

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**Reaproveitamento de Águas e Efluentes  
Inorgânicos de uma Indústria Petroquímica**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Liliane Damaris Pollo

Porto Alegre

2004

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

# **Reaproveitamento de Águas e Efluentes Inorgânicos de uma Indústria Petroquímica**

Liliane Damaris Pollo

Dissertação de Mestrado apresentada como  
requisito parcial para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia Química

Área de concentração: Fenômenos de Transporte  
e Operações Unitárias

**Orientadoras:**

**Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Isabel Cristina Tessaro**

**Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Keiko Wada**

**Porto Alegre, junho de 2004**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação *Reaproveitamento de Águas e Efluentes Inorgânicos de uma Indústria Petroquímica*, elaborada por Liliane Damaris Pollo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Química.

Comissão Examinadora:

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Líliliana Amaral Féris, ULBRA – Canoas/RS

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Mariliz Gutterrez Soares, UFRGS/RS

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Talita Furlanetto Mendes, UFRGS/RS

## **AGRADECIMENTOS**

Às minhas orientadoras Isabel Tessaro e Keiko Wada pela orientação profissional durante a realização deste trabalho.

À empresa Copesul pela oportunidade de aprendizado de engenharia química na indústria. Aos profissionais Eduardo e Lucas pela orientação. À Élen pela sua constante colaboração e amizade. Aos operadores da Unidade de Utilidades pela paciência e ensinamentos, em especial ao operador Gilberto Duarte por sua amizade e essencial contribuição para a realização deste trabalho.

A todos os profissionais do Departamento de Engenharia Química da UFRGS pelo aprendizado e oportunidade.

Aos membros da banca por aceitarem avaliar este trabalho e por contribuírem com sua experiência.

À minha amiga Isabel pelo apoio emocional, não deixando que eu desanimasse nos momentos mais difíceis e pela amizade durante todos esses anos que trabalhamos juntas. Obrigada pelo carinho e compreensão.

A todos os meus colegas e amigos da Pós-Graduação, em especial a Aline e Vanderlei que participaram das alegrias e tristezas desta etapa, obrigada pela grande amizade.

À minha querida mãe, irmã e irmão pelo constante incentivo e por sempre acreditarem em mim.

## ***Dedicatória***

Dedico este trabalho ao meu pai Valdir Pollo (*in memoriam*) pela educação e exemplo de vida.

## RESUMO

A escassez de água, o alto custo do tratamento de efluentes e a iminente cobrança pelo uso e descarte da água vêm preocupando a sociedade e incentivando pesquisas na área de otimização do uso da água e minimização de efluentes. O setor industrial é um dos setores que mais tem se preocupado e se empenhado em encontrar soluções para este problema, pois vivencia os dois problemas ao mesmo tempo, a alta demanda de água e o tratamento dos efluentes gerados. É neste contexto que este trabalho se insere, através de um estudo de caso na Companhia Petroquímica do Sul (Copesul), mais especificamente no setor de utilidades. Neste estudo, foi feita uma análise dos principais processos envolvidos, desde a captação da água até seus consumidores finais, para a identificação da demanda de água e dos locais com maior potencial de reaproveitamento. Para tanto, foi necessária a realização de um balanço hídrico da unidade de tratamento de água usando combinações de dados de planta, estimativas e medições em campo, que foram ajustados através de reconciliação de dados. Os resultados obtidos para esta primeira etapa foram satisfatórios, obtendo uma redução do consumo de água estimada em  $40 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  e economia anual com o tratamento da água e efluentes de aproximadamente R\$ 80.000,00. Também foram apresentadas duas propostas de configurações na planta para a aplicação destas alternativas de reaproveitamento. Numa segunda etapa, realizou-se um balanço de massa e energia para a torre de resfriamento, objetivando reduzir tanto o consumo de água de reposição como o descarte de efluente. O potencial de redução obtido na taxa volumétrica de purga do sistema, considerando apenas o efeito evaporativo e estado estacionário, foi estimado em 20 %. As iniciativas de reuso das águas de lavagem e enxágüe dos equipamentos, bem como da otimização do sistema de resfriamento, conduzem a uma redução da demanda de água e da geração de efluentes, trazendo benefícios econômicos e ambientais para a indústria.

## **ABSTRACT**

The world's supply of fresh water is diminishing, the cost of effluent treatment is increasing and the imminent collection for the use and discarding of water, are one of the main concerns of the society. Due to these aspects researches related with water conservation, water reuse and wastewater discharge reductions are being done. The industrial sector is the one which is doing more effort to develop strategies related with water recycling and reuse, probably because this sector is strongly affected by the reduction and collection of fresh water supply and the wastewater treatment costs. In this context this work is inserting, through a case study in the Companhia Petroquímica do Sul (Copesul), more specifically in the water treatment plant. In this study an analysis of the main processes involved in the water cycle was done, since the water impounding from the river until its final consumptions. This was very important for the identification of both, the water demand and the places with high potential of reuse. An hydric balance of the water treatment plant was done to optimize the water use through data reconciliation technique. The flowrate data used in the balance were a combination of values taken directly from the plant flowmeters, some from the control sheet and some were measured in loco. The results obtained by data reconciliation were very satisfactory: a reduction of  $40 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  (estimated) in the fresh water consumption and an annual economy of approximately R\$ 80.000,00 with effluent and water treatment. In addition, two proposals of plant configurations, applying different reuse alternatives, were presented. Also, a mass and energy balances of the cooling tower was developed of to reduce the make up water consumption and the effluent discharge. The potential of reduction of the volumetric blowdown rate of the system, considering only the evaporative effect and steady state, was estimated in 20 %. Thus, two actions - the reuse of the washing and equipment flushing water and the optimization of the cooling system - showed to be very interesting to the industry,

since these actions reduce the fresh water consumption and the effluent generation, producing substantial economic and environmental benefits to the industry.



# SUMÁRIO

<b>RESUMO .....</b>	<b>VI</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>VII</b>
<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>IX</b>
<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....</b>	<b>5</b>
2.1 MINIMIZAÇÃO E REUSO DE EFLUENTES LÍQUIDOS .....	5
2.2 ÁGUA PARA USO INDUSTRIAL.....	11
2.2.1 Principais Parâmetros de Caracterização da Água.....	12
2.2.2 Etapas do Tratamento da Água para Indústria.....	13
2.3 RECONCILIAÇÃO DE DADOS .....	20
2.4 TORRE DE RESFRIAMENTO.....	23
2.4.1 Classificação das Torres de Resfriamento.....	29
2.4.2 Pré-tratamento da Água de Reposição da Torre de Resfriamento .....	30
2.4.3 Qualidade da Água de Reposição e da Água de Resfriamento da Torre.....	31
2.4.4 Problemas relacionados com a qualidade da água de resfriamento.....	31
2.4.5 Controle da Água de Resfriamento.....	34
<b>METODOLOGIA DE TRABALHO .....</b>	<b>35</b>
3.1 LEVANTAMENTO DE DADOS DAS CORRENTES.....	35
3.1.1 Descrição do Tratamento de Água da Indústria .....	35
3.1.2 Balanço Hídrico.....	39
3.1.3 Reconciliação de Dados.....	43
3.2 ESTUDO DO APROVEITAMENTO DAS CORRENTES .....	43
3.2.1 Identificação das Correntes Potenciais para o Reaproveitamento.....	43
3.2.2 Configurações Propostas para o Reaproveitamento.....	44
3.3 OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE RESFRIAMENTO.....	44
3.3.1 Descrição da Torre de Resfriamento .....	45
3.3.2 Qualidade da Água de Reposição e da Água de Resfriamento da Torre.....	46
3.3.3 Análises de DQO das Correntes do Efluente Inorgânico.....	49
3.3.4 Análises de $DQO_{Cr}$ dos Produtos Químicos Utilizados no Tratamento da AR.....	51
3.3.5 Balanço de Energia da Torre de Resfriamento.....	51
3.3.6 Balanço Material da Torre de Resfriamento .....	54

<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>56</b>
4.1 LEVANTAMENTO DE DADOS DE VAZÃO E RECONCILIAÇÃO DE DADOS.....	56
4.2 REAPROVEITAMENTO DAS CORRENTES: VAZÕES E CONFIGURAÇÕES PROPOSTAS.....	64
4.2.1 <i>Levantamento das Vazões das Correntes Potenciais para o Reaproveitamento</i> .....	64
4.2.2 <i>Configurações Propostas para o Reaproveitamento</i> .....	73
4.3 OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE RESFRIAMENTO .....	75
4.3.1 <i>Qualidade da Água de Reposição da Torre de Resfriamento</i> .....	75
4.3.2 <i>Determinação da DQO das Correntes do Efluente Inorgânico</i> .....	76
4.3.3 <i>Determinação da DQO<sub>Cr</sub> dos Produtos Químicos Utilizados no Tratamento da AR</i> .....	77
4.3.4 <i>Balanco de Energia e Material da Torre de Resfriamento</i> .....	78
<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES .....</b>	<b>82</b>
5.1 CONCLUSÕES.....	82
5.2 SUGESTÕES.....	84
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>85</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>90</b>
<b>APÊNDICE B .....</b>	<b>94</b>
<b>APÊNDICE C .....</b>	<b>96</b>
<b>APÊNDICE D .....</b>	<b>99</b>
<b>APÊNDICE E .....</b>	<b>106</b>
<b>APÊNDICE F .....</b>	<b>110</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>XI</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS .....</b>	<b>XII</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>XV</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1.</b> Efeito do pH na dissociação do ácido hipocloroso.....	19
<b>Figura 2.2.</b> Diagrama Entalpia – Temperatura para os fluxos de ar e ar saturado dentro da torre.. .....	29
<b>Figura 3.1.</b> Representação esquemática dos processos de clarificação e filtração do sistema de tratamento de água.....	37
<b>Figura 3.2.</b> Representação esquemática do processo de desmineralização da água filtrada. ....	38
<b>Figura 3.3.</b> Representação esquemática de uma torre de resfriamento de tiragem induzida. ....	45
<b>Figura 3.4.</b> Torre de resfriamento de tiragem induzida da indústria. ....	46
<b>Figura 3.5.</b> Concentração de sílica na água clarificada e água de resfriamento desde o início da atual campanha. ....	47
<b>Figura 3.6.</b> Concentração de dureza magnésio na água clarificada e água de resfriamento a partir do primeiro ano de operação. ....	47
<b>Figura 3.7.</b> Concentração de dureza cálcio na água clarificada e água de resfriamento desde o início da atual campanha.....	48
<b>Figura 3.8.</b> Tendências das concentrações de sílica e dureza magnésio da água de resfriamento no início da campanha atual. ....	48
<b>Figura 4.1.</b> Relação das vazões medidas em campo e registradas pelo sistema para a corrente de água clarificada que alimenta os filtros de areia atmosféricos.....	59
<b>Figura 4.2.</b> Relação das vazões medidas em campo e registradas pelo sistema para a corrente de água clarificada para coligadas.....	60
<b>Figura 4.3.</b> Relação das vazões medidas em campo e registradas pelo sistema para a corrente de água clarificada para reposição das torres de resfriamento. ....	60
<b>Figura 4.4.</b> Relação das vazões medidas em campo e registradas pelo sistema para a corrente de água filtrada para a desmineralização. ....	61
<b>Figura 4.5.</b> Relação das vazões medidas em campo e registradas pelo sistema para a corrente de água filtrada que alimenta os filtros pressurizados. ....	61
<b>Figura 4.6.</b> Relação das vazões medidas em campo e registradas pelo sistema para a corrente de água permeada pelo sistema de osmose inversa.....	62

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A	Matriz das variáveis medidas
AB	Água bruta
AC	Água clarificada
AD	Água desmineralizada
AF	Água de incêndio
AG	Água de serviço
AH	Água filtrada
AP	Água potável
AR	Água de resfriamento
B	Matriz das variáveis não medidas
<i>c</i>	Ciclos de concentração do sistema de resfriamento
C	Matriz das variáveis exatas
<i>C(P)</i>	Custo do tratamento de efluentes em função da purga (R\$.h <sup>-1</sup> )
<i>C<sub>EI</sub></i>	Custo médio do tratamento do efluente inorgânico (R\$.m <sup>-3</sup> )
<i>Cp<sub>g</sub></i>	Calor específico do gás (Btu.lb <sup>-1</sup> .°F <sup>-1</sup> )
<i>Cp<sub>v</sub></i>	Calor específico do vapor (Btu.lb <sup>-1</sup> .°F <sup>-1</sup> )
DQO	Demanda química de oxigênio (ppm)
<i>E</i>	Taxa mássica de evaporação de água da torre de resfriamento (t.h <sup>-1</sup> )
EI	Efluente inorgânico
ETA	Estação de tratamento de água
<i>G</i>	Taxa mássica de ar (lb.min <sup>-1</sup> )
<i>H<sub>l</sub></i>	Entalpia do ar de entrada da torre (Btu.lb <sup>-1</sup> )
<i>H<sub>s</sub></i>	Entalpia do ar úmido de saída da torre (Btu.lb <sup>-1</sup> )
I	Matriz identidade
kps	Constante de solubilidade do silicato de magnésio
<i>L</i>	Taxa mássica de líquido (lb.min <sup>-1</sup> )
<i>M</i>	Taxa mássica de água de reposição da torre de resfriamento (t.h <sup>-1</sup> )
<i>M<sub>g</sub></i>	Massa molar do gás (lb.lbmol <sup>-1</sup> )
<i>M<sub>v</sub></i>	Massa molar do vapor (lb.lbmol <sup>-1</sup> )
NTU	Unidade nefelométrica de turbidez
<i>P</i>	Taxa mássica de purga da torre de resfriamento (t.h <sup>-1</sup> )
P	Pressão atmosférica (lbf.in <sup>-2</sup> )
<i>P<sub>c</sub></i>	Pressão crítica do ar (lbf.in <sup>-2</sup> )
<i>perc<sub>r</sub></i>	Porcentagem de recuperação do rejeito da osmose inversa
<i>Pot</i>	Potência dos ventiladores (hp)

ppm	Partes por milhão ( $\text{mg.L}^{-1}$ )
$P_Q$	Carga de DQO dos produtos químicos ( $\text{g.h}^{-1}$ )
$P_s$	Pressão de saturação ( $\text{lbf.in}^{-2}$ )
$Q$	Matriz diagonal das variâncias das variáveis medidas
$Q_{AC}$	Vazão de água clarificada ( $\text{t.h}^{-1}$ )
$Q_r$	Vazão de rejeito da osmose inversa ( $\text{t.h}^{-1}$ )
$R$	Taxa mássica de respingos da torre de resfriamento ( $\text{t.h}^{-1}$ )
$R$	Constante universal dos gases ( $\text{ft}^3.\text{lbmol}^{-1}.\text{°R}^{-1}$ )
$-ra$	Taxa mássica de consumo de DQO na torre ( $\text{g.h}^{-1}.\text{m}^{-3}$ )
$T$	Temperatura ( $^{\circ}\text{F}$ , $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{af}$	Temperatura da água fria ( $^{\circ}\text{F}$ )
$T_{aq}$	Temperatura da água quente ( $^{\circ}\text{F}$ )
$T_{bs}$	Temperatura de bulbo seco ( $^{\circ}\text{F}$ )
$T_{bu}$	Temperatura de bulbo úmido ( $^{\circ}\text{F}$ )
$T_{ref}$	Temperatura de referência ( $^{\circ}\text{F}$ )
$v$	Volume específico do ar ( $\text{ft}^3.\text{libra de ar seco}^{-1}$ )
$V$	Volume total do sistema de resfriamento ( $\text{m}^3$ )
$x$	Vetor das variáveis reconciliadas
$x_a$	Vetor dos ajustes das medidas
$x_e$	Fração mássica do contaminante na evaporação
$x_m$	Fração mássica do contaminante na água de <i>make up</i>
$x_M$	Concentração de DQO na água de <i>make up</i> (ppm)
$x_m$	Vetor das variáveis medidas
$x_p$	Fração mássica do contaminante na purga
$x_P$	Concentração de DQO na água de purga (ppm)
$x_r$	Fração mássica do contaminante nos respingos
$y$	Vetor das variáveis não medidas
$y_{AC}$	Concentração de Dureza Magnésio na água clarificada (ppm)
$y_M$	Concentração de Dureza Magnésio na água de <i>make up</i> (ppm)
$y_P$	Concentração de Dureza Magnésio na água de purga (ppm)
$y_r$	Concentração de Dureza Magnésio no rejeito da osmose inversa (ppm)
$Y^T$	Matriz projeção
$z$	Vetor das variáveis exatas
$z_{AC}$	Concentração de Sílica na água clarificada (ppm)
$z_M$	Concentração de Sílica na água de <i>make up</i> (ppm)
$z_P$	Concentração de Sílica na água de purga (ppm)
$z_r$	Concentração de Sílica no rejeito da osmose inversa (ppm)
$I$	Calor latente de vaporização da água ( $\text{Btu.lb}^{-1}$ )

$w_1$	Umidade absoluta do ar de entrada (lb de vapor de água . lb de ar seco <sup>-1</sup> )
$w_2$	Umidade absoluta do ar de saída (lb de vapor de água . lb de ar seco <sup>-1</sup> )
$w_s$	Umidade absoluta de saturação do ar (lb de vapor de água . lb de ar seco <sup>-1</sup> )
$[Mg -H]$	Concentração de Dureza Magnésio (ppm)
$[SiO_2]$	Concentração de Sílica (ppm)

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.1.</b> Situação do consumo de água doce por setor no Brasil e no Mundo. ....	3
<b>Tabela 2.1.</b> Características típicas de lodos de sulfato de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).....	16
<b>Tabela 3.1.</b> Características monitoradas nas correntes para o reaproveitamento. ....	44
<b>Tabela 4.1.</b> Média anual das vazões registradas no sistema.....	57
<b>Tabela 4.2.</b> Avaliação dos instrumentos de medida. ....	58
<b>Tabela 4.3.</b> Vazão das correntes antes e depois do ajuste das curvas. ....	63
<b>Tabela 4.4.</b> Comparação dos dados de vazão antes e depois da reconciliação de dados.....	64
<b>Tabela 4.5.</b> Dados para o cálculo da vazão de descarte do lodo dos clarificadores.....	66
<b>Tabela 4.6.</b> Dados para o cálculo da vazão de efluente da lavagem dos filtros de areia atmosféricos.....	66
<b>Tabela 4.7.</b> Etapas do processo de enxágüe dos vasos de troca iônica mista.....	68
<b>Tabela 4.8.</b> Resultado das análises físico-químicas das correntes potenciais para o reaproveitamento e suas respectivas vazões.....	69
<b>Tabela 4.9.</b> Estimativa de economia com o reaproveitamento das correntes.....	71
<b>Tabela 4.10.</b> Médias das vazões das correntes de AC para as indústrias coligadas e AC para o arraste de cinzas no período de janeiro a agosto de 2003. ....	72
<b>Tabela 4.11.</b> Resultados das análises físico-químicas de diferentes tipos de água. ....	75
<b>Tabela 4.12.</b> Análises de DQO das correntes de EI. ....	76
<b>Tabela 4.13.</b> Concentração de DQO dos produtos químicos utilizados na água de resfriamento.....	77
<b>Tabela 4.14.</b> Dados necessários para o cálculo da carga de DQO dos produtos químicos. ....	77
<b>Tabela 4.15.</b> Dados de entrada para o cálculo da taxa de evaporação da torre de resfriamento em duas condições climáticas distintas. ....	78
<b>Tabela 4.16.</b> Dados de entrada para o balanço material da torre de resfriamento.....	79
<b>Tabela 4.17.</b> Resultados da simulação do comportamento do sistema da água de resfriamento para diferentes porcentagens de recuperação de rejeito da OI e para dois valores de constante de solubilidade $k_{ps1} = 1,0 \times 10^{-29}$ e $k_{ps2} = 4,0 \times 10^{-31}$ . ....	80
<b>Tabela 4.18.</b> Parâmetros de controle da qualidade da água de resfriamento da indústria em estudo.....	81
<b>Tabela 4.19.</b> Dados obtidos pela simulação e pelas análises obtidas experimentalmente. ....	81
<b>Tabela A.1.</b> Resultado dos testes realizados na torre de resfriamento usando procedimento descrito na norma ATC – 105 do Cooling Tower Institute.....	90
<b>Tabela A.2.</b> Valores de Temperatura de água fria (Taf) e Temperatura de água quente (Taq) para o teste de performance realizado em abril de 2003. ....	90
<b>Tabela A.3.</b> Valores de Temperatura de bulbo úmido (Tbu) e bulbo seco (Tbs) do ar de entrada para o teste realizado em abril de 2003. ....	91
<b>Tabela A.4.</b> Dados de vazão de recirculação da água de resfriamento das áreas de aromáticos e olefinas registrados pelo sistema de controle durante o período de teste. ....	91

<b>Tabela A.5.</b> Dados coletados dos ventiladores para o cálculo da potência durante o teste de performance realizado em abril de 2003.....	92
<b>Tabela A.6.</b> Valores de Temperatura de água fria (Taf) e Temperatura de água quente (Taq) para o teste de performance realizado em novembro de 2003.....	92
<b>Tabela A.7.</b> Valores de Temperatura de bulbo úmido (Tbu) e bulbo seco (Tbs) do ar de entrada para o teste de performance realizado em novembro de 2003.....	93
<b>Tabela A.8.</b> Média dos dados de vazão de recirculação da água de resfriamento das áreas de aromáticos e olefinas registrados pelo sistema de controle durante o período de teste.....	93
<b>Tabela A.9.</b> Dados coletados dos ventiladores para o cálculo da potência durante o teste de performance realizado em novembro de 2003.....	93



# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

A escassez de água, o alto custo do tratamento de efluentes e a iminente cobrança pelo uso e descarte da água vêm preocupando a sociedade e incentivando pesquisas na área de otimização do uso da água e minimização de efluentes. O setor industrial é um dos setores que mais tem se preocupado e se empenhado em encontrar soluções para o problema da escassez, pois vivencia os dois problemas ao mesmo tempo, a alta demanda de água e o tratamento dos efluentes gerados. Com o conceito de usuário pagador, o qual foi introduzido pelas novas políticas de gerenciamento de recursos hídricos que estipulam a cobrança pela utilização dos recursos hídricos e também pela carga de poluentes lançados ao meio ambiente, os setores que fazem uso deste recurso serão levados a adotar estratégias para a racionalização do uso da água e reaproveitamento de efluentes.

A água é o pilar de sustentação de todas as formas de vida que se conhece, tal sua importância incondicional para a humanidade. No entanto, além da manutenção direta da vida, a água tem função primordial para o desenvolvimento sócio-econômico mundial, devido a sua ampla utilização nas atividades domésticas, irrigação na agricultura, pesca, geração de energia, processos industriais, transporte e processos menos nobres, como diluição de efluentes.

É importante mencionar que mesmo sendo o planeta Terra formado majoritariamente por água, sua disponibilidade para as aplicações antes mencionadas é de certa forma limitada. Sabe-se que 70 % da superfície mundial está coberta por água, no entanto, apenas 2,5 % deste total é de água doce, os outros 97,5 % são de água salgada, imprópria para o uso cotidiano. Destes 2,5 % de água doce cerca de 70 % está congelada nos pólos e montanhas e grande parte do restante está armazenada como umidade no solo ou em reservatórios subterrâneos. Sendo assim, menos de 1 % da água doce do planeta está disponível para uso humano (SHIKLOMANOV, 1998 apud LIMA, 2001).

Além dos pontos mencionados anteriormente outro fator a ser considerado é a distribuição espacial irregular da água no mundo. Apenas nove países dividem 60 % de toda a água doce disponível, possuindo as maiores reservas de água do planeta, sendo eles: Brasil, Rússia, Estados Unidos, Canadá, China, Indonésia, Índia, Colômbia e Peru. Avaliando os continentes separadamente, 39,6 % de toda a água disponível está localizada no continente americano, 31,8 % na Ásia, 15 % na Europa e África e 9,7 % na Oceania (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2000).

Vários países convivem com o problema da escassez de água, que segundo estimativas da Organização das Nações Unidas (ONU) poderá atingir em 2025, dois terços da população mundial. Neste cenário, o Brasil tem o privilégio de deter 13,7 % de toda a água doce mundial, que é praticamente o volume total com que conta o continente africano. No entanto, isso não significa que não há escassez de água em território brasileiro, pois aqui também há o problema da má distribuição. Uma observação mais cuidadosa mostra que apenas a região amazônica, onde se localiza a maior bacia hídrica do mundo, detém 80 % de toda a água disponível no Brasil, restando os outros 20 % para as outras regiões, onde se concentram aproximadamente 95 % da população. Um exemplo é o Estado de São Paulo que abriga 22 % da população brasileira e conta com apenas 1,6 % da água disponível. Especialistas estimam que, em menos de dez anos, a região metropolitana de São Paulo sofrerá sérios problemas de escassez de água, ou pela demanda reduzida ou pelo desperdício e mau uso.

Combinado à má distribuição da água, outro problema que contribui fortemente para a escassez deste recurso é a contaminação e o uso indiscriminado do mesmo. O consumo de água cresce a cada dia, e está cada vez mais difícil captar água de boa qualidade. Nas áreas mais desenvolvidas do país, o desordenado consumo das águas, paralelamente à industrialização, urbanização e agricultura intensiva, tem provocado escassez deste recurso em regiões outrora consideradas ricas em mananciais. O uso múltiplo da água como geração de energia, abastecimento público urbano e industrial, projetos de agricultura irrigada, diluição de efluentes, navegação, manutenção de ecossistemas, quando feito de forma não planejada, tem um efeito devastador sobre as fontes de água, fazendo com que sua exploração seja insustentável para as próximas gerações (COIMBRA et al., 2002).

Um dos grandes contribuintes ao uso excessivo de água é sem dúvida a atividade agrícola intensiva dependente de irrigação. As áreas irrigadas no Brasil cresceram fortemente nos últimos anos e tendem a crescer cada vez mais. Certamente grande parte da água utilizada retorna ao conhecido ciclo hidrológico, no entanto, uma agricultura dependente de agroquímicos pode causar contaminação desta água e de suas fontes. Em vista disso, medidas mais sustentáveis são fundamentais nesta área (LIMA, 2001).

Além da agricultura e do consumo humano, outra atividade que representa ameaça para a escassez da água, se não manejada de forma sustentável, é a industrial. Estima-se que em 2025 o consumo de água aumentará, em relação ao consumo atual, em 1,2 vezes para o setor agrícola, 1,5 vezes para o setor industrial e 1,8 vezes para o consumo doméstico (UNEP, 2004). O consumo de água doce por setores no Brasil e no mundo está apresentado na Tabela 1.1.

**Tabela 1.1.** Situação do consumo de água doce por setor no Brasil e no Mundo.

Setor	Volume captado-Brasil (km <sup>3</sup> .ano <sup>-1</sup> )	Volume captado-Mundo (km <sup>3</sup> .ano <sup>-1</sup> )
Agrícola (irrigação)	33,8	2595
Abastecimento	8,4	748
Industrial	4,4	386

Fonte: Lima, 2001.

Todos os pontos ressaltados anteriormente, se não abordados com a devida importância pelos países, conduzirão certamente à escassez do recurso água. Estimativas baseadas em estudos recentes mostram que em 2050 a população mundial deverá atingir 8,9 bilhões de habitantes, um crescimento significativo considerando os 62 bilhões atuais. A população continua crescendo, mas o mesmo não ocorre com os recursos naturais. A ONU alertou que em 2025, cerca de 2,7 bilhões de pessoas, em todo o mundo, enfrentarão a falta d'água se as populações continuarem a tratá-la como um bem inesgotável (UNFPA, 2004).

Por três vezes o mundo já se reuniu para discutir as relações entre desenvolvimento e meio ambiente: em Estocolmo, na Suécia, em 1972, no Rio de Janeiro, em 1992, conhecida como Rio 92 e em Johannesburg, África do Sul, em 2002. Na conferência Rio 92, foi criada a Agenda 21, um programa de ação global que define metas para algumas das principais questões ambientais do planeta. Os objetivos da Agenda 21 acerca do gerenciamento dos recursos hídricos para se atingir a sustentabilidade envolvem principalmente o comprometimento político em seu nível mais elevado, com posterior apoio econômico, técnico e científico para encontrar soluções de racionalização da água, bem como de técnicas de reutilização de águas e de efluentes (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2004).

Algumas medidas já vêm sendo tomadas em diferentes países para que o uso da água seja de forma mais racional. No Brasil foi criada a Lei 9.433 de 8 de janeiro de 1997, que instituiu a Política Nacional dos Recursos Hídricos, definindo a água como um bem de domínio público, um recurso natural limitado e dotado de valor econômico. Pela lei, usuários, poder público e comunidade local podem estabelecer, por meio de comitês formados por bacias hidrográficas e agências de água, como e quanta água será usada pelos diferentes setores, valores que serão cobrados dos usuários e onde esta arrecadação será aplicada. Cobrar pelo uso é uma estratégia interessante, pois os recursos poderão ser utilizados em medidas que visem tornar a utilização da água mais sustentável. A cobrança pelo uso da água no Brasil, iniciou em 2003 pelo Comitê da Bacia do Rio Paraíba do Sul (CEIVAP), que abrange parte do estado de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo.

Medidas eficazes para minimização do uso e redução da contaminação da água devem ser tomadas com urgência. Sendo um recurso limitado e, como mencionado anteriormente, com distribuição irregular, a água poderá se tornar um problema até mesmo para os países mais desenvolvidos. A perspectiva de que todo o país pagará pelo uso da água está levando as indústrias a investir em novas tecnologias para a racionalização e reaproveitamento. Em vista

disso, é neste setor que as práticas de minimização de uso e descontaminação têm evoluído mais rapidamente. O reuso de águas industriais vem ganhando importância a cada dia e pode significar uma alternativa potencial no uso mais sustentável deste recurso pela sociedade.

Nessas circunstâncias, surgem novos conceitos e ferramentas que incentivam a prevenção da poluição no mesmo ponto onde são gerados. O modelo de contenção de efluentes, para posterior tratamento e destinação, conhecido como “end-of-pipe treatment” não está mais adequado à situação atual, em que se prioriza a maximização do uso dos recursos disponíveis e minimização da geração e descarte de efluentes.

