e anaeróbia, fossas sépticas) e oxidação biológica (aeróbia, com lodos ativados, filtros biológicos, valos de oxidação e lagoas de estabilização; e anaeróbia, com reatores anaeróbios de fluxo ascendente).

Além desses, outros processos também podem ser utilizados em tratamento de esgoto sanitário. O processo eletrolítico utilizado no tratamento de esgoto de um balneário se mostrou uma alternativa flexível para variações de volume de esgoto e viável para remoção de DBO, DQO e fósforo (GIORDANO, 1999).

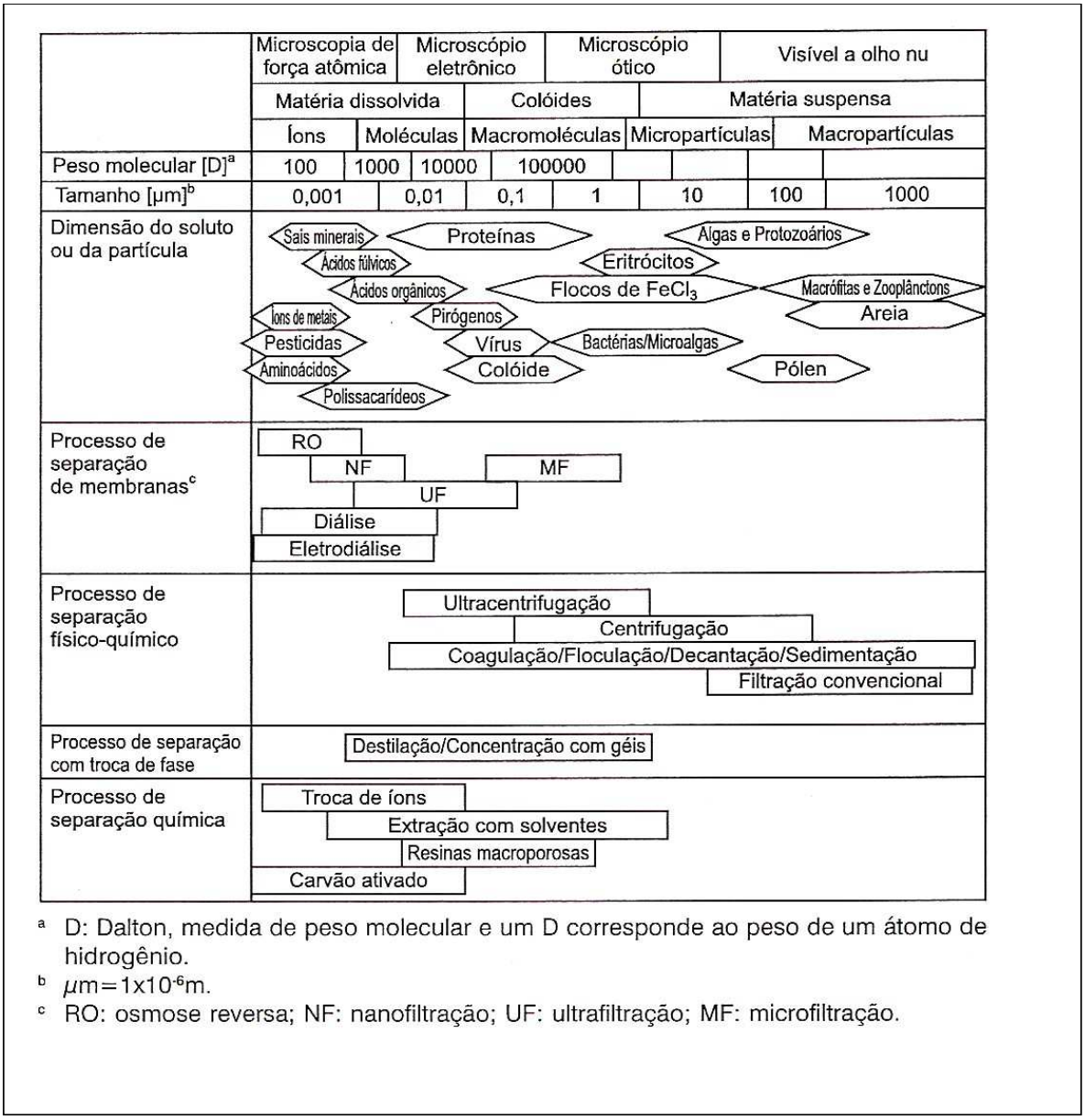
Segundo VON SPERLING (1996), os principais processos de remoção de nitrogênio no tratamento de esgotos seriam: nitrificação e desnitrificação biológica, disposição no solo e processos físico-químicos. Com relação ao fósforo os processos de remoção seriam: biológicos e físico-químicos. O autor também descreve sucintamente os principais mecanismos de tratamento de esgoto em nível secundário.

Em relação ao tratamento terciário, pode-se apontar algumas tecnologias atuais como ozonização, desinfecção por radiação ultravioleta (RUV), assim como as tecnologias de separação por membranas. Todas essas tecnologias têm sido utilizadas como polimento de processos de tratamento de efluentes, visando ao reúso. A desinfecção por bromo também tem sido citada na literatura.

Separação por membranas

Observa-se claramente a ocorrência de um aumento significativo da utilização de técnicas de filtração por membrana visto que atendem à remoção de contaminantes tanto orgânicos como inorgânicos e isso é importante pois os efluentes mesmo tratados em nível secundário, apresentam concentração e variedade de contaminantes diferentes da água doce que geralmente apresenta baixa salinidade, baixa DBO, baixa DQO, baixo teor de amônia e baixo teor de sulfetos. Pela literatura estudada, este último parâmetro tem sido motivo de vários estudos sobre água de refrigeração em refinarias, onde sua concentração pode ser maior, mesmo sem a utilização de efluentes como água de *makeup*. De qualquer forma, o aumento do número de trabalhos apresentados em congressos com vistas à utilização de membranas e a grande divulgação de cursos na área de separação por membranas comprovam essa teoria.

SCHNEIDER e TSUTYA (2001) apresentam um abrangente e precioso trabalho sobre a utilização de membranas filtrantes para o tratamento de esgoto e água de reúso. Segundo os autores, a classificação de membranas mais utilizada na área de saneamento básico é mostrada na **Figura 4.2**, onde curiosamente se pode observar que somente a membrana de osmose reversa pode remover o cloreto até o momento, sendo este íon um dos principais causadores de corrosão por pites. Alternativamente, o cloreto poderia ser removido também por troca iônica.



[a] D: Dalton, medida de peso molecular e um D corresponde ao peso de um átomo de hidrogênio.
[b] $\mu m = 1x10^{-6}m$.
[c] RO: osmose reversa; NF: nanofiltração; UF: ultrafiltração; MF: microfiltração.

Figura 4.2. Dimensões dos principais componentes microscópicos e moleculares presentes em águas naturais e tipos de membranas utilizáveis para a sua separação.

Fonte: Schneider e Tsutya (2001).

Radiação ultravioleta (RUV)

Uma outra prática que está sendo bastante utilizada em desinfecção de efluentes tratados é a aplicação de RUV. Através da RUV, aproximadamente no comprimento de onda de 255 a 260 nm, há máxima destruição de microorganismos. A RUV age sobre o mecanismo reprodutivo dos microorganismos, impedindo que os mesmos se reproduzam promovendo dessa forma, um efeito desinfectante sobre o efluente. É importante que o efluente apresente baixa turbidez de tal forma que os microorganismos não fiquem agregados à impurezas

dificultando a exposição à radiação.

Segundo DANIEL et al (2000), a interação de RUV com matéria orgânica é bem conhecida. Moléculas com grupos funcionais tais como carbonila, carboxila, insaturações e grupos aromáticos possuem o pré-requisito básico para absorção de RUV e desta forma se decompõem durante as irradiações com ultravioleta (UV). Tais grupos funcionais estão presentes em matéria orgânica dissolvida, bem como nas paredes celulares de microorganismos presentes no sistema irradiado.

A inativação dos microorganismos ocorre quando a RUV penetra a parede celular e é absorvida pelos ácidos nucléicos e em menor extensão pelas proteínas e outras moléculas biologicamente importantes.

O ácido desoxirribonucléico (DNA) é responsável pelo controle das funções e pela reprodução das células. Cada gene do DNA controla a formação do ácido ribonucléico (RNA), responsável pela formação de enzimas específicas e de proteínas estruturais. A absorção do UV pode produzir alterações bioquímicas letais aos microorganismos pela dissipação por excitação da energia absorvida que rompe as ligações não saturadas principalmente de purinas e pirimidinas, principais componentes dos ácidos nucléicos. Outras moléculas que não absorvem nesta faixa de RUV, poderão ser decompostas via reações fotoinduzidas.

AGUIAR et al (2002) apresenta a cinética de desinfecção com RUV possibilitando a aferição da taxa de letalidade à RUV de alguns microorganismos estudados. O estudo afirma a boa perspectiva de emprego de sistemas de desinfecção baseados na aplicação da RUV como agente desinfectante.

Ozonização

A ozonização é um processo muito utilizado na Europa com tendência a ser utilizado em todo o mundo. O ozônio (O_3) é uma variedade alotrópica do oxigênio (O_2), é um poderoso oxidante e pode ser produzido a partir de ar seco ou de oxigênio, pela passagem desses gases através de um campo elétrico com potencial suficiente para geração de descarga elétrica. SANTOS (1988) já acrescentava que por ser um poderoso oxidante, o ozônio rompia as células, expondo o citoplasma, podendo causar problemas ao equipamento, principalmente sob depósitos e áreas fragilizadas. Outras desvantagens seriam:

- Não permitir estocagem;

- Apresentar grande instabilidade, não existindo na água sob forma residual sendo necessário que sua geração fosse realizada no local de consumo;
- Formação de subprodutos de desinfecção como alguns aldeídos que podem ser cancerígenos, sendo recomendado por pesquisadores, o uso do ozônio seguido de um tratamento biológico em carvão ativado.

Como vantagens, poderia se destacar:

- Diminuição da turbidez e uma melhoria na qualidade orgânica da água tratada;
- Diminuição do potencial de formação de trihalometanos;
- Diminuição na quantidade de coagulante aplicado;
- Potencial de oxidação superior ao do ácido hipocloroso.

Segundo CAVALCANTI *et al* (2001), a ozonização tem sido o processo mais utilizado na maioria das aplicações comerciais podendo chegar às seguintes concentrações: de 2 a 4 % utilizando-se de oxigênio e de 1 a 2 % utilizando-se de ar resfriado. O processo tem se mostrado eficiente na degradação de uma variedade de compostos orgânicos e inorgânicos, podendo a reação se dar tanto diretamente, pela molécula de ozônio, quanto indiretamente, através da geração de radicais hidroxila ($OH^{\bullet}$) a partir do ozônio. Esses radicais reagem com sais metálicos e matéria orgânica. O ozônio e seus respectivos processos avançados de oxidação são tipicamente utilizados no tratamento de efluentes que contenha baixas concentrações de matéria orgânica. O uso da combinação ozonização-biotratamento ou ozonização catalisada mostra ser uma promessa para o tratamento de efluentes mais concentrados.

NOGUEIRA e GUIMARÃES (1998), descrevem os princípios dos principais processos oxidativos avançados, e dentre eles o que envolve a combinação de ozônio, peróxido de hidrogênio e ultravioleta ($O_3/H_2O_2/UV$) é o mais eficiente para tratamento de águas e efluentes, porém o aumento do custo operacional pode impedir sua utilização.

Brominação

Existem propostas para se utilizar a brominação em substituição à cloração em efluentes e sistemas de resfriamento de passagem única.

A brominação consiste na geração de ácido hipobromoso a partir de reação entre um sal de bromo e o ácido hipocloroso. O ácido hipobromoso também se dissocia.

$$HOCl + NaBr \rightarrow HOBr + NaCl$$

$$HOBr \rightleftharpoons OBr^{-} + H^{+}$$

Segundo STEINMEYER e KURLBAUM (1995), dentre as vantagens da bromination em relação à cloração, destacam-se:

- Maior rapidez e eficiência na eliminação de grande variedade de microorganismos;
- Maior estabilidade do ácido hipobromoso sob condições alcalinas, o que pode resultar em menor consumo de produto;
- Menor impacto ambiental;
- Menor potencial de corrosão resultando em aumento da vida útil dos equipamentos;
- Curva de dissociação bastante favorável nas faixas de pH normalmente encontradas nos sistemas industriais;
- Compostos haloaminados formados na bromination (bromoaminas) se degradam totalmente em poucas horas, enquanto que as cloroaminas podem levar dias para se degradar totalmente;
- Melhor relação custo/benefício nas faixas de pH normalmente encontradas em sistemas industriais;
- Redução dos problemas de segurança provenientes do uso do cloro gasoso.

Pensando-se na utilização de efluentes e conseqüentemente em novos problemas relacionados à qualidade físico-química da água, como maior tendência ao *fouling* devido a um crescimento microbiológico mais intenso, pode-se esperar que a bromination se enquadre melhor. De fato, por um lado, os efluentes industriais têm encontrado muitas restrições ao seu despejo, e há alguns anos a utilização de microbicidas oxidantes tem auxiliado na melhoria da qualidade dessas águas. Por outro, cada vez mais tem se tentado evitar a presença de compostos halogenados nos efluentes onde é comum a presença da amônia que propicia a formação das haloaminas. Ainda assim, a bromination é preferível à cloração em efluentes de pH alcalino, onde as propriedades biocidas da bromination serão melhores que as da cloração.

4.6 Tratamentos e Pré-tratamentos para Minimizar a Incrustação e Corrosão

Dentro dessa nova realidade de se utilizar efluentes para obtenção de água de resfriamento e considerando o pré-tratamento como um condicionamento prévio da água para um tipo determinado de uso, deve-se ampliar a visão global do processo e considerar os tratamentos de efluentes vistos acima como algumas das possibilidades de pré-tratamento da água de resfriamento, haja vista se buscar com técnicas em nível terciário, mais do que o atendimento às normas ambientais, mas também o atendimento aos padrões do uso específico.

Existem outros processos tais como: processo de separação físico-químico, processo de separação com troca de fase e processo de separação química, que podem, de acordo com a necessidade, ser utilizadas no pré-condicionamento da água de resfriamento.

Pode-se citar como exemplos: clarificação (para remoção de sólidos suspensos), abrandamento (para remoção da dureza), desmineralização (para a remoção da carga iônica), filtração em carvão ativado (para remoção de impurezas orgânicas).

O tratamento químico com adição de inibidores de corrosão, biocidas oxidantes, biocidas não oxidantes e agentes antiincrustantes ou dispersantes, por sua vez, ocorre durante o processo de resfriamento. Uma outra operação simples, mas muito eficaz, também realizada durante o processo, é a filtração contínua da água de resfriamento em filtro de areia para a remoção de sólidos suspensos e conseqüente atenuação da proliferação de microorganismos. Mais recentemente tem surgido tratamentos baseados em ação catalítica, usando condicionadores magnéticos para evitar a formação de incrustações de carbonato de cálcio e até mesmo corrosão. Destaca-se a simplicidade desses tratamentos quando comparados com os usados tradicionalmente. Entretanto, trabalhos realizados por diversos pesquisadores evidenciaram a ineficiência desses tratamentos (GENTIL, 2001).

Por outro lado, LANE e ENGELHARD (2000) relatam bons resultados numa experiência desse tipo realizada em torre de resfriamento comercial, trabalhando-se 4 meses e meio sem purgas e sem tratamento químico. Os autores afirmam que já estão seguindo o mesmo tipo de tratamento em uma segunda torre no estado da Carolina do Sul, EUA.

Observam-se ainda poucos provedores desse tipo de tratamento, mas é válido se aprofundar na busca de resultados positivos desses tipos de experiência. Por enquanto, no que diz respeito a quase 100 % das torres em operação, pode-se dizer que o tratamento de água de resfriamento envolve uma série de operações para torná-la adequada ao sistema em que será utilizada, o que dependerá da qualidade da água de *makeup* e da qualidade da água que se deseja atingir.

Na tentativa de se ter uma idéia abrangente sobre os diversos contaminantes dos efluentes e seus respectivos tratamentos visando ao reúso para fins de resfriamento, buscou-se um estudo que traduzisse com fidedignidade opções de tratamento utilizadas na prática. EBLE e FEATHERS (1993) apresentaram uma síntese de possíveis contaminantes em refinarias e suas respectivas opções de tratamento com vistas ao reúso em resfriamento. Também apresentaram um sumário onde resumem os vários contaminantes tipicamente encontrados bem como os respectivos níveis máximos na água de recirculação até onde podem ser controlados com sucesso, mencionando também o tipo de dano causado ao sistema, os programas de tratamento mais comumente usados e fazendo alguns comentários adicionais. Alertam, no entanto, que, devido às interações sinérgicas e variabilidades nos sistemas e nas águas, cuidados devem ser observados no uso dessas diretrizes. As **Tabelas 4.12** e **4.13** foram adaptadas desse trabalho e estão apresentadas a seguir.

Tabela 4.12. Possíveis contaminantes em refinaria e suas opções de tratamento.

Contaminantes	**Opções de Tratamento**	**Observações**
Aldeídos	A, K	
Alumínio	B, C, G, I, J, K	B – Requer ajuste de pH
Amina	K	
Amônia	F, K, I	
Arsênio	B, C, F, H, J	B – Requer ajuste de pH
Bário	E, G, I, J	I – Possível *fouling* na membrana
DBO	A, B, D, F, H, I, K	Pré-filtração
Cálcio	E, G, I, J	
Cloretos	H, I, J	
Cloro-residual		Adição de sulfito
DQO	A, B, F, H, I, K	
Condutividade	G + H, I, J	
Cobre	B, C, G, I, J, K	B - Requer ajuste de pH
Cianetos	A, K	
Fluoretos	E, H, I, J	Alguma adsorção em $CaPO_4$ e MgOH
Hidrocarboneto total	B, D, F, E, I, K	
Ferro	A, B, E, G, I, J, K	I – Possível *fouling* na membrana
Chumbo	A, B, E, I, J	B - Requer ajuste de pH
Magnésio	E, G, I, J	

Manganês	A, B, E, G, I, J	I – Possível *fouling* na membrana
Níquel	A, B, G, I, J	B - Requer ajuste de pH
Sílica-reativa	E, H, I	E – calor
Sulfatos	H, I, J	Alguma adsorção com cal
Sulfeto	A, E, F, H	
STS	B, C, D, E	
COT	A, F, H, I, K	
Zinco	B, C, E, G, I, J, K	B - Requer ajuste de pH

A – Oxidação Química B – Filtração C – Clarificação D – Separação física

E – *Lime or soda ash softening* F – *Stripping* com ar/vapor G – Troca catiônica H – Troca Aniônica

I – Osmose reversa J – Eletrodiálise reversa K – Tratamento biológico secundário

Tabela 4.13. Diretrizes de água de resfriamento.

Contaminante	**Sistema de Resfriamento Comum [a] (ppm)**	**Nível Máximo [a] (ppm)**	**Área Afetada**	**Tratamento necessário**	**Comentários**
Acetona	0	NPAP [b]			
Aldeídos	0	20	Corrosão	Inibidor	Cloração forma ácidos
Alumínio	0	1	*Fouling*	Dispersante	
Amina	0	10-25	*Fouling* microbiológico/ corrosão	Biocida / surfactante / inibidor	
Amônia	0	20-40	*Fouling* microbiológico /corrosão (especialmente cobre)	Biocida / surfactante / inibidor	Se o cobre não estiver presente nível máximo maior
Arsênio	0	1			
Bário	0	5-10	*Fouling*	Dispersante	Sulfato de bário
Benzeno	0	Ver hidrocarboneto	*Fouling* microbiológico	Biocida / surfactante	
DBO	NM [c]	200	*Fouling* microbiológico	Biocida / surfactante	
Cálcio	100-1200	1500	*Fouling*	Dispersante	
Cloretos	<3000	5000 [+]	Corrosão (especialmente aço inoxidável)	Inibidor	Corrosão por *stress* em aço inoxidável
Cloro livre residual	<0,5	<0,5	Corrosão	Inibidor	

Cloro total residual	<5	<5	Corrosão	Inibidor	
DQO	NM	200	*Fouling* microbiológico	Biocida/ surfactante	
Condutividade (μmhos)	<6000	15.000 [+]	Corrosão	Inibidor	
Cobre	0	0,5	Corrosão	Inibidor (azol)	
Cianetos	0	10	Corrosão	Inibidor	
Dissulfetos	0	10	Corrosão	Inibidor	Cloração forma sulfetos
Éster	0	NPAP	*Fouling* microbiológico	Biocida / surfactante	
Éter	0	NPAP	*Fouling* microbiológico	Biocida / surfactante	
Fluoreto	0	5-15	*Fouling*	Dispersante	Fluoreto de cálcio
Hidrocarbonetos totais	0	50	*Fouling* microbiológico/ *fouling*	Biocida / surfactante	
Hidrocarbonetos leves	0	50	*Fouling* microbiológico	Biocida não oxidante / surfactante	
Hidrocarbonetos pesados	0	25	*Fouling* microbiológico	Biocida / surfactante	
Sulfeto de hidrogênio	0	10	Corrosão/ *fouling* microbiológico	Inibidor / não oxidante Biocida / surfactante	Considerações de segurança
Ferro	0-3	5-10 [+]	*Fouling*	Dispersante	
Chumbo	0	2	*Fouling*	Dispersante	
Magnésio	50-1000	50-1000 [+]	*Fouling*	Dispersante	Silicato de magnésio
Manganês	0	1	Corrosão/ *fouling*	Inibidor/polímero	Corrosão, especialmente cobre e aço inoxidável
Mercaptans	0	50	*Fouling* microbiológico	Biocida não oxidante / surfactante	
Mercúrio	0	0,1	Corrosão por *stress* fratura do *admiralty*, corrosão do alumínio	Inibidor	
Metanol	0	50	*Fouling* microbiológico	Biocida / surfactante	
Níquel	0	2	*Fouling*	Dispersante	
Óleos e Graxas	0	Ver hidrocarbo-netos	*Fouling* microbiológico/ *fouling*	Biocida / surfactante	
pH	7-9	7-9	Corrosão / *fouling*	Controle de pH	

Fenóis	0	5-20	*Fouling* microbiológico/ *fouling*	Biocida não oxidante / surfactante	
Ortofosfato	0-25	0-50	*Fouling*	Dispersante	
Selênio	0	NPAP			
Sílica-reativa	<200	300	*Fouling*	Dispersante	Silicato de magnésio
Sódio	NM	NPAP	Veja condutividade		
Estrôncio	0	NPAP			
Sulfato	<3000	5000[+]	Corrosão / *fouling*	Inibidor/ Dispersante	Sulfato de cálcio
Sulfeto	0	10	Corrosão/ *fouling* microbiológico	Inibidor/ Biocida /surfactante	
Dióxido de enxofre	0	NPAP	Corrosão	Inibidor	
STS	40-200	200	*Fouling*	Dispersante	
Tiossulfato	0	10	Corrosão	Inibidor	Aço inoxidável
THM's	0	NPAP			
TKN	NM	Ver amônia	*Fouling* microbiológico	Biocida / surfactante	
COT	NM	200	*Fouling* microbiológico	Biocida / surfactante	
Tolueno	0	Ver hidrocarboneto	*Fouling* microbiológico	Biocida / surfactante	
Vanádio	0	5	*Fouling*	Dispersante	
Xileno	0	Ver hidrocarboneto	*Fouling* microbiológico	Biocida / surfactante	
Zinco	0-2	0-5	*Fouling*	Dispersante	

a Dividir pelos ciclos para determinar a qualidade de água de *makeup*

b NPAP = não considerado como um problema

c NM = normalmente não medida

[+] Sob condições muito restritivas pode-se trabalhar com níveis maiores

4.7 Controle e Monitoramento de Corrosão e Incrustação

4.7.1 Controle de Corrosão e Incrustação

Em grandes plantas, o controle microbiológico pode requerer um enorme controle haja vista seu potencial corrosivo, principalmente em se tratando de efluentes tratados por processos biológicos. O impacto econômico da corrosão microbiológica segundo LICINA (2003), pode girar em torno de U$ 1 000 000,00 por dia e em usinas termoelétricas os custos do reparo de alguns equipamentos danificados por corrosão microbiológica pode chegar a U$

30 000 000,00. Sondas de monitoramento biológico em tempo real, baseadas na monitoração do ATP (adenosina trifosfato) da célula, estão sendo amplamente divulgadas como descrito por DAVENPORT (2003).

Existe também uma contínua pesquisa no desenvolvimento de novos produtos químicos que combatam os fenômenos de corrosão e incrustação. A escolha desses produtos é muito importante na performance do tratamento da água, aliado à dosagem e ao pré-tratamento corretos. A literatura é vasta nesse assunto, cada inibidor possui características próprias, mas na maioria das vezes utilizam-se tratamentos sinérgicos com vários inibidores atuando em conjunto para melhor performance.

Face às características dos inibidores de corrosão, é comum em sistemas de resfriamento o emprego sinérgico de inibidores catódicos e anódicos. A mistura tem como conseqüência a obtenção de um tratamento com maior proteção a baixas concentrações de inibidores e com sensível diminuição da nucleação de pites nos metais. Dentre as combinações mais empregadas pode-se citar as seguintes:

Cromato – Zinco;
Cromato – polifosfato – zinco;
Fosfinocarboxílico – zinco – azóis;
Polifosfato – fosfonato – zinco;
Fosfonato – zinco – azol (que foi a utilizada no estudo de caso);
Molibdato – azóis;

Referindo-se aos inibidores de incrustação, pode-se dizer que o melhor procedimento seria utilizar água abrandada ou desmineralizada. Quando essa alternativa não existir, deve-se utilizar os inibidores de incrustação, cuja finalidade é evitar a deposição de sais minerais no sistema. Estes inibidores basicamente se dividem em agentes complexantes e de superfície. Os complexantes reagem com cátions di e tri positivos, mantendo-os em solução sob a forma de complexos solúveis. Possuem composição à base de EDTA, ácido glucônico e outros. Os agentes de superfície possuem a capacidade de serem absorvidos pelo núcleo dos cristais e distorcê-los. Alguns inibidores de corrosão também têm essa capacidade, tais como os polifosfatos, os polifosfonatos e os fosfinocarboxílicos de peso molecular médio. Existem também os dispersantes poliméricos, que podem ser sintéticos ou naturais, sendo alguns dos mais utilizados os polimetaacrilatos, os polihidroxiacrilatos, os polimaleatos e outros.

Com relação especificamente aos biocidas, estes podem ser oxidantes à base de cloro, bromo e compostos derivados ou não oxidantes à base de metileno bistiocianato, clorofenóis,

sais quaternários de amônio, aldeído glutárico, tiazolinas e outros. Todos com mecanismos específicos de atuação sobre a célula. No caso dos não oxidantes, para evitar a resistência microbiana, devem ser usados alternadamente 2 biocidas de mecanismos de atuação diferentes, lembrando-se também que o tempo de desconcentração é um parâmetro muito importante, pois, no controle do crescimento microbiológico das águas de resfriamento eles são aplicados em dosagem de choque inicialmente, mas depois as doses de reposição deverão ser feitas quando as suas concentrações caírem para valores iguais a 20, 25 ou 30% da concentração dosada inicialmente. A fórmula logarítimica utilizada para esses cálculos está transcrita abaixo e na **Tabela 4.14**.

$$\log C_f = \log C_i - \frac{(P+R)+T}{2{,}303 \times V} \qquad (4.10)$$

Onde:

C_f = concentração final em ppm

C_i = concentração inicial em ppm

P= purgas em m^3/h

R= respingos em m^3/h

t= tempo em hora

V= volume de água em m^3.

Tabela 4.14. Tempo de desconcentração dos biocidas para diversas reduções de dosagem.

30% de redução da dosagem	25% de redução da dosagem	20% de redução da dosagem
T= 1,21 (V/(P+R))	T= 1,39 (V/(P+R))	T= 1,61 (V/(P+R))

Fonte: Adaptado de Dantas (1988).

No intuito de atender à demanda atual, as pesquisas dos inibidores buscam maximizar o ciclo de concentração possível nos tratamentos, promovendo redução das purgas e conseqüentemente economia de água e produto químico. Pesquisas como essas são relatadas por KESSLER (2002), PEREZ e FREESE (1997), GIL *et al* (1997), COGNETTI *et al* (1996).

Uma variável muito importante no tratamento químico é o controle de pH que deve ser

rígido. Utilizando-se efluentes, pode ser que os valores de pH flutuem e deve-se observar com mais cuidado essa variável. Segundo FERREIRA (1988), entre os diversos desvios que podem ocorrer no programa de tratamento da água de um sistema de resfriamento aberto com recirculação, a queda no valor de pH é talvez a mais comum e, potencialmente, a mais perigosa. Historicamente a superdosagem de ácido e um controle deficiente da cloração são as causas principais dessa ocorrência, muito embora outras situações possam também provocá-la. Contaminações ácidas oriundas de processo, contaminações aéreas de gases ácidos (SO_2, SO_3, CO_2) freqüentemente são causadoras de quedas indesejáveis no valor de pH.

A faixa de pH de praticamente todos os programas de tratamento de sistemas de refrigeração abertos com recirculação situa-se entre 6,5 e 8,5. Valores de pH acima de 8,5 são evitados porque:

- Aumentam os riscos de incrustações e deposições, tornando o sistema fortemente sensível a falhas de dosagens dos anti-incrustantes e dispersantes;
- Reduzem a eficiência dos biocidas oxidantes e não-oxidantes;
- Tornam incompatível o uso do zinco como inibidor catódico, transformando-o em fonte de depósitos, reduzindo o controle da corrosão.

Valores de pH abaixo de 6,5 são evitados porque:

- Aumentam drasticamente o potencial corrosivo da água do sistema de resfriamento;
- Reduzem fortemente a eficiência dos inibidores de corrosão utilizados, tornando muito difícil o controle de corrosão.

Atualmente estão disponíveis no mercado dispositivos denominados bombas dosadoras que dosam automaticamente produtos químicos dentro da torre mediante prévia programação ou sinais provenientes de sondas, o que facilita a manipulação dos produtos, aumenta a segurança ocupacional, reduz riscos de dosagens excessivas ou insuficientes, mas de forma alguma dispensa a supervisão de um operador que deve fazer manutenção preventiva, verificar os estoques necessários, atualizar ou conferir periodicamente a calibração dos equipamentos de acordo com os resultados analíticos.

4.7.2 Monitoramento de Corrosão

Antigamente aceitava-se que para se obter informações suficiente para uma monitoração perfeita da água de um sistema de resfriamento seria necessário:

- Análises de material depositado ou incrustado em equipamentos para verificação da composição mais provável;
- Análises físico-químicas da água recirculante e de reposição;
- Cálculo de índices de estabilidade e ciclos de concentração.

Com o passar dos anos, concluiu-se que, como forma de acompanhamento, essas análises e esses cálculos seriam ferramentas úteis, porém insuficientes para avaliar o estado real do circuito em contato com a água passando a ser utilizados então processos específicos para a avaliação e monitoração da corrosão.

Os processos de avaliação de corrosão mais usados são: gravimétricos ou por perda de massa, eletroquímicos e elétricos. O método da perda de massa é sem dúvida o mais tradicional. Os métodos eletroquímicos basicamente se dividem em: Tafel e resistência de polarização linear, curvas de polarização anódica e impedância eletroquímica. Estes são amplamente utilizados principalmente na avaliação de inibidores de corrosão, como pode ser visto em: TORRES (1998), SANTOS FILHO (1998) e BITENCOURT (2002), que estudaram a avaliação de diversos inibidores de corrosão para aplicação em águas de resfriamento. Também existem equipamentos eletro-eletrônicos que fornecem taxas de corrosão instantâneas (sondas corrosimétricas), que permitem controle *on-line* das taxas de corrosão.

4.7.2.1 Perda de Massa

O recurso mais comum para avaliar a corrosão, em razão de sua disponibilidade a baixo custo e facilidade de avaliação visual é o emprego de corpos de prova ou cupons de prova, normalmente fabricados com os mesmos metais predominantes no circuito de resfriamento.

Existem opiniões divergentes com relação à eficiência de utilização desse método; alguns técnicos afirmam que seus resultados são extremamente limitados, outros consideram esse método sensível, embora limitado.

De acordo com BIANCHI *et al* (1988), os corpos de prova refletem corrosão cumulativa e, dessa forma, devem ser empregados. Ocorrências relacionadas a acontecimentos diários que interferem na velocidade de corrosão não são avaliadas corretamente pelo corpo de prova.

Para esse propósito, o uso de sondas corrosimétricas seria o mais adequado, pois forneceria dados instantâneos e assim disponibilizaria informações para o estabelecimento do modelo de corrosão instalado.

Segundo LAZARINE (1995), os corpos de prova fornecem indicações bastante sensíveis do comportamento dos metais que compõem o sistema em face ao meio líquido, principalmente no tocante à corrosão. De maneira indireta, pelo acréscimo de massa, servem para avaliar também a formação de depósitos em sua superfície, contudo, como não possuem troca térmica, são considerados limitados para essa finalidade.

Na tentativa de normalizar os ensaios de corrosão em águas industriais a **Comissão de Estudo de Águas Industriais,** criada em 1991, e que contava com representantes do Instituto Nacional de Tecnologia (INT); Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT); Universidade de São Paulo (USP); Empresas (Rhodia, Eletropaulo, Cosipa, Petrobrás e Sabesp) e Fornecedores (Kurita, Grace, Buckman), criou um projeto, intitulado "Água de Resfriamento Industrial – Avaliação da Corrosividade pelo Método de Perda de Massa com Utilização de Corpos de prova em Árvores de Corrosão". Em 1995, o texto finalmente encontrava-se em fase final de revisão e deveria ser encaminhado à ABNT para apreciação, aprovação e implantação como Norma Brasileira, mas até agosto de 2003 em visita à ABRACO – Associação Brasileira de Corrosão, fui informada de que o projeto não havia sido finalizado mas seria retomado futuramente. Portanto, não existia no Brasil até àquela data um ensaio normalizado para avaliação da corrosividade em sistemas de resfriamento.

Uma das experiências bastante produtivas dessa comissão foi a avaliação da influência da geometria, do tratamento superficial e da localização dos corpos de prova nos resultados de corrosividade de águas industriais. Segundo TANAKA *et al* (1995), essa experiência foi realizada com o objetivo de melhor fundamentar suas prescrições com relação aos corpos de prova e para tanto as seguintes variáveis foram combinadas: três seqüências de tratamento superficial (jateamento abrasivo, desengraxamento e decapagem ácida), duas geometrias de corpos de prova (100 mm x 15 mm e 50 mm x 30 mm) e duas localizações diferentes (bacia e árvore de teste com características próprias para acomodar as diferentes geometrias dos corpos de prova). Através da análise de variância, chegou-se ao resultado de que a variável de maior efeito na medida de taxa de corrosão dos corpos de prova é a sua localização seguida do tratamento superficial. A variável geometria não mostrou efeito significativo e não foi constatada nenhuma interação linear significativa entre as variáveis estudadas. Os valores de taxa de corrosão para cupons localizados na bacia são muito maiores. Pode-se concluir, portanto, que imergi-los simplesmente na bacia da torre poderá levar a resultados falsos, com valores elevados na taxa de corrosão, que nem sempre correspondem à realidade do sistema.

Na experiência piloto do Estudo de Caso a ser relatado no próximo capítulo, foi utilizada somente avaliação por perda de massa com cupons instalados na linha de retorno da água para torre de resfriamento utilizando uma árvore de teste, ilustrada na **Figura 4.3**. Observa-se nessa figura os suportes onde ficam afixados os corpos de prova e o percurso da água na árvore. Maiores detalhamentos serão abordados abaixo.

De acordo com a empresa AQUALAB, para a finalidade desta experiência, este teste simula adequadamente as condições de serviço da tubulação, fornecendo taxas de corrosão de relativa confiabilidade e gerando um aspecto visual definido, bastante aproximado do que está ocorrendo no sistema, se tornando neste estudo o parâmetro operacional que define se a água está adequada ou não para resfriamento, ou seja, se compromete ou não os equipamentos metálicos (neste caso aço e cobre). Para se medir a taxa de corrosão no teste piloto foi utilizado a Recomendação ASTM D. 2325-65T (1955) - corrosivity testing of industrial water (cupon test method). As orientações descritas a seguir são baseadas neste trabalho e descritas por DANTAS (1988).

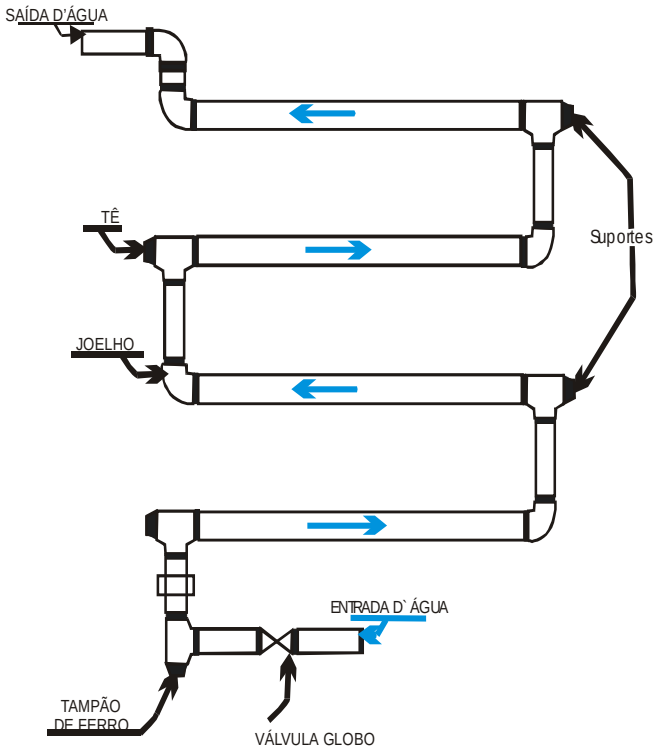


Figura 4.3. Árvore de teste

Fonte: Adaptado de Dantas (1988)

4.7.2.2 Detalhamento do Método para Determinação da Taxa de Corrosão

***a*) Localização dos corpos de prova**: a maneira mais correta de medir a taxa de corrosão, por cupons, é através da utilização de cupons de linha. Sua localização é feita numa derivação com previsão para inserir 4 (quatro) ou 6 (seis) cupons.

***b*) Controle de fluxo**: tendo a velocidade linear da água, grande influência na taxa de corrosão, deve-se ajustá-la para valores próximos aos do trocador de calor da planta.

***c*) Material do cupom**: o material do cupom deverá ter as mesmas características do trocador de calor em estudo.

***d*) Dimensões dos cupons**: os cupons de linha devem ter suas dimensões situadas nas seguintes faixas:

- Largura (12 - 15 mm) ou (1/2”- 3/4”);
- Comprimento (50 - 100 mm) ou (2”- 4”);
- Espessura (0,6 - 1,6 mm) ou (1/32”- 1/16”).

***e*) Procedimentos para instalação dos cupons**

- Registrar inicialmente a área total do cupom (A em cm^2);
- Remover, se houver, o óleo protetor do cupom, inicialmente com álcool isopropílico e, depois, com benzeno ou acetona, e colocá-los em dessecador;
- Evitar manusear os cupons, manipulando-os com pinças e utilizando vidros de relógio como recipientes;
- Pesar ao décimo de miligrama, registrando a massa do cupom (MI em grama);
- Inserir nas árvores cupons numerados 1, 2, 3 e 4 e registrar a data.

***f*) Procedimento para acompanhamento**

- Permanecer com os cupons em teste, pelo espaço mínimo de trinta (30) dias;
- Observar os cupons de bacia, periodicamente, a fim de constatar e registrar seu estado geral.

***g*) Procedimento para remoção de cupons e medida da taxa de corrosão**

- Remover, com escova, todos os depósitos dos cupons;

- Decapá-los com ácido clorídrico, inibido, a 26%;
- Enxaguar em água corrente, por cinco segundos;
- Neutralizar com solução de soda a 10%, durante cinco segundos;
- Enxaguar com água corrente, por cinco segundos;
- Imergir em álcool isopropílico por cinco segundos e, em seguida, em benzeno ou acetona, por mais cinco segundos;
- Secar em dessecador, por 15 minutos;
- Pesar ao décimo de miligrama, registrando a massa (MF em grama) e o tempo (T em dias) que o cupom ficou submetido ao teste;
- Registrar a diferença entre MI e MF (DM em grama).

***h*) Cálculo da taxa de corrosão**

$$\text{Taxa(mdd)} = \frac{100.000 \times \text{DM}}{\text{A} \times \text{t}} \tag{4.11}$$

$$\text{Taxa(mpy)} = \frac{1{,}437 \times \text{mdd}}{\mu} \tag{4.12}$$

$$Taxa(mmpy) = \frac{0{,}036 \times mdd}{\mu} \tag{4.13}$$

Onde:

A = área exposta dos cupons em cm^2
MI = massa inicial do cupom (em gramas)
MF = massa final do cupom (em gramas)
DM = diferença de massa (em gramas) = MI - MF
t = tempo de exposição dos cupons em dias
μ = massa específica
mdd = miligrama de perda de massa por decímetro quadrado por dia
mmpy = milímetro de penetração por ano
mpy = milésimo de polegada de penetração por ano

As taxas de corrosão correspondem a uma previsão de vida operacional dada pelas **Tabelas 4.15** e **4.16.**

Tabela 4.15. Taxa de corrosão do aço doce.

Taxa de corrosão do aço doce		
Taxa mpy	**Previsão de vida**	**Controle da corrosão**
0 – 2	Acima de 70 anos	Excelente
2 – 5	28 a 70 anos	Bom
5 – 8	17 a 28 anos	Fraco
8 – 10	14 a 17 anos	Pobre
10	14 anos	Intolerável

Tabela 4.16. Taxa de corrosão do cobre.

Taxa de corrosão do cobre		
Taxa mpy	**Previsão de vida**	**Controle de corrosão**
0 – 1	Acima de 65 anos	Excelente
1 – 2	32 a 65 anos	Bom
2 – 3	21 a 32 anos	Fraco
3 – 4	16 a 21 anos	Pobre
4	16 anos	Intolerável

4.8 Considerações para Melhor Gestão dos Sistemas Semi-Abertos e Melhor Previsão dos Impactos do Reúso de Efluentes em Torres de Resfriamento

Com o objetivo de alcançar um panorama da evolução do tratamento de água de resfriamento no Brasil, foi realizada uma vasta revisão em todos os trabalhos sobre esse assunto apresentados nos Anais dos Congressos publicados pela Associação Brasileira de Corrosão desde 1971, tendo em vista a enorme credibilidade desse órgão e sua grande representatividade no que se refere ao setor industrial. Com certa tranqüilidade pode-se afirmar que muitos trabalhos antigos são extremamente ricos em detalhes técnicos, mostrando uma séria preocupação com a definição e a implantação correta de programas de tratamento bem como com a otimização dos mesmos.