Pelo que foi exposto, constata-se que há um campo de interesse para o desenvolvimento de estratégias que visem minimizar o consumo de água e a geração de efluentes. Desta forma, a proposta original deste trabalho foi a de estudar o sistema de tratamento de águas do setor de utilidades da indústria petroquímica Copesul, visando minimizar a geração de efluentes e reduzir os custos envolvidos.

Em termos mais específicos, o presente trabalho tem os seguintes objetivos:

- realizar um balanço hídrico do setor de utilidades de uma indústria petroquímica;
- estudar propostas de redução de consumo de água e reaproveitamento de efluentes;
- caracterizar as correntes potenciais para o reaproveitamento;
- realizar um estudo do sistema de resfriamento objetivando minimizar a geração de efluentes.

A estrutura de apresentação deste trabalho consiste de uma revisão bibliográfica, metodologia de trabalho, resultados e discussões e, finalmente, conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## **CAPÍTULO 2**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

Neste capítulo são apresentados os fundamentos teóricos dos assuntos abordados neste estudo e uma revisão bibliográfica que inclui os principais trabalhos publicados. O capítulo é dividido em três seções, na primeira estão apresentados os fundamentos teóricos e estudo da literatura na área de minimização e reuso de efluentes industriais. A segunda seção descreve as etapas de tratamento de água para uso industrial, principais poluentes presentes nas águas e ferramentas para a realização de um balanço hídrico na planta de tratamento e distribuição de águas. A terceira seção apresenta os fundamentos teóricos sobre torres de resfriamento e uma breve apresentação dos principais trabalhos publicados que abordam metodologias para o cálculo de desempenho de torres de resfriamento.

#### **2.1 MINIMIZAÇÃO E REUSO DE EFLUENTES LÍQUIDOS**

O custo elevado da água industrial, associado à iminente cobrança pelo seu uso e às restrições impostas pelos órgãos ambientais tem levado as indústrias a criar alternativas para diminuir o consumo da água e minimizar a geração de efluentes. Estimativas feitas pela Agência Nacional de Águas (ANA), mostram que o custo da água irá triplicar nos próximos dez anos. Isso indica que a água merece uma maior atenção, pois não é mais considerada como um recurso disponível e barato e sim um recurso valioso, crítico para a sustentabilidade. Neste contexto, diversos estudos estão sendo realizados e diversas ferramentas estão sendo desenvolvidas para atingir este objetivo, sendo estes apresentados e discutidos no decorrer deste capítulo. As principais alternativas empregadas para a minimização do consumo de água e de geração de efluentes, segundo Wang e Smith (1994 a), podem ser assim definidas:

- Reuso: o efluente é usado diretamente em outras operações desde que o nível de contaminantes não interfira no processo. O efluente pode ser misturado com um efluente de outro processo ou com água fresca.

- Reuso com Regeneração: o efluente é regenerado por tratamento parcial para remover os contaminantes que impediriam seu reuso e, então, reusado em outra operação. Aqui também o efluente pode ser misturado com outro efluente ou água fresca. Neste caso, a água que é reusada após a regeneração não pode entrar novamente no processo onde foi previamente usada.

- Regeneração com Reciclo: o efluente é regenerado por tratamento parcial para a remoção dos contaminantes e o efluente retorna para o mesmo processo onde foi previamente usado.

Desde a década de setenta as indústrias vêm se preocupando em encontrar soluções para minimizar o consumo de água e efluentes (CARNES et al., 1973; HOSPODAREC e THOMPSON, 1974 apud BAGAJEWICZ e SAVELSKI, 2000), porém, o conceito de reuso de água começou a ser estudado efetivamente no início da década de 80. Estudos começaram a ser realizados para resolver o problema de Planejamento de Distribuição de Águas e Efluentes (WAP – *Water/Wastewater Allocation Planning*), que consiste na determinação de uma rede de interconexões de correntes de água dentro dos processos, onde o consumo de água fresca é minimizado, enquanto os processos recebem água de qualidade adequada (TAKAMA et al., 1980).

Desta época em diante, os conceitos de tratamento de efluentes centralizados, denominados de tratamentos de fim de tubo, “*end of pipe treatment*”, onde todas as correntes geradas nos diversos processos industriais são enviadas por tubulação para um determinado local da indústria, no qual esses efluentes são tratados e depois descartados conforme as normas vigentes, foram sendo deixados de lado por não se adaptarem a atual realidade industrial. Neste contexto, surgiu a idéia de minimizar a quantidade de efluentes gerados durante o processo e realizar o tratamento no ponto onde é gerado, conhecido como tratamento distribuído. Em geral, o custo do tratamento de misturas de correntes com características diferentes é maior do que o custo do tratamento das correntes individuais.

Existem na literatura muitos trabalhos que propõem diversas metodologias para a otimização de processos que utilizam água e geram efluentes. As metodologias utilizadas baseiam-se em regras heurísticas, conceitos de termodinâmica e química do processo, os chamados procedimentos algorítmicos, e métodos numéricos de otimização, a programação matemática. Esta revisão é dividida em dois grupos, o primeiro apresenta os trabalhos que abordam problemas de otimização cuja resolução está baseada em programação matemática. O segundo grupo apresenta trabalhos realizados onde a resolução dos problemas é feita através de procedimentos algorítmicos. Como o presente trabalho está mais relacionado com este último grupo, esta metodologia receberá maior ênfase.

### PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA

A programação matemática está baseada na resolução de problemas de otimização que têm como componentes chaves a função objetivo, o modelo do processo e as restrições. Dependendo do tipo de função objetivo e de suas restrições, os problemas de otimização com

restrição são comumente divididos em programação linear (LP), programação quadrática (QP), programação não-linear (NLP), programação inteira (IP) e programação mista (MP) (EL-HALWAGI, 1997).

Takama et al. (1980) usavam programação matemática para resolver um problema de distribuição de água em uma refinaria de petróleo. O trabalho dos autores resultou em uma superestrutura considerando todas as oportunidades de reuso e regeneração com conseqüente otimização e eliminação das configurações não viáveis economicamente.

El-Halwagi e Manousiouthakis (1989) adaptaram a metodologia usada e já consagrada por Linnhoff e Hindmarsh (1983) de Redes de Transferência de Energia (RTE), para um modelo de Redes de Transferência de Massa (RTM). Este modelo é baseado na transferência de contaminantes de uma corrente rica para uma corrente pobre. Mais tarde, estes autores apresentaram trabalhos onde a programação matemática foi utilizada para analisar o consumo mínimo de água para obter a máxima transferência de contaminantes e calcular o número mínimo de equipamentos para a rede.

Puigjaner et al. (1999) desenvolveram uma metodologia para a otimização do uso de água em processos em batelada. Segundo os autores, há na literatura diversos trabalhos que envolvem sistemas de otimização do uso da água em processos contínuos, mas há poucos trabalhos relacionados com minimização de uso de água em processos industriais em batelada, pois estes processos apresentam maior complexidade de gerenciamento. O trabalho é limitado ao reuso direto da água e não permite a separação intermediária de contaminantes. O sistema foi otimizado sob diferentes critérios, como demanda de água fresca, custo da água, custo de energia e projeto da rede de reuso da água. Por fim, foi formulado um modelo matemático que descreveu o reuso de água através de tanques de estocagem, que, segundo os autores, comparado com outros recursos recuperáveis, o uso destes tanques é relativamente simples e aumenta as oportunidades de reuso.

O modelo matemático formulado por estes autores descreveu a transferência de massa e energia que ocorre em sistemas de reuso de água através de tanques de estocagem. Para a otimização do modelo matemático foram aplicados dois procedimentos diferentes e os resultados foram considerados satisfatórios, mostrando significativa redução no consumo de água, apesar do procedimento de simulação matemática não ter garantido o alcance do ótimo global. Um estudo de caso foi realizado em uma indústria e os resultados obtidos permitem concluir que é possível reduções de 50 % na demanda de água fresca e dos custos associados ao sistema de reuso de água.

Bagajewicz e Savelski (2000) apresentaram uma metodologia para a otimização de problemas de Planejamento de Distribuição de Água para um único contaminante, usando um procedimento desenvolvido por eles chamado de *WaterSave*. Segundo os autores, o procedimento proposto pode ser usado eficientemente para qualquer processo que utilize água com baixa concentração de contaminante. Limites de concentração de entrada e saída de poluentes são impostos para cada processo e uma carga fixa de contaminantes é usada. Os

autores definiram alguns conceitos relacionados com os processos que utilizam água, estes são listados a seguir.

- Processos usuários de água fresca: são processos que necessitam de água fresca, podendo também ser consumidores de efluentes.
- Processos usuários de efluentes: processos que são alimentados somente por efluentes.
- Processo principal: é um caso especial de processo usuário de água fresca, que utiliza somente água fresca.
- Processos usuários de efluentes intermediários: são processos que recebem e enviam efluentes para outros processos.
- Processos usuários de efluentes terminais: são processos que são alimentados por efluentes de outros processos mas que após sua utilização são descartados para tratamento de efluentes.
- Conjunto de precursores de um processo  $j$ : é o conjunto de todos os processos que enviam efluente para o processo  $j$ .
- Conjunto de receptores do processo  $j$ : é o conjunto de todos os processos que recebem o efluente proveniente do processo  $j$ .
- Provedores parciais de efluentes: são processos em que o efluente gerado é parcialmente reusado por outro processo e a outra parte é enviada diretamente para tratamento.
- Provedores totais de efluentes: são processos em que o efluente gerado é totalmente reusado por outro processo.

No mesmo ano, Bagajewicz et al. (2000) apresentaram um procedimento para resolver sistemas com múltiplos contaminantes em uma refinaria. Este procedimento considerou a otimização dos custos de investimentos e custos de operação. As duas condições necessárias para resolução de um sistema multicomponente, segundo os autores, são o estabelecimento de uma máxima concentração de saída, ou seja, se a solução do problema é ótima, todos os processos usuários de água atingem a máxima concentração de saída de pelo menos um dos componentes. E a segunda condição é de monotonicidade da concentração do componente chave, que enuncia que se a solução é ótima, em cada processo a concentração de saída do componente chave não deve ser menor que a concentração da mistura das correntes de efluentes vindas de todos os precursores. O componente chave é aquele componente que necessita de maior vazão de água fresca para a neutralização de sua carga. O problema foi resolvido usando programação matemática não linear e permite explorar diferentes alternativas de configurações da rede.



### PROCEDIMENTOS ALGORÍTMICOS

A Tecnologia do ponto de estrangulamento “*Pinch Point*”, tradicionalmente empregada para análise de eficiência energética de processos, utiliza conceitos termodinâmicos juntamente com regras heurísticas para projetar redes de transferência de massa. O objetivo é remover compostos de um conjunto de correntes ricas, e transferi-los para um conjunto de correntes pobres, de forma eficiente, a custos baixos e sem a necessidade de alterações significativas nos processos. El-Halwagi e Manousiouthakis (1989) e Wang e Smith (1994 a) foram os precursores da aplicação dos conceitos da tecnologia do ponto de estrangulamento em sistemas de água e efluentes. Wang e Smith (1994 a,b) desenvolveram um método baseado no perfil limite de água que identifica a máxima concentração de poluentes da entrada e saída da água que está sendo usada no processo. Se o consumo de água for reduzido, por consequência a quantidade de efluentes será minimizada e a capacidade do sistema de tratamento irá aumentar.

Zbontar e Glavic (2000) fizeram uma abordagem sistemática para a minimização do consumo de água em uma indústria petroquímica. O objetivo foi minimizar o consumo de água em sistemas de resfriamento e lavagem de equipamentos e pisos. A metodologia utilizada tem algumas idéias contidas no método da tecnologia do ponto de estrangulamento, porém esta tecnologia não pode ser totalmente utilizada devido ao tipo de operação abordada no trabalho. Para a aplicação da tecnologia do ponto de estrangulamento, é necessário que ocorra a transferência de massa de uma corrente rica para uma corrente pobre, com o objetivo de reduzir o nível de um dos contaminantes, o que não ocorre neste caso, onde a maior parte da água é utilizada para resfriamento de correntes, equipamentos e limpeza de pisos. Esta tecnologia não permite combinar eficientemente importantes fatores como segurança, distâncias entre equipamentos e as temperaturas das correntes de entrada e saída dos processos, e também apresenta restrições quanto ao número de contaminantes. Como a água usada para diferentes processos de resfriamento não necessita ter uma qualidade muito elevada, é possível utilizar para este fim uma água que já tenha sido utilizada. Essa água pode ser regenerada ou misturada com água fresca caso não apresente qualidade suficiente para o reuso direto. O método utilizado por Zbontar e Glavic foi dividido em três fases:

- determinação e análise dos dados atuais dos processos que geram efluentes, como fluxogramas do processo, vazão das correntes, temperaturas, valores de pH e concentração dos poluentes;
- previsão das conexões entre as correntes de saída de água e possíveis consumidores dessas correntes;
- estimativa dos investimentos necessários.

Foram identificadas as vazões de entrada e de saída de água dos processos envolvidos possibilitando a obtenção do diagrama dessas correntes. A qualidade das correntes foi determinada através de análises físico-químicas. Com base nestes dados coletados, foram verificadas as possibilidades de conexões entre os processos, considerando o reuso, reciclo e a

necessidade de regeneração preliminar. Os principais fatores que influenciaram na proposta de possíveis conexões foram a segurança, temperatura e concentração de poluentes, distâncias entre os processos e a corrosividade do meio. Após a determinação das possíveis conexões, os autores fizeram estimativas dos custos de investimento necessários, da economia com as mudanças e de outros custos eventuais. A redução do uso da água alcançou 7 % do total de água consumida e gerou uma economia anual de aproximadamente U\$ 43.000,00.

Mann (2003) discutiu as mudanças culturais e os benefícios do rearranjo das correntes de água obtidos de um estudo piloto de otimização de sistemas que usam água em uma indústria química. Segundo o autor, o reuso de água não pode ser justificado baseado somente na economia do tratamento da água e dos efluentes. O custo variável de remoção de sólidos, cloração e distribuição de água é altamente dependente da origem da água, tecnologia de tratamento e tempo de uso do equipamento ou custo da água já tratada, quando o fornecimento é de água potável. Mann descreve os custos tradicionais associados ao uso e descarte da água de acordo com as operações, divide as operações em captação da água, tratamento da água, uso da água, tratamento de efluentes e descarte. Os custos associados à captação da água são as tarifas, se existirem, coleta de sólidos, bombeamento e manutenção. Para o tratamento da água, os custos envolvidos são do tratamento químico, disposição dos sólidos, bombeamento, manutenção e aumento da capacidade. No uso da água, os custos são bombeamento, manutenção, aquecimento e/ou resfriamento. Para o tratamento de efluentes, os custos são de tratamento químico, aeração, bombeamento, manutenção, aquecimento e/ou resfriamento e aumento da capacidade. Por fim, os custos envolvidos com o descarte dos efluentes são de monitoramento, tarifas para o descarte, disposição dos sólidos, bombeamento e manutenção. O autor afirma que para um bom projeto de reuso de água é necessário seguir os seguintes passos:

1) planejar e desenvolver um suporte corporativo. Projetos de reuso de água são uma iniciativa para a redução dos custos e para assegurar a sustentabilidade a longo prazo;

2) realizar uma pesquisa sobre os recursos existentes e os custos variáveis do tratamento de água. Uma análise profunda do atual consumo de água e geração de efluentes, além da capacidade de tratamento, é primordial para entendimento das complexas interações de todo o processo;

3) realizar um estudo para prever a demanda de água e tratamento de efluentes num período de cinco a dez anos. Identificar possíveis expansões de produção que irão demandar aumento do consumo de água e/ou capacidade de tratamento de efluentes. Nesta etapa podem-se reduzir os custos variáveis e também os investimentos de projeto;

4) realizar uma avaliação de custo total, onde se contabilizam os custos externos do negócio relacionados ao consumo de água e geração de efluentes;

5) planejar e desenvolver operações de suporte. Com a redução dos custos garantida, as operações serão mais direcionadas no sentido de destinar recursos limitados para o desenvolvimento de balanços detalhados de água e propostas de reuso.

Apesar de discutir os passos e os benefícios de um programa de gerenciamento de águas e efluentes de uma indústria química, o autor não descreve nenhum procedimento de minimização dos mesmos.

Há uma sobreposição significativa entre os métodos apresentados anteriormente, onde a tendência é a utilização conjunta das características de cada método para minimização de águas e efluentes em uma planta industrial. Na maioria dos casos aplicam-se regras heurísticas e conhecimentos termodinâmicos para simplificar o problema inicial e, posteriormente, métodos numéricos de otimização para a resolução final.

A tecnologia do ponto de estrangulamento não pode ser aplicada aos processos em que as correntes a serem minimizadas não entrem em contato com o material a ser processado, por exemplo, correntes provenientes de processos de enxágüe e de lavagens de equipamentos. O presente trabalho apresenta este cenário e para tanto, foram utilizadas regras heurísticas e métodos empíricos baseados nas observações e conhecimentos adquiridos na prática.

## 2.2 ÁGUA PARA USO INDUSTRIAL

Não existe na natureza água absolutamente pura. A água contém matéria orgânica e inorgânica, às vezes não perceptíveis visualmente. É comum classificar as impurezas encontradas na água como suspensas, coloidais e dissolvidas. De acordo com sua origem, as águas podem ser genericamente classificadas como superficiais ou subterrâneas. Águas superficiais são de rios, lagos, mares, oceanos e geleiras, e as águas subterrâneas são de lençóis freáticos, semi-artesianos e artesianos (TOMAR, 1999).

As águas subterrâneas são consideradas de melhor qualidade comparadas às águas superficiais. Esta afirmação se deve ao fato de que ao penetrar no solo, as águas subterrâneas vão sendo filtradas pelas diversas camadas existentes. Por outro lado, estas águas podem conter altas concentrações de substâncias minerais e também sofrer contaminação no caso dos lençóis freáticos (TOMAR, 1999).

As águas superficiais, por sua vez, podem sofrer maior contaminação, pois ao percolar pela superfície do solo, fazem uma espécie de lavagem, chamado de mecanismo de lixiviação, carregando diferentes substâncias orgânicas, tais como: terra, microorganismos, fezes e outros materiais que encontram pelo caminho. As águas superficiais no Brasil geralmente apresentam aspecto límpido em épocas de estiagem e barrento em épocas de chuva, podendo também apresentar alta concentração de matéria orgânica dissolvida em determinadas regiões, devido à decomposição de vegetais. Essas águas contêm gases dissolvidos, especialmente gás carbônico e oxigênio, compostos minerais, onde os principais são carbonatos, sulfatos e cloretos de cálcio, magnésio, sódio e a sílica coloidal ou combinada com bases alcalino-terrosas. A maioria das águas superficiais contém ainda substâncias orgânicas solúveis, provenientes da decomposição de matérias vegetais ou trazidas pelos esgotos, que despejam nos rios resíduos da indústria e de uso doméstico (TOMAR, 1999).

A água para uso industrial deve apresentar determinadas características exigidas de acordo com o processo usuário desta água. Para que essas características sejam alcançadas, é necessário um sistema que envolva diversas etapas de tratamento, que depende, além das necessidades do usuário, das características da água bruta (FILHO, 1985).

### **2.2.1 Principais Parâmetros de Caracterização da Água**

As características da água para uso industrial são definidas em função de diferentes parâmetros, os quais são relacionados a seguir.

#### Dureza Total

A dureza de uma água é proporcional ao número total de átomos de cálcio e magnésio que ela contém. Sob condições supersaturadas, estes cátions reagem com ânions para formar precipitados sólidos insolúveis, como, por exemplo, bicarbonatos, sulfatos, cloretos e nitratos de cálcio e magnésio. É comum usar a concentração de Dureza Total como sendo a soma das concentrações de Dureza Cálcio e Magnésio (TOMAR, 1999).

Sais de cálcio e magnésio têm a tendência de formar incrustações em superfícies onde há troca de calor, causando, por exemplo, o entupimento de tubos de caldeira e de trocadores de calor que usam água de resfriamento. Os tubos de caldeira podem sofrer ruptura por superaquecimento no local da incrustação, e tubos de trocadores de calor podem sofrer corrosão. As incrustações também causam perda de eficiência das superfícies de troca de calor e possibilitam a concentração de produtos altamente corrosivos entre a superfície do metal e a incrustação formada, provocando corrosão (DREW, 1988).

#### Alcalinidade

A alcalinidade é definida como a capacidade da água de neutralizar íons  $H^+$ . Geralmente se deve à presença de hidróxidos, carbonatos e bicarbonatos de metais, tais como cálcio, magnésio, sódio e potássio. A combinação destes compostos com cátions presentes na água pode resultar em deposição nas tubulações e outros equipamentos. Os bicarbonatos têm também o inconveniente de liberar gás carbônico quando submetidos a altas temperaturas, o que torna a água altamente corrosiva (TOMAR, 1999).

#### Sílica

A sílica é encontrada em todas as águas naturais. Sua presença é indesejável para uso industrial, pois se combina com traços de metais como cálcio, magnésio, alumínio e outros constituintes metálicos para formar incrustações duríssimas e de difícil remoção em superfícies de troca de calor, especialmente em caldeiras. Submetida a altas temperaturas, a sílica torna-se volátil, formando depósitos em superaquecedores e palhetas das turbinas. Por isso é essencial a remoção de sílica da água para sistemas industriais. O teor de sílica é expresso em  $mg.L^{-1}$  de dióxido de silício ( $SiO_2$ ) (TOMAR, 1999).

### Turbidez

A turbidez é causada pela presença de sólidos suspensos na água. É a medida da magnitude de absorção ou difusão da luz pela matéria suspensa em água, mas não é uma medida quantitativa direta de sólidos suspensos. A presença de turbidez na água se deve a várias razões, dentre elas se pode mencionar a presença de matéria coloidal, como argila, lodo, fragmentos de rochas, partículas de areia e óxidos metálicos. Também pode ser causada por despejos de efluentes e microorganismos. Há diversos métodos para a medida de turbidez, mas o mais utilizado atualmente é o nefelométrico e a unidade de medida é unidade de turbidez nefelométrica (NTU) que consiste em medir diretamente a luz difundida através de uma amostra. A intensidade da luz difundida pela amostra é comparada com a intensidade da luz difundida por uma solução padrão (BINNIE et al., 2002).

### Gases dissolvidos

Diversos tipos de gases são normalmente encontrados dissolvidos na água. Estes gases dissolvidos são altamente corrosivos aos equipamentos constituídos de ferro e ligas de cobre. Os principais gases encontrados nas águas são o oxigênio e dióxido de carbono (DREW, 1988).

### Demanda Química de Oxigênio (DQO)

Um dos principais parâmetros no monitoramento dos efluentes industriais e domésticos ou nível de contaminação de águas de superfície, subterrâneas e potável é a DQO. Ela é determinada em termos da quantidade de oxigênio requerida para oxidar a matéria orgânica, produzindo gás carbônico e água. Os valores de DQO incluem a demanda de oxigênio devido às substâncias biodegradáveis e não biodegradáveis que são oxidadas por um forte oxidante químico (TOMAR, 1999).

## ***2.2.2 Etapas do Tratamento da Água para Indústria***

O tratamento de águas superficiais, para a obtenção de água clarificada e desmineralizada na indústria, é dividido basicamente nas seguintes etapas:

### **PRÉ-TRATAMENTO**

Antes do tratamento propriamente dito, a água bruta é submetida, geralmente, a um pré-tratamento que compreende operações físicas ou mecânicas. Estes tratamentos têm a finalidade de separar da água a maior quantidade possível de materiais que, por seu tamanho ou natureza, trariam problemas nos tratamentos posteriores. É comum haver um sistema de gradeamento para separar os materiais mais grosseiros capazes de provocar obstruções nas bombas adutoras (FILHO, 1985).

## **CLARIFICAÇÃO**

A clarificação da água pode ser definida como sendo a remoção da matéria finamente dividida em suspensão (FILHO, 1985). É um processo que pode ser dividido em quatro etapas: coagulação/floculação, sedimentação, filtração e desinfecção.

### **Coagulação**

É comum classificar os sólidos presentes na água em três formas principais: partículas suspensas, colóides e sólidos dissolvidos. Partículas suspensas podem ser grossas ou finas, por exemplo, areia, pedras ou matéria vegetal. Colóides são partículas muito finas e os sólidos dissolvidos são moléculas ou íons. Partículas suspensas grossas ou finas são relativamente simples de remover por sedimentação ou filtração. Já os sólidos dissolvidos são difíceis de remover por tratamento físico, exceto por osmose inversa (BINNIE et al., 2002).

Os colóides podem ser divididos em dois tipos, hidrofílicos e hidrofóbicos. Os hidrofóbicos são instáveis e os hidrofílicos estáveis. Ambos apresentam cargas elétricas negativas que se repelem e mantêm as partículas separadas. Para a remoção dessas partículas é necessário desestabilizar as cargas eletrostáticas que as mantêm separadas, promovendo a aglomeração e formação de partículas maiores. Esse processo de desestabilização e formação de partículas maiores recebe o nome de coagulação (BINNIE et al., 2002).

Segundo Sell (1992), a coagulação é um processo rápido que consiste na desestabilização e coalescência inicial de partículas coloidais. Já a floculação, é um processo de mistura mais lento, que provoca colisões entre as partículas coaguladas anteriormente, tornando-as maiores e de mais fácil remoção.

Um coagulante é um produto químico, tipicamente sais metálicos, que é dosado para aglomerar as partículas coloidais. Polímeros podem ser também usados como coagulantes, mas são mais comumente usados durante a floculação.

Segundo Binnie et al., (2002), o processo de floculação pode ser explicado por três mecanismos: movimento browniano, agitação e sedimentação diferencial. Na floculação inicial, quando as partículas formadas têm um tamanho menor, o movimento browniano é o principal processo. Contudo, para que as partículas aumentem de tamanho, é necessário que se promovam colisões entre as partículas por agitação. A quantidade de energia usada deve ser apropriada, pois pouca energia irá resultar em uma baixa taxa de formação de flocos, e um excesso poderá provocar a quebra dos mesmos.

Pode-se dizer, como regra geral, que a coagulação requer alta energia de mistura, para que haja um maior contato entre as partículas e o coagulante, já a floculação, por sua vez, requer baixa energia para evitar a desintegração dos flocos. Dessa forma, a energia deverá ser diminuída com o aumento do tamanho dos flocos.

Binnie et al., (2002) propõem quatro métodos de desestabilização dos colóides, sugerindo que os coagulantes devam ter certas propriedades para permitir os seguintes mecanismos de desestabilização:

- compressão da dupla camada - adição de eletrólitos que aumentam a concentração de íons, diminuindo a espessura da dupla camada elétrica que circunda a partícula coloidal, permitindo que as partículas se movam mais próximas umas das outras. Essa proximidade permite que as forças atrativas do eletrólito superem as forças elétricas que mantêm as partículas separadas. Os coagulantes mais efetivos são aqueles compostos que formam cátions trivalentes, na prática são mais comumente usados os sais de ferro e alumínio;
- neutralização de cargas - adição de íons com carga oposta das partículas coloidais podem levar à adsorção de íons na matéria coloidal e redução das cargas superficiais. São usados compostos que formam cátions, por exemplo, sais de ferro e alumínio;
- união das partículas – adição de polímeros com múltiplas cargas elétricas, catiônicos e aniônicos, como são conhecidos, que unem as partículas conferindo-lhes um maior peso e, conseqüentemente, maior velocidade de decantação. A teoria sugere que os polímeros catiônicos seriam mais apropriados, mas na prática ambos, catiônicos e aniônicos, são freqüentemente usados para desestabilizar as partículas coloidais carregadas negativamente;
- encapsulamento das partículas - quando sais solúveis de ferro e alumínio são adicionados à água, com um determinado valor de pH, precipitam na forma de hidróxidos. Se colóides estão presentes, os hidróxidos são formados usando as partículas coloidais como núcleo.

A dosagem de coagulante depende muito da natureza da água e das características do próprio coagulante, como solubilidade e pH. Se um excesso de coagulante for usado, pode ocorrer uma reversão de cargas e ressuspensão da matéria coloidal.

### Sedimentação

O processo de sedimentação ou decantação é a etapa que sucede os processos de coagulação/floculação. Este processo tem por objetivo separar os sólidos formados na etapa anterior, que é removido pelo fundo do sedimentador (BINNIE et al., 2002).

A água clarificada, assim denominada neste ponto do tratamento, é então separada e pode ser usada para diversos fins, como por exemplo, água de alimentação de torres de resfriamento e água de incêndio.

O lodo químico, como é chamado o lodo proveniente do sistema de clarificação da água, é resultado do tratamento físico-químico aplicado nesta etapa. Neste tratamento são usados coagulantes como sais de alumínio, cal e polieletrólitos e o lodo formado contém em

sua composição altas concentrações de alumínio, sílica e ferro. A quantidade destes elementos depende da qualidade da água bruta e do tratamento químico empregado (RICHTER, 2001).

Segundo Richter (2001), o lodo proveniente do tratamento com sulfato de alumínio apresenta uma pequena porção biodegradável, a qual pode ser oxidável. A massa específica do lodo de ETA varia de acordo com as concentrações de sólidos presentes e pode variar de  $1 \text{ kg.m}^{-3}$  para lodos com teor de sólidos de 1 %, até  $1,5 \text{ kg.m}^{-3}$  após processo de desidratação. Suas principais características são apresentadas na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1.** Características típicas de lodos de sulfato de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).

Sólidos Totais (%)	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (%)	Inorgânicos (%)	Matéria Orgânica (%)	pH	DBO ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	DQO ( $\text{mg.L}^{-1}$ )
0,1 – 4	15 - 40	35 - 70	15 – 25	6 - 8	30 – 300	30 – 5000

Fonte: RICHTER (2001).

Existem na literatura diversos estudos sobre processos de desidratação de lodos e os principais sistemas de desaguamento comumente usados são:

- leitos de secagem;
- filtro prensa de esteira;
- filtro prensa de placas;
- filtro a vácuo;
- centrífugas.