Através desses trabalhos também se verifica que no Brasil até a década de 90, com relação à qualidade da água utilizada em resfriamento, na grande maioria das indústrias, sua

procedência era de concessionárias, rio próximo à indústria ou no máximo água de poço (geralmente misturada com uma das anteriormente citadas). A partir de meados dessa década é que a questão da proteção ambiental começa a ser apontada também como um incentivador na questão do reúso de efluentes para resfriamento. Os efluentes logicamente possuem uma carga de contaminantes elevada e bastante diversificada em relação às outras fontes habituais.

Seria esperado que a ênfase ao reúso incentivasse também um aumento nos ensaios pilotos e simulações de sistemas, de onde teoricamente se deveria retirar muitos parâmetros operacionais evitando enganos e danos penosos ao se partir para a escala industrial. Os ensaios pilotos e os estudos mais aprofundados, no entanto, não parecem crescer à mesma proporção. No âmbito das grandes indústrias essa disparidade é muito menos acentuada, mas nas pequenas indústrias e nos estabelecimentos comerciais, as decisões podem ser tomadas precipitadamente devido principalmente a problemas econômicos e administrativos. Por conta disso, vale alertar nesse momento que tentativas do tipo ensaio e erro para reúso de efluentes industriais ou sanitários com vistas ao resfriamento, tornam-se mais onerosas e menos otimizadas, podendo inclusive trazer prejuízos mesmo levando-se em conta a economia aparente devido a redução do consumo de água.

Nesses trabalhos antigos, mesmo ainda não se considerando reúso de efluentes, diversos autores estudavam com afinco as conseqüências de contaminantes orgânicos típicos em seus sistemas de resfriamento bem como seus tratamentos corretivos ou eliminações. Para tal, abusavam de testes pilotos, incentivando a simulação dos sistemas antes de uma tomada de decisão, principalmente em indústrias. Esse fato acontecia não exatamente por haver algum benefício ambiental envolvido, mas por ser uma boa estratégia para se aumentar o tempo de campanha operacional, ou seja, aumentar o tempo de trabalho contínuo sem paradas para grandes manutenções e em conseqüência aumentar a produtividade. Sabe-se que sem dúvida um dos sistemas que pode influenciar decisivamente na otimização desse tempo é o sistema de água de resfriamento por estar intimamente comprometido com a continuidade do processo produtivo.

Dentro desse sistema, os trocadores de calor diretamente ligados às torres, exercem grande peso nessa limitação. Como foi visto, esses equipamentos estão sujeitos a processos corrosivos, incrustantes e microbiológicos que influenciam diretamente no seu desempenho quanto à sua eficiência de troca térmica, sendo necessários vários controles e contínuos processos de monitoramento para se evitar manutenções corretivas prolongadas.

Segundo AMARAL e BIANCHI (1986), as décadas de 60 e 70 foram marcadas por um direcionamento somente para o emprego de produtos químicos já consagrados em outros países e que em tese atenderiam aos problemas das indústrias nacionais. Contestando essa

realidade, os autores enfatizavam o então recente conceito de “Programa de Tratamento”, explicitando que o princípio básico para se estabelecer um programa de tratamento químico em águas de refrigeração seria considerar que os problemas conhecidos como corrosão, incrustação e desenvolvimento microbiológico, apesar de se manifestarem universalmente da mesma maneira, para serem corrigidos, deveriam ser individualizados a partir de estudos no local de origem do problema, considerando a qualidade das águas, a situação dos equipamentos, as condições climáticas, as contaminações e assim por diante. Vale enfatizar que esse discurso é extremamente atual e não fica aquém de teorias modernas. Diante desse raciocínio, os autores apontavam para a necessidade das técnicas de simulação cujos objetivos principais seriam:

- Definir programas de tratamento sob medida para novos sistemas;
- Otimizar tratamentos implantados;
- Avaliar a performance dos programas de tratamento inclusive quando submetido à contaminação;
- Comparar o desempenho de programas sob as mais variadas condições.

Os autores sugeriram, ainda, uma seqüência lógica para a elaboração de um *programa sob medida*, que principiava no conhecimento do sistema, através de um minucioso levantamento de campo que pudesse orientar as técnicas de simulações necessárias. Esse levantamento buscava captar as características do sistema e as características dos fluidos conforme ilustrado na **Figura 4.4.**

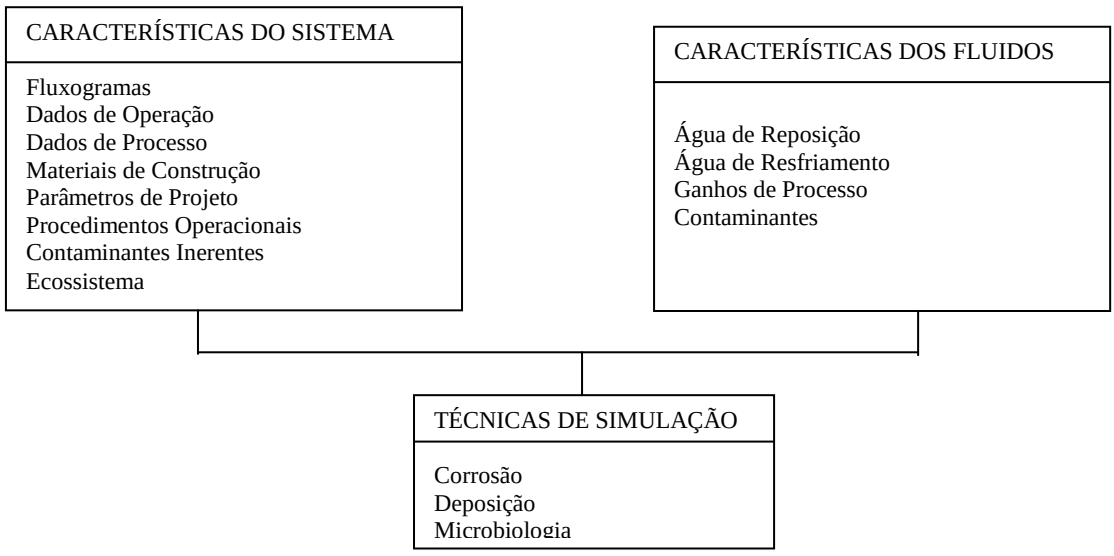


Figura 4.4. Diagrama de orientação para técnicas de simulações.

Aprofundando a questão, RIBEIRO *et al* (1993) demonstraram todas as etapas envolvidas no dimensionamento do programa de tratamento para maximização do tempo de campanha do sistema de resfriamento de uma unidade petroquímica, objetivando ganhos tangíveis de produtividade. Sugerem para tanto uma boa proposta de gerenciamento de sistemas de resfriamento, baseada num processo de gestão PDCA (*Plan – Do – Check – Act*), que promoveu na indústria um bom desempenho do tratamento de água e um contínuo melhoramento. Novamente cabe enfatizar que é evidente a aplicação atual dessa abordagem.

PUCKORIUS e TIANGCO (2002) ressaltam que boa parte dos trabalhos mais significativos é proveniente de refinarias e indústrias petroquímicas, pois essas indústrias apresentam as maiores variações com relação à metalurgia dos materiais, à velocidade e qualidade da água, à variação de temperatura e aos tipos de trocadores de calor. Isso é fato e também acontece da mesma forma aqui, mas ao contrário do Brasil os Estados Unidos, desde as décadas de 60/70, utilizam-se de efluentes sanitário ou industrial para utilização como água de *makeup* de torres de resfriamento e isso lhes conferem uma vasta experiência nessa área, contudo, não se deve apenas copiar seus modelos, mas sim analisá-los e adaptá-los à nossa realidade. Alguns relatos significativos serão aqui abordados, pois podem servir como referência para futuros estudos.

Segundo PUCKORIUS *et al* (2001), mais da metade dos estados americanos lançam mão do reúso de água para atender à demanda dos sistemas de resfriamento. Muito embora esgoto municipal tratado seja a fonte mais comumente encontrada para reúso, outras fontes estão sendo necessariamente procuradas para atender à demanda e reduzir custos. A reciclagem interna de água também está sendo utilizada em todos os estados, envolvendo todos os tamanhos de sistemas.

Em se tratando de reúso interno em indústrias, os autores apresentam sucintamente fontes que freqüentemente requerem tratamento para fins de reúso em torres de resfriamento e fontes que não requerem tratamento. Dentre as que freqüentemente não requerem tratamento estão:

- Esgoto municipal tratado a nível terciário;
- Água de rejeito de Osmose Reversa;
- Água de lavagem de abrandador;
- Purga de boiler;
- Condensado;
- Algumas águas de processo.

Dentre as que freqüentemente requerem tratamento estão:

- Esgoto municipal tratado a nível secundário;
- Efluente industrial;
- Purgas de torres de resfriamento;
- Algumas águas de processo.

PHILLIPS e STRITTMATTER (1994) detalharam três possibilidades de reúso interno dentro de uma refinaria, além do esgoto sanitário municipal. O estudo foi motivado pela necessidade do alto consumo de água de resfriamento na planta (cerca de 60 até 70% do total), gerando um efluente, através das purgas, de aproximadamente 20 a 40% do total de efluentes da indústria. O trabalho aborda a questão da identificação das fontes internas para água de *makeup* em torres de resfriamento, identificando os contaminantes passíveis de causar problemas, suas estratégias de pré-tratamento e o tratamento químico adequado da água. Eles mostram como um processo de auditoria é interessante antes de se avaliar a questão do reúso, pois ela fornece um balanço hídrico completo para todas as unidades da planta, vários parâmetros de qualidade, tanto da entrada, quanto da saída de todos os processos. Isso mostra onde estão os maiores consumos, onde estão as maiores descargas de efluentes e sem dúvida auxilia na definição dos processos que serão beneficiados com correntes de reúso. Finalmente, auxilia na definição dos pré-tratamentos necessários de cada corrente. Conclui-se que algumas correntes devem ser tratadas isoladamente para evitar contaminações ainda maiores, outras devem ser misturadas com água potável (obviamente para fins de reúso, não para fins de descarte). Outro parâmetro de extrema importância dentro dessa avaliação seria a localização, pois os custos com bombeamento e tubulações podem ser extremamente elevados. Após detalhar os problemas potenciais de cada corrente e indicar as alternativas de tratamento, ao final do trabalho, os autores concluíram que todas as fontes poderiam ser aproveitadas desde que se respeitassem as características de cada efluente, sabendo-se que cada uma delas representaria problemas diferentes em sistemas de refrigeração devido às suas características físico-químicas e, portanto, mereceriam tratamentos diferentes.

Muitos trabalhos detalham a alternativa específica de se reaproveitarem ou de se reduzirem as purgas da torre de refrigeração, o que não é muito comum no Brasil, mas, nos Estados Unidos, essas práticas já estão sendo executadas há bastante tempo. Pode-se observar que isso era uma preocupação para eles desde a década de 60/70. Um trabalho antigo que já ilustrava essa preocupação é o trabalho de FOSBERG (1972) numa companhia de gás do Texas que demonstrou excelentes resultados no reaproveitamento de purgas. Ainda nesta linha de pesquisa, pode-se dizer que diversos estudos já mostraram que é mais vantajoso e

alcançam-se ciclos maiores trabalhando-se com *staged cooling*, que é uma técnica de alta reciclagem e reaproveitamento térmico, utilizando duas torres de refrigeração (2 *loops*) onde a purga do *loop* primário é tratada e usada como *makeup* do *loop* secundário, sendo neste realizadas quase todas as atividades de tratamento.

Um trabalho interessante é o de LANCASTER e SANDERSON (1988), que patentearam um processo *staged cooling* específico, cuja descarga é praticamente zero. Nesse processo tanto o *loop* primário quanto o secundário sofrem tratamento de água e pode-se dizer que no global apresentam ciclos de concentração maiores. O tratamento da purga secundária é baseado em filtração, desmineralização e clarificação.

GOLDBLATT (1994) considera viável o modelo em cascata, com o reaproveitamento direto da purga da primeira torre na segunda torre.

Na realidade, atualmente as tecnologias para aquisição de descarga líquida zero, usualmente conhecidas pela sigla ZLD (do inglês *Zero Liquid Discharge*), estão se tornando ainda mais comuns e observa-se que atualmente existe uma tendência para se tratar purgas através de processos de membrana. Recentemente, FRITZ e NATHAN (2001) estudaram um processo que pode ser usado como um pré-concentrador de um sistema térmico de evaporação. Esse novo processo foi concebido para água contendo concentrações de sílica muito elevadas, como é o caso de muitas cidades no sul dos Estados Unidos. É um processo de osmose reversa de alta eficiência cuja sigla em inglês é HERO - Osmose Reversa de Alta Eficiência (do inglês *High Efficiency Reverse Osmosis*). Um esquema simplificado do processo HERO é apresentado na **Figura 4.5**. Nessa experiência, utilizando um teste piloto eles comprovaram que esse processo pode ser usado obtendo-se taxas de recuperação de purgas da ordem de 90%. Sendo a sílica solúvel em pH elevado, as etapas de pré-tratamento dependem da qualidade da água e dos critérios específicos e a única etapa que permanece constante é a operação de osmose reversa em pH elevado. No entanto, para que se trabalhe com pH elevado em osmose reversa, toda a dureza e outras espécies catiônicas que formariam depósitos nas membranas devem ser removidas, os sólidos suspensos devem permanecer próximo a zero e o dióxido de carbono deve ser removido para minimizar o tamponamento.

A dureza é preferencialmente removida pelo processo convencional de abrandamento seguido de filtração e troca iônica. A adição de ácido é para neutralizar qualquer alcalinidade remanescente. Os autores apontam várias vantagens para processo HERO, dentre elas eliminação de depósito na membrana pela eliminação da dureza, alcalinidade e outros formadores de depósitos constituintes da água de alimentação, ausência de fouling biológico pelo alto valor de pH e outras.

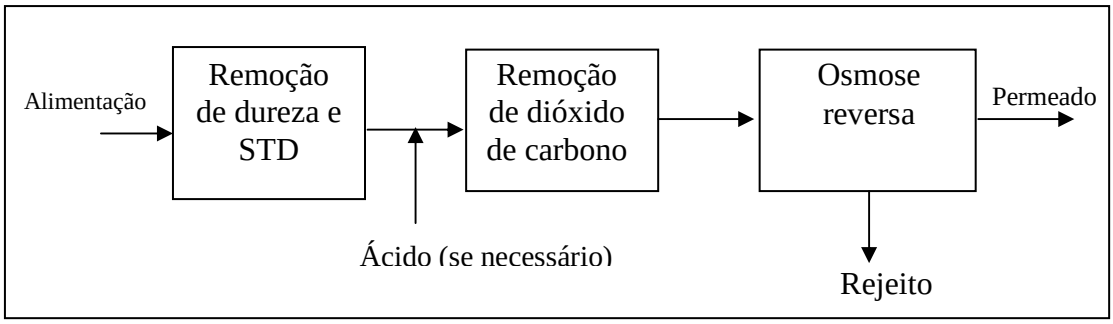


Figura 4.5. Esquema HERO PROCESS.

PUCKORIUS (2003) relatou em um trabalho sobre experiências de reúso com torres de resfriamento na cidade San Antonio, no Texas, um enorme estudo piloto para se determinar se a água reciclada proveniente de esgoto municipal poderia efetivamente substituir com sucesso a água de um aqüífero que abastecia toda a demanda de água de resfriamento da cidade. Curiosamente chegou-se à conclusão de que a água reciclada era menos corrosiva do que a água do aqüífero. As altas concentrações de fosfato apresentavam um forte potencial para formação de *fouling*, dependendo dos ciclos de concentração da torre, do pH e da concentração de polímero no sistema. Também foi concluído que seria necessário utilizar tratamento químico para garantir boa performance. Os custos compensam a substituição, pois serão economizados milhões de galões de água natural num futuro próximo. A empresa de água municipal criou um incentivo tarifário para que as indústrias fizessem essa substituição com rapidez. Essa experiência mostra a importância dos estudos pilotos, mesmo em locais onde a cultura do reúso de água já é tradicional; mostra também uma comparação econômica da utilização da água das duas fontes, apresentando a porcentagem de economia para os consumidores que poderá chegar a 60% em 2005.

Finalmente aborda-se um último estudo que se pode considerar como um guia na implementação de qualquer projeto de reúso em sistemas de resfriamento. No trabalho de PUCKORIUS (2002), o autor descreve os passos principais que devem ser apreciados antes de tomadas de decisões, não esquecendo, entretanto as orientações já citadas por AMARAL e BIANCHI (1986) que enfatizavam que apesar dos problemas de corrosão, incrustação e desenvolvimento microbiológico se manifestarem universalmente da mesma maneira, para serem corrigidos devem ser individualizados, considerando vários fatores, inclusive as condições climáticas, o que indica ressalvas em se apropriar do modelo de PUCKORIUS. Ainda assim, seu relato é importante. Ele sugere que os principais elementos que podem promover impactos em um sistema de resfriamento onde se utilizam efluentes como água de *makeup* são: amônia, fosfato, alta condutividade e alto teor de matéria orgânica. Ele prioriza

alguns passos, descritos abaixo, que devem ser levados em consideração nessa operação e enfatiza que a prioridade NÃO é conhecer a qualidade da água de *makeup*. Sugere os seguintes passos:

1º passo

- Conhecer os equipamentos que entram em contato com a água e como esses equipamentos funcionam (trocadores de calor / condensadores, tubulações, torre).
- Conhecer o material de construção e as condições de operação de todos os componentes (velocidades, fluxos, tempo de operação, temperatura etc.).
- Conhecer condições específicas da torre (operação contínua ou periódica, identificação das potencialidades de corrosão e incrustação).

2º passo

- Verificar se a qualidade da água é compatível com o sistema, assim como verificar qual o tratamento requerido caso a água não seja compatível. A água de *makeup* é importante, mas não tão importante como a água de recirculação.
- Avaliar os parâmetros: amônia, fosfato, condutividade e carbono orgânico total (COT).

Outros parâmetros que podem causar um impacto adverso são: ferro, cobre, cloretos, sulfatos, manganês, fluoretos, sólidos suspensos, DBO, DQO, sílica, dureza, cálcio, alcalinidade total e pH. Outras literaturas incluem também sulfetos e outras substâncias, o que complementa as recomendações de PUCKORIUS.

Águas para reúso que contenham matéria orgânica, amônia e fosfatos podem causar problemas de *fouling*. Um programa de tratamento microbiológico da água, assim como um bom programa para evitar depósito será crítico. Aconselha-se a usar um tipo de enchimento chamado *splash* nesses casos. Os metais cobre, ferro e manganês podem se depositar nos tubos de trocador de calor e criar pilhas galvânicas de corrosão em aços galvanizado e doce. O ferro causa depósito e sob o depósito ocorre a corrosão. O manganês propicia corrosão por pites no aço inoxidável, por isso eles devem ser removidos ou controlados por tratamento químico. Sugere-se que suas concentrações sejam determinadas por pelo menos 12 meses e preferencialmente 24 ou mais para que seja estimado o impacto no equipamento. A **Tabela 4.17** identifica a potencialidade de impacto desses contaminantes na água.

Tabela 4.17. Impactos potenciais dos constituintes da água.

Parâmetros	Problemas Prováveis			
	Incrustação	**Fouling**	**Corrosão**	**Corrosão microbiológica**
Amônia			X	X
Fosfato	X		X	X
Condutividade		X	X	
COT		X		X
DBO		X		X
DQO		X		X
Ferro		X	X	
Cobre			X	
Manganês		X	X	
Fluoretos	X			
Sulfatos	X			
Cloretos			X	
Sílica	X			
Dureza cálcio	X			
Alcalinidade total	X	X	X	
pH			X	

3º passo

Após as fases 1 e 2 concluídas, deve-se confrontar os reais impactos que acontecem no equipamento. Podem ser realizados vários tipos de comparação. A **Tabela 4.18** mostra os prováveis problemas de corrosão que podem ocorrer, especificamente com tubos do trocador de calor:

Tabela 4.18. Impacto corrosivo dos constituintes da água em tubos de trocador de calor.

Parâmetro	Metalurgia dos tubos de trocador de calor			
	Aço doce	**Aço galvanizado**	**Aço inoxidável**	**Cobre-zinco**
Amônia				X
Fosfato				X
Cloretos	X	X	X	
Manganês			X	
Cobre	X	X		
Sulfatos	X	X		
pH	X	X		X

Chama-se a atenção para dois impactos bastante prováveis que são: os impactos que os cloretos provocam no aço inoxidável (acima de 1000 mg/L). É notório que as altas velocidades podem diminuir as taxas de corrosão do aço inoxidável por cloretos. Por outro lado, a alta temperatura é um fator que pode fazer com que esses limites sejam ainda menores.

Os impactos que a amônia provoca nas ligas de cobre são bastante prejudiciais, pois formam complexos solúveis. As **Tabelas 4.19** e **4.20** ilustram esses fatos:

Tabela 4.19. Impacto da amônia sobre ligas de cobre.

Parâmetros	**Concentração Máxima de Amônia (ppm NH_3)**
70 / 30 cobre / zinco	< 0,2
70 / 30 cobre / níquel	< 20
90 / 10 cobre / níquel	< 10

Temperatura de água máxima 45º

Tabela 4.20. Impacto dos cloretos sobre aço inoxidável.

Parâmetros	**Aço Inoxidável**		
	304	**316**	**A I 6 X N**
Cloretos (mg/L)			
Meio estagnado	< 100	< 200	< 2000
Meio não estagnado	< 300	< 1000	< 10000

Temperatura máxima de 45º C.

5. ESTUDO DE CASO

A água de refrigeração pode ser utilizada para arrefecer diversos processos como visto no Capítulo 3. No estudo de caso descrito a seguir ela é utilizada para arrefecer o condensador de um sistema de ar-condicionado central, especificamente um sistema de expansão indireta, que é um sistema bastante utilizado em ambientes climatizados de grande porte, onde a vazão de recirculação da água é função da carga térmica de refrigeração. Sendo assim, para que se tenha uma visão global desse processo de refrigeração, e se tenha uma visão ainda mais clara do papel da água de resfriamento, antes de se descrever o caso, serão descritas sucintamente as etapas desse sistema, conforme ilustrado na **Figura 5.1**.

Os componentes do sistema de expansão indireta são um resfriador de líquido (*chiller*) e um climatizador de ar (*fan coil*). O resfriador de líquido encontra-se limitado pelas linhas tracejadas com um sistema típico de refrigeração por compressão de vapor, constituído basicamente por um evaporador, um compressor, um condensador e uma válvula de expansão termostática.

Na **Figura 5.1** observa-se que a água vinda da torre de resfriamento (água de condensação), escoa pelo interior dos tubos do condensador que geralmente é um trocador de calor tipo casco e tubo. Uma temperatura comum de entrada da água no condensador é 29,5ºC e a temperatura de saída é da ordem de 35ºC. Esse é o *range* da torre utilizado na maioria dos projetos de ar-condicionado no Rio de Janeiro, utilizando um *approach* de 3ºC para uma temperatura de bulbo úmido de 26,5ºC, de acordo com a NBR 6401/1980. Essa água retorna à torre de arrefecimento por meio de uma bomba onde é novamente resfriada.

O evaporador do resfriador de líquido é também um trocador de calor tipo casco e tubo, no qual o fluido dos tubos é o refrigerante (normalmente R22 – monocloro diflúor metano) e o fluido do casco é a água que retorna do *fan coil* a uma temperatura de 12ºC e é resfriada até cerca de 6ºC (circuito de água gelada), retornando ao *fan coil.*

O calor dissipado pela água no evaporador evapora o refrigerante, que é succionado pelo compressor. O vapor superaquecido da descarga do compressor com pressão alta e temperatura da ordem de 60ºC escoa pelo casco do condensador de onde sai como líquido a uma temperatura da ordem de 40ºC, ainda com pressão elevada, pois a perda de carga é desprezível.

O refrigerante condensado vindo do condensador expande-se na válvula de expansão de onde sai como mistura de duas fases a uma temperatura em torno de 5ºC e com uma pressão inferior àquela da descarga do compressor.

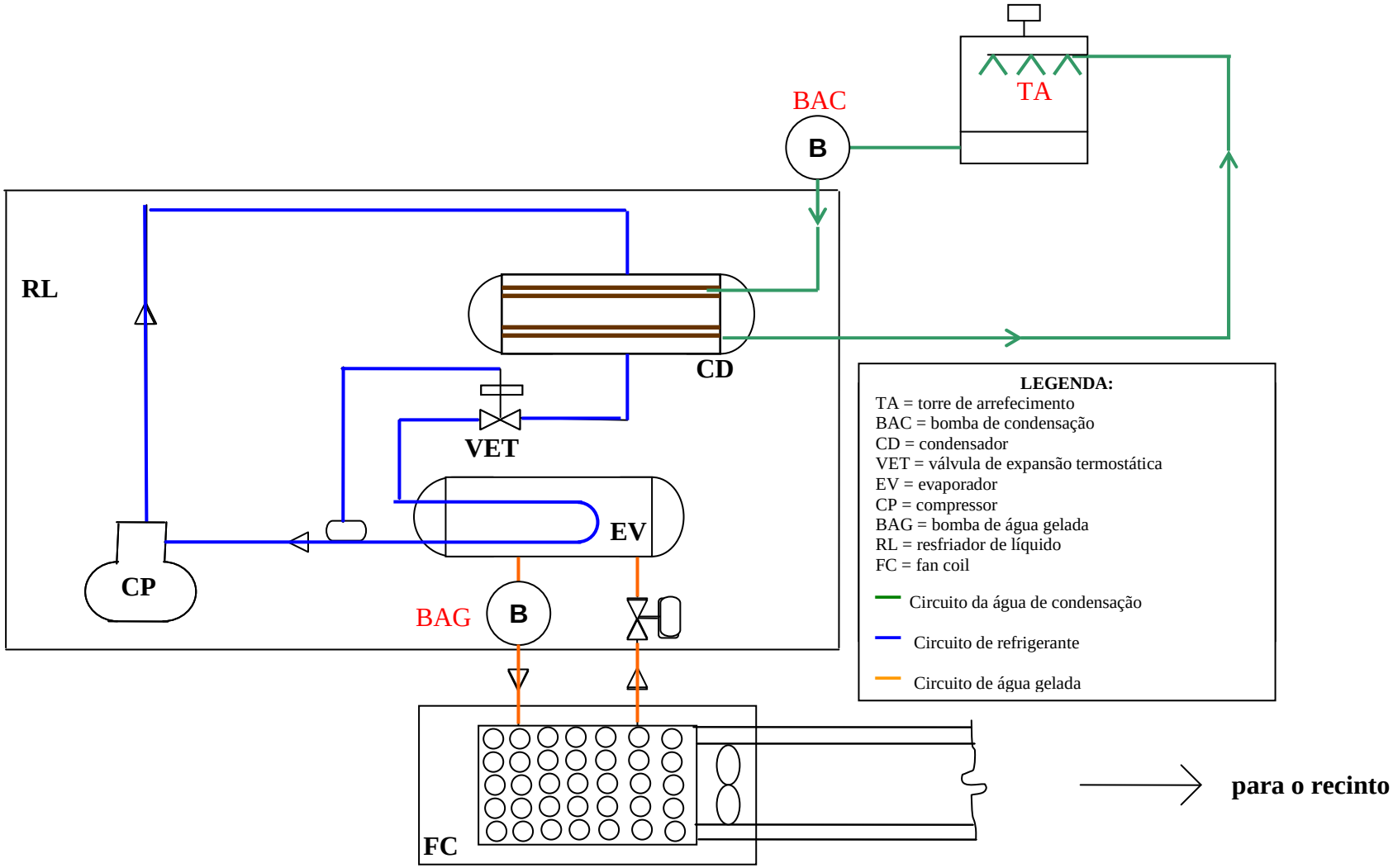


Figura 5.1. Diagrama simplificado do sistema de expansão indireta.

5.1 Descrição do Teste Piloto

Foi realizada em outubro de 2002 uma experiência piloto na empresa AQUALAB QUÍMICA E SERVIÇOS LTDA para verificar a possibilidade técnica e econômica do reúso do efluente tratado proveniente de uma estação de tratamento de esgoto sanitário por lodos ativados com posterior filtração e ozonização, como água de *makeup* em um sistema semi-aberto, o circuito de condensação do ar-condicionado central de um shopping (sistema de expansão indireta). O experimento foi realizado utilizando-se uma torre piloto induzida em fluxo contra corrente e ocorreu em duas fases descritas como Fase 1 (*Ensaio em branco*) e Fase 2 (*Ensaio com tratamento químico*).

A fim de se determinar as taxas de corrosão provocadas pela água no circuito de resfriamento, foram utilizados cupons de prova planos de ferro e de cobre, cujo objetivo é prever o nível de corrosão nos equipamentos e sua estimativa de vida. Os cupons foram dispostos em uma árvore de teste conforme descrito no Capítulo 4, pois, de acordo com a experiência da empresa AQUALAB, para a finalidade dessa experiência, esse teste simula razoavelmente as condições de serviço da tubulação, fornecendo taxas de corrosão não extremamente precisas, mas adequadas para o teste e gerando cupons com aspecto visual definido, bastante aproximado do que está ocorrendo no circuito, tornando-se neste estudo o parâmetro operacional que define se a água está adequada ou não para resfriamento, ou seja, se compromete ou não os equipamentos metálicos (neste caso aço e cobre).

Os procedimentos para a determinação das taxas de corrosão foram os descritos nos padrões ASTM através da *Corrosivity Testing of Industrial Water – Cupon Test Method* D.2325-65T (1955).

A experiência foi precedida da realização da análise físico-química do efluente.

5.1.1 FASE 1 - Ensaio em Branco

O objetivo desse ensaio foi o de verificar o nível de corrosividade da água recuperada da estação de tratamento de esgotos do shopping sem a aplicação de nenhum tipo de tratamento químico.

O efluente recebido foi analisado e colocado na torre piloto, nas dependências da Empresa AQUALAB. Para compensar as perdas por evaporação e arraste, foi montado um circuito de reposição com o mesmo efluente recebido.

Foram instalados corpos de prova de ferro e cobre na árvore de teste para a determinação das taxas de corrosão desses metais.

Após 4 dias de exposição, o circuito foi desligado, amostras da água foram retiradas para análise e os corpos de prova removidos para inspeção visual, fotografias e determinação das taxas de corrosão.

5.1.2 FASE 2 - Ensaio com Tratamento Químico

No dia 17/10, às 10:00 h, foi iniciada a fase de tratamento químico, objetivando o controle da forte corrosividade da água de circulação, demonstrada na Fase 1. Assim, foi introduzido à água de circulação o seguinte tratamento químico: Fosfonato/Zinco/Azol (fosfonato: 15 ppm como PO_4^{3-}; azol: 5 ppm e dispersante: 5 ppm).

Adicionalmente, foi introduzido um regime de cloração no intuito de controlar o desenvolvimento de microrganismos e reduzir principalmente o nitrogênio amoniacal. O pH foi ajustado a 8,0.

Novos corpos de prova de ferro e cobre foram instalados na árvore de teste para a determinação das taxas de corrosão.

O circuito foi recirculado até às 10:00 h do dia 22/10, quando então foi desligado. Os corpos de prova foram então retirados para inspeção, fotografados e tratados corretamente para determinação das taxas de corrosão.

5.2 Resultados

5.2.1 Resultado das Análises Físico-Químicas

Os resultados das análises físico-químicas na saída da estação de tratamento de esgoto, no final da Fase 1 e no final da Fase 2, estão dispostos na **Tabela 5.1**. Foram analisados alguns dos principais parâmetros em análises de tratamento de água de refrigeração, com exceção da amônia, que geralmente não é pesquisada quando se utiliza água de abastecimento comum como água de *makeup*, mas nesse caso tornou-se imprescindível a sua quantificação.

Tabela 5.1. Análises físico-químicas.

Parâmetros	Unidade	Água 1*	Água 2**	Água 3***
Alcalinidade total	ppm $CaCO_3$	128,5	190,8	114,6
Condutividade	μmho/cm	783,0	1377,9	1390,0
Cloretos	ppm Cl^-	155,0	273,0	251,8
Dureza total	ppm $CaCO_3$	74,1	134,0	128,7
Ferro	ppm Fe^{+2}	0,03	1,35	0,38
Nitrogênio amoniacal	ppm NH_3	2,02	0,69	0,22
STD	ppm NaCl	532,4	937,0	945,2
Sílica	ppm SiO_2	5,8	-	9,9
pH	-	7,1	8,7	8,3
Cobre	Ppm Cu^{+2}	-	0,16	0,12

*Água (1): Saída da Estação de Recuperação – recebida em 08/10/2002

**Água (2): Torre de Teste – (AQUALAB) – Análise em 15/10/2002 (FASE 1)

***Água (3): Torre de Teste - (AQUALAB) – Análise em 22/10/2002 (FASE 2)

Considerando a Água (1*) corrosiva para uso como água de reposição em torre de resfriamento em circuitos de ar-condicionado, constata-se que os teores de cloretos e sólidos dissolvidos são muito elevados para se trabalhar com altos ciclos, portanto esperam-se altas taxas de corrosão do ferro caso não se use tratamento químico. A concentração do nitrogênio amoniacal também poderá provocar sérios problemas de corrosão ao cobre caso não seja introduzido azol.

Considerando as Águas (2**) e (3***), os limites usuais de concentração salina são atingidos nesses circuitos. Foi observado que o tratamento químico à base de fosfonato e azol respondeu bem.

5.2.2 Medidas de Controle e Resultados da Taxa de Corrosão do Ensaio em Branco - FASE 1

A **Tabela 5.2** apresenta as medidas de controle utilizadas durante o experimento. Os resultados obtidos das taxas de corrosão estão apresentados na **Tabela 5.3** e foram obtidas segundo a equação 4.11. As **Figuras 5.2** e **5.3** ilustram algumas fotos dos cupons submetidos aos ensaios.

Tabela 5.2. Medidas de controle da Fase 1.

Item	Unidade	cupom n°05	cupom n° 06	cupom n° 24	cupom n°40
Vazão na árvore de teste	L/h	3000	3000	3000	3000
Tempo de exposição	Dias	4	4	4	4
Velocidade	m/s	1,2	1,2	1,2	1,2
Data da instalação	-	11/10/02	11/10/02	11/10/02	11/10/02
Data da remoção	-	15/10/02	15/10/02	15/10/02	15/10/02
Material do cupom	-	Ferro	Ferro	Cobre	Cobre

Tabela 5.3. Resultados obtidos com os cupons da Fase 1.

Item	Unidade	cupom n°05	cupom n° 06	cupom n° 24	cupom n°40
Área do cupom	cm^2	19,5	19,5	18,76	18,76
Massa inicial do cupom (MI)	g	10,5968	10,5560	8,5589	8,7400
Massa final do cupom (MF)	g	10,5114	10,4865	8,5512	8,7315
Diferença (MI - MF)	g	0,0854	0,0695	0,0077	0,0085
Massa específica do cupom (μ)	g/cm^3	7,86	7,86	8,92	8,92

*mpy – milésimo de polegada de penetração por ano.

Os valores encontrados para as taxas de corrosão foram:

- Taxa Média de Corrosão do Fe = (21,68+16,21)/2 =18,945 mpy
- Taxa Média de Corrosão do Cu = (1,166 + 1,144) /2 = 1,155 mpy

Figura 5.2. Cupom Nº 5.

Figura 5.3. Cupom Nº 24.

5.2.3 Medidas de Controle e Resultados da Taxa de Corrosão do Ensaio com Tratamento Químico - FASE 2

A **Tabela 5.4** apresenta as medidas de controle utilizadas durante o experimento. Os resultados obtidos das taxas de corrosão estão apresentados na **Tabela 5.5** e foram obtidas segundo a equação 4.11. As **Figuras 5.4**, **5.5**, **5.6** e **5.7** ilustram algumas fotos dos cupons submetidos aos ensaios.

Tabela 5.4. Medidas de controle da Fase 2.

Item	Unidade	cupom n°07	cupom n° 08	cupom n° 04	cupom n°03
Vazão na árvore de teste	L/h	L/h	3000	3000	3000
Tempo de exposição	Dias	Dias	5	5	5
Velocidade	m/s	m/s	1.2	1.2	1.2
Data da instalação	-	-	17/10/02	17/10/02	17/10/02
Data da remoção	-	-	22/10/02	22/10/02	22/10/02
Material do cupom	-	-	Ferro	Ferro	Cobre

Tabela 5.5. Resultados obtidos com os cupons da Fase 2.

Item	Unidade	cupom n°07	cupom n° 08	cupom n° 04	cupom n°03
Área do cupom	Cm^2	19,5	19,5	18,2	18,2
Massa inicial do cupom (MI)	G	10,5752	10,4722	8,7312	8,4778
Massa final do cupom (MF)	G	10,5656	10,4633	8,7288	8,4744
Diferença (MI - MF)	G	0,0096	0,0089	0,0024	0,0034
Massa específica do cupom (μ)	g/cm^3	7,86	7,86	8,92	8,92
Taxa de corrosão	*mpy/ano	1,800	1,669	0,4027	0,570

*mpy – milésimo de polegada de penetração por ano.

Os valores encontrados para as taxas de corrosão foram:

- Taxa Média de Corrosão do Fe = (1,8000+1,6690) / 2 =1,7345 mpy
- Taxa Média de Corrosão do Cu = (0,4027 + 0,570) /2 = 0,4863 mpy

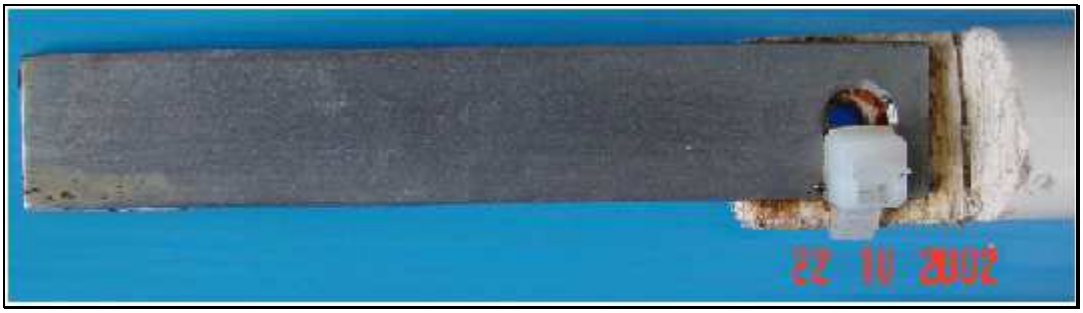


Figura 5.4. Cupom Nº 7.

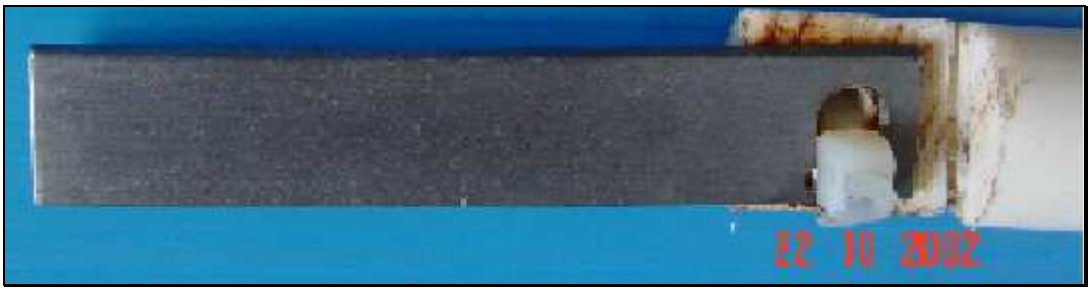


Figura 5.5. Cupom Nº 8.

Figura 5.6. Cupom Nº 4.

Figura 5.7. Cupom Nº 3.

5.3 Discussão dos Resultados

5.3.1. FASE 1

Os corpos de prova de ferro apresentaram-se acobreados e com tubérculos escuros sobre sua superfície. Os resultados da taxa de corrosão apresentaram valores muito elevados, cuja previsão de vida, segundo as tabelas 4.15 e 4.16, ficou abaixo de 14 anos e o controle de corrosão foi classificado como “intolerável”.

A elevada taxa de corrosão deve-se à pilha galvânica formada entre o ferro e o cobre depositado em sua superfície. Esse último é oriundo da corrosão inicial dos corpos de prova de cobre.

Os corpos de prova de cobre apresentaram taxa de corrosão entre 1 e 2 mpy, portanto com expectativa de vida de 30 a 65 anos. Na realidade, essa não é a expectativa desejável para o cobre, mesmo apresentando um controle de corrosão classificado como *bom*. Diante desse resultado a experiência indica entrar com tratamento químico também para o cobre. Rotineiramente quando se utiliza tratamento químico o controle da corrosão do cobre melhora acentuadamente, demonstrando uma expectativa de vida maior que 65 anos. Além disso, talvez pelo teste ter durado apenas poucos dias, esse valor médio pode ainda não estar refletindo totalmente o que aconteceria no circuito de condensação do ar-condicionado. É de se esperar que na prática ocorra uma grande perda de massa do feixe tubular com conseqüente deposição do cobre nos espelhos, tampas e tubulações de ferro.

5.3.2. FASE 2

Com a introdução dos produtos químicos, as taxas melhoraram significativamente, o aspecto visual dos corpos de prova tornou-se bom e as taxas de corrosão do ferro e do cobre apresentaram as respectivas médias de 1,734 e 0,486 mpy. Essas taxas demonstraram controle excelente de corrosão.

O resultado das análises também indicou bons resultados, pois o nitrogênio amoniacal foi reduzido devido à oxidação pelo cloro adicionado à água do sistema, aumentando provavelmente a concentração de nitrato. Além disso, observa-se que, em relação à fase 1 não houve acréscimo nos valores de ferro e cobre na solução.

5.4 Considerações sobre o Consumo de Água e Produtos Químicos

O atual abastecimento de água potável do Shopping é proveniente de uma mistura de água da concessionária pública CEDAE (Companhia Estadual de Água e Esgoto) com água de poços artesianos do próprio Shopping, o que ocasiona uma salinidade elevada para alimentação de circuitos de resfriamento semi-abertos, portanto também imprópria para esse consumo. Esse também é o motivo do esgoto (água 1*) apresentar alta salinidade. Para a avaliação do consumo de produtos devido à vazão de purga, a AQUALAB considerou duas fontes de água para abastecimento da torre: uma totalmente proveniente da CEDAE e a outra totalmente proveniente da estação de tratamento de esgotos.