A escolha da melhor operação depende de um conjunto de fatores, como por exemplo, características do lodo gerado, disponibilidade de espaço físico e custos operacionais. Na maioria dos processos é necessário adicionar flocculantes para auxiliar no adensamento. A água resultante da desidratação poderá, após análise de suas características, ser enviada para o início do processo juntamente com a água bruta ou reusada em qualquer processo que exija qualidade de água igual ou inferior a obtida. O lodo seco ou torta, como é chamado o lodo desidratado, apresenta uma concentração de sólidos que varia de 15 a 40 %, conforme o tipo de lodo e operação empregada. Para a reutilização deste efluente é necessário um estudo bem detalhado das características físico-químicas e equipamentos mais adequados para a desidratação.

### Filtração

O processo de filtração consiste, basicamente, na passagem de água através de um leito granular, que pode ser de areia ou outro meio filtrante adequado, com o objetivo de remover da água as partículas que ainda se encontram presentes. O meio filtrante retém a



maioria dos sólidos trazidos do tratamento prévio, enquanto permite a passagem da água. A qualidade do filtrado dependerá da performance do filtro utilizado e da qualidade da água que passará por ele. Há uma relação entre a performance da clarificação e a performance dos filtros, quanto mais efetiva a clarificação, menor esforço para os filtros, e vice e versa.

Há três tipos básicos de filtro granular: filtros lentos de areia; filtros rápidos por gravidade; filtros pressurizados.

Filtros lentos de areia – são os mais antigos e são chamados de lentos porque operam com baixas taxas de filtração. O meio filtrante é a areia e o tratamento pode ser dividido em dois processos, filtração física e ação biológica. Existe uma camada de crescimento biológico no topo do leito de areia que é vital para uma operação efetiva. Essa camada se comporta como uma pré-filtração onde os microorganismos presentes usam os nutrientes da água como fonte de energia.

Filtros rápidos por gravidade – são os tipos mais comuns de filtros e operam a altas taxas de filtração. Para que isso ocorra é necessário usar meios filtrantes com maior granulometria para promover alta permeabilidade. Os filtros mais simples usam um único meio filtrante, normalmente areia, que é suportado por uma camada de pedras. Abaixo dessa camada há um sistema de drenagem que serve para a coleta da água filtrada e para a contra-lavagem do filtro, já que este apresenta uma capacidade limitada de retenção das partículas.

Filtros pressurizados - são muito parecidos com os filtros rápidos por gravidade, a única diferença é que operam sob pressurização em grandes vasos fechados. São usados freqüentemente para a filtração de águas subterrâneas cujo objetivo é a remoção de ferro e manganês. Como as águas subterrâneas não contém sólidos suspensos, não necessitam de tratamentos prévios. Quando usados para águas superficiais, a água a ser filtrada já passou por processos de tratamentos anteriores. Os materiais filtrantes mais empregados são sílex moído, areia silicosa e alguns tipos de antracito particularmente resistentes à abrasão.

O processo de lavagem dos filtros consiste na passagem de água limpa e ar no sentido inverso ao de operação de filtração, deixando-os novamente habilitados para o uso.

### Desinfecção

A função da desinfecção da água é eliminar os microorganismos patogênicos e ainda deixar um residual de desinfetante para prevenir subsequente proliferação destes microorganismos. Há três espécies de microorganismos patogênicos que são de grande preocupação em tratamento de águas: vírus, bactérias e protozoários.

A oxidação química leva a bactéria à morte por ruptura da membrana celular e destruição das enzimas. Há diversas variáveis que afetam a eficiência dos processos de desinfecção, por exemplo, o organismo a ser eliminado, a natureza e concentração do desinfetante, o tempo de contato, a temperatura e outros. A desinfecção é um processo complexo de difícil modelagem, dado o grande número de variáveis que afetam a sua

eficiência. Os processos de desinfecção mais utilizados em plantas de tratamento de água são: tratamento com cloro, ozônio, ultra-violeta e dióxido de cloro (WHITE, 1972).

Recomenda-se o uso da cloração somente para a desinfecção da água já tratada ou águas subterrâneas de alta qualidade. Isto é devido à presença dos THMs (trihalometanos), que são formados pela substituição de três átomos de hidrogênio do metano (CH<sub>4</sub>) por halogênios, no caso, átomos de cloro. O composto de maior preocupação é o clorofórmio (CHCl<sub>3</sub>), que é considerado cancerígeno. Os THMs são formados por reações entre halogênios e matéria orgânica presente na água, os ácidos húmicos e fúlvicos, especificamente. No passado era comum a pré-cloração da água no início do tratamento para controlar o crescimento de algas, porém, atualmente este procedimento não é usual, a não ser que uma prévia avaliação sobre o potencial de formação de THMs indique que não haveria formação destes compostos (BINNIE et al., 2002).

O cloro, por ser um desinfetante que deixa um residual na água, é o principal desinfetante utilizado. Os desinfetantes a base de cloro são:

- cloro gás ou hipoclorito - Cloração;
- cloro e amônia - Cloraminação;
- dióxido de cloro.

A cloração é o processo de desinfecção mais comum e pode ser usado de duas formas, como gás cloro, que é dissolvido em uma corrente de água antes de ser adicionado a água a ser tratada, ou como uma solução de hipoclorito, normalmente hipoclorito de sódio.

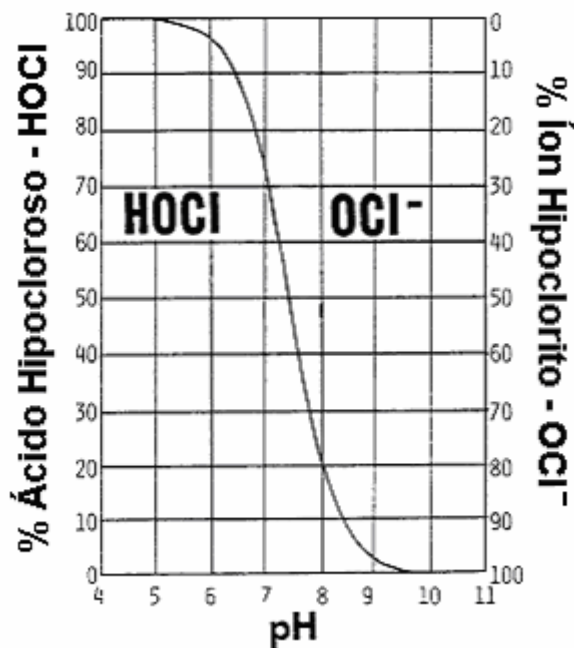
Quando adicionado à água, o cloro reage rapidamente formando ácido hipocloroso, íons hidrogênio e íons cloreto:



O ácido hipocloroso pode se dissociar conforme a equação 2.2:



O ponto de equilíbrio nestas reações depende do valor do pH, sendo que a primeira reação ocorre a valores de pH abaixo de 4, e a segunda reação a valores de pH compreendidos na faixa de 5 a 10. Este comportamento é apresentado na Figura 2.1 que ilustra o efeito do pH na dissociação do ácido hipocloroso. A quantidade de ácido hipocloroso é que determina a eficiência biocida, ao invés do íon hipoclorito. O ácido hipocloroso e íons hipoclorito são chamados de "cloro livre" (WHITE, 1972).



**Figura 2.1.** Efeito do pH na dissociação do ácido hipocloroso. Fonte: BINNIE et al., 2002).

### **ADSORÇÃO POR CARVÃO ATIVADO**

Carvão ativado é obtido por aquecimento controlado de matéria carbonosa, normalmente carvão, madeira ou casca de coco. Inicialmente o material é aquecido na ausência de ar para liberar todas as substâncias voláteis. Então é ativado a altas temperaturas, e deixado em contato para reagir com vapor, ar e dióxido de carbono ou ácido fosfórico. Este procedimento remove o material volátil que se encontra dentro dos poros e produz um material com uma estrutura mais aberta e de alta área superficial.

A adsorção é um processo de transferência de massa onde uma substância, geralmente um contaminante, é transferida da fase líquida para a superfície do carvão onde permanece aderida devido à ação de forças químicas ou físicas (DAVIS e CORNWELL, 1998).

O carvão ativado pode ser usado em duas formas, pó ou granulado. É usado para a remoção de compostos orgânicos, odor, sabor, cor e também para remover o cloro livre, extremamente danoso em sistemas de resina de troca iônica e, principalmente, em sistemas de osmose inversa, onde causa degradação de algumas membranas.

### **TROCA IÔNICA**

É um processo que substitui ou troca íons menos desejáveis por íons mais desejáveis. Existem dois tipos fundamentais de resinas de troca iônica: resina catiônica que remove parte ou todos os cátions da água (cálcio, magnésio, sódio, etc.); e resinas aniônicas que removem parte ou todos os ânions da água (alcalinidade de bicarbonatos e carbonatos, cloretos,

sílicatos, etc.). É um processo descontínuo com reações reversíveis. Em função da salinidade da água, após um certo tempo de operação as resinas ficam saturadas, devendo-se então interromper o processo e realizar a regeneração dos leitos, ou seja, deve-se devolver às resinas a sua capacidade de troca de íons. Este procedimento envolve as seguintes etapas (DAVIS e CORNWELL, 1998):

- descompactação dos leitos através de expansão com ar e água em sentido contrário ao do fluxo normal de operação;
- regeneração das resinas através da passagem de soluções regenerantes pelo seu leito com concentrações suficientemente elevadas para deslocar os cátions e ânions retidos nas resinas. Em geral, são utilizados ácido clorídrico ou sulfúrico para as colunas catiônicas e o hidróxido de sódio para as aniônicas;
- lavagem do leito para eliminar o excesso dos regenerantes. Esta lavagem é realizada com água desmineralizada para que não haja contaminação do leito.

### **OSMOSE INVERSA**

Segundo Byrne (1995), os sistemas de osmose inversa têm como objetivo separar substâncias dissolvidas presentes na água através de uma membrana semipermeável que permite preferencialmente a passagem da água.

A osmose inversa é uma tecnologia de tratamento de água bastante usada na indústria. As principais aplicações deste processo envolvem a purificação de efluentes, dessalinização de água salgada para consumo humano, produção de água ultrapura para abastecimentos de caldeiras de alta pressão, fabricação de semicondutores, produtos farmacêuticos, aparelhos médicos, etc. Comparada a outras tecnologias de remoção de sais dissolvidos, os processos de osmose inversa apresentam vantagens pois não necessitam de energia na forma de calor para mudança de fase, como no processo de destilação, e também não requerem grande quantidade de produtos químicos, como em sistemas de troca iônica (BYRNE, 1995).

## **2.3 RECONCILIAÇÃO DE DADOS**

As medidas das variáveis de uma planta industrial estão sujeitas a erros sistemáticos e frequentemente a erros de natureza aleatória, causando inconsistência no balanço de massa. Estes erros podem ocorrer em virtude de instrumentos não calibrados, leitura fora da faixa de uso do instrumento, erro de transmissão do sinal, má instalação do instrumento, etc.

O objetivo da reconciliação de dados é ajustar estatisticamente dados coletados do processo que estão sujeitos somente a erros aleatórios. Por este motivo, erros sistemáticos devem ser identificados e eliminados antes da reconciliação. Para contornar este problema são introduzidos pesos nas variáveis com o objetivo de atribuir maior grau de confiança para as medidas que apresentam maior precisão (KUMAR, 1982). É comum usar a matriz variância-covariância como uma matriz ponderante para diferenciar a precisão dos dados coletados. A

variância mede a dispersão em torno da média, logo, os dados que apresentarem maior variância contribuem menos no ajuste da vazão das correntes e, como consequência, estas vazões terão maiores ajustes. A reconciliação de dados pode ser aplicada somente se há redundância no sistema, isto é, se há mais variáveis medidas do que não medidas (CROWE, 1989).

A reconciliação de dados é um problema de otimização com restrição e estas restrições podem ser lineares ou não lineares. O método utilizado neste trabalho, denominado de projeção matricial, apresentado por Crowe et al. (1983) apud Crowe (1996a,b), é um método que elimina as vazões não medidas pelo uso de uma matriz de projeção, para obter um conjunto reduzido de balanços contendo somente as vazões medidas que são redundantes.

O problema de reconciliação de dados, considerando estado estacionário, pode ser definido como (KELLY, 1998):

$$\min_{x_a} J = x_a^T Q^{-1} x_a = (x_m - x)^T Q^{-1} (x_m - x) \quad (2.3)$$

sujeito à restrição do balanço material em estado estacionário:

$$A x + B y + C z = 0 \quad (2.4)$$

onde:

$x_m$  é o vetor das variáveis medidas;

$x$  é o vetor das variáveis reconciliadas;

$x_a$  é o vetor dos ajustes;

$y$  é o vetor das variáveis não medidas;

$z$  é o vetor das variáveis consideradas exatas;

A matriz  $Q$  é uma matriz diagonal, de tamanho  $n_x \times n_x$  onde  $n_x$  é o número das variáveis medidas cujos elementos são o desvio padrão dos dados elevado ao quadrado.

As matrizes  $A$ ,  $B$  e  $C$  são matrizes que representam o balanço de massa inicial e correspondem às variáveis medidas, não medidas e exatas, respectivamente. Considerando que não há medidas de vazão consideradas exatas, o último termo do lado esquerdo da equação 2.4 é nulo. O número de linhas de  $A$  e  $B$ , representado por  $m$ , é igual ao número de unidades onde o balanço material é considerado. O número de colunas de  $A$  e  $B$ , representado por  $n$ , é dado pelo número de correntes medidas e não medidas que estão presentes no balanço, respectivamente. Os elementos  $a_{ij}$  e  $b_{ij}$  das matrizes  $A$  e  $B$ , para problemas lineares, são valores constantes  $\pm 1$  ou zeros que seguem a seguinte lógica:

- 1 se a corrente  $j$  entra na unidade de processo  $i$ ;
- 1 se a corrente  $j$  sai da unidade de processo  $i$ ;
- 0 se nenhuma das hipóteses anteriores são satisfeitas.

As medidas têm diferentes graus de precisão e para diferenciar estas medidas costuma-se resolver o problema através do método dos mínimos quadrados ponderados, incluindo na função objetivo uma matriz variância covariância como matriz ponderante, que faz com que os ajustes individuais sejam diferenciados (MENDES, 1999). Sendo assim, a maior probabilidade de erro ocorre para os valores que apresentam maior desvio padrão e vice-versa. Como as medidas são feitas por instrumentos diferentes e, portanto, independentes, ou seja, nenhum instrumento interfere na operação de outro, as covariâncias não são consideradas e os elementos da matriz  $Q$  são as variâncias de um conjunto de dados estatisticamente independentes, normalmente distribuídos, observados em um período de tempo.

Com o objetivo de simplificar a solução do problema de reconciliação acima, é possível eliminar as variáveis não medidas da equação de restrição (CROWE, 1996a; KELLY, 1998). Isto pode ser feito criando-se uma matriz de projeção, denominada como  $Y^T$ , ortogonal à matriz  $B$ , que resulta em:

$$Y^T B = 0 \quad (2.5)$$

Multiplicando a equação 2.4 por  $Y^T$  elimina-se o termo  $By$ , o qual será resolvido separadamente. A matriz  $Y^T$  pode ser interpretada como uma matriz de compressão, que essencialmente elimina todas as restrições envolvendo variáveis não medidas, conservando somente combinações de restrições com variáveis medidas. A matriz de projeção  $Y^T$  é obtida pela divisão da matriz  $B$  em quatro matrizes menores, sendo  $B_1$  uma matriz quadrada não singular contendo somente linhas e colunas independentes da matriz  $B$ . A matriz  $B_2$  contém todas as linhas dependentes e as colunas independentes.

$$P^R B P^C = \begin{bmatrix} B_1 & B_3 \\ B_2 & B_4 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

As matrizes de permutação  $P^R$  e  $P^C$  contém a informação de ordenamento para as linhas e colunas, respectivamente. O tamanho de  $B_1$  determina o tamanho das outras três sub-matrizes. Uma vez que a matriz  $B$  tenha sido rearranjada conforme equação 2.6, a matriz de projeção pode ser calculada como:

$$Y = P^{R^T} \begin{bmatrix} -B_2 & B_1^{-1} & I \end{bmatrix}^T \quad (2.7)$$

Em resumo, para o cálculo de  $Y$  é necessário identificar um conjunto de colunas e linhas independentes contidas na matriz  $B$ . A matriz de permutação utilizada foi obtida a

partir da matriz identidade I, com suas linhas permutadas de modo a obter uma matriz B quadrada não singular.

O balanço de massa, após a multiplicação de  $Y^T$ , tem a seguinte forma:

$$Y^T A x = 0 \quad (2.8)$$

Resolvendo o problema usando multiplicadores de Lagrange, que é um método para encontrar o mínimo ou máximo de uma função multivariável sujeita a restrições, obtém-se a solução do problema de reconciliação de dados linear:

$$x_a = Q A^T Y (Y^T A Q A^T Y)^{-1} Y^T A x_m \quad (2.9)$$

Com os dados de ajuste  $x_a$ , obtém-se os dados reconciliados  $x$ :

$$x = x_m + x_a \quad (2.10)$$

e, finalmente, o vetor das estimativas para as variáveis não medidas é calculado da seguinte forma:

$$B y = -A x \quad (2.11)$$

$$y = -B^{-1} A x \quad (2.12)$$

## 2.4 TORRE DE RESFRIAMENTO

Torres de resfriamento são equipamentos utilizados para o resfriamento de água industrial que é proveniente do processo, como por exemplo, de condensadores de superfície e trocadores de calor. Existem dois tipos básicos de torres de resfriamento: de contato direto (circuito aberto) e indireto (circuito fechado). O sistema fechado não envolve o contato do ar com o fluido a ser refrigerado. A função básica de uma torre de resfriamento de contato direto é promover contato íntimo entre a água a ser resfriada e o ar ambiente. Este contato é obtido pela passagem da água a ser resfriada através de um recheio, contatando com o ar em fluxo ascendente ou em fluxo cruzado. A maior parte do calor removido é devido à evaporação de uma parte da água, que ocorre pela transferência do calor de vaporização da água ao ar atmosférico (calor latente). O restante do calor transmitido se deve à diferença de temperatura entre os fluidos (calor sensível). O calor latente corresponde a aproximadamente 90 % do calor total transferido (MANUALES TECNICOS Y DE INSTRUCCION PARA CONSERVACION DE ENERGIA, 1983). Portanto o resfriamento é atingido parcialmente pela evaporação de uma fração da água recirculante e parcialmente pela transferência de calor sensível para a fase gasosa.

A água resfriada é coletada em uma bacia de onde retorna para o processo, sendo necessária apenas reposição de uma quantidade de água equivalente às perdas, chamada de

*makeup*. Além da evaporação, as perdas de água são causadas por respingos e purgas. A purga, também conhecida pelo termo em inglês *blowdown* representa a quantidade de água descartada do sistema para controlar a concentração de sais ou outras impurezas na água de recirculação. As impurezas dissolvidas na água são medidas em termos de ciclo de concentração,  $C$ , que é calculado pela razão entre a concentração de sólidos totais dissolvidos na água de resfriamento e sua concentração na água de reposição:

$$c = \frac{\text{concentração de sólidos dissolvidos na água de resfriamento}}{\text{concentração de sólidos dissolvidos na água de reposição}} \quad (2.13)$$

Este parâmetro é frequentemente utilizado para determinar a quantidade de água que deve ser removida do sistema de resfriamento.

Nas condições de equilíbrio, a carga de sais ou outras impurezas que entram no sistema deve ser igual à carga que sai, sendo a variação da purga o meio de controle da concentração da água dentro da torre. O ciclo de concentração adequado para um dado sistema é determinado pelo seu projeto, características da água, parâmetros operacionais e pelo programa de tratamento adotado (BETZ, 1991).

#### BALANÇO MATERIAL

O balanço material global de uma torre de resfriamento operando em regime permanente é dado pela relação:

$$M = E + R + P \quad (2.14)$$

onde:

$M$  = taxa mássica de reposição ( $\text{t.h}^{-1}$ );

$E$  = taxa mássica de evaporação ( $\text{t.h}^{-1}$ );

$R$  = taxa mássica de respingos ( $\text{t.h}^{-1}$ );

$P$  = taxa mássica de purga ( $\text{t.h}^{-1}$ ).

Em termos de concentração de sais dissolvidos ou outras impurezas, a relação pode ser expressa da seguinte forma:

$$M x_m = E x_e + R x_r + P x_p \quad (2.15)$$

onde:

$x_m$  = fração mássica do contaminante na água de *make up*;



$x_e$  = fração mássica do contaminante na evaporação;

$x_r$  = fração mássica do contaminante nos respingos;

$x_p$  = fração mássica do contaminante na purga.

Como a fração mássica de contaminantes na corrente evaporada é igual a zero e a fração mássica de contaminantes nos respingos e na purga são iguais,  $x_r = x_p$ , a equação 2.15 pode ser escrita da seguinte forma:

$$M x_m = (R + P) x_p \quad (2.16)$$

Uma vez atingido o regime permanente, a carga de contaminante que entra deverá ser igual à carga removida, de modo que o ciclo de concentração seja constante.

Rearranjando a equação 2.16 e substituindo na equação 2.13, obtém-se:

$$c = \frac{M}{(R + P)} \quad (2.17)$$

Substituindo M pela equação 2.14, obtém-se:

$$c = \frac{E + P + R}{(P + R)} \quad (2.18)$$

Esta equação pode também ser rearranjada para resolver diretamente a taxa mássica de purga necessária para manter um determinado ciclo de concentração:

$$P = \frac{E}{(c - 1)} - R \quad (2.19)$$

Na parte superior da torre, a água quente entra em contato com o ar da saída, o qual é mais frio que a água. Tanto o processo de transmissão de calor latente como o de calor sensível fazem diminuir a temperatura da água, aumentando deste modo a entalpia do ar. Assim sendo, dependendo da quantidade de ar e da quantidade de evaporação, é possível que a temperatura da água caia para ou abaixo da temperatura de bulbo seco do ar de entrada antes de atingir o fundo da torre. Temperatura de bulbo seco ( $T_{bs}$ ) é a temperatura da mistura vapor e ar indicada por um termômetro normal.

Na parte inferior da torre, a água pode possuir uma temperatura menor ou igual a temperatura de bulbo seco do ar que entra em contato com ela. Neste caso, o calor sensível e a transferência de massa estão em direções opostas. O limite para o qual a temperatura da água pode atingir em uma torre de resfriamento é dado pelo equilíbrio adiabático com o ar da entrada, ou seja, a temperatura de bulbo úmido (KERN, 1982).

Temperatura de bulbo úmido (Tbu) é a temperatura em regime permanente que um termômetro de bulbo úmido atinge quando exposto a uma corrente da mistura de vapor e gás. O bulbo de um termômetro de bulbo úmido fica recoberto com o mesmo líquido que forma o vapor na mistura de vapor e gás (FOUST et al., 1982).

Este comportamento contrário nas duas regiões da torre foi verificado por Zubair et al. (2003), que estudaram o mecanismo de transferência de calor da água para o ar ao longo da altura da torre. Foi demonstrado que o ar, que age como um fluido refrigerante, ao entrar na base da torre, inicialmente à temperatura de bulbo seco, diminui sua temperatura e aumenta antes de sair no topo. Este fenômeno de resfriamento do ar é explicado devido ao fato de que a água, que entra no topo da torre, quando alcança uma região mais baixa é resfriada predominantemente pelo mecanismo de evaporação. Nesta região, a temperatura da água é muito mais baixa que a temperatura de bulbo seco do ar da entrada.

A teoria básica sobre a operação de torres de resfriamento foi primeiramente proposta em 1923 por Walker et al. (1923) apud MOHIUDDIN e KANT (1996) que desenvolveram as equações básicas para a transferência de massa e energia. No entanto, foi Merkel que, em 1925, combinou as equações de transferência de calor e massa e usou a diferença de entalpia como a força motriz para a transferência de calor sensível e latente.

Para o cálculo da taxa de evaporação da torre de resfriamento é necessário ter conhecimento de alguns conceitos importantes.

Umidade absoluta ou umidade específica ( $\omega$ ) - por definição, umidade absoluta é a razão entre as massas de vapor de água,  $m_v$ , e do ar seco,  $m_g$ , presentes na mistura.

$$\omega = \frac{m_v}{m_g} \quad (2.20)$$

Considerando uma mistura de dois gases perfeitos e a lei de mistura de Dalton, tem-se:

$$m_i = \frac{P_i V M_i}{RT} \quad (2.21)$$

onde V é o volume da mistura, T é a temperatura, R é a constante universal dos gases,  $M_i$  e  $P_i$  são a massa molar e a pressão parcial do componente i, respectivamente.

Substituindo essas relações na equação 2.20, e uma vez que a pressão total da mistura, P, é dada pela soma das pressões parciais dos constituintes da mistura,  $P_g$  e  $P_v$ , tem-se:

$$w = \frac{M_v}{M_g} \frac{P_v}{P - P_v} \quad (2.22)$$

Umidade de saturação ( $w_s$ ) - é a umidade absoluta do ar na condição de saturação.

$$w_s = \frac{M_v}{M_g} \frac{P_s}{P - P_s} \quad (2.23)$$

onde  $P_s$  é a pressão de saturação, que pode ser calculada pela equação de Antoine:

$$P_s = \ln(P_c) + \exp \left[ A - \frac{B}{(T + C)} \right] \quad (2.24)$$

onde A, B e C são constantes empíricas e  $P_c$  é a pressão crítica.

Volume específico ( $v$ ) - é a relação entre o volume ocupado pela mistura e a massa de ar seco presente.

$$v = \frac{RT}{P M_g} \left( 1 + w \frac{M_g}{M_v} \right) \quad (2.25)$$

Entalpia do ar úmido (H) - é a entalpia da mistura de ar seco e vapor d'água por unidade de massa de ar seco.

$$H = C_{p_g} (T - T_{ref}) + w [ \lambda + C_{p_v} (T - T_{ref}) ] \quad (2.26)$$

onde  $T_{ref}$  é a temperatura do estado de referência,  $\lambda$  é o calor latente de vaporização específico da água na temperatura do estado de referência e  $C_{p_g}$  e  $C_{p_v}$  são os calores específicos do gás e do vapor, respectivamente.

Calor latente de vaporização ( $\lambda$ ) - é a entalpia necessária para vaporizar uma unidade de uma substância. Da equação de Clapeyron obtém-se:

$$1 M_v = \frac{RT^2}{P_s} \frac{dP_s}{dT} \quad (2.27)$$

onde admite-se que a fase vapor tem comportamento de gás ideal e que o volume molar do líquido é desprezível face ao volume molar do vapor.

A energia cedida pela água, no processo de transferência de calor e massa em uma torre de resfriamento, é igual a recebida pelo ar, de forma que:

$$L C_p dT = G dH \quad (2.28)$$

que integrada da base da torre em direção ao topo tem-se:

$$LC_p(T - T_2) = G(H - H_1) \quad (2.29)$$

que representa a equação da linha de operação. Para  $L$ ,  $C_p$  e  $G$  constantes esta é a equação de uma reta cuja inclinação é  $LC_p / G$ .

onde,

$L$  = taxa mássica de água;

$C_p$  = calor específico da água à pressão constante. Admite-se que seja constante e igual a  $1 \text{ cal.g}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ ;

$T_2$  = temperatura de saída da água da torre;

$G$  = taxa mássica de ar seco;

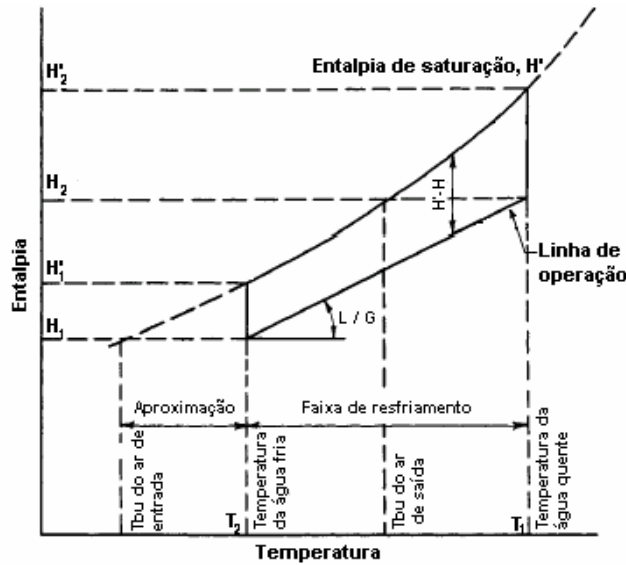
$H_1$  = entalpia do ar na entrada da torre.

Esta equação relaciona a variação de entalpia na fase gasosa com a concomitante variação de temperatura da água em contato com o gás.

Na Figura 2.2 estão representadas as curvas de entalpia do ar saturado (superior) e entalpia do ar que circula na torre (inferior) como função da temperatura. A força motriz é então definida como a diferença de entalpia entre a linha de equilíbrio e de operação. O valor da entalpia em qualquer ponto da linha de operação é dado por:

$$H = H_1 + \frac{L}{G}(T - T_2) \quad (2.30)$$

A entalpia do ar de entrada ( $H_1$ ) é conhecida ou pode ser facilmente determinada pela equação 2.26, conhecendo a temperatura e umidade absoluta do ar na entrada da torre.



**Figura 2.2.** Diagrama Entalpia – Temperatura para os fluxos de ar e ar saturado dentro da torre. Fonte: PERRY et al., 1984.

A taxa de evaporação da água na torre de resfriamento é:

$$E = G(w_2 - w_1) \quad (2.31)$$

onde  $\omega_2$  é a umidade absoluta no topo da torre, considerada como sendo a do ar saturado  $\omega_s$ , e  $\omega_1$  é a umidade absoluta do ar de entrada (KERN, 1982).

### 2.4.1 Classificação das Torres de Resfriamento

As torres de resfriamento podem ser classificadas de acordo com o processo de fornecimento de ar, podendo ser com tiragem mecânica ou natural. As torres de tiragem mecânica podem ser de dois tipos: tiragem forçada, caso os ventiladores estejam situados na parte inferior da torre; tiragem induzida, se os ventiladores estiverem situados no topo. As torres de tiragem de ar induzida se subdividem em duas categorias de acordo com o fluxo de ar em relação à água, que pode ser em contracorrente ou cruzado (KERN, 1982).

O projeto em contracorrente utiliza venezianas de entrada de ar na base da torre que direcionam o ar para cima, contra as gotículas de água que caem sobre o enchimento. No projeto de fluxo cruzado, as venezianas são colocadas ao longo das paredes da torre, fornecendo um fluxo de ar horizontal que compreende toda sua extensão. Dessa maneira, o ar é introduzido perpendicularmente à água que cai (DREW, 1988).

Em Drew (1988) consta que as torres de tiragem mecânica são projetadas de modo a minimizar as perdas de água pelo vento e arraste, a qual é mantida entre 0,005 e 0,3 % da vazão de recirculação. Estima-se que cerca de 85 a 95 % do resfriamento deve-se à evaporação, sendo que o restante é atribuído à transferência de calor por convecção para o ar circundante. Uma aproximação generalizada para estimar a taxa de evaporação é considerar que a cada 5,5 °C de queda de temperatura ao longo da torre, perde-se de 0,85 a 1 % da

quantidade de água recirculada por evaporação. Na literatura encontram-se algumas relações empíricas para estimar a taxa de evaporação, como a encontrada em Betz (1991) apud SMITH et al. (2001):

$$E = \frac{C_E (T_{in} - T_{out}) F_{in}}{560} \quad (2.32)$$

onde:

$E$  = taxa mássica de evaporação ( $t \cdot h^{-1}$ );

$T_{in}$  = temperatura de água quente na entrada ( $^{\circ}C$ );

$T_{out}$  = temperatura de água fria na saída ( $^{\circ}C$ );

$F_{in}$  = taxa mássica de recirculação de água dentro da torre ( $t \cdot h^{-1}$ );

560 = calor latente de vaporização da água ( $kcal \cdot kg^{-1}$ );

$C_E$  = fator adimensional que é função da temperatura ambiente e varia entre 0,75 e 1,0.

Outras relações semelhantes são utilizadas pela indústria em estudo, como as apresentadas a seguir (CADERNO DE INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES, 1998):

$$E = \frac{C_E (T_{in} - T_{out}) F_{in}}{579} \quad (2.33)$$

onde  $C_E$  varia de 0,6 a 0,8 e também é função da temperatura ambiente. O valor admitido para o calor latente de vaporização da água foi de  $579 kcal \cdot kg^{-1}$ .

$$E = \frac{(0,575 + 0,011T_{amb}) C_E (T_{in} - T_{out}) F_{in}}{580} \quad (2.34)$$

e  $C_E$ , neste caso, é um fator adimensional que é função do gradiente térmico e varia de 0,85 a 1,0, e  $T_{amb}$  é a temperatura ambiente em  $^{\circ}C$ .

### **2.4.2 Pré-tratamento da Água de Reposição da Torre de Resfriamento**

A água para reposição de sistemas de resfriamento deve passar por alguns processos de purificação para adequar sua qualidade. Os processos mais usuais são pré-cloração, clarificação e, se necessário, filtração (DREW, 1988). O sistema de pré-tratamento utilizado pela indústria em estudo é de pré-cloração e clarificação. Estes processos não serão discutidos neste item, pois já foram abordados anteriormente.

### **2.4.3 Qualidade da Água de Reposição e da Água de Resfriamento da Torre**

A água de resfriamento (AR) é uma utilidade importante e, em muitos casos, essencial de uma indústria, por isso a importância da otimização deste sistema. Um tratamento não adequado desta água pode trazer sérios problemas na produção e de poluição. A qualidade da água de resfriamento depende, dentre outros fatores, da qualidade da água de reposição.

A partida de um sistema de resfriamento envolve um condicionamento químico que pode ser dividido em três partes: limpeza completa de toda a superfície do metal, formação de um filme protetor passivo na superfície do metal e a manutenção desta proteção. A formação do filme protetor, chamada também de passivação, é um processo de vital importância para a proteção dos equipamentos, pois normaliza e atenua sensivelmente o potencial corrosivo imposto pelo meio, que se mostra bastante intenso nos primeiros dias de operação do sistema. Deve-se realizar este procedimento sempre que houver uma limpeza química ou mecânica do sistema, pois a não realização deste, compromete severamente a vida útil dos equipamentos em contato com a água de resfriamento. Antes da etapa de passivação é imprescindível a realização de uma limpeza das superfícies do metal, pois se estas estiverem contaminadas a formação do filme protetor ficará comprometida (KURITA, 2004; NACE, 1995).

Por este motivo, no início de cada campanha, período de operação contínua de uma torre de resfriamento, é necessário um controle rigoroso da adição dos produtos químicos e do modo de operação, neste último caso, controlando principalmente a vazão de purga e de reposição de água.

### **2.4.4 Problemas relacionados com a qualidade da água de resfriamento**

Os fatores mais críticos que devem ser controlados em uma torre de resfriamento são: incrustação, corrosão e proliferação de microorganismos. Para contornar estes problemas uma quantidade de água é purgada do sistema e produtos químicos são adicionados. A corrosão, os depósitos e o desenvolvimento microbiológico causados pela água podem reduzir a eficiência operacional dos equipamentos de troca térmica e aumentar os custos de manutenção, podendo até interromper a produção, o que traria um prejuízo enorme para a indústria. Um programa de tratamento de água eficaz e bem projetado pode amenizar estes problemas (BETZ, 1991).

#### Corrosão

Independentemente de fatores externos, as águas são naturalmente corrosivas. A extensão dos problemas relacionados à corrosão em meio aquoso depende de alguns fatores (DREW, 1988):

- composição da água: pH, sólidos dissolvidos e suspensos, sais dissolvidos, gases dissolvidos, crescimento microbiológico;
- interação entre a água e os materiais normalmente usados em sistemas de resfriamento;

- temperatura, taxas de transferência de calor, velocidade, tipo de fluxos (laminar ou turbulento).

Com o objetivo de manter o sistema sob controle, os fatores citados devem ser considerados. A causa mais comum da corrosão pela água é a presença de oxigênio e outros gases, como dióxido de carbono e dióxido de enxofre, que formam ácidos quando dissolvidos em água (DREW, 1988). A corrosão é um processo eletroquímico no qual é estabelecida uma diferença de potencial elétrico entre dois metais ou entre diferentes partes de um mesmo metal. O fenômeno acontece em superfícies expostas à ação da água, nas quais se liberam elétrons (regiões anódicas) que, para manter o caráter neutro do metal, fluem até as regiões de caráter eletricamente contrário (regiões catódicas) (PUCKORIUS, 1999).

O pH da água de resfriamento é, em geral, um indicador de corrosão e incrustação. O pH ácido favorece reações que provocam a corrosão, enquanto que o pH alcalino favorece a formação e precipitação de sais. Porém, a formação de depósitos pode provocar um processo de corrosão chamado de corrosão diferencial. A área sob o depósito é deficiente em oxigênio, mas a água acima do depósito contém oxigênio dissolvido, formando, portanto, uma célula de aeração diferencial que resulta em uma extensa corrosão do metal (NACE, 1995).

Os métodos empregados para o controle de corrosão consistem na utilização de inibidores químicos que interferem nas reações que causam a corrosão, formando uma capa protetora nas superfícies metálicas que as protege do ataque corrosivo (NACE, 1995).

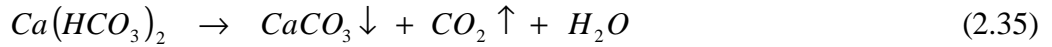
#### Deposição e Incrustação

Os depósitos são caracterizados como materiais fracamente aderidos à superfície metálica, enquanto que as incrustações (*scaling*) são formadas por um depósito inorgânico mais duro e aderente. Um processo incrustante inclui necessariamente uma etapa de nucleação onde ocorre a formação do primeiro cristal que irá iniciar um processo de crescimento cristalino estável, desenvolvendo-se um tipo de depósito denominado de incrustação verdadeira (*true scale*). Os depósitos são formados por sólidos em suspensão, inicialmente dispersos na água, que se separam da fase aquosa e se depositam sobre as superfícies metálicas. Em alguns casos, como nos que envolvem produtos de corrosão, como o óxido férrico por exemplo, podem ocorrer deposições envolvendo os dois mecanismos citados, originando depósitos de natureza mista (BETZDEARBORN, 1998 apud FOFANO, 1999).

Devido à evaporação na torre, os sais inorgânicos presentes na água de recirculação podem se concentrar a tais níveis que o limite de solubilidade desses sais pode ser excedido, iniciando uma formação cristalina que tende a se depositar na superfície dos equipamentos e tubulações promovendo a incrustação. As deposições e incrustações podem causar redução no rendimento térmico, corrosão por deposição, diminuição da vida útil dos equipamentos, aumento de custos de manutenção e paradas não programadas. Os principais causadores de incrustação em sistemas de água de resfriamento são os carbonatos, sulfatos, silicatos e sais de ferro. O carbonato de cálcio é o principal agente causador de incrustação nos sistemas de refrigeração, ele forma depósitos altamente aderentes. A sua formação deve-se à presença e

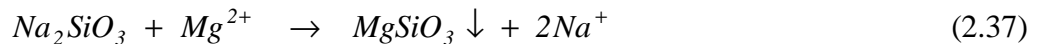
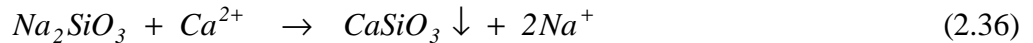


alcalinidade do bicarbonato de cálcio na água de reposição, pois com o fornecimento de calor ou elevação brusca do pH, este se decompõe formando dióxido de carbono e carbonato de cálcio, conforme reação apresentada a seguir (DREW, 1988).



A solubilidade do carbonato de cálcio decresce com o aumento da temperatura e também é extremamente baixa a qualquer temperatura. Em comparação ao sulfato de cálcio, por exemplo, a sua solubilidade é de mais de cem vezes inferior nas temperaturas normais de operação de sistemas de resfriamento.

A presença conjunta de compostos de silício e sais de cálcio e magnésio formam incrustações muito resistentes e de difícil remoção por processos químicos. As reações de formação de silicato de cálcio e magnésio estão apresentadas nas equações 2.36 e 2.37, respectivamente.



Para evitar a formação de incrustações por silicatos deve-se controlar a concentração destes sais no sistema e na água de reposição. Os valores limites são determinados para cada tipo de sistema e tratamento químico adotado (DREW, 1988).

#### Crescimento microbiológico

Os microorganismos presentes na água de resfriamento provêm da água de reposição e do ar que passa através da torre. A torre de resfriamento é um ambiente bastante propício ao crescimento microbiológico devido à temperatura e pH, que estão dentro das faixas ideais, e pela abundância de nutrientes, como matéria orgânica, sais inorgânicos e luz solar. Estes microorganismos podem afetar de modo adverso a eficiência de operação dos sistemas de resfriamento. A atividade microbiana causa uma série de problemas de corrosão, mau cheiro, incrustação e deposição, causando entupimento das tubulações e conseqüente perda de eficiência térmica. O controle microbiológico é realizado através de adição de biocidas apropriados no circuito e utilização de água de reposição de boa qualidade (DREW, 1988).

### **2.4.5 Controle da Água de Resfriamento**

Sistemas evaporativos de resfriamento de água podem operar com altas cargas térmicas e perdas mínimas de água. Esta capacidade, por outro lado, é causa de muitos problemas associadas com o tratamento desses sistemas, visto que quando uma quantidade da água de resfriamento evapora na torre, a concentração de sólidos dissolvidos e em suspensão aumenta. Como os sais dissolvidos possuem limites de solubilidade, poderá ocorrer formação de depósitos, caso estes limites sejam ultrapassados. Estes depósitos reduzem a transferência

de calor, seja pela deposição nas superfícies dos trocadores e/ou pela obstrução de seus tubos. Este efeito de concentração pode ser impedido pela remoção de parte da água concentrada (purga do sistema) e substituição por água de reposição de menor concentração. Quando a água é evaporada, os sólidos e os produtos químicos usados para o tratamento permanecem no sistema. No entanto, quando a água é purgada do sistema, os produtos químicos perdidos através desta purga devem ser adicionados novamente para que o sistema permaneça protegido (MORTENSEN, 2003).

Existem índices de controle da qualidade da água de resfriamento que são amplamente usados pelas indústrias e servem para avaliar o potencial corrosivo ou incrustante desta água. Os mais conhecidos são os índices de Langelier e Ryznar (DREW, 1988). Estes índices são baseados no produto de solubilidade dos sais e no pH da água, relacionando fatores de incrustação e corrosividade que devem estar em equilíbrio. O índice usado neste sistema foi a constante de solubilidade do silicato de magnésio (kps), um composto que em alta concentração pode precipitar e formar um depósito chamado “talco” ( $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ ), uma estrutura cristalina definida que inibe a transferência de calor. As incrustações desta natureza são muito resistentes à remoção por processos químicos. A fórmula do kps do silicato de magnésio relaciona a concentração de óxido de silício  $[SiO_2]$ , de dureza magnésio  $[Mg-H]$ , ambos em ppm, e o pH.

$$kps = ( [Mg - H] 10^{-5} )^3 \left( \frac{[SiO_2]}{6} 10^{-4} \right)^4 ( 10^{-(14-pH)} )^2 \quad (2.38)$$

Deve-se ressaltar que o controle da qualidade da água de resfriamento deve ser elaborado para cada caso específico, baseando-se nos materiais de construção de cada sistema, qualidade da água de reposição e tipo de tratamento recomendado.

## **CAPÍTULO 3**

### **Metodologia de Trabalho**

O estudo foi realizado no Setor de Utilidades da indústria petroquímica Copesul, especificamente na Unidade de Tratamento de Água. A metodologia de trabalho está dividida em três etapas, sendo a primeira o levantamento de dados de vazão das correntes de água e efluentes que fazem parte da unidade em estudo e reconciliação destes dados. A segunda etapa consiste na identificação das possibilidades de reaproveitamento de correntes subutilizadas e caracterização físico-química das mesmas, e a terceira etapa compreende a otimização de um sistema de água de resfriamento, onde se avalia a influência dos custos de água de reposição, da vazão volumétrica do descarte, da qualidade do efluente de descarte e da adição de produtos químicos na água de resfriamento.

#### **3.1 LEVANTAMENTO DE DADOS DAS CORRENTES**

Esta etapa consistiu na identificação de todos os pontos de registro de medição de vazão das correntes, coleta de dados, realização de medidas com instrumento ultra-sônico onde não havia registros e análise da confiabilidade dos medidores de vazão. Por fim, foi realizada a reconciliação dos dados obtidos através de projeção matricial.

Para facilitar a compreensão do estudo realizado, será descrito a seguir, o processo de tratamento de água na indústria.

##### ***3.1.1 Descrição do Tratamento de Água da Indústria***

O processo de tratamento de água da indústria em estudo inclui a captação de água bruta do rio, o tratamento e a distribuição da água para os diferentes consumidores do complexo industrial.

A água bruta passa por um sistema de gradeamento antes de ser bombeada para as adutoras. Este sistema de grades tem a função de reter galhos, folhas, madeira, peixes e outros

materiais mais grosseiros que possam prejudicar o bombeamento da água. Esta água chega a um tanque de mistura rápida, localizado na estação de tratamento de água (ETA), onde recebe tratamento químico, com o objetivo de promover a coagulação e floculação.

Os produtos químicos dosados no tanque de mistura são cloro gás, sulfato de alumínio, polieletrólito e hidróxido de cálcio. O cloro atua na desinfecção da água e na proteção dos sistemas de distribuição contra os microorganismos e também auxilia no processo de clarificação através da oxidação da matéria orgânica. O sulfato de alumínio age como coagulante, o polieletrólito como coagulante auxiliar e o hidróxido de cálcio é usado para a correção do pH. A dosagem destes produtos químicos é realizada manualmente por operadores e conduzida de acordo com a vazão e qualidade da água bruta.

Na etapa seguinte, a água passa por um clarificador do tipo manta de lodo onde ocorre a floculação, um processo de mistura que provoca colisões entre as partículas coaguladas anteriormente, tornando-as maiores para serem mais facilmente removidas por sedimentação. Estes sólidos são descartados, na forma de lodo, e seu descarte pode ser realizado de forma automática ou manual pelos operadores, variando de acordo com a qualidade da água bruta e com a quantidade de água tratada. Nas estações chuvosas, por exemplo, a qualidade da água bruta diminui, pois a quantidade de sólidos suspensos aumenta sendo necessário intensificar a dosagem de produtos químicos para manter a qualidade da água clarificada, o que resulta em geração de maior quantidade de lodo e, conseqüentemente, maior descarte. O contrário ocorre nos períodos de seca em que a água bruta é de melhor qualidade. Este lodo é descartado em um tanque e enviado para uma bacia de sedimentação, onde é misturado com as cinzas provenientes da queima do carvão nas caldeiras. Após sedimentação, este resíduo é vendido para uma indústria de fabricação de cimento.

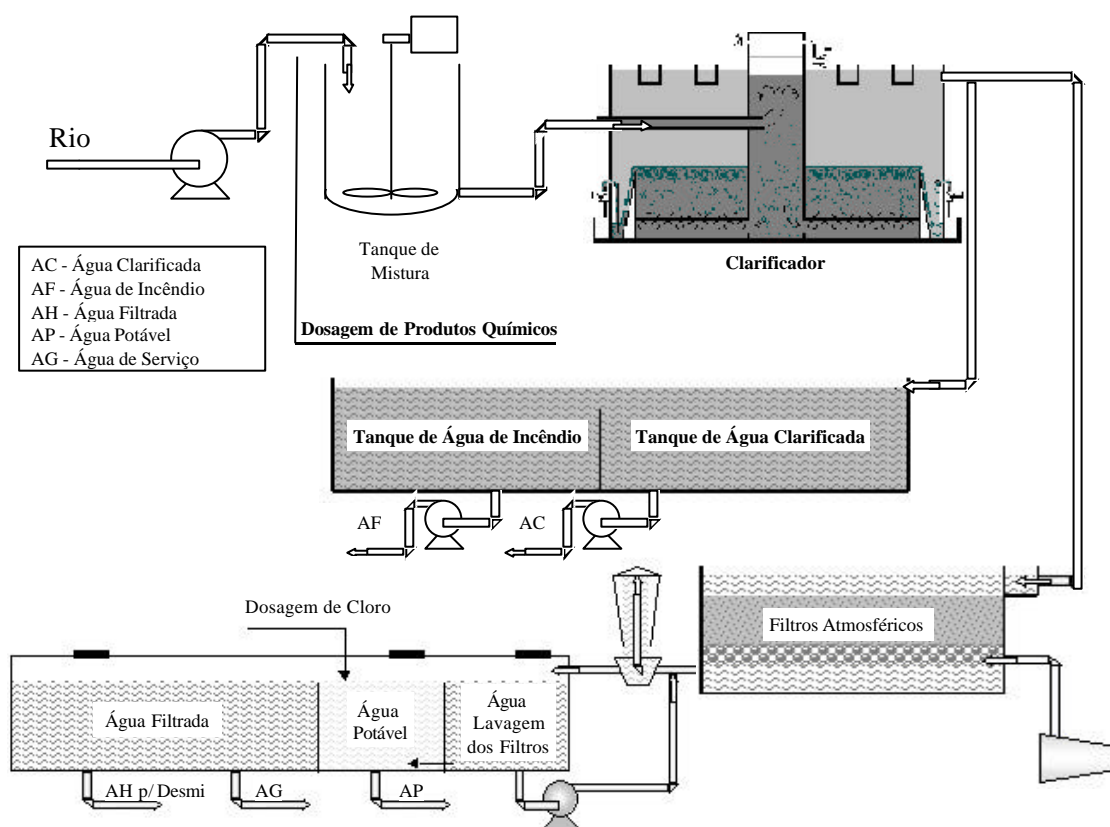
Após esta etapa, a água é classificada como água clarificada (AC) e é dividida em duas correntes: uma delas é enviada a um tanque de armazenamento (Tanque de AC) para ser utilizada como água de resfriamento, água de combate a incêndio e água de transporte de resíduos do sistema de geração de vapor; a outra corrente é enviada para os filtros de areia atmosféricos. A água clarificada que vai para o sistema de resfriamento abastece duas torres de resfriamento, uma de tiragem forçada (Torre I) e outra de tiragem induzida (Torre II).

A água clarificada destinada ao transporte de resíduos do sistema de geração de vapor é utilizada na reposição do tanque de água para arraste de cinzas. No processo de geração de vapor, um dos combustíveis usado nas caldeiras é o carvão, que após a sua queima gera cinzas como resíduo. Estas podem ser pesadas e/ou leves. A cinza leve é arrastada com os gases de combustão para os precipitadores eletrostáticos e posteriormente armazenada em silos. A cinza pesada se deposita em uma bacia chamada “fundo de fornalha” de onde é arrastada com água, via tubulação, para um tanque de armazenamento, e depois para uma bacia de sedimentação, a mesma em que o lodo dos clarificadores é depositado. Uma parte da água sobrenadante desta bacia retorna para o tanque de água para arraste de cinzas. Neste tanque há um medidor de nível que envia um sinal para uma válvula quando o nível está baixo, liberando água clarificada até o nível ser restabelecido. Este processo não apresenta uma

frequência definida, depende das condições de operação das caldeiras, as quais, além do carvão, são alimentadas por outros combustíveis.

A água clarificada, que é enviada ao Tanque de AC, abastece toda a indústria petroquímica e também outras indústrias do complexo petroquímico (indústrias coligadas). A outra corrente de água clarificada abastece os filtros de areia atmosféricos, que têm a finalidade de reter partículas suspensas remanescentes do processo de clarificação.

A corrente de água filtrada, por sua vez, é dividida e coletada em três tanques separados. O primeiro tanque é o da água de lavagem dos próprios filtros, o segundo é o tanque de água potável (AP) e o terceiro é o de água de serviço (AG) e de água filtrada (AH). A água filtrada é enviada para o pré-tratamento do sistema de osmose inversa. Uma representação esquemática do fluxograma dos processos de clarificação e de filtração está mostrado na Figura 3.1.



**Figura 3.1.** Representação esquemática dos processos de clarificação e filtração do sistema de tratamento de água.

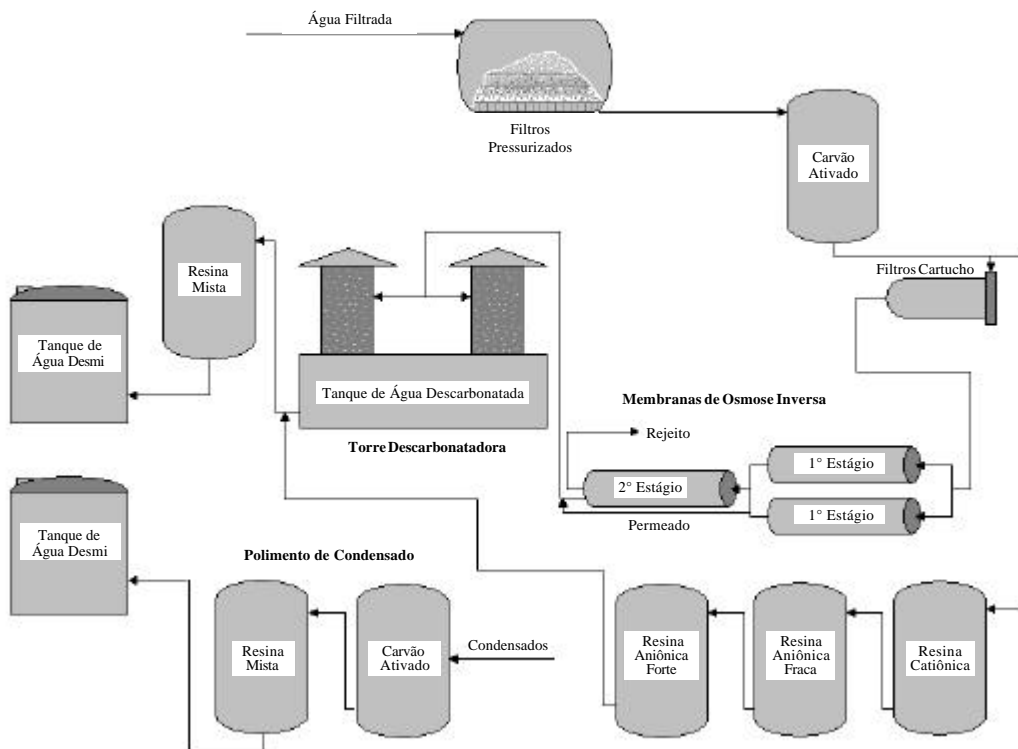
A água filtrada que abastece o sistema de osmose inversa passa por um sistema de pré-tratamento, como mostrado no fluxograma da Figura 3.2. Este sistema é composto por:

- filtração em filtros pressurizados de areia e antracito que têm a finalidade de reter material suspenso remanescente da filtração anterior;
- filtração em filtros de carvão ativado que têm a função de eliminar o cloro que foi adicionado no pré-tratamento, reter material suspenso e matéria orgânica;

- dosagem de produtos químicos que atuam como dispersantes e anti-incrustantes, além daqueles que reagem com o cloro livre que não foi removido pelo carvão ativado;
- filtração em filtros cartucho com tamanho de poro nominal de 3  $\mu\text{m}$ , os quais retêm qualquer sólido que por ventura tenha passado pelo carvão ativado ou provenientes da própria tubulação.

O tratamento seguinte é o processo de desmineralização da água pelo sistema de separação por osmose inversa. Este processo remove as impurezas minerais presentes na forma de sais dissolvidos e ionizados. O rejeito é reaproveitado como água clarificada sendo enviado para o Tanque de AC. O permeado segue para a torre descarbonatadora, uma torre de separação líquido – gás que tem a finalidade de separar e remover o dióxido de carbono dissolvido na água, pois este é prejudicial às caldeiras devido a sua alta corrosividade. A torre descarbonatadora recebe o permeado pela parte superior que através de um sistema de aspersão é distribuída sobre um recheio, cuja finalidade é aumentar a superfície de contato entre o líquido e o gás. Simultaneamente, um fluxo de ar ascendente entra em contato com a corrente de água removendo o dióxido de carbono.

Por fim, a água é tratada por resinas de troca iônica mistas, que têm a finalidade de reter os íons ainda existentes, normalmente sílica e sódio que tenham eventualmente permeado pela membrana. Essa água é estocada em tanques de onde segue para desaeradores, que são equipamentos destinados à remoção do  $\text{O}_2$  e  $\text{CO}_2$  dissolvidos na água pela passagem de vapor em contracorrente. Após esta operação, a água é finalmente enviada para as caldeiras para a produção de vapor de superalta pressão.



**Figura 3.2.** Representação esquemática do processo de desmineralização da água filtrada.

Parte do vapor gerado, após o seu uso, retorna para a ETA na forma de condensado. Este condensado, produzido no processo, é tratado em filtros de carvão ativado e resinas mistas de troca iônica e retorna para as caldeiras. Este tratamento, denominado de polimento de condensado, tem como finalidade garantir que a qualidade final do condensado tenha as mesmas características da água desmineralizada. O reaproveitamento do condensado visa diminuir a reposição de água desmineralizada, reduzindo os custos na produção de vapor.

### **3.1.2 Balanço Hídrico**

Um projeto de minimização e reuso de água necessita de um bom conhecimento da área onde será implantado. A realização de um balanço hídrico é primordial para a avaliação sistemática de oportunidades para reuso e minimização do consumo de água.

A realização do balanço de massa foi precedido por algumas medidas importantes que tiveram como objetivo dar consistência aos dados coletados. Primeiramente foram estabelecidas as fronteiras para a realização do balanço. Foram identificadas as fontes de água fresca e fontes alternativas, como efluentes de processo que se encontram próximos do local onde o balanço foi realizado. Os dados coletados para a realização do balanço hídrico podem ser obtidos levando-se em consideração diferentes fontes de informação, como dados de projeto, registro de medidas, estimativas e medições em campo, se necessário.

A primeira etapa para o desenvolvimento deste trabalho foi o reconhecimento da área industrial em estudo. Foi realizado um estudo detalhado dos diagramas de fluxo, tubulações e instrumentação do sistema de distribuição de águas e geração de efluentes da Unidade de Utilidades. Nesta etapa foram identificados todos os pontos onde havia registros de vazão e, com estes dados, construiu-se um fluxograma preliminar do processo. Os valores de vazão foram coletados do sistema de registro utilizado pela empresa. Através deste fluxograma preliminar, foi possível identificar os pontos onde não havia registros de vazão e, dentre estes, quais são importantes para a consistência do balanço. Pode-se também constatar que o balanço hídrico não foi satisfeito usando os dados de vazão coletados do sistema de registro, pois não seguiam as leis básicas de conservação de massa. Para auxiliar na identificação de oportunidades de melhorias, é de fundamental importância que se faça um balanço hídrico bem detalhado e consistente. Além disso, para o enriquecimento do estudo, foi importante ouvir todas as sugestões apresentadas pelos funcionários da indústria, pois eles detêm o conhecimento e a experiência de anos de operação.

O levantamento dos dados de vazão das correntes foi realizado de três formas distintas, considerando registros existentes, medição de vazão por equipamento de ultra-som e finalmente, por fechamento de balanço.

#### LEVANTAMENTO DE DADOS DE VAZÃO POR REGISTROS EXISTENTES

Após cuidadosa investigação e análise da planta, foi realizado um levantamento de dados de vazão através de um sistema de registros de dados instantâneos. A partir do registro mensal do consumo de água, foi calculada a sua vazão média em  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Como este consumo varia sazonalmente, foram usadas as médias anuais para a construção do balanço hídrico.

O balanço hídrico não foi satisfeito utilizando os dados de vazão coletados do sistema de registro. Por este motivo, foi realizada uma verificação de todos os instrumentos de medida de vazão comprometidos no balanço. O primeiro passo foi a verificação das folhas de dados dos instrumentos e comparação destas informações com os dados registrados nos instrumentos em campo e com os dados registrados no sistema de controle. A folha de dados é um documento onde constam todas as especificações do instrumento e condições de uso. Estas especificações devem ser seguidas rigorosamente e atualizadas, quando necessário, para que se tenha um controle efetivo do processo, pois a falta de atualização dos dados gera perdas de informações e conseqüente redução da qualidade nos serviços. Após esta verificação, foi realizada a aferição dos instrumentos em que os dados obtidos das diferentes fontes não coincidiam.

Alguns instrumentos estavam com as tomadas de pressão obstruídas e foi necessária uma limpeza mecânica. Outros instrumentos estavam mal instalados em relação à posição das tomadas de pressão. Sabe-se que em tubulações onde escoam substâncias em estado líquido, as tomadas de pressão dos medidores devem estar localizadas na parte lateral da tubulação, e não na parte superior, como observado em alguns casos.