Tendo em vista a salinidade normal da água da CEDAE (concentração aproximada de cloreto na faixa de 14 ppm) alimentando um circuito de condensação, e ainda considerando um ciclo de concentração teórico em torno de 21, obtém-se um teor de cloretos em torno de 300 ppm. Com o efluente em questão, devido à sua elevada salinidade, seria necessário trabalhar com 2 ciclos de concentração, admitindo-se no máximo 3 e limitando-o através da purga. Para os cálculos de evaporação, arraste e purga, a AQUALAB trabalhou com as seguintes considerações:

Evaporação (E): 1 % sobre a vazão de recirculação.

Respingos (arraste) (R): 0,05 % sobre a vazão (esse parâmetro depende da eficiência dos eliminadores de gotas da torre, valor este fornecido pelo fabricante da torre).

Purga (P) = 0 (considerando a água da CEDAE como de alimentação).

Ciclo de concentração máximo teórico (C): 21

Equações básicas: $C = (E/ R + P) + 1$ (3.10)

$$P = \left[E /(C - 1)\right] - R \quad (3.16)$$

Necessitando-se de um ciclo de concentração de no máximo 3, no intuito de manter a salinidade da água dentro de um nível aceitável, tem-se de calcular a purga pela equação 3.16. Assim, obtém-se o valor da purga de P = 0,45 % da vazão.

Essa purga é 9 vezes maior do que a perda por arraste, aumentando o consumo de produtos em 900 %. No caso limite, ao se considerar água da CEDAE como fonte de abastecimento e purga nula, só haveria perda de produtos por arraste, pois logicamente não haveria perda de produto pela evaporação.

Considerando a vazão de água circulante do sistema de resfriamento do shopping como 1569 m^3/h, necessária para uma carga térmica de 2241 TR (toneladas de refrigeração), medida usual de carga térmica em sistemas de ar-condicionado, além da perda de evaporação, haverá uma perda por arraste de 0,78 m^3/h e necessidade de uma purga de 7,06 m^3/h.

Considerando a jornada de trabalho diária de um shopping, isso pode alcançar valores razoáveis. Representa uma boa economia, tendo em vista não só a redução de água consumida mas também de esgoto lançado, como visto no Capítulo 2.

Além da avaliação do consumo, o teste piloto também serviu para nortear outros aspectos aqui não relatados, mas de um modo geral a AQUALAB concluiu que seria tecnicamente viável o aproveitamento do esgoto tratado para fins de resfriamento desde que fosse garantido um baixo valor de nitrogênio amoniacal (preferencialmente abaixo de 1 ppm) após a etapa de ozonização. Para se obter ciclos maiores, foi também indicado que o pré-tratamento não consistisse apenas da ozonização do efluente mas também de um tratamento para redução da salinidade, pois seria ideal que os sólidos dissolvidos não ultrapassassem os 200 ppm e o teor de cloretos ficasse no máximo em 60 ppm no efluente final.

5.5 Cálculo da Taxa de Evaporação em Cidades de Climas Variados e sua Respectiva Influência no Ciclo de Concentração da Água

A torre do shopping possui vazão de recirculação e KaV/L diferentes da torre piloto, cujas proporções são muito menores. No intuito de se fazer uma comparação da taxa de evaporação em cidades de climas variados em nível nacional e internacional, foram utilizados os próprios dados da torre em funcionamento do shopping, descritos abaixo.

Range = 5,5 ºC

L/G = 1,103

Vazão de recirculação = 1569 m^3/h

$\frac{KaV}{L} = 1$

Arraste = 0,05% sobre a vazão

Abaixo estão descritas todas as demais considerações que foram aplicadas a essa simulação:

- As condições do ar de entrada das cidades nacionais (temperatura de bulbo seco média e umidade relativa média) foram fornecidas pelo Instituto de Meteorologia, RJ;
- As condições do ar de entrada das cidades internacionais (temperatura de bulbo seco média e umidade relativa média) foram retiradas das Normais Climatológicas de 1931-1960 da OMM - Organização Mundial de Meteorologia (do inglês *World Meteorological Organization* - WMO), fornecidas pelo Instituto de Meteorologia, RJ;
- As condições do ar de saída foram tomadas como condições do ar saturado assumindo-se 100% de umidade relativa na saída da torre, considerando-se como parâmetro complementar para definição do estado a entalpia de saída;
- Foi assumida plena carga, portanto KaV/L e L/G de projeto nesta simulação permanecem constante durante a operação;
- Foi assumida em todas as simulações pressão barométrica de 29,921 polegadas de mercúrio, ao nível do mar;
- Foi assumida purga nula em todos os cálculos a fim de que se possa comparar o número de ciclos teóricos possível de se obter em todas as cidades, haja vista que a vazão de purga pode variar em função do número de ciclos que se deseja trabalhar, que por sua vez, como visto nos capítulos anteriores, é função da metalurgia dos sistemas, do tratamento químico aplicado à água de refrigeração, das temperaturas de processo, etc;
- Foi utilizada carta psicrométrica de um programa computacional ASHRAE PSYCROMETRIC Chart Nº 1 (1992), específico para o cálculo dos dados de entalpia (BTU/lb ar seco), umidade absoluta (lb de água/lb ar seco) e temperaturas de bulbo úmido (ºF).

5.5.1 Metodologia de Cálculo

1 - De posse dos dados de temperatura média de bulbo seco e umidade relativa média do ar de entrada, obtém-se da carta a umidade absoluta, a temperatura de bulbo úmido e a entalpia desse ponto.

2 - De posse da entalpia do ar de entrada calcula-se a entalpia do ar de saída, pela equação da reta de operação do ar como visto na equação 3.35, conhecendo-se o *range* e o (L/G) da torre.

3 - De posse da entalpia do ar de saída, calcula-se a umidade absoluta e a temperatura de bulbo seco associada a esse ponto, considerando-se o ar de saída saturado.

4 - Para se conseguir calcular facilmente a porcentagem de calor latente, após o cálculo das entalpias de entrada e saída, o processo foi dividido em dois outros processos (somente para fins de cálculo): aquecimento sensível e umidificação isotérmica, uma vez que a entalpia é uma função de estado e independe do trajeto. A umidificação isotérmica está relacionada com a dissipação por calor latente (temperatura de bulbo seco constante) e o aquecimento sensível obviamente com a dissipação do calor sensível (massa constante). Os pontos de entrada, saída e 2* indicados nas **Tabelas 5.6**, **5.7**, **5.8**, **5.9**, **5.10**, **5.11**, **5.12** e **5.13** encontram-se esquematizados na **Figura 5.8** abaixo como aparecem na carta psicrométrica. Também foram realizados os gráficos das **Figuras 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17** para melhor comparação e avaliação dos diversos ciclos teóricos obtidos.

5 - De posse da temperatura de bulbo seco do ar de saída e da umidade absoluta do ar de entrada, calcula-se a entalpia do ponto 2*, que é maior que a entalpia do ar de entrada e menor que a entalpia do ar de saída, sendo que:

$$\underbrace{h_2 - h_1}_{\text{Dissipação por calor total}} = \underbrace{(h_2 - h_2^*)}_{\text{Dissipação por calor latente}} + \underbrace{(h_2^* - h_1)}_{\text{Dissipação por calor sensível}}$$

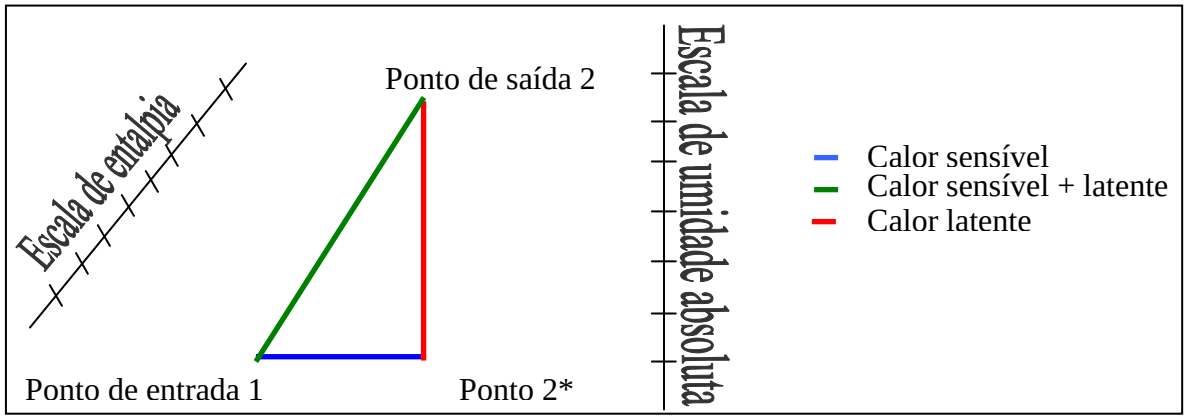


Figura 5.8. Esquema da dissipação de calor visto em carta psicrométrica.

6 - Utilizar a equação da **Tabela 3.4** $E = \dfrac{cp \times Q \times \Delta T}{\dfrac{\Delta h}{\Delta w} \times 10^3}$ para calcular a evaporação (m^3/h).

7 – Utilizar a equação 3.10, considerando purga nula, para calcular o número de ciclos teóricos.

Abaixo, na **Figura 5.9,** encontra-se esquematicamente a seqüência de observações utilizando-se a carta.

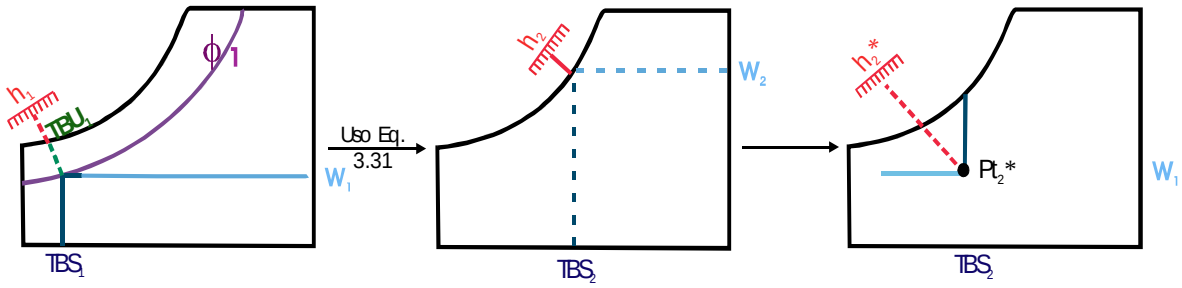


Figura 5.9. Seqüência gráfica para elaboração das **Tabelas 5.6** a **5.13**.

Tabela 5.6. Simulação de dissipação de calor em torre de resfriamento em cidades nacionais utilizando médias do mês de janeiro.

Nº	Período	Cidades	Ar de Entrada				Ar de Saída			ΔUmid.	Evap.	Dissip. Calor		Ciclos T. Máx.
			TBS	UR	Entalpia	Umid.	Entalpia	Umid.	TBS			Entalpia 2*	Laten.	
			ºF	%	BTU/lb ar s	lb/lb ar s	BTU/lb ar s	lb/lb ar s	ºF	lb/lb ar s	(m^3/h)	BTU/lb ar s	(%)	
83743	73/90	R. Janeiro	79,2	79,0	37,521	0,01693	48,440	0,02571	84,2	0,00878	12,49	38,798	88,3	16,9
83781	61/90	São Paulo	71,8	80,0	31,293	0,01305	42,212	0,02130	78,6	0,00825	11,74	33,167	82,8	16,0
82331	61/90	Manaus	79,0	86,0	39,214	0,01848	50,134	0,02693	85,6	0,00845	12,02	40,845	85,1	16,3
83229	61/90	Salvador	79,7	79,4	37,521	0,01693	48,440	0,02571	84,2	0,00878	12,49	38,798	88,3	16,9
83377	63/90	Brasília	70,9	76,0	29,859	0,01196	40,778	0,02031	77,2	0,00835	11,88	31,634	83,7	16,1
83967	61/90	P. Alegre	76,3	71,0	33,251	0,01371	44,171	0,02267	80,5	0,00896	12,75	34,344	90,0	17,2
83587	61/90	B. Horizonte	73,0	79,0	32,610	0,01380	43,530	0,02222	79,9	0,00842	11,98	34,293	84,6	16,3
82900	61/90	Recife	79,9	73,0	36,076	0,01562	46,995	0,02467	83,0	0,00905	12,87	37,672	85,4	17,4
83714	61/90	C. Jordão	70,7	87,0	31,791	0,01373	42,710	0,02165	79,1	0,00792	11,27	34,029	79,5	15,4
82397	61/90	Fortaleza	81,1	78,0	39,050	0,01788	49,970	0,02681	85,4	0,00893	12,70	40,151	89,9	17,2

Tabela 5.7. Simulação de dissipação de calor em torre de resfriamento em outros países utilizando médias do mês de janeiro.

Nº	Período	Cidades	Ar de Entrada				Ar de Saída			ΔUmid.	Evap.	Dissip. Calor		Ciclos T. Máx.
			TBS	UR	Entalpia	Umid.	Entalpia	Umid.	TBS			Entalpia 2*	Laten.	
			ºF	%	BTU/lb ar s	lb/lb ar s	BTU/lb ar s	lb/lb ar s	ºF	lb/lb ar s	(m^3/h)	BTU/lb ar s	(%)	
8536	31/60	Lisboa	51,4	80,0	19,118	0,00635	30,038	0,01325	65,0	0,00690	9,81	22,515	68,9	13,5
16242	31/60	Roma	46,4	77,0	16,506	0,00505	27,426	0,01166	61,4	0,00661	9,40	20,236	65,8	13,0
10387	31/60	Berlim	31,1	83,0	10,665	0,00300	21,585	0,00834	52,3	0,00534	7,60	15,800	53,0	10,7
3334	31/60	Manchester	37,9	89,0	13,318	0,00412	24,238	0,00980	56,6	0,00568	8,08	18,071	56,5	11,3
72503	31/60	Nova York	33,6	70,0	10,886	0,00276	21,805	0,00846	52,6	0,00570	8,11	15,625	56,6	11,3
7150	31/60	Paris	37,6	89,0	13,318	0,00412	24,238	0,00980	56,6	0,00568	8,08	18,071	56,5	11,3
72627	41/60	Montreal	14,7	80,0	4,731	0,00128	15,650	0,00540	40,9	0,00412	5,86	11,202	40,7	8,5
2974	31/60	Helsinque	19,8	89,0	6,512	0,00183	17,432	0,00623	44,6	0,00440	6,26	12,680	43,5	9,0
7180	31/60	Nanci	33,4	91,0	11,780	0,00359	22,700	0,00894	54,1	0,00535	7,61	16,892	53,2	10,7
10866	31/60	München	28,0	90,0	9,760	0,00283	20,679	0,00786	50,7	0,00503	7,15	15,236	49,8	10,1

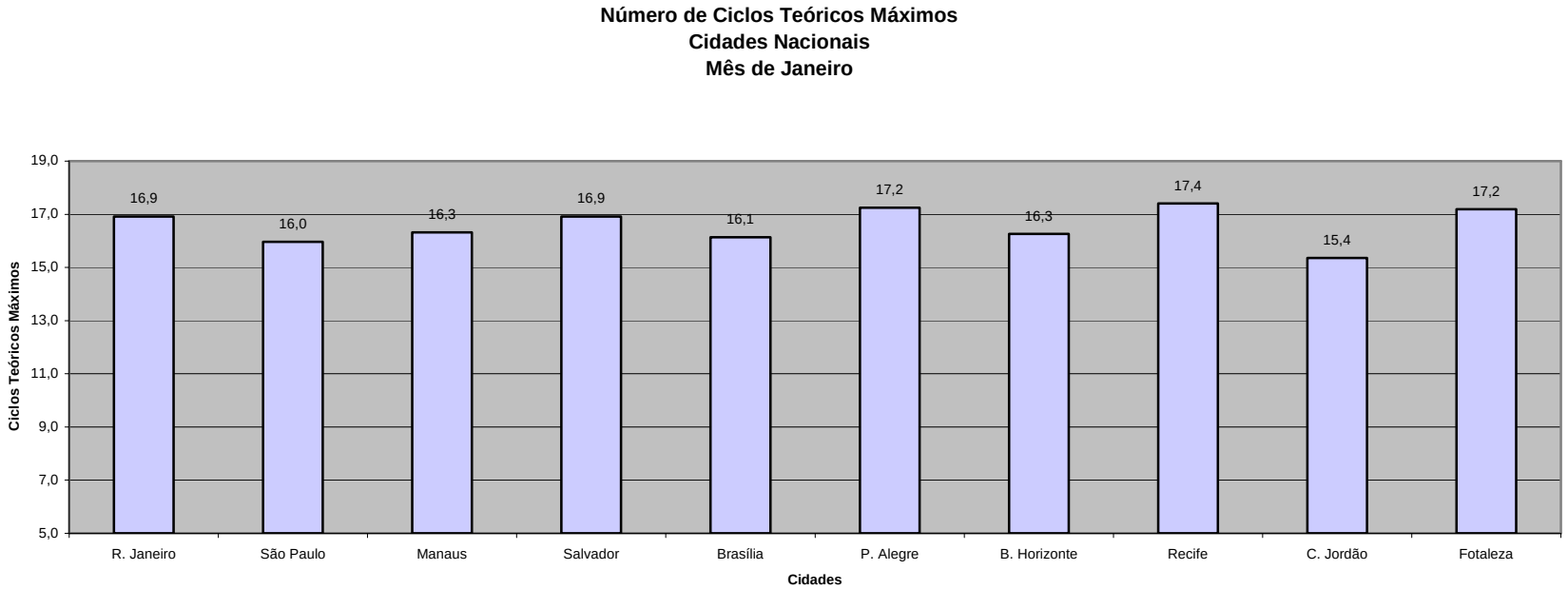


Figura 5.10. Ciclos de concentração teóricos máximos - cidades nacionais - janeiro.

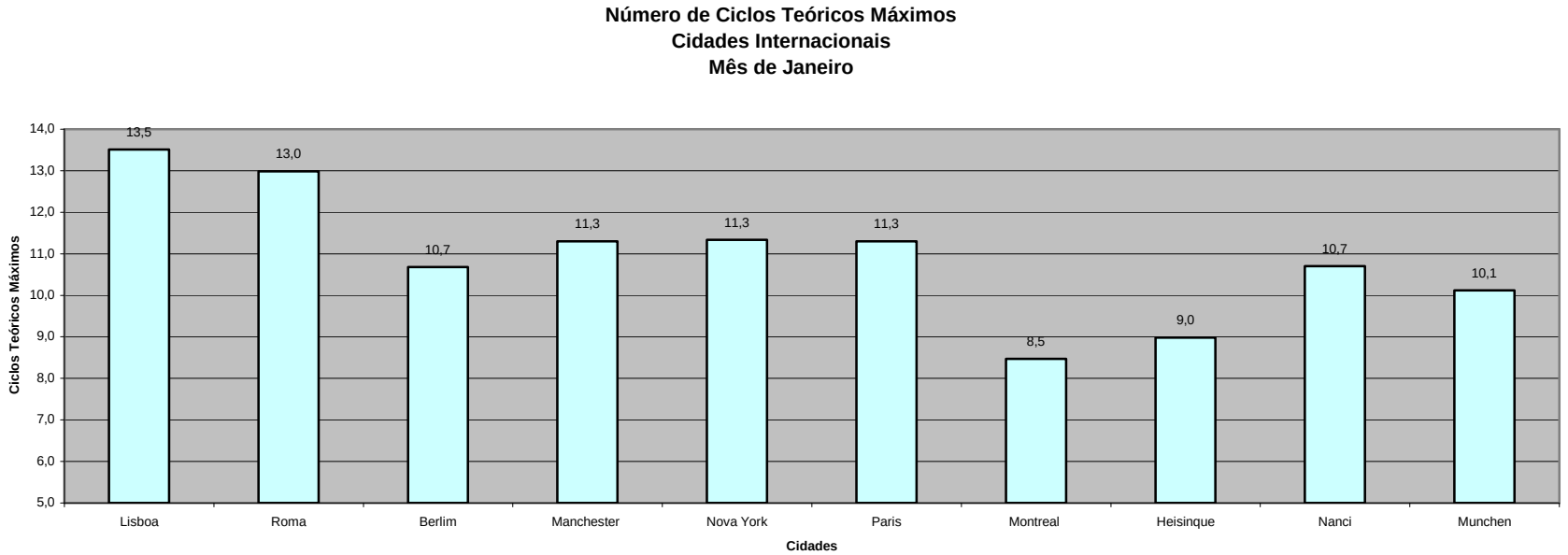


Figura 5.11. Ciclos de concentração teóricos máximos - cidades internacionais - janeiro.

Tabela 5.8. Simulação de dissipação de calor em torre de resfriamento em cidades nacionais utilizando médias do mês de fevereiro.