As fontes de informação usadas para avaliar os instrumentos foram as seguintes:

- diferencial de pressão - campo: valor do diferencial de pressão indicado pelo instrumento em campo (mmH<sub>2</sub>O);
- diferencial de pressão - folha de dados: valor do diferencial de pressão para cada instrumento registrado na folha de dados (mmH<sub>2</sub>O);
- diferencial de pressão - instrumento: valor fixado em etiquetas junto ao instrumento de medida em campo (mmH<sub>2</sub>O);
- vazão - sistema de controle: intervalo de vazão registrado no sistema de controle (m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>);
- vazão - folha de dados: intervalo de vazão para cada instrumento registrado na folha de dados (m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>);
- condições de instalação: posição das tomadas de pressão na tubulação.

Estes medidores de vazão, tipo placa de orifício, operam através da medida da diferença de pressão produzida por uma constrição no escoamento. Disposta de forma conveniente na tubulação, a constrição produz uma restrição das linhas de fluxo, o que induz a uma queda de pressão ( $\Delta P$ ). Os medidores de vazão por pressão diferencial variável podem ser genericamente divididos em duas partes: uma parte, chamada de elemento primário, é a que entra em contato direto e interage com o fluido; a outra, o elemento secundário, serve para a conversão do diferencial de pressão em vazão ou massa.



O princípio de funcionamento destes medidores está baseado na lei da conservação de energia, expressa pela equação de Bernoulli aplicada à seção da tubulação onde está instalada a restrição. Considerando que não haja variação na altura, que as velocidades de entrada e saída sejam as mesmas, que não haja variação do diâmetro da tubulação, que o fluido seja incompressível e o regime turbulento, tem-se que a vazão (Q) é diretamente proporcional à raiz quadrada da queda de pressão ( $\sqrt{-\Delta P}$ ) da seguinte maneira:

$$Q = A C \sqrt{-\Delta P} \quad (3.1)$$

onde A é a área da seção transversal da tubulação e C uma constante que depende do fluido e do tipo de escoamento (LIPTÁK, 1995).

Então, para cada valor de pressão diferencial está associada uma vazão. A pressão diferencial é convertida em valores de vazão através de transdutores de pressão, que transformam o sinal da variável medida em sinais possíveis de serem enviados de forma elétrica. É imprescindível que haja certeza das correlações existentes entre as medidas inferidas e as características específicas dos elementos primário e secundário utilizados na medição.

A partir das informações obtidas através desta avaliação, optou-se por realizar medidas de vazão com um instrumento ultra-sônico portátil para a verificação da vazão de algumas correntes. Também foram realizadas medidas para a obtenção de dados de vazão de correntes que não são registradas.

#### MEDICÃO DE VAZÃO POR ULTRA-SOM

Os instrumentos de medição de vazão por ultra-som são medidores que usam a velocidade do som como meio auxiliar de medição. Os medidores ultra-sônicos podem ter dois princípios de funcionamento: medidores de tempo de trânsito e de efeito Doppler % (LIPTÁK, 1995).

O instrumento utilizado foi do tipo tempo de trânsito, portátil e de instalação relativamente fácil. Para a estimativa da vazão são necessários dados como diâmetro, espessura e material da tubulação, além das propriedades do fluido. Um transdutor emissor e outro receptor de ultra-som são fixados em lados opostos da parede da tubulação, com posições predeterminadas de acordo com o diâmetro da tubulação. Os transdutores transmitem e recebem alternadamente um conjunto de ondas ultra-sônicas de pequena duração. A vazão é determinada em função do tempo que o sinal acústico leva para ir do transdutor emissor até o receptor. Estes instrumentos não são adequados para medir vazão de fluidos que contêm partículas em suspensão, pois uma medição de vazão bem sucedida depende do deslocamento do sinal de ultra-som no líquido. Quando usado corretamente, o aparelho apresenta incerteza inferior a 3 % (LIPTÁK, 1995).

A corrente mais importante que não apresenta registro de vazão, e tem um consumo relativamente alto, é a de água de combate a incêndio. Esta água é usada para resfriar alguns

equipamentos que não são totalmente supridos com a água de resfriamento. Este uso é indevido e medidas para a resolução deste problema já estão sendo tomadas para que esta água seja usada somente para o fim a que se destina.

Com o objetivo de obter um balanço hídrico confiável, foi verificada a vazão das principais correntes envolvidas. Para as correntes em que os valores medidos em campo e os registrados pelo sistema de controle não coincidiam, foram realizadas quatro medidas em vazões diferentes, através de manobras na regulação das válvulas. As vazões foram comparadas com as armazenadas no sistema de registro no mesmo intervalo de tempo em que as medições foram realizadas. As seguintes correntes foram medidas:

- água clarificada que alimenta os filtros de areia atmosféricos;
- água clarificada para coligadas;
- água clarificada para abastecimento da própria indústria;
- água filtrada para o sistema de desmineralização;
- água filtrada para os filtros pressurizados de areia e antracito;
- água permeada pelo sistema de osmose inversa.

O instrumento que registra o consumo de AC para as indústrias coligadas contabiliza também o consumo de AC para o arraste de cinzas das caldeiras. O controle efetivo do consumo de AC para as indústrias coligadas é realizado através de medidores individuais.

Não foi possível encontrar correlação entre os dados medidos em campo e os registrados pelo sistema de controle para o instrumento que registra a vazão da corrente de AC para abastecimento da própria indústria. Este fato permitiu constatar que as medidas registradas por este instrumento não apresentam confiabilidade.

Algumas restrições impossibilitaram a medição de vazão por ultra-som de algumas correntes, sendo elas: diâmetro de tubulação superior ao limite máximo permitido pelo aparelho; incrustação no interior da tubulação não permitindo a transferência do sinal de ultra-som; tubulações que não apresentavam o comprimento mínimo de tubulação livre de acessórios, como por exemplo, conexões, válvulas e curvaturas. Essas correntes foram:

- água bruta - diâmetro da tubulação superior ao limite máximo permitido pelo instrumento;
- água clarificada para reposição da Torre de Resfriamento II – baixa transmissão do sinal de ultra-som, provavelmente pela presença de incrustação no interior da tubulação.

Para algumas correntes foi suficiente realizar apenas uma medida, pois constatou-se que os valores de vazão obtidos por ambos os instrumentos eram similares. Neste grupo, encontram-se as seguintes correntes:

- água clarificada para reposição da Torre de Resfriamento I;
- água desmineralizada - saída dos vasos de resina mista.

### **3.1.3 Reconciliação de Dados**

Após realizado todo o levantamento das vazões das correntes, fez-se um ajuste nestes valores usando um método de reconciliação de dados denominado projeção matricial. Este método ajusta os valores medidos e faz uma estimativa para aqueles valores não medidos. Através de operações matriciais foi possível estabelecer o balanço hídrico do sistema. A rotina de cálculo empregada em MATLAB<sup>®</sup> versão 5.3 é apresentada no Apêndice B.

## **3.2 ESTUDO DO APROVEITAMENTO DAS CORRENTES**

Após a obtenção de dados consistentes das vazões para a realização do balanço hídrico, foram feitas a identificação das correntes potenciais para o reaproveitamento, caracterização das mesmas quanto a sua vazão e qualidade físico-química e, por fim, sugeridas duas configurações para o mesmo.

### **3.2.1 Identificação das Correntes Potenciais para o Reaproveitamento**

Existem dois tipos básicos de reaproveitamento de correntes, o reuso e o reciclo. Entende-se por simples reuso o reaproveitamento da corrente, sem tratamento prévio, em um ponto de consumo diferente do qual foi gerada. Já o reciclo, é o reaproveitamento da corrente, sem tratamento prévio, no mesmo ponto onde esta foi gerada. Estas opções podem incluir a regeneração da corrente antes de ser reaproveitada, que depende da qualidade que se deseja obter (WANG e SMITH, 1994a). Sempre que possível, o reuso e o reciclo devem ser priorizados, pois são técnicas mais simples e de menor custo.

Verificou-se que as operações que apresentam maior potencial de reaproveitamento são as operações de lavagens e enxágüe de equipamentos. Estas correntes foram caracterizadas em termos de vazão e concentração de alguns contaminantes. Para quantificar o consumo médio de água necessária para estas operações, foram usados dados registrados pelo sistema, acompanhamento de desnível de tanques e estimativas de capacidade das bombas, quando aplicável. Não foram usados os dados de projeto, porque a situação atual pode não ser a mesma em função do crescimento da demanda do processo.

Como as operações identificadas para o reaproveitamento estão localizadas após a etapa de clarificação da água, um possível usuário para estes efluentes poderia ser algum processo que utiliza água clarificada. Em vista disso, foram selecionadas algumas análises para a caracterização da qualidade das correntes. As amostras foram caracterizadas segundo

os parâmetros apresentados na Tabela 3.1. Também foram analisadas, segundo às análises listadas, a água clarificada e a água bruta, por serem possíveis receptoras das correntes a reutilizar.

**Tabela 3.1.** Características monitoradas nas correntes para o reaproveitamento.

Parâmetros	Unidade	Descrição
pH		Concentração de íons H <sup>+</sup> .
Turbidez	NTU - Unidade de Turbidez Nefelométrica	Intensidade de luz difundida por uma amostra.
Sólidos Suspensos (SS)	mg L <sup>-1</sup>	Partículas de matéria coloidal, como argila, lodo, partículas de areia, óxidos metálicos, etc.
Dureza Cálcio (Ca-H)	mg L <sup>-1</sup> de CaCO <sub>3</sub> (Carbonato de Cálcio)	Concentração de sais de cálcio presentes capazes de formar precipitados insolúveis.
Dureza Magnésio (Mg-H)	mg L <sup>-1</sup> de CaCO <sub>3</sub>	Concentração de sais de magnésio presentes capazes de formar precipitados insolúveis.
Dureza Total (T-H)	mg L <sup>-1</sup> de CaCO <sub>3</sub>	O somatório da dureza cálcio e magnésio.
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	mg L <sup>-1</sup> de O <sub>2</sub>	Quantidade de oxigênio requerida para oxidar a matéria orgânica para gás carbônico e água.
Ferro (Fe)	mg L <sup>-1</sup> de Fe	Concentração de íons de ferro presentes.
Sílica (SiO <sub>2</sub> )	mg L <sup>-1</sup> de SiO <sub>2</sub>	Concentração de óxido de silício presente, causador de incrustação de alta dureza.

Foram realizadas quatro amostragens, em dias diferentes, para cada corrente em estudo. Em virtude de que estes efluentes apresentam características distintas durante o processo, foram coletadas amostras em dois tempos diferentes, uma no início e a outra na metade do período de lavagem e de enxágüe. As análises foram realizadas pelo laboratório da empresa.

### 3.2.2 Configurações Propostas para o Reaproveitamento

Foi realizado um estudo do espaço físico, identificação de tubulações e equipamentos existentes, distâncias entre as operações em estudo e de posse de todas estas informações foi possível propor configurações para o reaproveitamento das correntes.

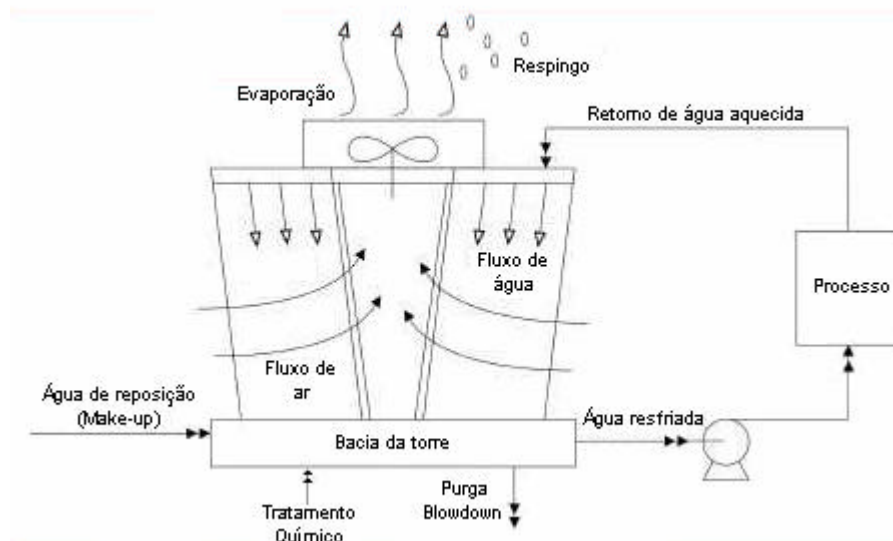
## 3.3 OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE RESFRIAMENTO

Neste item será descrita a metodologia empregada para a obtenção de dados para a realização do balanço de massa e energia da torre de resfriamento, bem como a descrição do algoritmo empregado.

### 3.3.1 Descrição da Torre de Resfriamento

A torre em estudo, conforme mostrado na Figura 3.3, é uma torre do tipo tiragem induzida de ar, fluxo cruzado, onde a água a ser resfriada é bombeada para o topo da torre, de onde é distribuída sobre o recheio. O sistema de distribuição permite que a água aquecida, a aproximadamente 45 °C, seja espalhada de maneira uniforme por toda a área transversal da torre. Os ventiladores axiais succionam o ar através da água que está caindo sobre o recheio, provocando a evaporação. O ar entra na torre pelas venezianas laterais percorrendo horizontalmente o enchimento até atingir o eliminador de respingos, de onde é expulso para a atmosfera. A água resfriada, a aproximadamente 30 °C, é armazenada na bacia da torre, de onde retorna novamente para o processo. Para suprir as perdas de água por evaporação, respingos e purgas, é necessária uma reposição de água na torre, também conhecida como *make up*. A vazão de recirculação da torre de resfriamento é de aproximadamente 32.000 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>.

O balanço material para a água da torre de resfriamento pode ser determinado se três das seguintes taxas forem conhecidas: taxa de água de reposição, taxa de evaporação, taxa de respingos e taxa de purga. A relação entre a qualidade da água de purga e a água de reposição é conhecida como “ciclo de concentração”. O uso mais eficiente da água ocorre quando o ciclo de concentração aumenta e a taxa de purga diminui, para tanto, é necessário um bom programa de tratamento da água de resfriamento, bem como de uma boa qualidade da água de reposição.



**Figura 3.3.** Representação esquemática de uma torre de resfriamento de tiragem induzida.

O sistema de resfriamento de tiragem induzida é constituído de duas torres, uma composta por nove e a outra por três células. A fotografia da torre em estudo está disposta na Figura 3.4.



**Figura 3.4.** Torre de resfriamento de tiragem induzida da indústria.

Os fatores mais críticos que devem ser controlados em uma torre são: incrustação, corrosão e proliferação de microorganismos. Para manter a água de resfriamento dentro dos limites de concentração são adicionados produtos químicos. O objetivo desta adição é evitar que os contaminantes precipitem na superfície dos equipamentos. Também é realizada uma purga do sistema, que tem como objetivo manter constante a concentração, cujo aumento é causado pela evaporação.

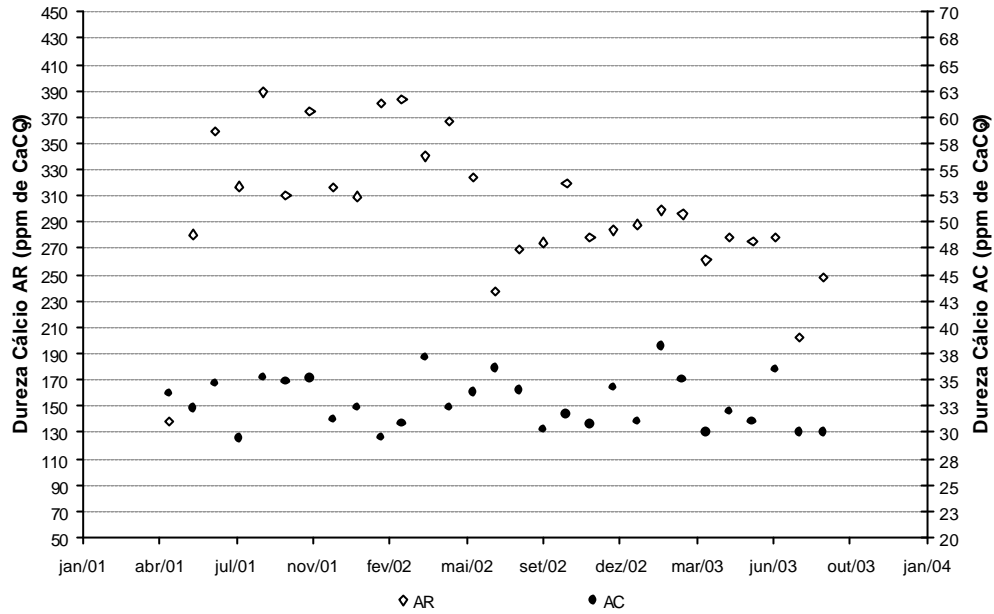
A purga da torre, também chamada de *blowdown*, é um efluente caracterizado como efluente inorgânico (EI) e deve ser minimizado. Há limites de concentração para o descarte dos efluentes inorgânicos, impostos pela legislação, que devem ser obedecidos. A concentração do efluente inorgânico gerado pela indústria não deve ultrapassar 50 ppm de DQO sob pena de multa pelos órgãos ambientais.

### **3.3.2 Qualidade da Água de Reposição e da Água de Resfriamento da Torre**

A água de reposição da torre de resfriamento é composta por água clarificada (AC) e água de rejeito da osmose inversa. A vazão do rejeito da osmose inversa é de aproximadamente 8 % da vazão total de água clarificada. O efeito principal deste reaproveitamento consiste no recrudescimento da água clarificada em termos de concentração de alguns sais, por exemplo, de cálcio, magnésio e de sílica. O reuso deste rejeito implica diretamente no acréscimo da concentração destes sais na água de recirculação da torre de resfriamento.

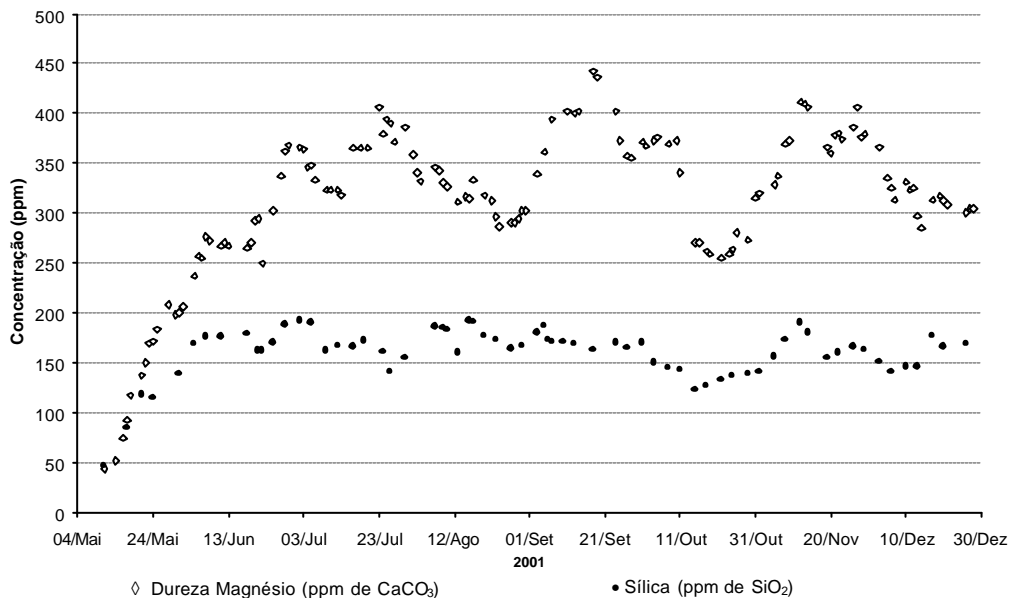
Nas Figuras 3.5, 3.6 e 3.7 é possível verificar as tendências das concentrações de sílica, dureza cálcio e magnésio na água de reposição e de resfriamento desde o início da operação do sistema de resfriamento, campanha atual, iniciada em maio de 2001 (HISTÓRICO





**Figura 3.7.** Concentração de dureza cálcio na água clarificada e água de resfriamento desde o início da atual campanha.

Na Figura 3.8 são mostradas as tendências das concentrações de sílica e dureza magnésio na água de resfriamento no período inicial da operação do sistema de resfriamento. Observa-se uma rápida concentração destes sais no primeiro mês de operação, obtida pela baixa taxa de purga aplicada neste período.



**Figura 3.8.** Tendências das concentrações de sílica e dureza magnésio da água de resfriamento no início da campanha atual.

Como pode ser observado na Figura 3.8, há uma concentração dos sais de magnésio e sílica nas primeiras semanas de operação da torre de resfriamento até atingir um patamar mais ou menos constante. Neste período a taxa de purga do sistema foi mantida mais baixa,



umentando o seu valor gradativamente até o estabelecimento de um comportamento quase estacionário. Não é interessante manter uma concentração muito baixa de sais na água de resfriamento, pois o sistema se torna ineficiente economicamente, necessitando de uma maior taxa de purga que implica em um aumento do consumo de água, geração de efluentes e perdas de produtos químicos pelo descarte. A eficiência de um sistema de resfriamento envolve, entre outros fatores, a maximização dos ciclos de concentração e a minimização do consumo de água e da geração de efluente, conseguida por um bom tratamento químico da água de resfriamento e uma boa qualidade da água de reposição (DREW, 1988).

### **3.3.3 Análises de DQO das Correntes do Efluente Inorgânico**

O EI é composto principalmente pelas seguintes correntes: purgas de duas torres de resfriamento, efluente gerado pela regeneração e enxágüe dos vasos de troca iônica e efluente da limpeza química das membranas. Com o objetivo de avaliar o potencial contaminante de cada corrente foram realizadas análises de DQO desses efluentes. A contribuição em vazão das purgas das torres de resfriamento em relação à geração total de EI é de aproximadamente 70 %. O objetivo é minimizar a carga do efluente gerado, seja pela diminuição da concentração ou da vazão da corrente de purga. Todos os efluentes gerados pela indústria são tratados por uma empresa terceirizada.

Antes de ser enviado para o tratamento de efluentes inorgânicos, uma parte do efluente gerado é enviado para um tanque, denominado de Tanque de EI. Este tanque recebe as seguintes correntes:

- efluentes gerados pela regeneração das resinas de troca iônica;
- efluente da limpeza química das membranas e “*flushing*”;
- efluente do laboratório de análises químicas da ETA;
- lavagem dos vasos de carvão ativado do sistema de retorno de condensados;
- drenagem do tanque de preparação de hidróxido de cálcio que é usado na correção do pH da água bruta.

As purgas das torres de resfriamento são enviadas diretamente para o tratamento de efluentes inorgânicos.

Foram coletadas amostras das correntes de purgas das torres de resfriamento de tiragem forçada (Torre I) e de tiragem induzida (Torre II), do tanque de armazenamento de EI e da mistura dos efluentes que compõem o EI. Nestas amostras foram realizadas análises de DQO usando duas metodologias distintas. O motivo pelo qual foi usada estas duas metodologias é porque o controle de DQO para a água de resfriamento é realizado usando a metodologia da oxidação pelo permanganato ( $DQO_{Mn}$ ), enquanto que a usada para determinar a DQO do EI, é a oxidação pelo dicromato de potássio ( $DQO_{Cr}$ ). Estes dois métodos

apresentam resultados totalmente diferentes, pois o dicromato de potássio é um agente oxidante mais forte que o permanganato de potássio, por isso, é capaz de oxidar substâncias orgânicas e inorgânicas, resultando, dessa forma, em uma oxidação mais completa e, conseqüentemente, em um valor maior de DQO em relação ao método que usa permanganato de potássio.

Os resultados das análises de DQO da AC e da AR disponíveis nos históricos da Torre II são de  $DQO_{Mn}$ . Para realizar o balanço material do sistema de resfriamento é necessário converter estes dados para  $DQO_{Cr}$ , pois o controle da concentração é baseada nesta metodologia. Em vista disso, foi estabelecida uma relação entre os resultados obtidos, analisando cada amostra pelas duas metodologias de determinação de DQO. A seguir estão descritas as duas metodologias empregadas.

#### METODOLOGIA 1. OXIDAÇÃO POR PERMANGANATO DE POTÁSSIO

As análises de DQO foram realizadas pelo laboratório da área responsável pelo tratamento da água de resfriamento. As análises seguiram a metodologia descrita no *Japan Internation Standard* - JIS - K0101, (1991). A amostra é oxidada por uma solução padrão de permanganato de potássio em meio ácido. O excesso de permanganato é determinado por titulação indireta com solução padrão de oxalato de sódio. A incerteza da metodologia é de  $\pm 5\%$ .

#### METODOLOGIA 2. OXIDAÇÃO POR DICROMATO DE POTÁSSIO

As análises de DQO foram realizadas pelo laboratório de análises químicas da indústria e o método usado segue o *Standard Methods* 5220-B (APHA, 1998). Este método consiste na oxidação da amostra mediante aquecimento e refluxo em solução fortemente ácida ( $H_2SO_4$ ) com um excesso conhecido de dicromato de potássio, em presença de sulfato de prata, que atua como agente catalisador. Após a digestão, a quantidade de dicromato de potássio não reduzida é titulada com uma solução de sulfato ferroso amoniacal, utilizando como indicador do ponto final o complexo ferroso de ortofenantrolina (ferroína). A incerteza da metodologia é de  $\pm 4,8\%$ .

### **3.3.4 Análises de $DQO_{Cr}$ dos Produtos Químicos Utilizados no Tratamento da AR**

Foi realizado também um estudo sobre a contribuição de DQO causada pelos produtos químicos adicionados na torre. Foram preparadas soluções com a mesma concentração dos produtos químicos usados no tratamento da água de resfriamento. Essas soluções foram preparadas através de diluição em água clarificada de soluções concentradas do produto químico. As análises foram realizadas pelo laboratório de análises químicas da indústria. No total são cinco produtos químicos usados no tratamento. Serão usados nomes fictícios para a identificação dos produtos, como por exemplo: produto químico I - (PQ-I). Os produtos analisados foram:

- inibidor de incrustação (PQ-I);
- inibidor de incrustação e corrosão (PQ-II);
- dispersante (PQ-III);
- inibidor de corrosão (PQ-IV);
- agente complexante de cloro (PQ-V).

Com os resultados obtidos foi possível estimar a carga de DQO dentro da torre que é causada pela adição dos produtos químicos.

### 3.3.5 Balanço de Energia da Torre de Resfriamento

No balanço de água da torre de resfriamento há quatro correntes envolvidas: taxa de reposição de água, taxa de evaporação, taxa de respingos e taxa de purga. Um medidor de vazão registra a taxa de reposição de água, a taxa de purga é controlada por um tanque de nível, a taxa de respingos é estimada por uma relação empírica (4 vezes o número de ventiladores em operação) e a taxa de evaporação é calculada pela diferença do balanço material. Foi realizado um balanço energético da torre de resfriamento com o objetivo de se estimar, com maior exatidão, a taxa de evaporação. Para a realização do balanço de energia é necessário conhecer os seguintes parâmetros: temperaturas da água fria, da água quente, de bulbo úmido do ar de entrada e saída, de bulbo seco do ar de entrada, vazões do líquido e do ar. Testes foram realizados na torre de resfriamento para a obtenção de algum destes dados, seguindo o procedimento descrito na norma ATC – 105 do CTI (COOLING TOWER INSTITUTE, 1990). De posse destes dados e dos de projeto foi possível obter a taxa de evaporação do sistema. Os dados de projeto e os obtidos nos testes realizados na torre de resfriamento estão apresentados no Apêndice A.

O cálculo da taxa de evaporação foi realizado em MATLAB<sup>®</sup> versão 5.3, onde utilizou-se um método iterativo para o cálculo da temperatura de bulbo úmido (T<sub>bu</sub>) do ar de saída. O objetivo é calcular a taxa de evaporação (E) pela seguinte equação:

$$E = G (\omega_2 - \omega_1) \quad (3.2)$$

para tanto, deve-se conhecer a taxa mássica de ar (G) e as umidades absolutas do ar de entrada ( $\omega_1$ ) e de saída ( $\omega_2$ ). O ar de saída foi considerado como saturado. Para o cálculo de G foi utilizada a equação que relaciona os dados de projeto com os dados de teste, segundo norma ATC-105 do CTI.

$$\left(\frac{L}{G}\right)_t = \left(\frac{L_t}{L_p}\right) \left(\frac{Pot_p}{Pot_t}\right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\rho_t}{\rho_p}\right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{v_t}{v_p}\right) \left(\frac{L}{G}\right)_p \quad (3.3)$$

onde os índices t e p referem-se aos dados de teste e de projeto, Pot é a potência dos ventiladores,  $\rho$  e  $v$  são a massa específica e o volume específico do ar de saída, respectivamente.  $L_t$  é a taxa mássica de água de recirculação de teste.

O volume específico do ar saturado foi calculado pela equação:

$$v = \frac{RTbu}{PM_g} \left( 1 + \omega_s \frac{M_g}{M_v} \right) \quad (3.4)$$

onde R é a constante universal dos gases, P é a pressão total de mistura,  $\omega_s$  é a umidade absoluta de saturação,  $M_v$  e  $M_g$  são as massas molares do vapor e do ar seco respectivamente.

A umidade absoluta de saturação é calculada pela seguinte equação:

$$\omega_s = \frac{M_v}{M_g} \frac{P_s}{P - P_s} \quad (3.5)$$

A pressão de saturação é calculada pela equação de Antoine:

$$P_s = \ln(P_c) + \exp \left[ A - \frac{B}{(Tbu + C)} \right] \quad (3.6)$$

onde A, B e C são constantes empíricas e  $P_c$  é a pressão crítica, cujos valores para a temperatura em °F são:

$$A = 6,53247;$$

$$B = 7173,79;$$

$$C = 389,4747;$$

$$P_c = 3206,7 \text{ lbf.in}^{-2}.$$

O calor latente de vaporização foi calculado pela seguinte equação:

$$\lambda = \Delta H_{vap} = \frac{RTbu^2}{P_s} \frac{dP_s}{dTbu} \quad (3.7)$$

A temperatura de bulbo úmido do ar de saída foi calculada por um método numérico iterativo baseado em mínimos quadrados usando-se a função *fsolve* do Matlab<sup>®</sup> 5.3 (COLEMAN et al., 1999). O ar de saída foi considerado saturado.

$$T_{bu} = \frac{H_s - \omega_s \lambda}{(Cp_g + \omega_s Cp_v)} + T_{ref} \quad (3.8)$$

onde  $T_{ref}$  é a temperatura do estado de referência, considerada como 0°C e  $H_s$  é a entalpia específica do ar úmido de saída, calculada pela equação da linha de operação da torre:

$$H_s = H_1 + \left( \frac{L}{G} \right)_t (T_{aq} - T_{af}) \quad (3.9)$$

onde  $T_{aq}$  e  $T_{af}$  são as temperaturas da água quente e da água fria, respectivamente e  $H_1$  é a entalpia do ar de entrada da torre:

$$H_1 = Cp_g (T_{bs} - T_{ref}) + \omega [\lambda + Cp_v (T_{bs} - T_{ref})] \quad (3.10)$$

O procedimento dos cálculos está apresentado no Apêndice D.

### 3.3.6 Balanço Material da Torre de Resfriamento

Com o objetivo de otimizar o sistema, minimizando, se possível, o consumo de água de reposição e, conseqüentemente, a geração de efluentes, foi realizado um balanço material da torre de resfriamento. As seguintes equações foram usadas para o balanço material realizado em MATLAB<sup>®</sup> versão 5.3:

#### Balanço de Massa Global

$$M = E + P + R \quad (3.11)$$

#### Balanço Material de DQO (x)

$$M x_M + PQ = (P + R) x_P + (-ra) V \quad (3.12)$$

onde  $PQ$  é a carga de DQO dos produtos químicos adicionados na água de resfriamento,  $(-ra)$  é a taxa de consumo de DQO dentro da torre causada por reações de oxidação da matéria orgânica e inorgânica e  $V$  é o volume total de água do sistema de resfriamento. A taxa de consumo  $(-ra)$  foi calculada pelo balanço material (eq.3.12) usando os dados históricos da água de reposição e de resfriamento.

#### Balanço Material de Dureza Magnésio (y)

$$M y_M = (P + R) y_P \quad (3.13)$$

onde  $y_M$  e  $y_P$  são as concentrações de dureza magnésio na água de *make up* e na purga, respectivamente.

Balço Material de Sílica ( $z$ )

$$M z_M = (P + R) z_P \quad (3.14)$$

onde  $z_M$  e  $z_P$  são as concentrações de sílica na água de *make up* e na purga, respectivamente.

Como a água de reposição da torre de resfriamento é composta por água clarificada e rejeito da osmose inversa, as concentrações de Dureza Magnésio e Sílica da água de reposição são calculadas pelo balanço de massa para os componentes da seguinte forma:

$$y_M, z_M = \frac{(y_r, z_r) Q_r \text{perc}_r + (y_{AC}, z_{AC}) Q_{AC}}{Q_r \text{perc}_r + Q_{AC}} \quad (3.15)$$

onde os índices  $r$  e  $AC$  diferenciam as concentrações de Dureza Magnésio e Sílica no rejeito da osmose inversa e na água clarificada isenta de rejeito, respectivamente,  $Q$  é a vazão de cada corrente e  $\text{perc}$  é a percentagem de recuperação de rejeito.

A condição de restrição para as concentrações de sílica e dureza magnésio na água de resfriamento é imposta pela equação da constante de solubilidade do silicato de magnésio ( $kps$ ).

$$kps = ([Mg - H] 10^{-5})^3 \left( \frac{[SiO_2]}{6} 10^{-4} \right)^4 (10^{-(14 - pH)}) \quad (3.16)$$

Com as equações do balanço material (3.13 e 3.14) e a equação da constante de solubilidade do silicato de magnésio, foi possível calcular as concentrações de Dureza Magnésio e Sílica da água de resfriamento para um intervalo de valores de  $kps$ . Para o sistema em estudo o valor limite de  $kps$  é de  $1 \times 10^{-29}$ , porém, foi observado através da análise dos dados históricos da água de resfriamento, que o valor de  $kps$  vem aumentando a cada período contínuo de operação. Dados referentes ao último período, iniciado em maio de 2001, demonstram que o  $kps$  tem superado o seu valor limite para alguns meses (HISTÓRICO DA 48 TM-01/02, 2002).

A partir das concentrações de sais calculadas para o intervalo de  $kps$  considerado, obtiveram-se valores de taxas de purga pelo balanço material. O objetivo é encontrar um valor para a taxa de purga que minimize os custos envolvidos com o tratamento de efluentes e, conseqüentemente, com os produtos químicos adicionados e com a água de reposição. Na função que descreve o custo, equação 3.17, foi levado em consideração o limite imposto para a concentração de  $DQO_{Cr}$  do efluente inorgânico. Foi utilizada uma função de otimização com restrição baseada em mínimos quadrados para a resolução do problema.

$$C(P) = (P + 10 \text{ Excesso de } DQO) c_{EI} \quad (3.17)$$

$$\text{Excesso de DQO} = P \left( \frac{x_P}{1000} - 0,05 \right) \quad (3.18)$$

onde  $C$  é o custo de tratamento (R\$) em função da purga  $P$  ( $\text{m}^3$ ),  $x_P$  é a concentração de DQO da purga (ppm),  $c_{EI}$  é o custo médio do metro cúbico de efluente inorgânico (R\$ 0,45) e 0,05 é o limite de concentração de DQO permissível. Esta equação é semelhante à utilizada para o cálculo do volume equivalente de efluentes inorgânicos da indústria em estudo. Os cálculos estão apresentados no Apêndice E.

## **CAPÍTULO 4**

### **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos neste estudo, os quais estão ordenados da seguinte forma:

1. levantamento de dados de vazões e reconciliação dos dados;
2. aproveitamento de correntes: identificação de correntes com suas respectivas vazões e caracterização físico-química, e propostas de configurações espaciais para o reaproveitamento;
3. otimização do sistema de resfriamento:
  - análises de DQO das correntes do efluente inorgânico e dos produtos químicos utilizados para o tratamento da água de resfriamento;
  - estimativa para a taxa de evaporação;
  - otimização da torre de resfriamento.

#### **4.1 LEVANTAMENTO DE DADOS DE VAZÃO E RECONCILIAÇÃO DE DADOS**

##### LEVANTAMENTO DE DADOS DE VAZÃO

As vazões das correntes do sistema de tratamento e distribuição de água são registradas por uma central de controle. Para estimar o valor médio da vazão horária de cada corrente coletaram-se dados de consumo total mensal dividindo-os pelo número de horas de cada mês. Este procedimento foi realizado para todos os meses do ano de 2002 e foi tomado o



valor médio anual da vazão para cada corrente. A média da vazão anual das correntes está mostrada na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1.** Média anual das vazões registradas no sistema.

Corrente	Vazão* (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )
Água Bruta	2020
AC - Filtros de Areia	765
AC - Coligadas	465
AC - Torre forçada	288
AC - Torre induzida	592
AF	não medido
AH - Consumidores	155
AH - Desmineralização	520
Permeado da Osmose Inversa	460
Rejeito da Osmose Inversa	110
Entrada Vasos de Resina Mista	500
Água Desmineralizada Geração de Vapor	320
Água Desmineralizada Coligadas	65
Condensado Polido	606

\* Valores referentes ao ano de 2002.

Como mencionado anteriormente, para a corrente de água de combate a incêndio não há instrumento de registro de vazão, e a medida realizada pelo aparelho ultra-sônico registrou um consumo de 280 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> de AF. Esta medida foi realizada no período de verão, situação de maior consumo. Este valor não pode ser considerado como padrão, pois o consumo de AF varia muito com as condições climáticas.

Os dados de vazão podem ser obtidos de três modos distintos: por coleta de dados do sistema de registro, por medidas de vazão com aparelho de ultra-som e por fechamento do balanço material. Os instrumentos de medida de vazão foram avaliados e o resultado desta avaliação está mostrado na Tabela 4.2, que apresenta um comparativo entre as diferentes fontes de informação referentes aos dados de vazão e de pressão diferencial. Nesta tabela o termo Planta 2 refere-se a uma parte da indústria que foi ampliada e Planta 1 é a parte mais antiga. A corrente AC – Filtros areia (nova) passa através da tubulação instalada mais recentemente. As correntes AC – Torre I e AC – Torre II referem-se à água de reposição das torres de resfriamento de tiragem forçada e induzida, respectivamente. A corrente AH – Desmi é a corrente de água filtrada que se destina ao processo de desmineralização. A distribuição de água pode ser para a própria indústria (Indústria) e também para as indústrias vizinhas (Coligadas).

**Tabela 4.2.** Avaliação dos instrumentos de medida.

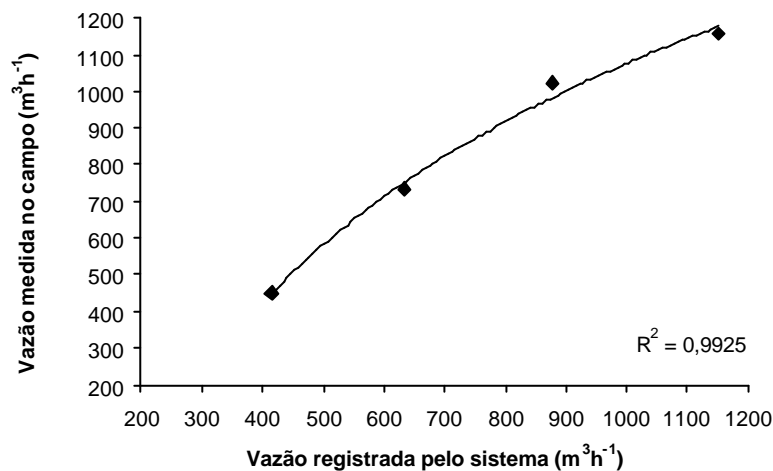
Corrente	Código do Instrumento	Diferencial de Pressão Campo (mmH <sub>2</sub> O)	Diferencial de Pressão Folha de Dados (mmH <sub>2</sub> O)	Diferencial de Pressão Fixado no Instrumento *	Vazão Sistema de Controle (m <sup>3</sup> . h <sup>-1</sup> )	Vazão Folha de Dados (m <sup>3</sup> . h <sup>-1</sup> )	Condições de Instalação
AG Planta 1	142FT01	0 - 2480	0 - 2500	EA	0 - 100	0 - 220	acima linha
Água Bruta	42FT01	0 - 1600	0 - 1600	SE	0 - 4000	0 - 4000	acima linha
AP Planta 2	142FT02	0 - 2480	0 - 2500	EA	0 - 100	0 - 66	correta
AC -Filtros areia	42FT02	0 - 1800	0 - 1560	FD	0 - 1300	0 - 1300	acima linha
AC -Filtros areia (nova)	142FT04	0 - 210	0 - 220	EA	0 - 1340	0 - 1300	correta
AH-Desmi	42FT05	0 - 4570	0 - 2060	SE	0 - 1020	0 - 800	acima linha
Entrada Vaso Resina Mista	42FT10A	0 - 4340	0 - 4340	FD	0 - 300	0 - 300	correta
	42FT10B	0 - 4340	0 - 4340	FD	0 - 300	0 - 300	correta
	42FT10C	0 - 4340	0 - 4340	FD	0 - 300	0 - 300	correta
	42FT10D	0 - 4340	0 - 4340	FD	0 - 300	0 - 300	correta
Condensado Polido	42FT11	0 - 4400	0 - 4250	SE	0 - 800	0 - 800	acima linha
AD Coligadas	42FT12	0 - 7000	0 - 7000	FD	0 - 120,7	0 - 120,7	correta
AD Indústria	42FT13	0 - 10550	0 - 10600	SE	0 - 800	0 - 800	correta
AF Coligadas	42FT30	0 - 4120	0 - 4140	SE	0 - 500	0 - 500	acima linha
AC Indústria	42FT31	0 - 3270	0 - 3330	SE	0 - 1200	0 - 1200	acima linha
AC Coligadas	42FT32	0 - 4360	0 - 4140	SE	0 - 500	0 - 500	acima linha
AG Indústria	42FT33	0 - 222	0 - 2000	SE	0 - 200	0 - 100	acima linha
AP Indústria	42FT34	0 - 2800	0 - 2830	SE	0 - 70	0 - 70	acima linha
AP Coligadas	42FT35	0 - 2750	0 - 2830	SE	0 - 70	0 - 70	acima linha
Entrada Filtros Pressurizados	42FT101	0 - 1510	0 - 2500	FD	0 - 520	0 - 520	correta
	42FT102	0 - 1490	0 - 2500	FD	0 - 520	0 - 520	correta
	42FT103	0 - 1500	0 - 2500	FD	0 - 520	0 - 520	correta
	42FT104	0 - 1500	0 - 2500	FD	0 - 520	0 - 520	correta
Permeado Osmose Inversa	42FT106	0 - 3000	0 - 5000	FD	0 - 101,6	0 - 130	correta
	42FT107	0 - 1200	0 - 2500	FD	0 - 51,1	0 - 72	correta
	42FT109	0 - 3000	0 - 5000	FD	0 - 101,6	0 - 130	correta
	42FT110	0 - 1200	0 - 2500	FD	0 - 51,1	0 - 72	correta
	42FT112	0 - 3000	0 - 5000	FD	0 - 101,6	0 - 130	correta
	42FT113	0 - 1200	0 - 2500	FD	0 - 51,1	0 - 72	correta
	42FT115	0 - 3000	0 - 5000	EA	0 - 130	0 - 130	correta
42FT116	0 - 1200	0 - 2500	FD	0 - 72	0 - 72	correta	
Rejeito Osmose Inversa	42FT118	0 - 3000	0 - 5000	FD	0 - 101,6	0 - 130	correta
	42FT119	0 - 1200	0 - 2500	LC	0 - 50,1	0 - 72	correta
	42FT108	0 - 5000	0 - 7500	FD	0 - 33,3	0 - 40	correta
	42FT111	0 - 5000	0 - 7500	FD	0 - 33,3	0 - 40	correta
AC - Torre I	42FT114	0 - 5000	0 - 7500	EA	0 - 33,3	0 - 40	correta
	42FT117	0 - 5000	0 - 7500	FD	0 - 40	0 - 40	correta
	42FT120	0 - 5000	0 - 7500	FD	0 - 33,2	0 - 40	correta
AC - Torre II	48FT04	0 - 5000	0 - 5000	FD	0 - 1600	0 - 1600	correta

\* SE - Sem Etiqueta    EA - Etiqueta Apagada    FD - Conforme Folha de Dados    LC - Conforme Leitura de Campo

Como pode ser observado pelos dados da Tabela 4.2, alguns instrumentos apresentaram discrepâncias entre os valores coletados nas diferentes fontes, as quais podem causar desvios em relação ao valor real.

Para alguns instrumentos foi possível realizar medidas de vazão com um aparelho de ultra-som e compará-las com as vazões registradas pelo sistema de controle. Os resultados das relações encontradas entre estas medidas de vazão estão apresentados nas Figuras 4.1 a 4.6. Na Figura 4.1 é mostrada a relação das medidas realizadas pelo aparelho de ultra-som (medidas em campo) e os valores registrados pelo sistema de controle para a corrente de água clarificada que alimenta os filtros de areia atmosféricos. Esta corrente é dividida em duas, uma parte é enviada para uma tubulação mais antiga (tubulação A) e outra para uma tubulação mais nova (tubulação B), que foi instalada para suprir as necessidades de água filtrada. Desta forma a vazão de água filtrada que alimenta os filtros de areia é registrada por dois instrumentos de medida.

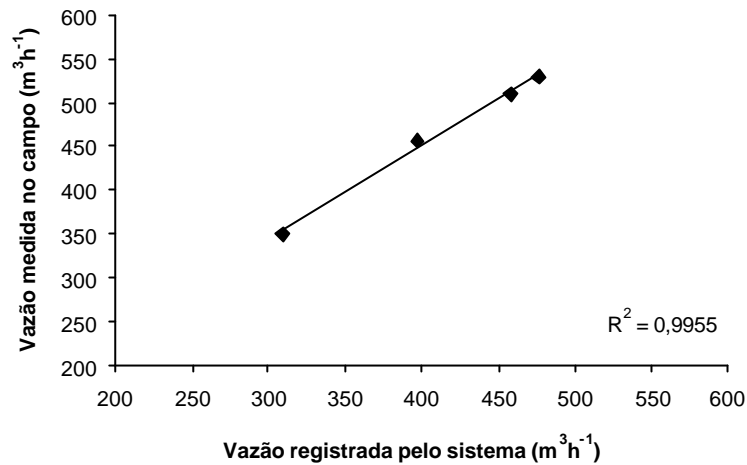
Na tubulação A não foi possível realizar as medidas de vazão por aparelho de ultra-som provavelmente por problemas de incrustação que não permitiram a transmissão do sinal de ultra-som. Portanto, para medir a vazão total de água filtrada que alimenta os filtros de areia, foi necessário desviar esta corrente para a tubulação B, bloqueando a entrada de água para a tubulação A. Pode-se perceber que para as vazões elevadas, próximas de  $1300 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , a correlação entre as duas medidas deixa de ser linear, passando para um comportamento logarítmico. Esta vazão é calculada através da medida de perda de carga sofrida pelo fluido na passagem através de uma placa de orifício. A não linearidade que pode ser verificada através dos dados apresentados na Figura 4.1 é devida ao fato de que os sensores de pressão estão operando em fundo de escala, o que resulta em um desvio no valor da vazão registrada pelo instrumento em relação à vazão medida pelo aparelho ultra-sônico.



**Figura 4.1.** Relação das vazões medidas em campo e registradas pelo sistema para a corrente de água clarificada que alimenta os filtros de areia atmosféricos.

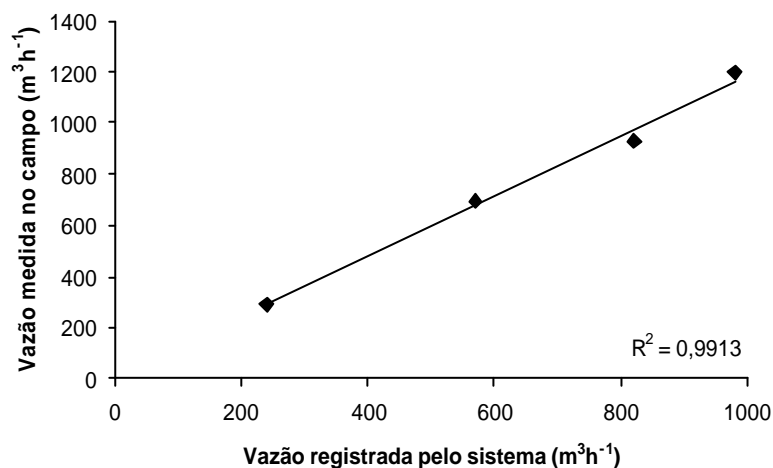
O instrumento analisado na Figura 4.2 apresenta a relação entre a vazão registrada pelo sistema e a vazão medida em campo para o consumo de AC pelas indústrias coligadas e o consumo com o transporte das cinzas pesadas provenientes da queima de carvão nas caldeiras. Este consumo de AC não é constante, depende da produção de vapor requerida, disponibilidade de matéria-prima, enfim, das condições do processo. A relação encontrada entre os dados medidos e registrados apresentou comportamento linear e alta correlação entre os dados analisados. Os valores medidos por ultra-som são maiores que os registrados pelo sistema de controle. Como pode ser observado na Tabela 4.2, o diferencial de pressão do

instrumento em campo é diferente daquele registrado na folha de dados, que por sua vez, corresponde a um intervalo de vazão que não foi atualizado no sistema de controle.



**Figura 4.2.** Relação das vazões medidas em campo e registradas pelo sistema para a corrente de água clarificada para coligadas.

Para a corrente de água clarificada que abastece as torres de resfriamento, não foi possível encontrar nenhuma correlação entre os dados medidos e os registrados pelo sistema de controle, então optou-se por relacionar os dados medidos pelo aparelho de ultra-som desta corrente com a soma dos dados registrados pelos instrumentos individuais de cada torre. A Figura 4.3 mostra a relação encontrada para estas medidas.

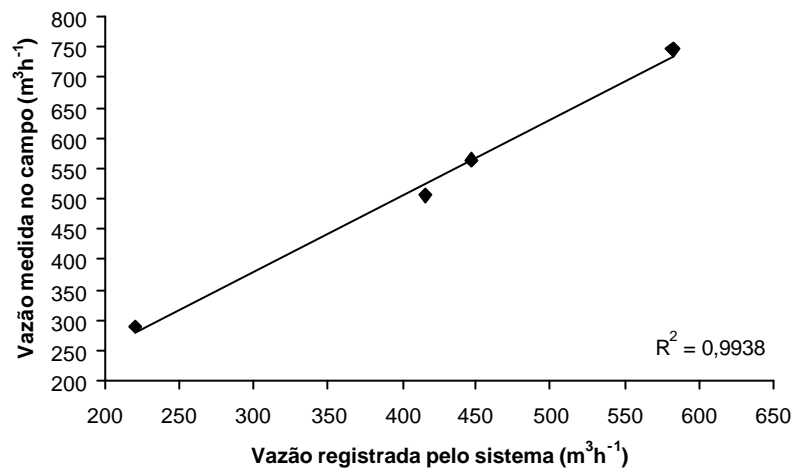


**Figura 4.3.** Relação das vazões medidas em campo e registradas pelo sistema para a corrente de água clarificada para reposição das torres de resfriamento.

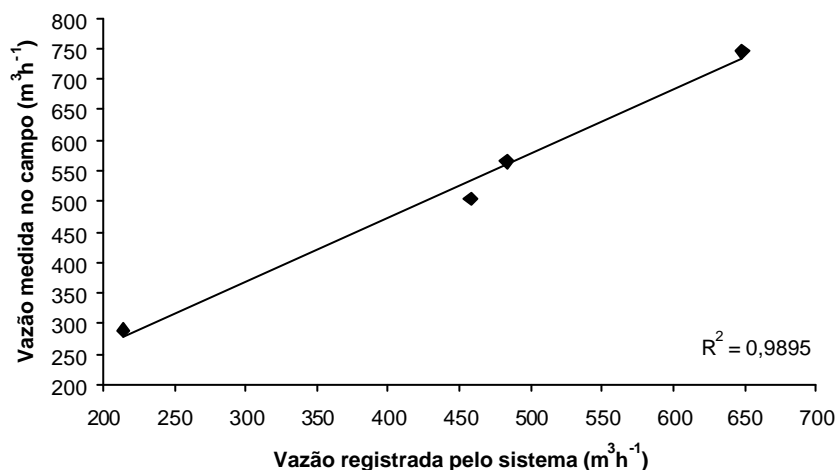
Foi verificado anteriormente, através de medidas na tubulação de água de entrada da Torre I, que os dados registrados pelo medidor de vazão desta corrente concordam com os

dados medidos pelo aparelho de ultra-som. Já para a corrente de água de entrada da Torre II, não foi possível realizar medidas por ultra-som, devido a motivos já comentados anteriormente. Portanto, o desvio apresentado para esta corrente pode estar relacionado com alguma falha do instrumento de medida da Torre II, apesar de que este instrumento não apresentou nenhum problema na avaliação realizada.

As Figuras 4.4 e 4.5 apresentam as relações encontradas para instrumentos que registram a vazão de uma mesma corrente. O primeiro instrumento está localizado à jusante do tanque de água filtrada e registra a vazão de água filtrada que se destina ao processo de desmineralização. O segundo, localizado na entrada dos filtros pressurizados, registra a vazão afluyente de água filtrada para estes filtros. Estes pontos de localização dos instrumentos estão representados nas Figuras 3.1 e 3.2 mostradas no Capítulo 3.



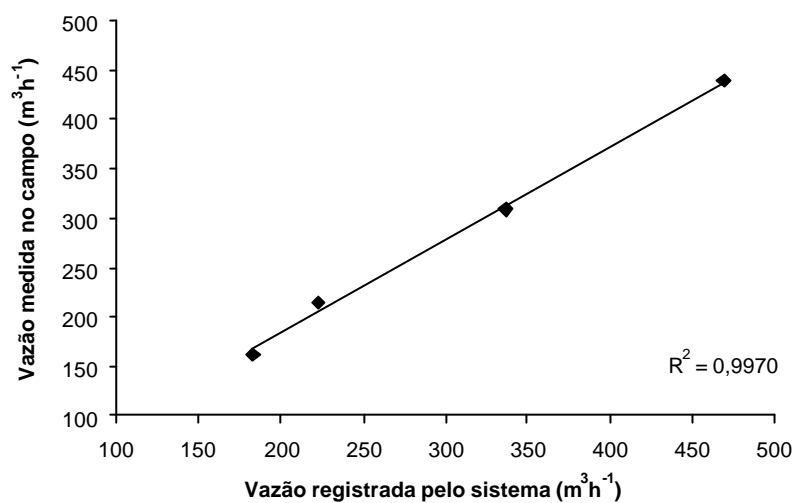
**Figura 4.4.** Relação das vazões medidas em campo e registradas pelo sistema para a corrente de água filtrada para a desmineralização.



**Figura 4.5.** Relação das vazões medidas em campo e registradas pelo sistema para a corrente de água filtrada que alimenta os filtros pressurizados.

A medida realizada pelo aparelho de ultra-som foi em um ponto intermediário entre estes dois instrumentos de medida. O conjunto de dados referentes ao primeiro instrumento apresentou um bom ajuste aos dados medidos pelo aparelho ultra-sônico. Isto pode ser verificado pelo coeficiente de correlação linear encontrado para estes pontos.

Na Figura 4.6 são apresentados os dados de vazão do permeado do sistema de osmose inversa registrada pelo sistema de controle e os medidos em campo. Estes dados apresentam uma tendência linear e alta correlação. Os dados medidos pelo aparelho de ultra-som são inferiores aos dados registrados pelo sistema de controle. Uma possível justificativa para este comportamento é a não correspondência dos dados de diferencial de pressão com o respectivo intervalo de vazão, ocasionando uma leitura de vazão superior ao valor real.



**Figura 4.6.** Relação das vazões medidas em campo e registradas pelo sistema para a corrente de água permeada pelo sistema de osmose inversa.

Com base nos resultados dos testes realizados para estes instrumentos, foram ajustados os dados de vazão do balanço hídrico preliminar. Na Tabela 4.3 estão apresentados os dados do balanço hídrico do sistema antes e depois dos testes previamente discutidos.

Conforme mostrado na Tabela 4.3, o ajuste dos dados de vazão das correntes através dos gráficos apresentados anteriormente, possibilitou a eliminação dos erros sistemáticos presentes nas medidas de vazão. Considerando que apenas erros aleatórios estão presentes, foi realizada a reconciliação de dados em estado estacionário para as principais correntes do sistema em estudo. A corrente de AF foi considerada como medida devido à necessidade de redundância dos dados de vazão para se realizar a reconciliação. Foi realizada uma estimativa para a vazão da corrente de água de incêndio, considerando um consumo médio anual de  $120 m^3 \cdot h^{-1}$ . Este valor foi obtido considerando um consumo de AF nos três meses de verão igual a  $280 m^3 \cdot h^{-1}$ , nenhum consumo nos meses de inverno e  $100 m^3 \cdot h^{-1}$  nos meses intermediários. Como este valor é apenas uma estimativa, pois não há dados suficientes para uma análise estatística, foi-lhe atribuído um menor peso na matriz que pondera os erros das medidas.

**Tabela 4.3.** Vazão das correntes antes e depois do ajuste das curvas.

Corrente	Vazão - valores registrados * (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )	Vazão - valores corrigidos (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )
Água Bruta	2020	2020
AC - Filtros de Areia	765	780
AC-Tanque de AC	-	-
AC - Coligadas	465	520
AC - Torre I	288	-
AC - Torre II	592	-
AC - Torres I e II	880	1050
AF	-	-
AH - Consumidores	155	155
AH - Desmineralização	520	656
Permeado da Osmose Inversa	460	429
Rejeito da Osmose Inversa	110	110
Entrada Vasos de Resina Mista	500	500
Água Desmineralizada Geração de Vapor	320	320
Água Desmineralizada Coligadas	65	65

\* Valores referentes ao ano de 2002.

Os resultados da reconciliação estão apresentados na Tabela 4.4. Na reconciliação de dados é necessário classificar as correntes como medidas e não medidas. As seguintes correntes foram consideradas como medidas:

- Água Bruta;
- AC - Filtros de Areia;
- AC - Coligadas;
- AC - Torres I e II;
- AF;
- AH - Consumidores;
- Permeado da Osmose Inversa;
- Rejeito da Osmose Inversa;
- Água Desmineralizada para Geração de Vapor;
- Água Desmineralizada – Coligadas.

As correntes consideradas como não medidas foram:

- AC – Tanque de Água Clarificada;
- AH - Desmineralização;
- Entrada dos Vasos de Resina Mista.

**Tabela 4.4.** Comparação dos dados de vazão antes e depois da reconciliação de dados.

Correntes	Vazão antes da reconciliação (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )	Vazão reconciliada (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )
Água Bruta	2020	2186
AC - Filtros de Areia	780	716
AC - Tanque de AC	-	1469
AC - Coligadas	520	518
AC - Torres de Resfriamento	1050	980
AF	120	89
AH - Consumidores	155	171
AH - Desmineralização	656	545
Permeado da Osmose Inversa	429	428
Rejeito da Osmose Inversa	110	117
Entrada Vasos de Resina Mista	500	428
Água Desmineralizada Geração de Vapor	320	362
Água Desmineralizada Coligadas	65	66

Analisando os resultados de vazão apresentados na Tabela 4.4 verifica-se que para a maioria das correntes não houve uma grande diferença de valores entre a vazão antes e depois da reconciliação de dados. Estes dados de vazão são médias anuais das correntes, podendo variar para as diferentes estações do ano.

## 4.2 REAPROVEITAMENTO DAS CORRENTES: VAZÕES E CONFIGURAÇÕES PROPOSTAS

Neste item são apresentados e discutidos os resultados obtidos do levantamento das vazões das correntes potenciais para o reaproveitamento e duas propostas de configurações para viabilizar o reaproveitamento destas correntes na planta industrial.