Nº	Período	Cidades	Ar de Entrada				Ar de Saída			ΔUmid.	Evap.	Dissip. Calor		Ciclos T. Máx.
			TBS	UR	Entalpia	Umid.	Entalpia	Umid.	TBS			Entalpia 2*	Laten.	
			ºF	%	BTU/lb ar s	lb/lb ar s	BTU/lb ar s	lb/lb ar s	ºF	lb/lb ar s	(m^3/h)	BTU/lb ar s	(%)	
83743	73/90	R. Janeiro	79,7	79,0	37,521	0,01693	48,440	0,02571	84,2	0,00878	12,49	38,798	88,3	16,9
83781	61/90	São Paulo	72,3	79,0	31,852	0,01333	42,772	0,02169	79,1	0,00836	11,89	33,604	84,0	16,2
82331	61/90	Manaus	78,8	87,0	38,526	0,01808	49,445	0,02643	85,0	0,00835	11,88	40,273	84,0	16,1
83229	61/90	Salvador	79,9	79,0	37,521	0,01693	48,440	0,02571	84,2	0,00878	12,49	38,798	88,3	16,9
83377	63/90	Brasília	71,2	77,0	30,747	0,01255	41,667	0,02092	78,1	0,00837	11,91	32,493	84,0	16,2
83967	61/90	P. Alegre	76,5	74,0	33,900	0,01430	44,820	0,02313	81,0	0,00883	12,56	35,130	88,7	17,0
83587	61/90	B. Horizonte	73,8	75,1	31,830	0,01309	42,750	0,02168	79,1	0,00859	12,22	33,340	86,2	16,6
82900	61/90	Recife	79,9	77,0	37,038	0,01649	47,958	0,02536	83,8	0,00887	12,62	38,210	89,3	17,1
83714	61/90	C. Jordão	60,1	84,0	24,500	0,00929	35,419	0,01670	71,5	0,00741	10,54	27,325	74,1	14,4
82397	61/90	Fortaleza	80,1	79,0	38,405	0,01751	49,324	0,02635	84,9	0,00884	12,57	39,612	88,9	17,0

Tabela 5.9. Simulação de dissipação de calor em torre de resfriamento em outros países utilizando médias do mês de fevereiro.

Nº	Período	Cidades	Ar de Entrada				Ar de Saída			ΔUmid.	Evap.	Dissip. Calor		Ciclos T. Máx.
			TBS	UR	Entalpia	Umid.	Entalpia	Umid.	TBS			Entalpia 2*	Laten.	
			ºF	%	BTU/lb ar s	lb/lb ar s	BTU/lb ar s	lb/lb ar s	ºF	lb/lb ar s	(m^3/h)	BTU/lb ar s	(%)	
8536	31/60	Lisboa	52,9	74,0	19,082	0,00609	30,001	0,01323	64,9	0,00714	10,16	22,222	71,2	13,9
16242	31/60	Roma	48,2	78,0	17,501	0,00553	28,420	0,01226	62,8	0,00673	9,57	21,098	67,1	13,2
10387	31/60	Berlim	32,4	82,0	11,018	0,00310	21,938	0,00853	52,9	0,00543	7,72	16,050	53,9	10,8
3334	31/60	Manchester	38,1	89,0	13,740	0,00429	24,659	0,01004	57,3	0,00575	8,18	18,410	57,2	11,4
72503	31/60	Nova York	33,6	67,0	10,758	0,00264	21,678	0,00839	52,4	0,00575	8,18	15,441	57,1	11,4
7150	31/60	Paris	38,8	84,0	13,478	0,00404	24,398	0,00989	56,9	0,00585	8,32	18,044	58,2	11,6
72627	41/60	Montreal	17,1	79,0	5,650	0,00147	16,570	0,00582	42,8	0,00435	6,19	11,866	43,1	8,9
2974	31/60	Helsinque	18,7	88,0	6,158	0,00172	17,077	0,00606	43,9	0,00434	6,17	12,382	43,0	8,9
7180	31/60	Nanci	34,9	87,0	12,003	0,00357	22,923	0,00907	54,5	0,00550	7,82	16,956	54,6	11,0
10866	31/60	München	30,2	87,0	10,427	0,00300	21,347	0,00821	51,9	0,00521	7,41	15,702	51,7	10,4

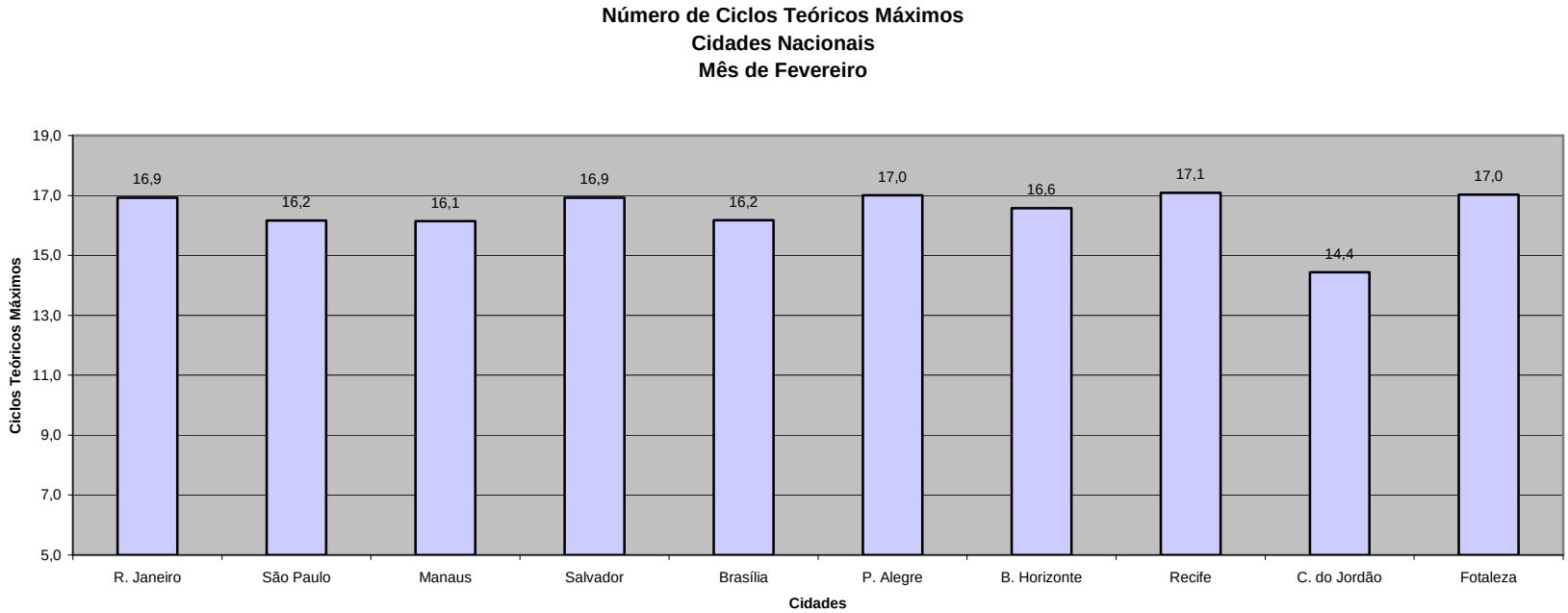


Figura 5.12. Ciclos de concentração teóricos máximos - cidades nacionais - fevereiro.

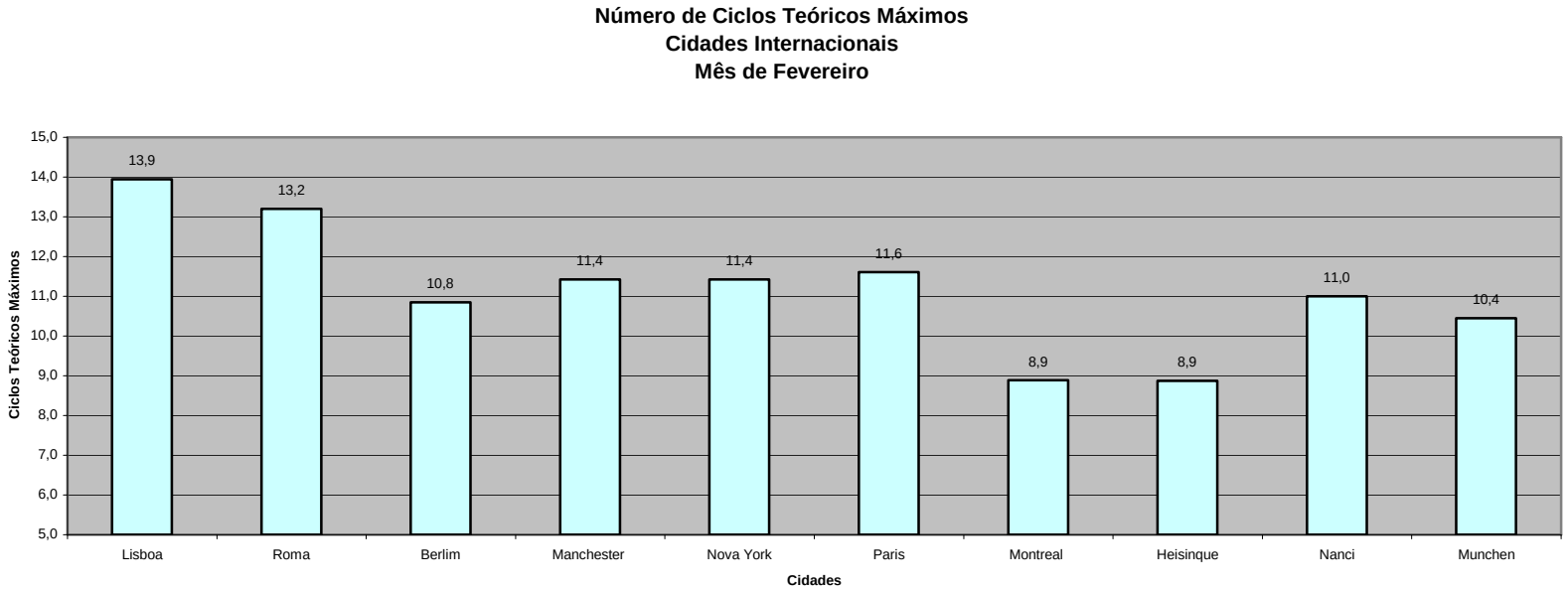


Figura 5.13. Ciclos de concentração teóricos máximos - cidades internacionais - fevereiro.

Tabela 5.10. Simulação de dissipação de calor em torre de resfriamento em cidades nacionais utilizando médias do mês de junho.

Nº	Período	Cidades	Ar de Entrada				Ar de Saída			ΔUmid.	Evap.	Dissip. Calor		Ciclos T. Máx.
			TBS ºF	UR %	Entalpia BTU/lb ar s	Umid. lb/lb ar s	Entalpia BTU/lb ar s	Umid. lb/lb ar s	TBS ºF	lb/lb ar s	(m^3/h)	Entalpia 2* BTU/lb ar s	Laten. (%)	
83743	73/90	R. Janeiro	70,7	79,0	30,385	0,01244	41,304	0,02067	77,7	0,00823	11,71	32,283	82,6	15,9
83781	61/90	São Paulo	61,7	78,0	24,356	0,00893	35,276	0,01661	71,4	0,00768	10,92	26,890	76,8	14,9
82331	61/90	Manaus	79,5	83,0	38,487	0,01782	49,407	0,02640	85,0	0,00858	12,20	39,970	86,4	16,6
83229	61/90	Salvador	75,7	82,3	34,805	0,01536	45,725	0,02377	81,8	0,00841	11,96	36,497	84,5	16,2
83377	63/90	Brasília	66,4	61,0	24,906	0,00831	35,826	0,01697	72,0	0,00866	12,32	26,358	86,7	16,7
83967	61/90	P. Alegre	57,7	82,0	22,506	0,00813	33,426	0,01540	69,2	0,00727	10,34	25,494	72,6	14,2
83587	61/90	B. Horizonte	65,3	71,4	25,804	0,00936	36,724	0,01756	73,0	0,00820	11,66	27,753	82,2	15,9
82900	61/90	Recife	76,1	85,0	36,290	0,01649	47,210	0,02483	83,1	0,00834	11,86	38,054	83,8	16,1
83714	61/90	C. Jordão	48,6	84,0	17,965	0,00595	28,885	0,01254	63,4	0,00659	9,37	21,702	65,8	12,9
82397	61/90	Fortaleza	78,6	80,0	36,890	0,01658	47,809	0,02525	83,6	0,00867	12,33	38,278	87,3	16,7

Tabela 5.11. Simulação de dissipação de calor em torre de resfriamento em outros países utilizando médias do mês de junho.

Nº	Período	Cidades	Ar de Entrada				Ar de Saída			ΔUmid.	Evap.	Dissip. Calor		Ciclos T. Máx.
			TBS ºF	UR %	Entalpia BTU/lb ar s	Umid. lb/lb ar s	Entalpia BTU/lb ar s	Umid. lb/lb ar s	TBS ºF	lb/lb ar s	(m^3/h)	Entalpia 2* BTU/lb ar s	Laten. (%)	
8536	31/60	Lisboa	68,2	64,0	26,538	0,00936	37,458	0,01806	73,8	0,00870	12,38	27,950	87,1	16,8
16242	31/60	Roma	70,9	71,0	28,984	0,01116	39,904	0,01971	76,3	0,00855	12,16	30,540	85,8	16,5
10387	31/60	Berlim	63,9	61,0	23,263	0,00748	34,182	0,01589	70,1	0,00841	11,96	24,998	84,1	16,2
3334	31/60	Manchester	57,6	77,0	21,962	0,00762	32,881	0,01505	68,6	0,00743	10,57	24,771	74,3	14,5
72503	31/60	Nova York	71,4	63,0	28,214	0,01023	39,134	0,01919	75,6	0,00896	12,75	29,328	89,8	17,2
7150	31/60	Paris	62,8	69,0	23,778	0,00817	34,697	0,01623	70,7	0,00806	11,46	25,893	80,6	15,6
72627	41/60	Montreal	65,5	68,0	25,367	0,00896	36,286	0,01727	72,5	0,00831	11,82	27,196	83,2	16,1
2974	31/60	Helsinque	57,7	64,0	20,549	0,00632	31,469	0,01415	66,8	0,00783	11,14	22,931	78,2	15,2
7180	31/60	Nanci	61,7	76,0	24,104	0,00870	35,023	0,01644	71,1	0,00774	11,01	26,568	77,4	15,0
10866	31/60	München	60,6	72,0	23,038	0,00794	33,958	0,01574	69,9	0,00780	11,10	25,436	78,0	15,1

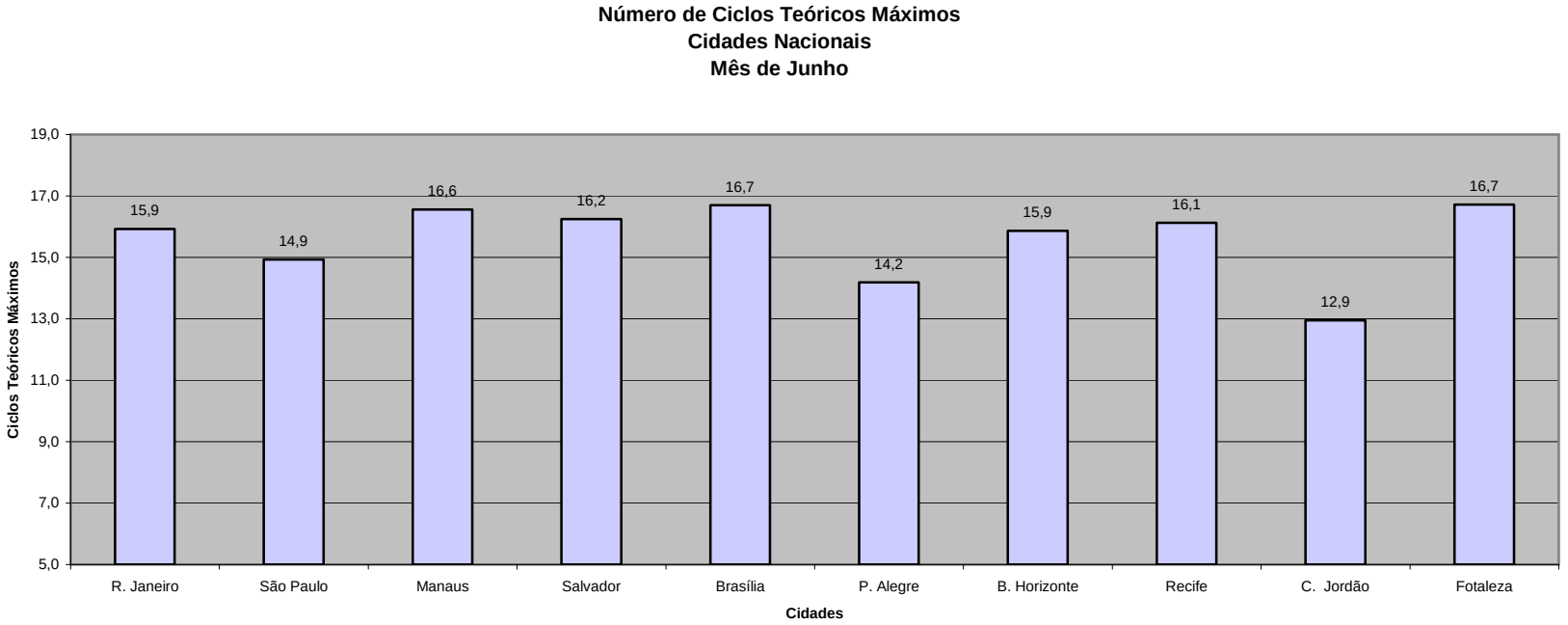


Figura 5.14. Ciclos de concentração teóricos máximos - cidades nacionais - junho.

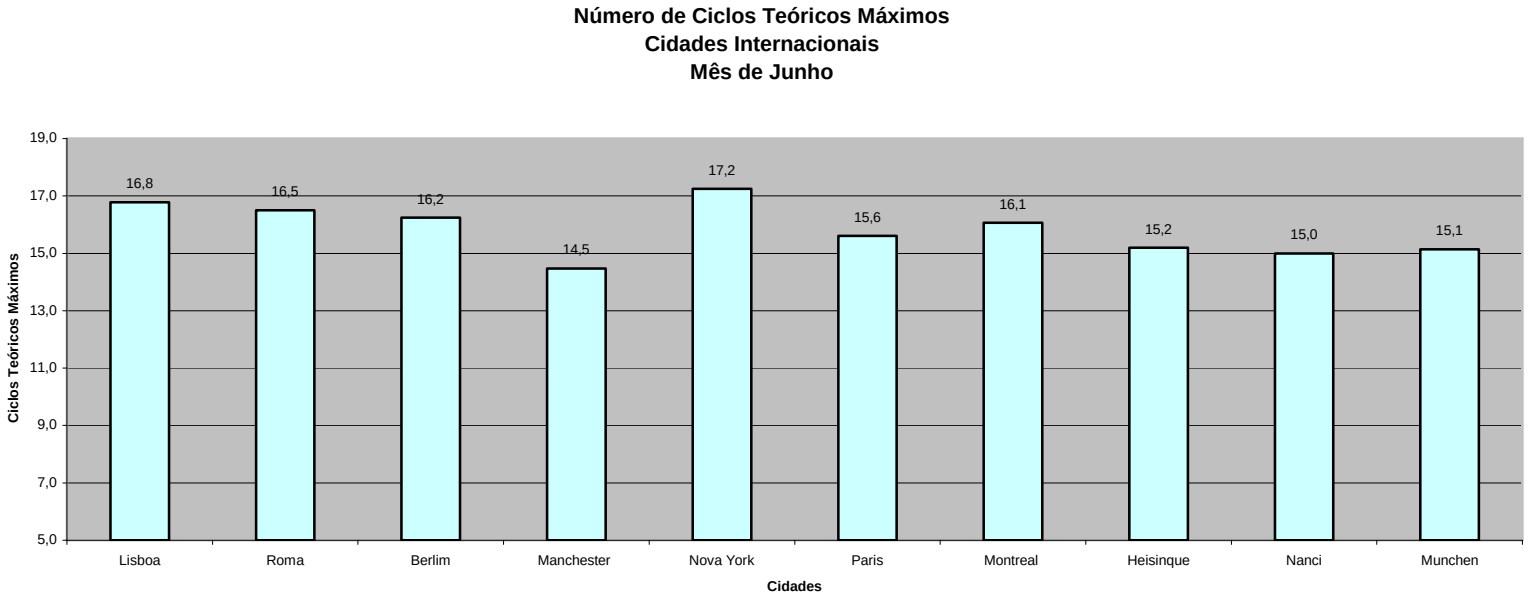


Figura 5.15. Ciclos de concentração teóricos máximos - cidades internacionais - junho.

Tabela 5.12. Simulação de dissipação de calor em torre de resfriamento em cidades nacionais utilizando médias do mês de julho.

Nº	Período	Cidades	Ar de Entrada				Ar de Saída			ΔUmid.	Evap.	Dissip. Calor		Ciclos T. Máx.
			TBS	UR	Entalpia	Umid.	Entalpia	Umid.	TBS			Entalpia 2*	Laten.	
			ºF	%	BTU/lb ar s	lb/lb ar s	BTU/lb ar s	lb/lb ar s	ºF	lb/lb ar s	(m^3/h)	BTU/lb ar s	(%)	
83743	73/90	R. Janeiro	70,3	77,0	30,034	0,01212	40,954	0,02043	77,4	0,00831	11,82	31,849	83,4	16,1
83781	61/90	São Paulo	60,4	77,0	23,647	0,00850	34,566	0,01614	70,6	0,00764	10,87	26,255	76,1	14,9
82331	61/90	Manaus	79,7	80,0	37,762	0,01715	48,682	0,02588	84,2	0,00873	12,42	38,798	90,5	16,8
83229	61/90	Salvador	74,5	81,5	33,789	0,01465	44,709	0,02305	80,9	0,00840	11,95	35,494	84,4	16,2
83377	63/90	Brasília	66,4	56,0	24,154	0,00762	35,073	0,01646	71,2	0,00884	12,57	25,412	88,5	17,0
83967	61/90	P. Alegre	58,1	81,0	22,965	0,00832	33,885	0,01570	69,8	0,00738	10,50	25,828	73,8	14,4
83587	61/90	B. Horizonte	64,6	68,7	24,783	0,00865	35,702	0,01689	71,9	0,00824	11,72	26,701	82,4	15,9
82900	61/90	Recife	75,2	85,0	35,436	0,01593	46,355	0,02422	82,4	0,00829	11,79	37,265	83,2	16,0
83714	61/90	C. Jordão	46,8	77,0	16,506	0,00505	27,426	0,01166	61,4	0,00661	9,40	20,232	65,9	13,0
82397	61/90	Fortaleza	78,3	80,0	36,890	0,01658	47,809	0,02525	83,6	0,00867	12,33	38,278	87,3	16,7

Tabela 5.13. Simulação de dissipação de calor em torre de resfriamento em outros países utilizando médias do mês de julho.

Nº	Período	Cidades	Ar de Entrada				Ar de Saída			ΔUmid.	Evap.	Dissip. Calor		Ciclos T. Máx.
			TBS	UR	Entalpia	Umid.	Entalpia	Umid.	TBS			Entalpia 2*	Laten.	
			ºF	%	BTU/lb ar s	lb/lb ar s	BTU/lb ar s	lb/lb ar s	ºF	lb/lb ar s	(m^3/h)	BTU/lb ar s	(%)	
8536	31/60	Lisboa	72,0	60,0	27,670	0,00973	38,593	0,01882	75,0	0,00909	12,93	28,643	91,1	17,5
16242	31/60	Roma	75,9	67,0	31,669	0,01249	42,589	0,02156	79,0	0,00907	12,90	32,646	91,1	17,4
10387	31/60	Berlim	66,9	65,0	25,509	0,00887	36,428	0,01737	72,7	0,00850	12,09	27,138	85,1	16,4
3334	31/60	Manchester	60,4	79,0	23,890	0,00873	34,810	0,01630	70,8	0,00757	10,77	26,537	75,8	14,7
72503	31/60	Nova York	76,8	62,0	31,312	0,01194	42,232	0,02132	78,6	0,00938	13,34	31,952	94,1	18,0
7150	31/60	Paris	66,2	70,0	26,264	0,00956	37,184	0,01787	73,5	0,00831	11,82	28,093	83,2	16,1
72627	41/60	Montreal	70,5	70,0	28,810	0,01100	39,729	0,01959	76,2	0,00859	12,22	30,321	86,2	16,6
2974	31/60	Helsinque	62,8	70,0	23,908	0,00829	34,828	0,01631	70,9	0,00802	11,41	26,068	80,2	15,5
7180	31/60	Nanci	64,9	75,0	25,770	0,00955	36,687	0,01754	73,0	0,00799	11,37	27,946	80,0	15,5
10866	31/60	München	63,9	72,0	24,752	0,00884	35,672	0,01687	71,8	0,00803	11,42	26,902	80,3	15,6

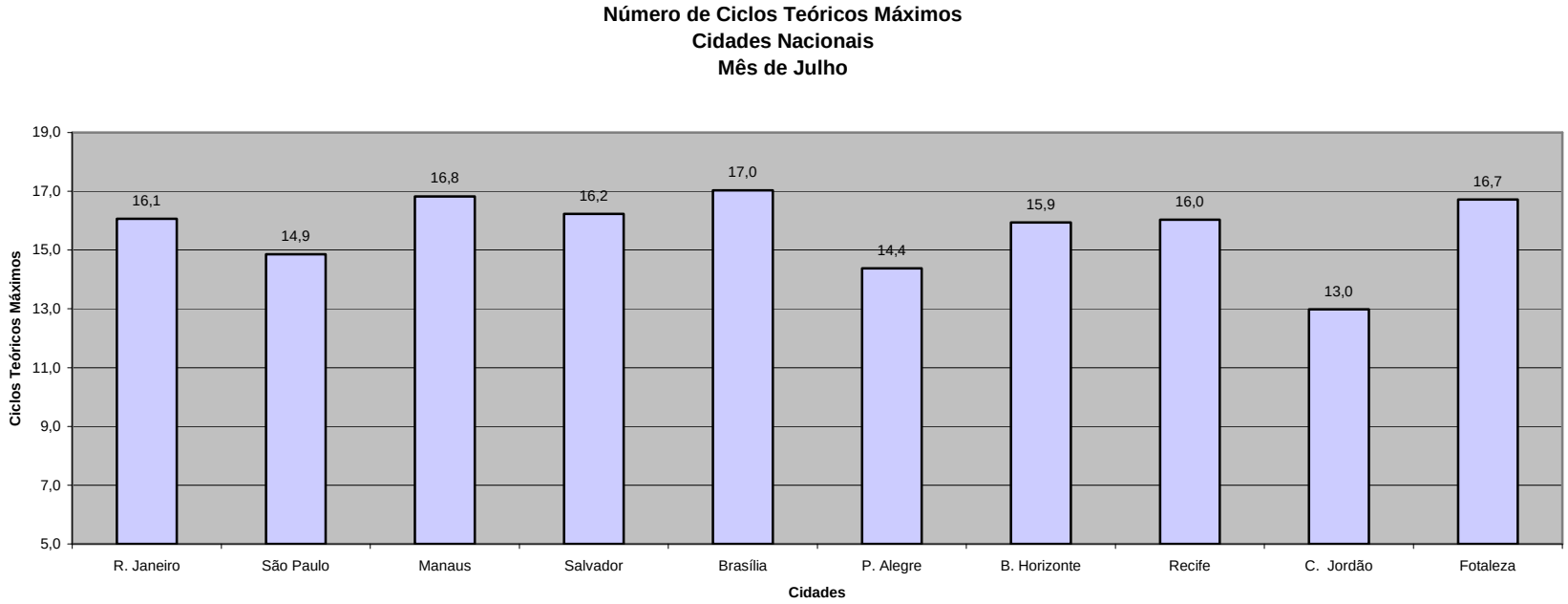


Figura 5.16. Ciclos de concentração teóricos máximos - cidades nacionais - julho.

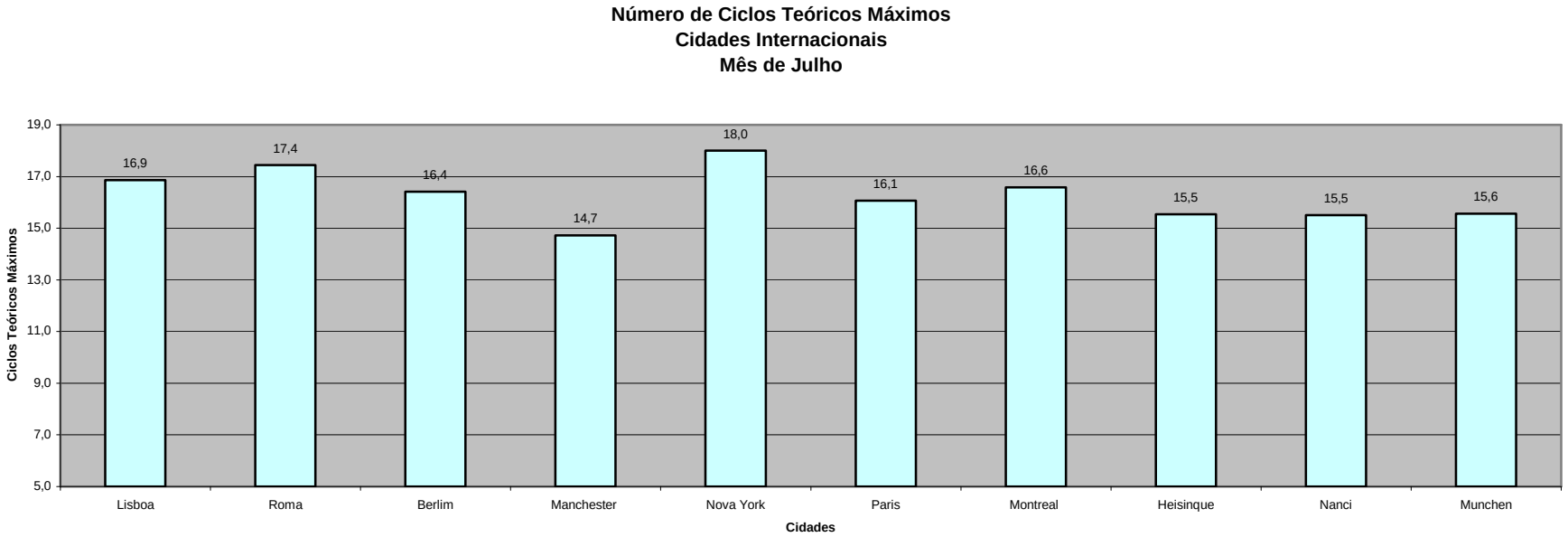


Figura 5.17. Ciclos de concentração teóricos máximos - cidades internacionais - julho.

5.5.2 Discussão de Resultados

Assumindo todas as considerações descritas anteriormente, pode-se observar que as diversidades climáticas provocam diferentes taxas de evaporação e estas por sua vez influenciam diretamente no ciclo de concentração teórico. A **Tabela 5.14** apresenta uma comparação de ciclos máximos e mínimos encontrados nos diversos meses em nível internacional e nacional, onde se pode observar discrepâncias de até 8,9 no mês de janeiro comparando-se, por exemplo, Recife com Montreal, o que significa uma concentração 8,9 vezes maior de um determinado contaminante.

Os efeitos dessa concentração no teor salino nas águas de abastecimento podem até ser previstos, mas quando se trata de contaminantes orgânicos ou inorgânicos provenientes de efluentes torna-se bastante necessário que se façam testes pilotos para investigar os diferentes comportamentos dessas substâncias e do tratamento a ser efetuado.

Tabela 5.14. Comparação entre os ciclos mínimos e máximos encontrados nas cidades estudadas.

Mês	Mínimo Nacional	Mínimo Internacional	Máximo Nacional	Máximo Internacional
Janeiro	15,4 C. Jordão	8,5 Montreal	17,4 Recife	13,5 Lisboa
Fevereiro	14,4 C. Jordão	8,9 Montreal e Helsinque	17,1 Recife	13,9 Lisboa
Junho	12,9 C. Jordão	14,5 Manchester	16,7 Brasília e Fortaleza	17,2 Nova York
Julho	13,0 C. Jordão	14,7 Manchester	17,0 Brasília	18,0 Nova York

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O trabalho, em primeiro lugar, mostrou a importância relativa da água de resfriamento em termos operacionais e em termos de demanda nas plantas industriais e também na área comercial em nível mundial. No Brasil, mostrou-se que em termos econômicos o custo da água assume uma importância grande na planilha de custos das indústrias e dos grandes estabelecimentos comerciais com a implantação da cobrança pelo uso da água. As práticas de reúso, além de ambientalmente corretas tornam-se economicamente atraentes sendo consideradas as operações mais lógicas a serem realizadas em se tratando de águas residuárias. Para algumas empresas situadas dentro da Bacia do Paraíba do Sul, esse fato já é uma realidade e para outras será uma questão de tempo.

Como foi visto, dentro das indústrias, as torres de resfriamento, pela questão intrínseca da evaporação, são consumidores potenciais de água e não necessariamente de água potável, porém essa água deve satisfazer requisitos que a tornem aceitável para esse fim. Pode parecer contraditório, mas de um modo geral a água potável, mesmo respondendo aos padrões físico-químicos e bacteriológicos da Portaria Nacional 1469/2000, muitas vezes é extremamente danosa aos sistemas metálicos como água de resfriamento, necessitando de tratamento químico e/ou físico-químico para que atenda a essa finalidade. Isso ocorre principalmente pela ampla faixa de aceitabilidade nos parâmetros que se referem à salinidade, o que não traz malefício à saúde humana, mas pode ser fatal para sistemas metálicos.

Negligenciar esses requisitos e considerar a torre de resfriamento apenas um “excelente sumidouro de efluentes tratados” seria condenar equipamentos a uma vida útil bastante reduzida e condenar processos a baixos rendimentos operacionais e baixo tempo de campanha, implicando graves perdas para o patrimônio da empresa devido a paradas constantes ou súbitas para manutenção e substituição de peças.

Ao se detalhar um pouco mais os principais problemas que podem ocorrer em sistemas semi-abertos, tais como corrosão, formação de depósitos de origem orgânica e inorgânica e desenvolvimento microbiológico, o trabalho enfatizou que a água de resfriamento requer alguns cuidados de condicionamento para que possa realizar o trabalho principal, que é basicamente resfriar com economia de água os equipamentos de troca térmica como condensadores e outros sem ao mesmo tempo estar corroendo-os ou ajudando a diminuir sua vida útil.

No que se refere à previsão dos impactos do reúso de efluentes em torres de resfriamento, foi enfatizado que as análises físico-químicas da água de recirculação e de

reposição, bem como seus índices de corrosividade não podem ser considerados definidores. Apesar de serem muito úteis, são insuficientes para uma previsão do comportamento futuro da água.

É válido mencionar também que os índices de corrosividade estudados, mesmo os utilizados somente para refrigeração, são baseados no uso de águas naturais e levam em conta geralmente só parâmetros referentes à salinidade e ao pH, de tal forma que possivelmente não sejam indicadores ideais para avaliar corrosividade em efluente de esgoto sanitário, que é composto por diversas substâncias orgânicas, além de sulfetos. Como uma proposta futura de trabalho, para prever melhor essas tendências seria adequado se trabalhar um índice que também levasse em conta outros parâmetros passíveis de causar corrosão, mas típico de esgotos sanitários como, por exemplo, DBO, sulfetos etc.

Nota-se também que, nos parâmetros internacionais vistos no capítulo 4, já se pode perceber a preocupação de se limitar parâmetros referentes a efluentes, talvez por conta da prática do reúso já ser mais comum. Nós ainda não temos esse histórico e seria bom se criar um banco de dados para se correlacionar parâmetros físico-químicos de origem orgânica com taxa de corrosão, por exemplo, e para isso entidades de ensino e pesquisa poderiam atuar junto às diversas empresas que atuam com reúso de água e tratamento de efluentes, reunindo dados já existentes, para que se estudasse mais detalhadamente esse assunto.

Ficou claro que, para se ter uma previsão mais aproximada, é necessária a realização de ensaios pilotos com o devido acompanhamento da taxa de corrosão e que, na ausência de testes mais sofisticados como testes eletroquímicos e sondas corrosimétricas, pode-se usar como estimativa o método gravimétrico, que, aliás, deve ser usado mesmo quando se utilizam esses outros, pois apesar de somente refletir corrosão cumulativa não avaliando com precisão acontecimentos diários ou instantâneos que interfiram na velocidade de corrosão, o teste gravimétrico fornece visualmente a expectativa do estado geral do circuito.

Para afirmar isso, foi importante a realização de uma busca literária em trabalhos nacionais que mostravam sérias preocupações com o condicionamento da água de resfriamento como também internacionais, onde esse tipo de prática de reúso já é realizada há décadas.

Dos trabalhos nacionais, pode-se observar que na década de 80, quando nem se pensava em trabalhar com efluentes para *makeup* de torres de resfriamento, já se apontava para a necessidade de um bom gerenciamento de programas de tratamento de água e já se enfatizava a necessidade da realização de testes pilotos no intuito de otimizar os sistemas. Esses mesmos trabalhos devem ser rememorados, pois se aplicam perfeitamente aos dias atuais.

Dos trabalhos internacionais, foi possível aproveitar várias experiências e pesquisar uma seqüência racional dos passos que devem ser seguidos para uma conduta adequada quanto à prática do reúso de efluentes para fins de resfriamento.

Pode-se dizer ainda que indiretamente essa busca literária auxilia na previsão dos problemas que serão enfrentados ao se tentar adequar um sistema já operante ao reúso de água para torres de resfriamento, explicitando algumas limitações tendo em vista o fato de o projeto inicial não haver previsto o reúso. Esse provavelmente será o caso de muitas empresas que buscam uma alternativa prática e econômica para suprir sua demanda, esperando reduzir o consumo de água, mas esquecendo ou ignorando que o sistema de água de resfriamento industrial deve receber água de qualidade e, com isso, evitar problemas de incrustação, presença de lama orgânica e corrosão.

Num futuro próximo, quando a prática do reúso já estiver mais disseminada no Brasil, os projetos já serão concebidos dentro da filosofia do reúso de água, abrindo-se então um leque maior de oportunidades e tratamentos para a aquisição e distribuição de água de reúso. Na prática, isso se traduz em criar projetos com desenhos, especificações dos equipamentos, fluxos e tubulações já adequados para se trabalhar com efluente. Há exemplos de processos em que se incorporaram no próprio projeto tubos de titânio no condensador, caixas d'água com cobertura de epóxi, tubulações de fibra de vidro e enchimento especial na torre para que houvesse menos requisitos de inibidores de corrosão, menores controles biológicos e um bom controle de depósito.

Com relação ao estudo de caso fornecido pela AQUALAB, pode-se observar que foi possível obter bons resultados, trabalhando-se com dois ciclos de concentração. Pela experiência da empresa AQUALAB, ainda se permitiu sugerir três ciclos de concentração, não mais que isso, haja vista o perigo de ocorrer grande processo corrosivo no espelho de aço carbono, nos tubos de cobre do condensador e nas tubulações. Na realidade, vale ressaltar que além dos testes físico-químicos e ensaios gravimétricos, o estudo da viabilidade de uso de efluentes como água de reposição passa também pela qualidade do controle físico-químico e/ou bacteriológico das etapas de pré-tratamento. Ou seja, uma flutuação nos parâmetros do pré-tratamento pode significar uma total inviabilidade na etapa posterior de tratamento químico de água de resfriamento. Por conta disso, em se tratando de reúso, é esperado que haja crescente consumo e maior diversidade de controladores eletro-eletrônicos para parâmetros físico-químicos.

Observa-se que a afirmação inicial foi confirmada: a dissipação térmica aqui seria baseada principalmente no calor latente, enquanto que em outros países, em determinadas épocas do ano, a dissipação por calor sensível assumiria uma parcela mais significativa.

No que tange à questão do modelo, existe pouca validade em se utilizar padrões internacionais, tendo em vista a peculiaridade dos fatores que envolvem os processos de resfriamento no Brasil. Aponta-se aqui um dos fatores não muito referenciados em literaturas, mas passível de promover diferenças e influenciar na concentração de contaminantes, podendo inclusive alterar a taxa de corrosão ou de depósitos.

Além dos fatores; diversidade de metalurgia dos sistemas, diversidade da qualidade físico-química das águas naturais e efluentes, temperaturas e vazões de processos, o clima também seria um outro fator que pode alterar a taxa de corrosão e/ou depósitos em função da variação da taxa de evaporação.

Com relação à taxa de evaporação, especificamente, foi efetuada uma simulação para se verificar suas diferenças, considerando a diversidade de climas. Respeitando-se todas as considerações feitas no capítulo 5, e sabendo que o trabalho foi realizado com base em temperaturas médias, comprovou-se que com relação aos meses de junho e julho praticamente não há diferença significativa na evaporação entre as cidades nacionais (representantes dos diversos climas brasileiros) e as cidades internacionais (de clima frio) pesquisadas, mas, ao compararmos a evaporação ocorrida nesses mesmos locais nos meses de janeiro e fevereiro, observa-se bastante diferença na taxa de evaporação, o que se traduz também em grande diferença nos ciclos de concentração teóricos máximos, o que pode ser verificado nos gráficos dos meses de janeiro e fevereiro.

A máxima diferença constatada no mês de janeiro ocorre ao se comparar a taxa de evaporação ocorrida em Montreal com a taxa de evaporação ocorrida no Recife, cuja diferença é da ordem de 8,9 ciclos de concentração, o que implica uma concentração salina teórica 8,9 vezes maior no Recife.

A mínima diferença constatada no mês de janeiro ocorre ao se comparar a taxa de evaporação ocorrida em Lisboa com a taxa de evaporação ocorrida em Campos do Jordão, cuja diferença é da ordem de 1,9 ciclo de concentração, o que implica uma concentração salina teórica quase 2 vezes maior em Campos do Jordão.

No mês de fevereiro, considerando os mesmos locais, pode-se constatar que a diferença máxima seria de 8,2 ciclos e a mínima seria de 0,5 ciclo. Sendo que em média, nos meses de janeiro e fevereiro, as cidades internacionais apresentam ciclos bastante inferiores aos observados no Brasil.

Se a simulação fosse realizada também para os meses de março, abril e maio, provavelmente se observaria essa diferença caindo gradualmente até os meses de junho/julho quando daí novamente tenderia a crescer.

Sabe-se que a evaporação na torre de tiragem mecânica pode ser controlada pelos ventiladores, que geralmente recebem o sinal de um termostato instalado na bacia da torre ou são controlados por variadores de freqüência, mas para a finalidade desse trabalho o sistema foi considerado a plena carga.

Nesse ponto vale lembrar que a evaporação foi calculada termodinamicamente e, em geral, os valores de evaporação calculados apresentam resultados mais baixos que quando calculados pelas fórmulas empíricas. No entanto, o objetivo a ser discutido aqui não é pura e simplesmente o consumo de água, mas a diferença do comportamento do sistema, com relação a uma certa tendência maior ou menor de concentrar suas impurezas, o que é um dos fatores que influenciam na maior ou menor tendência a corrosão e/ou incrustação.

Finalmente: pode-se usar efluentes como água de *makeup*? A resposta é sim, mas para otimização dos resultados terão de ser avaliados os equipamentos, o processo, o tratamento químico ou físico-químico para adequar o efluente às condições mínimas aceitáveis, assim como o tratamento químico ou mesmo não químico da água de circulação.