### 4.2.1 Levantamento das Vazões das Correntes Potenciais para o Reaproveitamento

As correntes identificadas para o reaproveitamento foram as seguintes:



- 1) lodo extraído dos clarificadores. O sobrenadante deste lodo é enviado para uma bacia, denominada de Bacia 4, e, posteriormente, enviado ao rio;
- 2) efluente da lavagem dos filtros de areia atmosféricos. O efluente é enviado para uma bacia, denominada de Bacia 7, transborda por gravidade para o rio e o lodo formado é distribuído na área verde da empresa;
- 3) efluente da lavagem dos filtros pressurizados de areia e antracito. O efluente é enviado para a Bacia 7;
- 4) efluente da lavagem dos vasos de carvão ativado. O efluente é enviado para a Bacia 7;
- 5) “flushing” do sistema de osmose inversa, o qual consiste na água do processo de osmose inversa que é descartada quando o sistema é interrompido por algum motivo operacional. O efluente é enviado para o tanque de efluente inorgânico;
- 6) efluente do enxágüe dos vasos de troca iônica mista após regeneração. O efluente é enviado para tanque de efluente inorgânico;
- 7) efluente da lavagem dos vasos de carvão ativado do sistema de retorno de condensados. O efluente é enviado para tanque de efluente inorgânico;
- 8) efluente do enxágüe dos vasos de troca iônica mista do sistema de retorno de condensados após regeneração. O efluente é enviado para tanque de efluente inorgânico.

#### CORRENTE 1 – LODO GERADO PELO PROCESSO DE CLARIFICAÇÃO DA ÁGUA

Para esta corrente foram realizadas apenas estimativas da vazão de descarte. Foi possível estimar a vazão de descarte do lodo pelo acompanhamento da variação de nível do tanque com o tempo. A frequência de descarte anual do lodo foi obtida através de informações fornecidas pelos operadores da planta. Para o cálculo desta vazão levou-se em consideração os períodos de inverno, em que a turbidez da água bruta é maior, e verão, em que a turbidez é menor. A vazão de descarte de lodo foi calculada conforme dados apresentados na Tabela 4.5.

Considerando que cada estação compreende três meses, obtém-se uma média de 33 extrações a cada mês. Sabendo-se que a vazão e o tempo de cada extração é de  $4,5 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  e 3 minutos, respectivamente, foi calculado o valor do volume de cada extração. Como são 6 extratores, o volume total a cada extração é de aproximadamente  $80 \text{ m}^3$ . Então, o volume de lodo extraído mensalmente é, em média, de  $2640 \text{ m}^3$ . Se o processo fosse contínuo, a vazão de extração de lodo seria de aproximadamente  $3,7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . É importante ressaltar que estes dados são apenas estimativas baseadas em informações técnicas de operação, estando sujeitos a desvios significativos por apresentarem forte dependência das condições meteorológicas.

**Tabela 4.5.** Dados para o cálculo da vazão de descarte do lodo dos clarificadores.

Vazão calculada para cada extração	$270 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} = 4,5 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$
Número de extrações no inverno	1 a cada 8 horas = 90 extrações ao mês
Número de extrações no verão	1 a cada 3 dias = 10 extrações ao mês
Número de extrações nas estações intermediárias	1 a cada 2 dias = 15 extrações ao mês
Número de extratores do clarificador	6

CORRENTE 2 – EFLUENTE DA LAVAGEM DOS FILTROS DE AREIA ATMOSFÉRICOS

O volume de efluente gerado pela lavagem dos filtros de areia atmosféricos foi estimado pelo cálculo da vazão e do tempo de operação das bombas que enviam a AC para os filtros. O intervalo de lavagem dos filtros é de 180 horas em condições normais. Quando a turbidez da água clarificada for igual ou superior a 2 NTU, os filtros que estiverem com tempo de operação acima de 90 horas ou turbidez da água de saída dos filtros acima de 0,8 NTU ou ainda colmatados (não filtrando), deverão ser contralavados. A lavagem é realizada em duas etapas com tempos e vazões de água diferentes, sendo que na primeira etapa há uma expansão do leito durante 1 minuto com ar comprimido. A vazão desta corrente foi calculada conforme os dados apresentados na Tabela 4.6.

**Tabela 4.6.** Dados para o cálculo da vazão de efluente da lavagem dos filtros de areia atmosféricos.

Tempo da 1ª etapa de lavagem	6 minutos
Tempo da 2ª etapa de lavagem	10 minutos
Vazão da 1ª etapa de lavagem	$420 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$
Vazão da 2ª etapa de lavagem	$840 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$
Número de filtros	5
Intervalo das lavagens	182 horas
Número de lavagens mensal	4

Se este processo fosse contínuo a vazão horária aproximada de efluente produzido, obtida pela multiplicação da vazão de cada estágio, tempo de lavagem, nº de lavagens mensais e pelo nº de filtros, seria de  $5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .

### CORRENTE 3 - EFLUENTE DA LAVAGEM DOS FILTROS PRESSURIZADOS DE AREIA E ANTRACITO

A quantidade de efluente gerado pela lavagem dos filtros pressurizados foi estimada pelo registro de vazão do instrumento localizado na entrada destes filtros. A lavagem é realizada a cada 48 horas e o tempo de lavagem é de 20 minutos para cada filtro com vazão de  $420 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . O intervalo entre as lavagens é diminuído caso a análise de índice de densidade de lodo (SDI) apresentar valor superior a 5 na saída dos filtros. Esta análise indica o grau de saturação dos filtros, isto é, eles não conseguem mais reter as partículas em suspensão. O detalhamento do método de determinação de SDI está apresentado no Apêndice C. A vazão horária de efluente gerado se o processo fosse contínuo, considerando os 4 filtros em operação, seria de  $12 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .

### CORRENTE 4 - EFLUENTE DA LAVAGEM DOS VASOS DE CARVÃO ATIVADO

A campanha de operação dos vasos de carvão ativado é de 48 horas e o tempo de lavagem de cada vaso é de 20 minutos com vazão de  $220 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Esta vazão é a de projeto, pois não há registros de vazão nestes vasos. Caso o valor de SDI da saída dos filtros pressurizados apresente valor superior a 5, o intervalo entre as lavagens será menor. A vazão horária de efluente gerado se o processo fosse contínuo, considerando os 4 vasos em operação, seria de aproximadamente  $6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .

### CORRENTE 5 - “FLUSHING” DO SISTEMA DE OSMOSE INVERSA

“*Flushing*” é o nome usado para o processo de lavagem com água das membranas de osmose inversa. Este processo pode ocorrer por diversos motivos: remoção da solução de conservação das membranas na instalação de membranas novas, interrupção do processo devido a variações de pressão ou concentração de cloro acima do limite permitido, após limpeza química para a retirada de todo o produto químico das membranas e no momento em que o módulo não estiver em operação para garantir que as membranas sempre estejam umedecidas com água em movimento. Como este processo não tem uma frequência definida, a estimativa de vazão horária foi baseada em informações obtidas pela experiência adquirida de operadores e engenheiros e pela análise dos dados de vazão de permeado e rejeito da osmose inversa no momento de ocorrência de um “*flushing*”. Verificou-se que a vazão é de aproximadamente  $60 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . O tempo médio de permanência nesta condição é de 5 minutos para os casos de interrupção do processo. Segundo os operadores, o “*flushing*” é realizado, em média, uma vez ao dia para cada conjunto de membranas. Como o sistema de osmose inversa é composto por 5 conjuntos, a vazão horária estimada de efluente para este processo foi de  $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Não foram levados em consideração para o cálculo da vazão os efluentes gerados pela limpeza química e pelo enxágüe das membranas novas.

CORRENTE 6 - EFLUENTE DO ENXÁGÜE DOS VASOS DE TROCA IÔNICA MISTA APÓS REGENERAÇÃO

A quantidade de efluente gerado pelo enxágüe dos vasos de troca iônica mista do sistema de desmineralização foi estimada pelo registro de vazão do instrumento localizado na entrada destes vasos. O enxágüe é realizado em três etapas, conforme dados mostrados na Tabela 4.7.

**Tabela 4.7.** Etapas do processo de enxágüe dos vasos de troca iônica mista.

Tempo da 1ª etapa de enxágüe	40 minutos
Tempo da 2ª etapa de enxágüe	20 minutos
Tempo da etapa de contrafluxo	5 minutos
Vazão da 1ª etapa de enxágüe	250 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>
Vazão da 2ª etapa de enxágüe	250 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>
Vazão da etapa de contrafluxo	30 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>
Número de filtros	4

A vazão de operação dos vasos é de 250 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> e a regeneração é efetuada a cada 16.000 m<sup>3</sup> de água tratada produzida ou quando as concentrações de sílica e condutividade elétrica ultrapassarem os limites máximos permissíveis. Considerando o aproveitamento das correntes de enxágüe a partir da metade da 1ª etapa, para garantir um efluente com melhor qualidade, e dois vasos em operação, a vazão horária de efluente gerado, se o processo fosse contínuo, seria de aproximadamente 5 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>.

CORRENTE 7 - EFLUENTE DA LAVAGEM DOS VASOS DE CARVÃO ATIVADO DO SISTEMA DE RETORNO DE CONDENSADOS

A vazão de água gerada pela lavagem dos vasos de carvão ativado do sistema de retorno de condensados foi estimada por verificação da vazão no momento da lavagem e por informações dos operadores da unidade. Estes vasos são lavados a cada 10.000 m<sup>3</sup> de água tratada produzida. O processo de lavagem pode ocorrer com menor volume produzido devido aos seguintes motivos: concentração de hidrocarbonetos superior a 5 ppm indicando contaminação, concentração de sílica superior a 150 ppb e turbidez superior a 1 NTU. A vazão de contralavagem dos filtros é de 120 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> durante 40 minutos e a vazão de operação é de 225 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>. Considerando os cinco vasos em operação, a vazão horária de efluente gerado é de aproximadamente 9 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>.

CORRENTE 8 - EFLUENTE DO ENXÁGÜE DOS VASOS DE TROCA IÔNICA MISTA DO SISTEMA DE RETORNO DE CONDENSADOS APÓS REGENERAÇÃO

O procedimento para o cálculo da vazão de efluente foi o mesmo adotado para o efluente de enxágüe dos vasos de troca iônica mista para o sistema de água desmineralizada.

A regeneração é realizada a cada 60.000 m<sup>3</sup> de água tratada e a vazão média de operação de cada vaso é de 170 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>. Logo, os vasos são lavados cerca de duas vezes ao mês e cada lavagem gera aproximadamente 170 m<sup>3</sup> para cada vaso. Considerando os 5 vasos operando, a vazão horária de efluente gerado, se o processo fosse contínuo, seria de aproximadamente 2,4 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>. A regeneração é realizada para um volume menor de água tratada quando limites de concentração de sílica e condutividade elétrica forem alcançados.

Com o intuito de comparar a qualidade das correntes que serão reaproveitadas com a qualidade das correntes de água bruta e água clarificada nas quais aquelas poderiam ser incorporadas, foram realizadas as seguintes análises físico-químicas: pH, turbidez, sólidos suspensos, dureza cálcio, dureza magnésio, dureza total, demanda química de oxigênio, teor de ferro, teor de sílica e vazão média destas correntes. Os resultados destas análises estão apresentados na Tabela 4.8. Há duas medidas para cada corrente, uma para a primeira etapa de lavagem e outra para a segunda etapa.

**Tabela 4.8.** Resultado das análises físico-químicas das correntes potenciais para o reaproveitamento e suas respectivas vazões.

Corrente	pH	Turbidez (NTU)	SS (mg L <sup>-1</sup> )	Ca-H (mg L <sup>-1</sup> )	Mg-H (mg L <sup>-1</sup> )	T-H (mg L <sup>-1</sup> )	DQO <sub>Cr</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	Fe (mg L <sup>-1</sup> )	SiO <sub>2</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	Vazão (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,7
2	7,4	80,0	200,0	36,0	13,0	49,0	58,0	24,0	60,0	5,0
		15,0	< 2,5	30,0	9,0	39,0	< 0,5	0,1	17,0	
3	6,7	25,0	3,0	16,0	9,0	25,0	< 0,5	< 0,1	17,0	12,0
		8,0	< 2,5	15,0	10,0	25,0	< 0,5	< 0,1	17,0	
4	6,2	< 1	3,0	19,0	10,0	29,0	< 0,5	< 0,1	17,0	6,0
		< 2,5	13,0	9,0	29,0	< 0,5	< 0,1	16,0		
5	7,2	< 1	< 2,5	1,7	1,0	2,7	< 0,5	< 0,1	2,1	1,0
6	6,4	< 1	< 2,5	0,1	< 0,1	0,1	< 0,5	< 0,1	< 0,1	5,0
		< 2,5	0,1	< 0,1	0,1	< 0,5	< 0,1	< 0,1		
7	8,5	< 1	< 2,5	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,5	0,1	0,1	9,0
		< 2,5	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,5	0,1	0,1		
8	5,5	< 0,1	< 2,5	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,5	0,1	< 0,1	2,4
		< 2,5	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,5	0,1	< 0,1		
AB	6,8	43,0	10,0	15,0	10,0	25,0	10,0	3,0	15,0	-
AC	7,2	1,0	< 2,5	33,0	15,0	48,0	< 5	0,1	21,0	-

Como dito anteriormente, para a corrente 1 somente foi realizada a estimativa de sua vazão. Pela análise dos dados da Tabela 4.8 verifica-se que, com exceção das correntes 2 e 3, todas as outras apresentam qualidade adequada para serem reusadas como água clarificada.

A corrente 2, efluente da lavagem dos filtros atmosféricos, apresenta alta turbidez nos primeiros momentos da lavagem, impossibilitando o simples reuso desta corrente como água clarificada. As alternativas para o reaproveitamento dessa corrente são as seguintes:

- reuso como água bruta;
- regeneração e reuso como água clarificada;

Para os dois casos é necessária a coleta deste efluente em um tanque e posterior bombeamento para o processo de destino.

A qualidade do efluente da primeira etapa de lavagem dos filtros de areia é inferior à qualidade da água bruta, tornando-se superior na segunda etapa em relação à maioria dos contaminantes. A vazão calculada de efluente de lavagem dos filtros foi de  $5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , que corresponde a 0,23 % da vazão de água bruta captada, que é aproximadamente  $2.200 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Em vista disso, o reuso deste efluente como água bruta poderia ser possível, porém deverão ser realizados estudos futuros para verificar se a recirculação deste efluente não causa algum efeito cumulativo de contaminantes no afluente e também se este reuso não prejudica os processos subsequentes de coagulação e filtração.

Para o reaproveitamento desta corrente como água clarificada se faz necessário um pré-tratamento. Uma alternativa seria o tratamento em um tanque de equalização e posterior retorno do líquido sobrenadante para o tanque de água clarificada. O lodo gerado pelo tratamento desta corrente poderá ser misturado com o lodo extraído dos clarificadores para posterior desidratação. É necessário um estudo mais detalhado para determinar o tratamento que apresenta a melhor razão custo / benefício.

A corrente 3, efluente da lavagem dos filtros pressurizados de areia e antracito, apresenta qualidade superior à da água clarificada, sendo possível o seu reuso. A turbidez apresenta valores superiores ao da água clarificada, mas esta diferença poderia ser diluída no montante de água clarificada produzida.

As demais correntes apresentam qualidade muito superior à da água clarificada, sendo que não há nenhuma restrição para o seu reuso direto.

Para as correntes 7 e 8 do sistema de retorno de condensados deve-se ter o cuidado com possíveis contaminações por hidrocarbonetos. Uma vez verificado um cenário com este tipo de problema, o efluente deverá ser desviado para o efluente orgânico.

Além da economia gerada pela redução da captação e pelo tratamento da água, estas alternativas de reaproveitamento resultam em uma diminuição do custo com o tratamento de efluentes e do impacto ambiental que estes causam. Na Tabela 4.9 está apresentada uma estimativa da economia que pode ser obtida através da implantação das propostas de

reaproveitamento estudadas. Para o cálculo das estimativas foram considerados apenas os custos envolvidos com o tratamento da água e dos efluentes gerados. Para a opção de reuso como água bruta, no caso da corrente de lavagem dos filtros atmosféricos, foi considerado o custo de captação de água cobrado pelo CEIVAP (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2004). Os custos unitários de cada tratamento que são usados para estimar a economia anual, considerando 365 dias por ano, são os seguintes:

- Custo unitário do metro cúbico de água bruta captada = R\$ 0,008;
- Custo unitário do metro cúbico de água clarificada = R\$ 0,04;
- Custo unitário do metro cúbico de efluente inorgânico tratado = R\$ 0,45.

**Tabela 4.9.** Estimativa de economia com o reaproveitamento das correntes.

Proposta de Reaproveitamento	Conseqüência	Economia anual (R\$)
Reuso da água de lavagem dos filtros atmosféricos como água bruta.	Economia de 5,0 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> de água bruta captada.	350,40
Reuso da água de lavagem dos filtros pressurizados como água clarificada.	Economia de 12 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> de água clarificada.	4.204,80
Reuso da água de lavagem dos vasos de carvão ativado como água clarificada	Economia de 6 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> de água clarificada.	2.102,40
Reuso da água de "flushing" da osmose inversa como água clarificada.	Economia de 1 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> de água clarificada.	350,40
	Economia de 1 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> de efluente inorgânico.	3.942,00
Reuso da água de enxágüe dos vasos de resina mista como água clarificada.	Economia de 5,0 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> de água clarificada.	1.752,00
	Economia de 5,0 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> de efluente inorgânico para tratamento.	19.710,00
Reuso da água de lavagem dos vasos de carvão ativado do sistema de retorno de condensados como água clarificada.	Economia de 9,0 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> de água clarificada.	3.153,60
	Economia de 9,0 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> de efluente inorgânico para tratamento.	35.478,00
Reuso da água de enxágüe dos vasos de resina mista do sistema de retorno de condensados como água clarificada.	Economia de 2,4 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> de água clarificada.	840,96
	Economia de 2,4 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> de efluente inorgânico para tratamento.	9.460,80
Economia Total Anual		80.994,96

Conforme observado na Tabela 4.9, o aproveitamento das correntes resulta em uma economia total anual para a indústria de aproximadamente R\$ 81.000,00. Para o cálculo deste

valor não foi considerada a economia obtida pela redução da captação de água bruta, pois o sistema de cobrança pela captação e uso da água ainda não foi implementado no RS. Baseada no valor para a captação do metro cúbico de água bruta cobrado pelo CEIVAP, a economia anual obtida com esta redução seria de R\$ 2.800,00. Não foram considerados os custos de energia elétrica envolvidos no bombeamento de água bruta e das correntes de reaproveitamento.

A corrente de rejeito da osmose inversa é direcionada ao tanque de água clarificada provocando um aumento na concentração de sais desta água. Uma alternativa ao uso deste rejeito é no arraste de cinzas das caldeiras, que, como visto no capítulo anterior, é realizado com água clarificada. A principal vantagem desta alternativa de reuso é não alterar a qualidade da água clarificada. Como o consumo de AC para o arraste de cinzas não tem registro de vazão, sendo o seu consumo registrado juntamente com a corrente de AC para as indústrias coligadas, fez-se uma estimativa para a vazão desta corrente, coletando-se dados de vazão de AC de cada indústria coligada e comparando-os com os dados de vazão da corrente de AC para coligadas e arraste de cinzas. A diferença entre o somatório das vazões de água clarificada de cada indústria coligada e a corrente que registra o consumo de AC - coligadas e arraste de cinzas permite obter uma estimativa para a vazão da corrente usada para o arraste de cinzas das caldeiras. Os dados usados para a estimativa da vazão desta corrente estão apresentados na Tabela 4.10. Estes dados são médias mensais do período de janeiro a agosto de 2003.

**Tabela 4.10.** Médias das vazões das correntes de AC para as indústrias coligadas e AC para o arraste de cinzas no período de janeiro a agosto de 2003.

Correntes	Vazão Média (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )
Indústria Coligada A	39
Indústria Coligada B	28
Indústria Coligada C	103
Indústria Coligada D	70
Indústria Coligada E	83
Indústria Coligada F	27
Indústria Coligada G	21
Indústria Coligada H	14
Indústria Coligada I	25
Total	412
AC Coligadas + AC cinzas	431
AC Cinzas	19

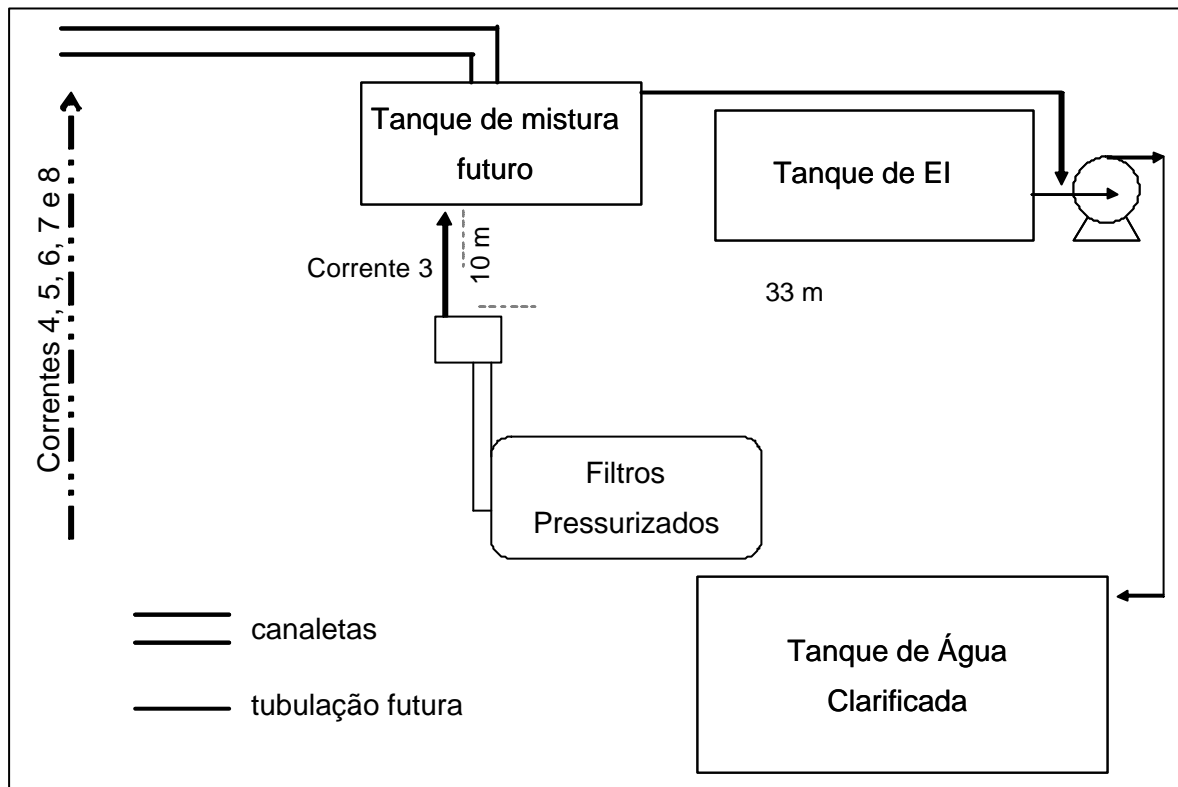
Este consumo de água clarificada para o arraste de cinzas representa aproximadamente 15 % do rejeito da osmose inversa. Como dito anteriormente, esta é apenas uma estimativa



para o consumo de água clarificada destinada ao arraste de cinzas e, portanto, não apresenta precisão. Seu consumo pode ser maior ou menor, dependendo das necessidades do processo.

### 4.2.2 Configurações Propostas para o Reaproveitamento

As configurações propostas para o reuso das correntes em potencial estão apresentadas nas Figuras 4.7 e 4.8.



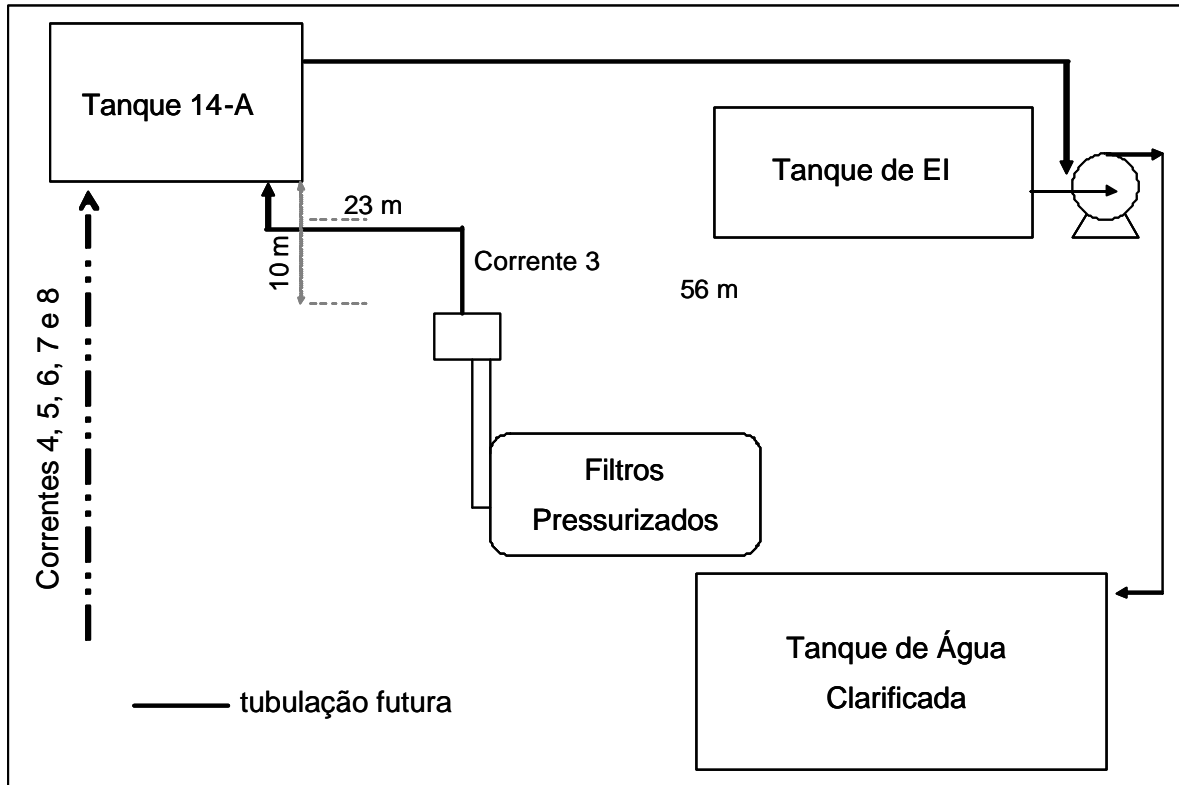
**Figura 4.7.** Representação esquemática da primeira configuração.

As duas configurações sugerem a mistura das correntes numeradas de 3 a 8 em tanques de armazenamento para posterior reaproveitamento como água clarificada.

A configuração apresentada na Figura 4.7 propõe a construção de um tanque para onde os efluentes seriam enviados por gravidade. Uma tubulação e uma bomba seriam necessários para enviar este efluente ao tanque de água clarificada. Já existe uma tubulação que liga o tanque de efluente inorgânico ao tanque de água clarificada. Esta interligação foi feita no passado para o reaproveitamento dos efluentes de enxágüe da cadeia de troca iônica, processo hoje substituído, quase que totalmente, pela osmose inversa.

Para a mistura dos efluentes numerados de 4 a 8 serão necessárias algumas modificações no sistema de canais de escoamento de efluentes já existente. Estas modificações não apresentam custos elevados, uma vez que envolvem apenas obras civis simples. Estas modificações estão apresentadas no Apêndice F.

Para o reaproveitamento da corrente 3 será necessária a instalação de uma tubulação para enviar o efluente para o tanque de mistura. Para a primeira configuração proposta, a distância do ponto de descarga do efluente até o tanque de mistura futuro é de 10 metros. Na segunda configuração a distância é de 33 metros.



**Figura 4.8.** Representação esquemática da segunda configuração.

Na Figura 4.8 está apresentada uma configuração onde se utiliza um tanque já existente (Tanque 14-A). Este tanque recebe o lodo extraído dos clarificadores. A capacidade do tanque é de  $270 \text{ m}^3$  e está superdimensionado para o fim a que se destina. Este tanque tem a possibilidade de ser dividido, sendo que um dos compartimentos ficaria destinado para a mistura dos efluentes a reaproveitar. Neste caso também seriam necessárias tubulação e bomba para enviar o efluente ao tanque de água clarificada.

Em termos de instrumentação seriam necessários um medidor de pH e um medidor de nível. Um sistema de dosagem de álcali é necessário para o ajuste do pH, pois a maioria das correntes apresentam valores de pH abaixo do valor da água clarificada.

A vazão total das correntes que podem ser reaproveitadas como água clarificada é de  $35 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Se essas correntes fossem todas geradas ao mesmo tempo, o que é praticamente impossível, seria necessário um tanque de mistura com capacidade de aproximadamente  $150 \text{ m}^3$ , considerando um tempo de retenção de 4 horas, que é um tempo suficiente para detectar qualquer tipo de contaminação que possa eventualmente ocorrer. Esta capacidade de tanque está superestimada, pois as lavagens dos vasos e filtros jamais ocorrem ao mesmo tempo. Por exemplo, há quatro vasos de carvão ativado e a lavagem é realizada um de cada vez, o que reduz a vazão de  $6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  para  $1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . O mesmo ocorre com os outros filtros e vasos. Se

considerar o caso em que apenas um dos vasos e filtros estejam sendo lavados e enxaguados ao mesmo tempo, a vazão de efluentes será de no máximo  $10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , o que exigiria um tanque com capacidade de 40 a  $50 \text{ m}^3$ .

A escolha entre as duas configurações propostas deve ser realizada através de um estudo de viabilidade econômica para cada caso.

### 4.3 OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE RESFRIAMENTO

O objetivo principal de um tratamento de água de resfriamento é reduzir o descarte sem aumentar as tendências de corrosão, deposição e crescimento biológico. Isto resultará em redução de custos com água de reposição, tratamento de efluentes e produtos químicos. Neste item serão apresentados e discutidos os resultados obtidos para a otimização do sistema de resfriamento estudado.