Finalmente, para se aplicar reúso de efluentes em torres de resfriamento com racionalidade e economia, estudos devem ser estimulados, pois são extremamente necessários devido à diversidade de compostos químicos presentes nos efluentes das mais diversas indústrias e mesmo dos efluentes sanitários, que, embora possuam uma composição mais previsível e sejam extremamente corrosivos, não possuem sempre a mesma composição, ou seja, cada estação de tratamento de esgoto vai gerar um efluente com características próprias. Ao se partir para o reúso precipitadamente, peculiaridades não devidamente estudadas, podem gerar grandes problemas. É recomendável, se passar por uma etapa intermediária para otimizar o reúso, minimizando as possibilidades de equívoco, ajustando o pré-tratamento e o tratamento químico da água de resfriamento, avaliando consumo de produtos e observando possíveis dificuldades técnicas e operacionais a serem ultrapassadas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6111:1980. **Torres de Resfriamento de Água**. Nov. 1980.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6401:1980. **Instalações Centrais de Ar Condicionado para Conforto - Parâmetros Básicos de Projeto**. Dez. 1980

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9792:1987. **Torres de Resfriamento de Água - Teste para Verificação do Desempenho em Torres de Tiragem Mecânica**. Mar. 1987.

ÁGUAS PARA FINS FARMACÊUTICOS. Rio de Janeiro: UFRJ, Faculdade de Farmácia, 2002.

AGUIAR *et al*. Avaliação do Emprego da Radiação Ultravioleta na Desinfecção de Águas com Turbidez e Cor Moderadas. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de janeiro, vol. 7, n. 1- jan/mar 2002, n. 2 - abr/jun 2002, p. 37.

ALVES, F. Uma Arma de Competição no Mercado Externo. **Saneamento Ambiental**, São Paulo, n. 35, 1995.

ALPINA. Catálogo Técnico - Resfriadores de Água ALPINA / BALCKE compactos, de plásticos, de pequena e média capacidade. Séries OHSV e SG. São Paulo, 1972.

ALPINA. Catálogo Técnico – Torres de Resfriamento ALPINA - Modelos 180/2 a 550/5. São Paulo, 2001.

AMARAL, M. C.; BIANCHI, F. Técnicas Especializadas para Definir Programas de Tratamento para Circuitos de Água de Resfriamento. In: 13º Seminário Nacional de Corrosão, 1986, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABRACO, 1986. p. 312.

ANVISA. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Uso Múltiplo das Águas no Brasil**. Disponível em : <http://www.anvisa.gov.br.>. Acesso em 30.03.2003.

ASHRAE PSYCROMETRIC ANALYSIS. 1992. PsyChart1 Normal Temp - Sea Level: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers - Inc, 1992. 1 CD-ROM.

BARTH, F.T. **Aspectos Ambientais da Gestão dos Recursos Hídricos. Subsídio Técnico para a Elaboração do Relatório Nacional do Brasil para a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento**. UNICED 92, mimeo, 1991.

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

BEZERRA, M. C. L.; MUNHOZ, T. M. T. (Coord.). **Gestão dos Recursos Naturais: Subsídios à Elaboração da Agenda 21 Brasileira**. Brasília: Ministério de Meio Ambiente; Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis; Consórcio TC / BR / FUNATURA, 2000. p. 20-21.

BIANCHI, F.; AMARAL, M. C.; RAMIREZ, M. C. Monitoração “on-line” de Circuitos de Resfriamento de Água. In: 1º Seminário de Utilização de Água na Indústria, 1988, São Paulo. **Anais...** Rio de Janeiro: ABRACO, Ago. 1988. p. 159.

BITENCOURT, D. T. **Avaliação de Inibidores de Corrosão à Base de Fósforo Associados ao Molibdato para Aplicação em Águas de Refrigeração**. Dissertação de Mestrado apresentada à Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

BLUM, J. R. C. Critérios e Padrões da Qualidade da Água. In: MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. dos (Editores). **Reúso de Água**. 1. ed. São Paulo: Editora Manole LTDA, 2003. p.125-127.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Atlas Geográfico Escolar. **Climas**, 2002. p. 106.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Atlas Geográfico Escolar. **Distribuição Espacial da Indústria - 1999**, 2002.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 20, Artigo 1º, I, de 1986. Disponível em: <http://www. ambientebrasil.com.br/legislacao/verifica_lei.php3?id=(622) >. Acesso em: 20 dez. 2003.

CAVALCANTI, L. F. N.; LAGO, R. M.; LEÃO, M. M. D; POS, W. H. Aumento da Eficiência da Ozonização de Corantes da Indústria Têxtil Através da Adição de Catalisadores. In: 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001, João Pessoa. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 2001.

CHEREMISINOFF, P. N. **Water Management and Supply**. New Jersey: Prentice Hall, 1993. p. 266.

COGNETTI, A.; PARSONS, J.; GERAGHTY, M.; VANDERPOLL, D. **Operation of Cooling Tower at High Cycles of Concentration: Corrosion and Scale Control**. In: The Nace International Annual Conference and Exposition, Houston, 1996. n. 575. Houston: Nace International, 1996.

CTI, Cooling Tower Institute. Cooling Tower Manual.**Water Chemistry and Treatments**, 1990, Houston.

CTI, Cooling Tower Institute. Cooling Tower Manual.**Introduction to CTI Thermal Design**, 1998, Houston.

CTI, Cooling Tower Institute. Cooling Tower Manual.**Cooling Tower Performance Variables**, 1998, Houston.

CTI. Cooling Tower Institute. Cooling Tower Manual. **Cooling Tower Operations**, 1999, Houston.

D'ÁGUILA, P. S. **Pseudomonas aeruginosa como Indicador em Análises Bacteriológicas de Águas de Abastecimento Público**. Dissertação de Mestrado apresentada à Escola Nacional de Saúde Pública / FIOCRUZ, Rio de Janeiro, 1996.

DANIEL *et al*. Métodos Alternativos para Desinfecção de Águas de Abastecimento. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, vol. 5, n. 1 - jan/mar 2000, n. 2 - abr/jun 2000, p. 43.

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

DAVENPORT, K. **Real-Time Biological Monitoring**. In: Cooling Technology Institute Annual Conference, 2003, San Antonio. TP 03-10. Houston: Cooling Technology Institute, 2003.

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

EBLE, K.S.; FEATHERS, J**. Water Reuse Within a Refinery**. In: Cooling Tower Institute Annual Meeting, 1993, Nova Orleans. TP 93-09. Houston: Cooling Technology Institute, 1993.

ELKIND, R. **Tratamento de Água de Resfriamento**. Rio de Janeiro: PETROBRÁS, 1996.

FERREIRA, V. C. Como Operar em Sistemas de Resfriamento Durante a Incidência de Baixos Valores de pH. In: 1º Seminário de Utilização de Água na Indústria, 1988, São Paulo. **Anais...** Rio de Janeiro: ABRACO, Ago. 1988. p. 150.

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

FOSBERG, T. M. **Industrial Waste Water Reclamation**. In: Cooling Tower Institute Annual Meeting, 1972, Houston. TP 72-06. Houston: Cooling Tower Institute,1972.

FRITZ, C.; NATHAN, V. J. **Hero Process – Recovery Reuse of Cooling Tower Blowdown and as a Preconcentrator for ZLD Application**. In: Cooling Technology Institute Annual Conference, 2001, Corpus Christi. TP 01-10. Houston: Cooling Technology Institute, 2001.

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

GILL, J. S.; PARSONS, J. R.; WREDE, P. H. **A New Cooling Water Treatment to Reduce Blow Down**. In: The Nace International Annual Conference and Exposition, Houston, 1997. n. 482. Houston: Nace International, 1997.

GIORDANO, G. **Avaliação Ambiental de um Balneário e Estudo de Alternativa para Controle da Poluição Utilizando o Processo Eletrolítico para o Tratamento de Esgotos**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência Ambiental da Universidade Federal Fluminense, Niterói, 1999.

GOLDBLATT, M. E. **Innovate Thinking in Water Conservation**. In: Cooling Tower Institute Annual Meeting, 1994, Houston. TP 94-09. Houston: Cooling Tower Institute, 1994.

GOMES, C. C. G. Torres de Resfriamento de Água. AlPINA Equipamentos Industriais Ltda, **Revista Oficina do Frio**, n. 25, jan. 1997.

HESPANHOL, Ivanildo. Potencial de Reúso de Água no Brasil: Agricultura, Indústria, Município e Recarga de Aqüíferos. In: MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. dos (Editores). **Reúso de água**. 1. ed. São Paulo: Editora Manole LTDA, 2003. Cap. 3, p. 41-49.

ITARCON. Programa de Manutenção Preventiva para Torre de Resfriamento. Disponível em: <http://www.itarcon.com.br>. Acesso em: 21.06.03.

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

KERN, D. **Process Heat Transfer**. Kogakusha: Mc Graw Hill, 1950. Cap. 17.

KESSLER, S. M.; BETZDEARBORN, INC. **Advanced Scale Control Technology For Cooling Water Systems**. In: The Nace International Annual Conference and Exposition, Houston, 2002. n. 2402. Houston: Nace International, 2002.

LANCASTER, R. L.; SANDERSON W.G. **Staged Cooling at Signaal/Shasta a High Recycle Evaporative Cooling Technique for Cost Effective Zero Discharge**. In: Cooling Tower Institute Annual Meeting, 1998, New Orleans. TP 88-02. Houston: Cooling Tower Institute, 1998.

LANE, J.; ENGELHARD, G. K. **A Non-Chemical Water Treatment Device**. In: Cooling Technology Institute Annual Conference, 2000, Houston. TP 00-03. Houston: Cooling Technology Institute, 2000.

LAZARINE, J. C. Relação entre Tratamento de Águas Industriais e Corrosão de Equipamentos. In: 18º Congresso Brasileiro de Corrosão, 1995, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABRACO, Nov. 1995. p. 618.

LEFEVRE, M. R. **Eliminating the Merkel Theory Approximations – Can it Replace the Empirical 'Temperature Correction Factor'?**. In: Cooling Tower Institute Annual Meeting, Houston, TP 84 –18. Houston: Cooling Tower Institute, 1984.

LICINA, G. **Experience with On-Line Monitoring of Biofilms in Plant Applications**. In: Cooling Technology Institute Annual Conference, 2003, San Antonio. TP 03-19. Houston: Cooling Technology Institute, 2003.

LUDWIG, E. E. **Applied Process Design for Cheimical and Petrochemical Plants**. 3º ed., Houston: Gulf Publishing Company Book Division, vol. 2, 1997. p. 379-408.

MALVEZZI, R.; REIS, A. G**. Bendita Água**. Brasília: Caritas Brasileira e Comissão Pastoral da Terra, 2003. p. 28.

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

MONTGOMERY, J. M. In: TOMAZ. P. **Conservação da Água**. Guarulhos: Digihouse Editoração Eletrônica, 1998. p. 154-157.

MOREIRA, J. R. S. **Fundamentos e Aplicações da Psicrometria**. São Paulo: RPA Editorial, LTDA, 1999. p. 61, 119.

NOGUEIRA, R. F. P.; GUIMARÃES, J. R. Processos Oxidativos Avançados: uma Alternativa para o Tratamento de Efluentes. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, vol. 3, n. 3 - jul/set, n. 4 - out/dez, 1998. p. 97.

PEREIRA, C. A. Controle de Depósitos nos Sistemas de Água de Condensação em Centrais de Ar Condicionado. In: 1º Seminário de Utilização de Água na Indústria, 1988, São Paulo. **Anais...** Rio de Janeiro: ABRACO, Nov. 1988. p. 071.

PEREZ, L. A.; D.T. FREESE. **Scale Prevention at High LSI, High Cycles, and High pH Without the Need for Acid Feed**. In: The Nace International Annual Conference and Exposition, Houston, 1997. n. 174 . Houston: Nace International, 1997.

PERRY, R. H. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. 6º ed. McGraw-Hill International Editions, 1988. Cap 12.

PHILLIPS, E. C.; STRITTMATTER, R. J. **Reuse of Industrial Waste Stream as Cooling Tower Makeup**.In: Cooling Tower Institute Annual Meeting, 1994, Houston. TP 94-08. Houston: Cooling Tower Institute, 1994.

PUCKORIUS, P. R.; DIEHL, K. **Water Reuse Experiences With Cooling Tower Systems in San Antonio**. In: Cooling Technology Institute Annual Conference, 2003, San Antonio. TP 03-03. Houston: Cooling Technology Institute, 2003.

PUCKORIUS, P. R.; HELM, K.; SPURRELL, C. **Reclamaid Water as Cooling Tower Makeup for Refinary/Petrochemical Plants – Southern California's Activities and Time Table**. In: Cooling Tower Institute Annual Meeting, 1995, Fort Worth.TP 95-15. Houston: Cooling Tower Institute, 1995.

PUCKORIUS, P. R.; LORETITSCH, G. A.; TVEDT, T.**Water Reuse in Refineries, Chemical Plants, and Utilities: Experiences Throughout the USA and Texas – Guidelines and Case Histories**. In: Cooling Technology Institute Annual Conference, 2001, Corpus Christi. TP 01-01. Houston: Cooling Technology Institute, 2001.

PUCKORIUS, P. R.; TIANGCO, J. M. **Cooling Tower System Components and the Impact of Reuse Waters**. In: Cooling Technology Institute Annual Conference, 2002, Houston. TP 02-17. Houston: Cooling Technology Institute, 2002.

QASIM, S. R. In: TOMAZ, P. **Previsão de Consumo de Água - Interface das Instalações Prediais de Água e Esgoto com os Serviços Públicos**. São Paulo: Navegar Editora, 2000. p. 47.

RIBEIRO, C.; AGUIAR JR., J. M.; PASTOR, J. R.; SILVELLI, L. C. Nova Filosofia para o Dimensionamento de um Programa de Tratamento de Sistemas de Resfriamento para Obtenção de uma campanha Contínua de 4 Anos. In: 17º Congresso brasileiro de Corrosão, 1993, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de janeiro: ABRACO, 1993. p. 352.

ROQUE, O. C. **Sistemas Alternativos de Tratamento de Esgotos Aplicáveis às Condições Brasileiras.** Dissertação de Mestrado apresentada à Escola Nacional de Saúde Pública / FIOCRUZ, Rio de Janeiro, 1997.

ROZENTAL, L. Y. **Avaliação de Tratamentos de Água de Sistemas de Refrigeração Semi-abertos por Meio de Medidas Eletroquímicas**. Dissertação de Mestrado apresentada à Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

SANTOS, A. L. **Psicrometria**. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2003. p. 2-24.

SANTOS, M. A. Utilização da Água na Indústria-inquérito na Bacia Hidrográfica do Rio Ave. In: TOMAZ, P. **Previsão de Consumo de Água – Interface das Instalações prediais de Água e Esgoto com os Serviços Públicos**. São Paulo: Navegar Editora, 2000. p. 20-23.

SANTOS FILHO, M. A. **Avaliação de Inibidores de Corrosão à Base de Fósforo para Águas de Refrigeração Industrial**. Dissertação de Mestrado apresentada à Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1998.

SANTOS, N. A. Corrosão Microbiológica – Microorganismos e Microbiocidas. In: 1º Seminário de Utilização de Água na Indústria, 1988, São Paulo. **Anais...** Rio de Janeiro: ABRACO, Ago. 1988. p. 95.

SANTOS, M. A. Previsão de Consumo. In: TOMAZ, P. **Previsão de Consumo de Água - Interface das Instalações prediais de Água e Esgoto com os Serviços Públicos**. São Paulo: Navegar Editora, 2000. Cap 1, p. 20-23.

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

SHELEF, G. **Wastewater Reclamation and Water Resourcer Management**. In: Stockolm Water Symposium. Estocolmo, 1992.

SILVA, J. O.; AMARAL, M. C.; BIANCHI, F. **Corrosive Water – Brazilian Reality**. In: Cooling Tower Institute Annual Meeting, 1987, Nova Orleans. TP 87-14. Houston: Cooling Tower Institute, 1987.

SILVA, J. S.; LACERDA FILHO A. D.; AFONSO, A. D. L. **Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2000. CD-ROM.

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

STEINMEYER, M. A.; KURLBAUM, C. E. Controle da Corrosão Microbiológica através da Brominação. In: 18º Congresso Brasileiro de Corrosão, 1995, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABRACO, 1995. p. 578.

STOECKER, W. F. **Refrigeração de Ar Condicionado**. São Paulo: Mc Graw Hill do Brasil, 1985. Cap 3.

TANAKA *et al*. Avaliação da Influência da Geometria, do Tratamento Superficial e da Localização dos Corpos de Prova nos Resultados de Corrosividade de Águas Industriais. In: 18º Congresso Brasileiro de Corrosão, 1995, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABRACO, 1995. p. 607.

THAME, A. C. M. (*et al*.). **A Cobrança pelo Uso da Água**. São Paulo: IQUAL – Instituto de Qualificação e Editoração LTDA, 2000. p. 212.

TOMAZ, P. **Economia de Água para Empresas e Residências: Um Estudo Atualizado sobre o Uso Racional da Água**. 2ª ed., São Paulo: Editora, 2001. p. 42-74.
TOMAZ, P. **Previsão de Consumo de Água – Interface das Instalações Prediais de Água e Esgoto com os Serviços Públicos**. São Paulo: Navegar Editora, 2000. p. 14.

TORRES, F. **Avaliação do Molibdato a Baixas Concentrações como Inibidor de Corrosão do Aço em Águas de Refrigeração**. Dissertação de Mestrado apresentada à Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1998, p. 44-81.

VALEZI, L. Maximizando o Potencial de Reutilização da Água com a Reciclagem de Águas Residuárias Provenientes de Sistemas de Tratamento de Efluentes. In: CONFERÊNCIA RACIONALIZAÇÃO DO USO E REÚSO DA ÁGUA TRANSFORMANDO PROCESSOS INDUSTRIAIS PARA REDUZIR CUSTOS E MINIMIZAR OS IMPACTOS AMBIENTAIS. ibc (International Business Communications). São Paulo, 19.06.2002 a 20.06.2002.

WIESER, C. von. Informativo técnico da ALPINA - Equipamentos nº AEq-011/88. Revisão 4, 1997.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Climatological Normals for climat and climat ship stations for the period 1931-1960 (n. 117 TP 52). Geneva, 1971.

8. Glossário

Água de *Makeup*

É a água que é reposta à torre de resfriamento em função das perdas por respingos, evaporação e possíveis vazamentos. É adicionada continuamente à bacia da torre, através de um sistema de controle de nível. É a água de reposição.

Árvore de Corrosão

Também chamada de árvore de teste. É um dispositivo utilizado para se realizar ensaios de corrosão por perda de massa em sistemas de resfriamento. É conectado à tubulação de retorno da torre (tubulação de água quente). A árvore é o dispositivo onde são colocados os corpos de prova.

Corpo de Prova

Também chamado de cupom ou cupom de prova ou cupom de teste. É uma placa metálica de dimensões bem definidas, utilizada em ensaios de corrosão de sistemas de resfriamento para se observar o comportamento corrosivo da solução. A placa fica exposta, por determinado período de tempo, à água de retorno da torre de resfriamento, dentro da árvore de corrosão.

COT - Carbono Orgânico Total

É medida direta da matéria orgânica carbonácea. É determinado através da conversão do carbono orgânico a gás carbônico.

DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio

Parâmetro que retrata de forma indireta, o teor de matéria orgânica nos esgotos ou no corpo d`água e está associado à fração biodegradável dos componentes orgânicos carbonáceos, sendo uma indicação do potencial do consumo do oxigênio dissolvido pelos microorganismos para a estabilização bioquímica da matéria orgânica. Na prática, mede-se em laboratório a quantidade de oxigênio que um determinado volume de esgoto consome. Para esgotos domésticos a estabilização completa demoraria 20 dias ou mais, para evitar essa demora e facilitar comparações, convencionou-se medir o oxigênio consumido no 5º dia. Também convencionou-se realizar o teste à 20º C. A diferença de concentração de oxigênio dissolvido

entre o momento logo após a coleta e após cinco dias, representa a demanda bioquímica de oxigênio padrão, expressa por DBO_5^{20}. Nesse texto, sempre que se referir à DBO simplesmente, ficará implícito que se trata da DBO_5^{20}.

DQO - Demanda Química de Oxigênio

É uma indicação indireta do teor de matéria orgânica. Este teste mede a quantidade de oxigênio necessária para estabilizar quimicamente a matéria orgânica carbonácea biodegradável ou não. Utiliza agente oxidante forte em meio ácido e condições energéticas. A principal vantagem da DQO é a rapidez, em aproximadamente três horas é possível se determiná-la.

Fouling

Consiste num aglomerado de materiais sólidos onde o ligante normalmente é a biomassa. É extremamente prejudicial aos trocadores de calor pela perda de eficiência de troca térmica e pelo processo corrosivo que pode advir do depósito.

Índice Coli

O índice coli é um indicador biológico da qualidade da água para consumo ou para banho (mar). Ele mede a quantidade de bactérias fecais (provenientes do esgoto sanitário) em cada 100 ml de água.

Pites

Sulcos ou escavações de fundo em forma angulosa e profunda (geralmente maior do que o diâmetro), gerados em superfícies metálicas devido à corrosão que se processa em pontos ou pequenas áreas localizadas.

Teste Piloto

Ensaio em escala menor que a real. Utiliza dimensões superiores às de escala em laboratório e inferiores às industriais. Visa ajustar as variáveis envolvidas no processo e obter parâmetros importantes para então se partir para uma escala industrial, minimizando erros.