#### 4.3.1 Qualidade da Água de Reposição da Torre de Resfriamento

Foram realizadas análises da água de reposição da torre de resfriamento e as amostras analisadas foram coletadas em dois pontos diferentes. Uma amostra foi coletada no tanque de água clarificada (AC), onde o rejeito da osmose inversa está misturado, e a outra amostra foi coletada na saída dos clarificadores antes da mistura do rejeito da osmose inversa. Também foi analisada uma amostra da água bruta (AB). Os resultados estão mostrados na Tabela 4.11.

**Tabela 4.11.** Resultados das análises físico-químicas de diferentes tipos de água.

Parâmetros	Água Bruta	AC sem rejeito da OI	AC com rejeito da OI	Rejeito da OI
pH (25°C)	6,8	6,0	7,2	6,9
Turbidez (NTU)	43,0	1,0	1,0	NA
Condutividade elétrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	84,0	123,0	176,0	506,0
Dureza Ca (ppm $\text{CaCO}_3$ )	15,0	21,0	33,0	115,0
Dureza Mg (ppm $\text{CaCO}_3$ )	10,0	10,0	15,0	46,0
Dureza Total (ppm $\text{CaCO}_3$ )	25,0	31,0	48,0	161,0
DQO <sub>Mn</sub> (ppm $\text{O}_2$ )	6,2	3,8	3,3	6,8
Fe Total (ppm Fe)	3,5	< 0,1	0,1	< 0,1
Sílica (ppm $\text{SiO}_2$ )	19,0	14,0	21,0	92,0
Alcalinidade (ppm $\text{CaCO}_3$ )	23,0	8,0	31,0	31,0

Comparando os dados obtidos pelas análises das diferentes correntes, observa-se que há uma grande influência da recuperação do rejeito da osmose inversa na qualidade da água clarificada. Este aumento de concentração causa um impacto na qualidade da água de resfriamento, pois como visto anteriormente, o índice de controle da qualidade da AR, a constante de solubilidade do silicato de magnésio, tem relação direta com a concentração de

sílica e dureza magnésio. Pelo histórico de dados de análise da água de resfriamento, pode-se perceber que houve um aumento do valor da constante de solubilidade do silicato de magnésio na presente campanha (iniciada em maio de 2001) em comparação com a campanha anterior (maio de 1996 a abril de 2001), ultrapassando o limite estabelecido para o tipo de tratamento aplicado (HISTÓRICO DA 48 TM-01/02, 2002).

#### 4.3.2 Determinação da DQO das Correntes do Efluente Inorgânico

Com o objetivo de avaliar o potencial contaminante das correntes que compõem o EI, foram realizadas análises de DQO das seguintes correntes:

- purga da torre de tiragem forçada (Torre I);
- purga da torre de tiragem induzida (Torre II);
- tanque de efluente inorgânico (Tanque EI);
- mistura dos efluentes que compõem o EI (Mistura EI).

Foram realizadas três amostragens em dias diferentes e foram utilizados dois métodos distintos para a determinação de DQO dessas amostras: método do dicromato e método do permanganato. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 4.12.

**Tabela 4.12.** Análises de DQO das correntes de EI.

	DQO <sub>Cr</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	DQO <sub>Mn</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	Razão $\frac{DQO_{Cr}}{DQO_{Mn}}$	Média das razões
Torre I	76,0	16,3	4,7	4,9
	77,0	15,1	5,1	
	81,0	16,5	4,9	
Torre II	58,0	12,6	4,6	4,5
	64,0	14,5	4,4	
	67,0	14,5	4,6	
Tanque EI	5,0	1,4	3,6	8,1
	13,0	1,4	9,3	
	25,0	2,2	11,4	
Mistura EI	73,0	12,6	5,8	5,3
	75,0	14,7	5,1	
	62,0	12,7	4,9	

Com os resultados das análises das diferentes correntes que compõem o efluente inorgânico foi possível concluir que o alto valor da concentração de DQO neste efluente é devido à concentração das purgas das torres de resfriamento. A relação entre as concentrações de DQO obtidas pelos dois métodos utilizados não apresentou valores muito próximos para os diferentes pontos de coleta, principalmente o efluente do Tanque EI, possivelmente por este

apresentar uma baixa concentração de DQO e, portanto, mais sensível a erros metodológicos. Foi considerado o valor de 4,5 para a razão  $DQO_{Cr}/DQO_{Mn}$  no cálculo da carga mássica de DQO no balanço material da torre de resfriamento (Torre II).

### 4.3.3 Determinação da $DQO_{Cr}$ dos Produtos Químicos Utilizados no Tratamento da AR

Para realizar o balanço material da torre de resfriamento é necessário conhecer as concentrações de  $DQO_{Cr}$  das correntes de entrada e saída do sistema. Com o objetivo de avaliar a contribuição em termos de DQO dos produtos químicos adicionados na água de resfriamento, foram realizadas análises das soluções dos produtos químicos utilizados. Estes resultados estão apresentados na Tabela 4.13.

**Tabela 4.13.** Concentração de DQO dos produtos químicos utilizados na água de resfriamento.

Produto Químico (PQ)	Dosagem (ppm PQ)	$DQO_{Cr}$ (ppm $O_2$ )
Inibidor de Incrustação (PQ - I)	68,0	22,0
Inibidor de Incrustação e Corrosão (PQ - II)	73,0	22,0
Dispersante (PQ - III)	8,0	19,0
Inibidor de Corrosão (PQ - IV)	18,0	9,0
Agente Complexante de Cloro (PQ - V)	10,0	39,0

Com os dados da Tabela 4.13 foi possível estimar a contribuição da carga de DQO dos produtos químicos adicionados na torre de resfriamento. Foi utilizado um histórico de dados de dois anos, a partir do início da atual campanha de operação da torre (maio de 2001). Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 4.14.

**Tabela 4.14.** Dados necessários para o cálculo da carga de DQO dos produtos químicos.

Produto Químico	Consumo mensal * (kg PQ)	Dosagem (ppm PQ)	$DQO_{Cr}$ (ppm $O_2$ )	Carga $DQO_{Cr}$ (kg hora <sup>-1</sup> $DQO_{Cr}$ )
PQ - I	4520,4	68,0	22,0	2,0
PQ - II	5255,2	73,0	22,0	2,2
PQ - III	502,0	8,0	19,0	1,7
PQ - IV	1054,7	18,0	9,0	0,7
PQ - V	678,2	10,0	39,0	3,7
<b>Total</b>	<b>12010,4</b>	<b>177,0</b>	<b>111,0</b>	<b>10,3</b>

\* Média de dois anos.

A carga total de DQO devida à adição de produtos químicos na torre de resfriamento é de 10,5 kg.hora<sup>-1</sup>. Este valor foi obtido pela seguinte equação:

$$\text{Carga DQO}_{Cr} = \frac{CM [DQO_{Cr}]}{720 [PQ]} \quad (4.1)$$

onde CM é o consumo médio mensal de produto químico em kg.mês<sup>-1</sup> de PQ, [DQO<sub>Cr</sub>] é a concentração de DQO das soluções de produtos químicos em ppm de O<sub>2</sub>, [PQ] é a dosagem do produto químico na AR em ppm de PQ e 720 é o fator de conversão de mês para hora.

#### 4.3.4 Balanço de Energia e Material da Torre de Resfriamento

São apresentados os resultados obtidos para a taxa de evaporação e para o balanço material da torre de resfriamento. Os dados de entrada necessários para o cálculo da taxa de evaporação em duas condições diferentes estão apresentados na Tabela 4.15.

**Tabela 4.15.** Dados de entrada para o cálculo da taxa de evaporação da torre de resfriamento em duas condições climáticas distintas.

Dados de entrada para o cálculo da taxa de evaporação	Condição	
	Abril	Novembro
Temperatura de bulbo úmido da base (°C)	19,71	23,95
Temperatura de bulbo seco da base (°C)	28,59	30,40
Temperatura da água quente (°C)	43,78	46,35
Temperatura da água fria (°C)	30,23	30,45
Vazão de recirculação de água dentro do sistema (t h <sup>-1</sup> )	31.957	29.020
Potência total dos ventiladores (hp)	2.143	2.274
<b>Taxa de evaporação (t h<sup>-1</sup>)</b>	<b>698</b>	<b>725</b>

Como observado, a taxa de evaporação da torre depende das condições de operação a que está submetida e das condições climáticas. As taxas de evaporação calculadas são pontuais, ou seja, são para a condição do período do dia em que se realizaram os testes na torre de resfriamento. Considerando que na Região Sul as estações do ano são bem definidas, é possível utilizar um valor médio da taxa de evaporação para cada estação, sem que isso implique em erros muito grandes. O cálculo da taxa de evaporação foi realizado em Matlab<sup>®</sup> 5.3 e o procedimento está apresentado no Apêndice D.

Para o balanço material da torre de resfriamento é necessário fornecer alguns dados de entrada, mostrados na Tabela 4.16, que possibilitam o cálculo das taxas de purga e de *make up* para uma condição predeterminada.

**Tabela 4.16.** Dados de entrada para o balanço material da torre de resfriamento.

Dados de entrada para o balanço material da torre de resfriamento	Condição	
	Abril	Novembro
Taxa de evaporação da água (t h <sup>-1</sup> )	698,0	725,0
Taxa de perda por respingos (t h <sup>-1</sup> )	48,0	48,0
Concentração de DQO <sub>Cr</sub> da água de reposição (ppm)	10,0	10,0
Vazão do rejeito da osmose (t h <sup>-1</sup> )	117,0	117,0
Recuperação do rejeito da osmose (%)	100,0	100,0
Vazão de entrada da água clarificada no Tanque de AC (t h <sup>-1</sup> )	1.470,0	1.470,0
pH da água de resfriamento	8,5	8,5

O rejeito da osmose inversa é totalmente recuperado, mas é possível fazer uma simulação de como ficariam o balanço material e os custos envolvidos com o tratamento de efluentes quando parte deste rejeito é recuperado e parte descartado para EI. Na Tabela 4.17 são apresentados os dados obtidos através da simulação do sistema de resfriamento para as condições de operação do mês de abril, exceto a recuperação de rejeito, apresentadas na Tabela 4.16. A simulação foi realizada para dois valores de kps, o valor limite permissível para o tipo de tratamento aplicado ( $kps1 = 1 \times 10^{-29}$ ) e o valor verificado pela análise das médias dos dados referentes ao ano de 2002 ( $kps2 = 4,0 \times 10^{-31}$ ).

Também foi realizada a simulação para um valor de kps seis vezes menor do que o limite de  $1 \times 10^{-29}$ , ( $kps3 = 1,5 \times 10^{-30}$ ), obtendo resultados que poderiam ser aplicados para o sistema atual, trazendo benefícios pela redução da purga, da água de reposição e dos produtos químicos adicionados. Os resultados obtidos para as condições do mês de abril da Tabela 4.16 foram os seguintes:

- taxa de Purga → 51,5 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>;
- concentração de DQO na AR → 77,1 ppm;
- concentração de Sílica na AR → 170,0 ppm;
- concentração de Dureza Magnésio na AR → 132,6 ppm;
- custo mensal com o tratamento de efluentes → R\$ 21.200,00.

Se comparado ao valor atual de taxa de purga aplicada, que é em média 66 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>, o uso do kps3 reduziria este valor em aproximadamente 20 %.

**Tabela 4.17.** Resultados da simulação do comportamento do sistema da água de resfriamento para diferentes porcentagens de recuperação de rejeito da OI e para dois valores de constante de solubilidade  $kps_1 = 1,0 \times 10^{-29}$  e  $kps_2 = 4,0 \times 10^{-31}$ .

Indicadores de desempenho		Cenário				
		1	2	3	4	5
Recuperação do rejeito da osmose inversa (%)		<b>100,0</b>	<b>75,0</b>	<b>50,0</b>	<b>25,0</b>	<b>0,0</b>
Taxa de purga do sistema (t h <sup>-1</sup> )	$kps_1$	25,4	19,5	13,6	7,8	2,0
	$kps_2$	75,9	65,3	54,9	44,7	34,7
Taxa de água de reposição (t h <sup>-1</sup> )	$kps_1$	771,4	765,5	759,6	753,8	748,0
	$kps_2$	821,9	811,3	800,9	790,7	780,7
Concentração de DQO na água de resfriamento (ppm)	$kps_1$	101,0	109,0	118,4	129,7	143,5
	$kps_2$	63,9	69,0	74,9	82,1	90,8
Concentração de Sílica na água de resfriamento (ppm)	$kps_1$	222,8	219,6	215,8	211,5	206,4
	$kps_2$	140,7	138,6	136,3	133,5	130,3
Concentração de Dureza Mg na água de resfriamento (ppm)	$kps_1$	173,9	177,3	181,4	186,4	192,6
	$kps_2$	109,8	112,0	114,6	117,7	121,6
Custo mensal com Tratamento de Efluentes da purga (R\$)	$kps_1$	12.434	10.036	7.429	4.545	1.282
	$kps_2$	28.010	25.161	22.217	19.130	15.835
Custo mensal com Tratamento de Efluentes do rejeito (R\$)	$kps_1$	0	8.424	16.848	25.272	33.696
	$kps_2$	0	8.424	16.848	25.272	33.696
Custo mensal Total do Tratamento de Efluentes (R\$)	$kps_1$	12.434	18.460	24.277	29.817	34.978
	$kps_2$	28.010	33.585	39.065	44.402	49.531

Como observado na Tabela 4.17, para o limite de  $kps_1$  de  $1,0 \times 10^{-29}$  para todos os cenários, a taxa de purga é menor, porém, as concentrações de DQO e de sais são maiores. Os parâmetros de controle de qualidade da água de resfriamento, apresentados na Tabela 4.18, indicam que o limite máximo de Sílica na AR é de 220 ppm, portanto, o uso de  $kps = 1 \times 10^{-29}$  ultrapassa este valor. Esta condição resulta no menor custo de tratamento de efluentes, porém, deve-se ter cuidado com os problemas que possam ocorrer por se tratar de uma condição limite de operação, por exemplo, problemas com o controle do sistema e com o aumento do valor de  $kps$  causando a precipitação dos sais.

Pela análise dos dados da Tabela 4.17, observa-se, ainda, que o custo total do tratamento de efluentes aumenta à medida que a porcentagem de recuperação do rejeito da osmose inversa diminui. Isso se deve ao fato de que a vazão de descarte de rejeito não recuperado é superior ao ganho obtido pela diminuição da taxa de purga. A equação que minimiza o custo total de tratamento de efluentes mostra que este é diretamente proporcional à vazão e concentração do efluente, sendo que a vazão apresenta uma influência mais significativa no custo total de tratamento. Uma alternativa para o reaproveitamento deste rejeito, como discutido anteriormente, é o seu reuso como água de arraste das cinzas das



caldeiras, que traria benefícios em termos de custos com o tratamento de efluentes e aumento da qualidade da água de reposição das torres de resfriamento.

**Tabela 4.18.** Parâmetros de controle da qualidade da água de resfriamento da indústria em estudo.

Parâmetro	Valor
pH (a 25 °C)	8,0 a 8,5
Turbidez (NTU)	< 30
Sólidos Suspensos (mg L <sup>-1</sup> )	< 30
Dureza Cálcio (mg L <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub> )	200 a 400
Alcalinidade (mg L <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub> )	> 80
Ferro (mg L <sup>-1</sup> )	< 5,0
Cloro (mg L <sup>-1</sup> )	0,5 a 1,0
DQO <sub>Mn</sub> (mg L <sup>-1</sup> O <sub>2</sub> )	< 20
SiO <sub>2</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	< 220

Os dados da Tabela 4.19 possibilitam a comparação entre os dados obtidos pela simulação do sistema de resfriamento (kps1 e kps 2) e a média anual de dados obtidos por análises físico-químicas da AR no ano de 2002.

**Tabela 4.19.** Dados obtidos pela simulação e pelas análises obtidas experimentalmente.

Parâmetros	Simulação		Análises*
	kps1	kps2	
Concentração de DQO <sub>Cr</sub> (ppm O <sub>2</sub> )	101,0	63,9	69,3
Concentração de Sílica (ppm de SiO <sub>2</sub> )	222,8	140,7	157,0
Concentração de Dureza Magnésio (ppm de CaCO <sub>3</sub> )	173,9	109,7	95,0
Taxa de purga (t h <sup>-1</sup> )	25,4	75,9	66,0

\* Valores referentes ao ano de 2002.

Observa-se que os dados obtidos na simulação com kps2 ( $4,0 \times 10^{-31}$ ), aproximam-se das médias obtidas experimentalmente. Este fato evidencia que a simulação, apesar das considerações feitas, mostrou-se válida para representar o sistema de resfriamento. O balanço material deste sistema foi realizado em estado estacionário, portanto, o acúmulo de sais dentro da torre não foi considerado. Esta situação certamente é hipotética, pois não existe um tratamento químico que garanta que todos os compostos presentes na água de resfriamento permaneçam dissolvidos. Porém, após o período de passivação, realizado no início de operação da torre de resfriamento, onde a concentração de sais atinge rapidamente um patamar aproximadamente constante, assumir que o processo está em estado estacionário é uma aproximação razoável.

## Capítulo 5

# CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES

### 5.1 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos no decorrer do desenvolvimento deste trabalho, podem-se obter as conclusões listadas a seguir.

- Foi possível realizar um balanço hídrico consistente do sistema em estudo através do levantamento e medidas de vazões, juntamente com o auxílio do método de reconciliação de dados.
- Foram identificadas oito correntes para o reaproveitamento.
- As propostas de reaproveitamento trazem os seguintes benefícios:
  - ambientais - redução de 40 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> de água captada;
  - econômicos - economia anual de R\$ 80.000,00 com o tratamento de água e efluentes;

Especificamente para o estudo realizado na torre de resfriamento, obtiveram-se as conclusões apresentadas a seguir.

- O efluente gerado pelas purgas das torres de resfriamento contribuem significativamente na concentração de DQO dos efluentes inorgânicos.
- A contribuição em DQO dos produtos químicos adicionados no tratamento da água de resfriamento foi estimada em 60 % do total. Considera-se que a concentração de DQO da água de resfriamento é proveniente da matéria orgânica e inorgânica da água clarificada e dos produtos químicos adicionados.

- O comportamento da DQO no sistema de resfriamento não ocorre da mesma forma que os sais dissolvidos, onde a concentração é diretamente proporcional à taxa de evaporação. Na torre de resfriamento, o cloro adicionado como biocida e o ar atmosférico oxidam parte da matéria orgânica, causando uma notável redução da concentração de DQO.
- A composição química da água de reposição da torre de resfriamento é de fundamental importância para a otimização do sistema, influenciando diretamente nos ciclos de concentração e na taxa de purga.
- A taxa de evaporação obtida através do balanço de energia da torre de resfriamento possibilitou calcular com maior precisão os parâmetros necessários para a realização do balanço material.
- A manutenção da constante de solubilidade do silicato de magnésio no valor limite de  $1 \times 10^{-29}$  pode ocasionar problemas no sistema de resfriamento pela ultrapassagem do limite da concentração de sílica admissível.
- A redução do reaproveitamento do rejeito da osmose inversa implica na diminuição da taxa de purga e no aumento da concentração de DQO da água de resfriamento, resultante do acréscimo no ciclo de concentração da torre.
- Os custos com o tratamento de efluente da purga são minimizados com o aumento do valor de kps e com a redução do reaproveitamento do rejeito da osmose inversa.
- O rejeito da osmose inversa que não é reaproveitado gera um custo adicional se for enviado para o tratamento de efluentes, pois a vazão deste rejeito é superior à redução obtida na vazão de purga, causando um acréscimo significativo no custo total do tratamento dos efluentes.
- A redução da vazão de efluentes para o tratamento é economicamente mais viável que o enquadramento da concentração de DQO no limite de 50 ppm.
- Com base nos resultados obtidos pela simulação do sistema de resfriamento, é possível diminuir a taxa de purga em aproximadamente 20 % do valor realizado atualmente.

Finalmente, é importante ressaltar que as iniciativas de reuso das águas de lavagem e enxágüe dos equipamentos, bem como da otimização do sistema de resfriamento, conduzem a uma redução da demanda de água e da geração de efluentes, trazendo benefícios econômicos e ambientais para a indústria.

## 5.2 SUGESTÕES

São propostos os seguintes assuntos para a continuidade deste trabalho:

- realização de uma análise econômica para as propostas de reaproveitamento;
- caracterização físico-química do lodo da Estação de Tratamento de Água e estudo das operações mais adequadas para o reaproveitamento deste efluente;
- estudo de alternativas para regeneração do efluente de lavagem dos filtros de areia atmosféricos;
- estudo de outras alternativas para o reaproveitamento do rejeito da osmose inversa;
- estudo da relação que existe entre o consumo de produtos químicos no tratamento da água de resfriamento e a taxa de purga;
- implementação de uma interface do Matlab<sup>®</sup> para o Programa Microsoft Excel, por ser de mais fácil acesso aos operadores da planta industrial;
- realização do balanço material da unidade de vapor;
- fazer um trabalho semelhante ao que foi realizado com os efluentes inorgânicos para as unidades que geram efluentes orgânicos, visando a integração de todos os processos.

## CAPÍTULO 6

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Água no Brasil e no Mundo*. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/GestaoRecHidricos/InfoHidrologicas/docs/AguaNoBrasilenoMundo.html>>. Acesso em: dezembro de 2003.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Cobrança Paraíba do Sul / Fórmula da Cobrança*. Cobrança pelo uso da água na bacia do Rio Paraíba do Sul, 2002. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/GestaoRecHidricos/Cobranca/docs/FormulaCobranca.pps>>. Acesso em: janeiro de 2004.

APHA, AWWA, WEF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association. American Water Works Association. Water Pollution Control Federation, Washington, D. C., 20<sup>th</sup> ed., 1998.

BAGAJEWICZ, M. e SAVELSKI, M. Design of water utilization systems in process plants with a single contaminant. *Waste Management*, v. 20, p. 659-664, 2000.

BAGAJEWICZ, M., RIVAS, M. e SAVELSKI, M. A robust method to obtain optimal and sub-optimal design and retrofit solutions of water utilization systems with multiple contaminants in process plants. *Computers & Chemical Engineering*, v. 24, p. 1461-1466, 2000.

BETZ. *Handbook of industrial water conditioning*. 9<sup>th</sup> ed. Treviso: Betz Laboratories, 1991.

BINNIE, C.; KIMBER, M. e SMETHURST, G. *Basic water treatment*. 3th. ed., London: Thomas Telford Publishing, 2002.

BIRNFELD, E. F e MENDES, T. F. Métodos de obtenção da matriz ponderante para a reconciliação de dados. In: *Congresso de Engenharia de Processos do Mercosul – ENPROMER*, 1999, Florianópolis, SC.

- BRASIL. Lei nº 9.433 de 8 de janeiro de 1997. Institui a *Política Nacional de Recursos Hídricos*. Disponível em: <<http://www.senado.gov.br/legisla.htm>>. Acesso em: dezembro de 2003.
- BYRNE, W. *Reverse Osmosis - A practical guide for industrial users*. 1<sup>st</sup> ed., Littleton: Tall Oaks, 1995.
- CADERNO DE INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES. *KDBP-SP 093/98*. São Paulo, 1998.
- COIMBRA, R. M.; LEEUWSTEIN, J. M. e PEDROSA, M. M. F. *Avaliação das Águas do Brasil*. Secretaria dos Recursos Hídricos. Brasília, 2002. Disponível em: <[http://www.portaldosconcursos.com/partes/Ibama/Manejo\\_Bacias\\_Hidrograficas/avalia CAO\\_AGUAS\\_BRASIL.PDF](http://www.portaldosconcursos.com/partes/Ibama/Manejo_Bacias_Hidrograficas/avalia CAO_AGUAS_BRASIL.PDF)>. ACESSO EM: OUTUBRO DE 2003.
- COLEMAN, T.; BRANCH, M. A. e GRACE, A. *Optimization Toolbox for Use With Matlab - User's Guide*. Version 2, The MathWorks Inc., p. 4-84, 1999.
- COOLING TOWER INSTITUTE. *CTI Code ATC-105*: acceptance teste code for water-cooling towers. USA, 1990.
- CROWE, C. M. Data reconciliation: progress and challenges. *J. Proc. Cont.*, v. 6, p. 89-98. 1996.
- CROWE, C. M. Formulation of linear data reconciliation using information theory. *Chemical Engineering Science*, v. 51, n. 12, p. 3359-3366, 1996.
- CROWE, C. M. Observability and redundancy of process data for steady state reconciliation. *Chemical Engineering Science*, v. 44, n. 12, p. 2909-2917, 1989.
- DAVIS, M. L. e CORNWELL, D. A. *Introduction to environmental engineering*. 3<sup>rd</sup> ed., USA: McGraw-Hill, 1998.
- DREW CHEMICAL CORPORATION. *Principles of industrial water treatment*. 9th.ed., Boonton, N.J: Drew Chemical Corporation, 1988.
- EL-HALWAGI, M. M. e MANOUSIOUTHAKIS, V. Synthesis of mass-exchange networks. *AIChE Journal*, v. 35, n. 8, p. 1233-1244, 1989.
- EL-HALWAGI, M. M. e MANOUSIOUTHAKIS, V. Automatic synthesis of mass-exchange networks with single-component targets. *Chemical Engineering Science*, v. 45, n. 9, p. 2813-2831, 1990.
- EL-HALWAGI, M. M. *Pollution prevention through process integration: systematic design tools*. Alabama, USA: Academic Press, 1997.

- FILHO, D. F. S. *Tecnologia de tratamento de água: água para indústria*. 3<sup>a</sup> ed., São Paulo: Nobel, 1985.
- FOFANO, S. *Avaliação de técnicas eletroquímicas na monitoração de corrosão por sulfetos em sistema de água de resfriamento industrial*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1999.
- FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, W. C.; MAUS, L. e ANDERSEN, L. B. *Princípios das Operações Unitárias*. 2<sup>a</sup> ed., Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982.
- HISTÓRICO DA 48 TM-01/02. *KDBR-SP 153/02*, período: 05/96 a 04/01. São Paulo, 2002.
- KELLY, J. D. On finding the matrix projection in the data reconciliation solution. *Computers & Chemical Engineering*, v. 22, n. 11, p. 1553-1557, 1998.
- KERN, D. Q. *Processos de Transmissão de Calor*. Traduzido por Adir M. Luiz. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982.
- KUMAR, A. *Chemical process synthesis and engineering design*. New Delhi: McGraw-Hill, 1982.
- KURITA. *Pré condicionamento em sistemas de resfriamento*. Seção Download / Documentos Técnicos. Disponível em: <<http://kurita.com.br/modules.php?name=download>>. Acesso em: janeiro de 2004.
- LIMA, J. E. F. W. *Recursos Hídricos no Brasil e no Mundo*, Documentos Embrapa Cerrados, ISSN 1517-5111, n. 33. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001.
- LINNHOF, B. e HINDMARSH, E. The pinch design method for heat exchanger networks. *Chemical Engineering Science*, v. 38, n. 5, p. 745-763, 1983.
- LIPTÁK, B.G. *Process Measurement and Analysis*, 3<sup>rd</sup> ed., Pensilvania: Chilton Book Company, 1995.
- MANN, J. G. Cultural changes and water-asset realignment to support water-reuse projects. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 37, p. 175-180, 2003.
- MANUALES TECNICOS Y DE INSTRUCCION PARA CONSERVACION DE ENERGIA. *Torres de Refrigeración*. Madrid: Centro de estudios de la energia, 1983.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Capítulo 18 da Agenda 21. Disponível em:<<http://www.mma.gov.br/port/se/agen21/cap18.html>>. Acesso em: janeiro de 2004.

- MOHIUDDIN, A. K. M; KANT, K. Knowledge base for the systematic design of wet cooling towers. Part I: Selection and tower characteristics. *International Journal of Refrigeration*, v. 19, n. 1, p. 43-51, 1996.
- MORTENSEN, K. How to manage cooling tower water quality. *Refrigeration Service Engineers Society Journal*, May 2003. Disponível em: <[http://www.marleyct.com/pdf\\_forms/RSESjournal\\_5-03.pdf](http://www.marleyct.com/pdf_forms/RSESjournal_5-03.pdf)>. Acesso em: novembro 2003.
- NACE, NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS. *Standart RP0182-95: Standard recommended practice. Initial conditioning of cooling water equipment*, Houston, 1995.
- PERRY, R. H.; GREEN, D. W. e MALONEY, J. O. *Chemical Engineer's Handbook*, 6<sup>th</sup> ed., New York: McGraw-Hill, 1984.
- PUCKORIUS, P. R. Water corrosion mechanisms. *ASHRAE Journal*, v. 41, n. 5, p. 57-61, 1999.
- PUIGJANER, L.; ALMATÓ, M. e ESPUÑA, A. Optimisation of water use in batch process industries. *Computers & Chemical Engineering*, v. 23, n. 10, p. 1427-1437, 1999.
- RICHTER, C. A. *Tratamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água*. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 2001.
- SELL, N. J. *Industrial Pollution Control: Issues and Techniques*, 2<sup>th</sup> ed., John Wiley & Sons, Inc., 1992.
- SMITH, R.; KIM, J. K. e SAVULESCU, L. Design of cooling systems for effluent temperature reduction. *Chemical Engineering Science*, v. 56, p. 1811-1830, 2001.
- TAKAMA, N.; KURIYAMA, T.; SHIROKO, K. e UMEDA, T. Optimal water allocation in a petroleum refinery. *Computers & Chemical Engineering*, v. 4, n. 4, p. 251-258, 1980.
- TOMAR, M. *Quality assessment of water and wastewater*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1999.
- UNEP, UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. Evolution of global water use and industrial domestic consumption compared with evaporation from reservoirs. Disponível em: <<http://www.unep.org/vitalwater/15.htm>>. Acesso em: fevereiro 2004.
- WALKER, W. K.; LEWIS, W. K.; MCADAMS, W. H. e GILLILAND, E.R. *Principles of Chemical Engineering*. 3<sup>rd</sup> ed., New York: McGraw-Hill, 1923.
- WANG, Y. P. e SMITH, R. Design of distributed effluent treatment systems. *Chemical Engineering Science*, v. 49, n. 18, p. 3127-3145, 1994.



- 
- WANG, Y. P. e SMITH, R. Wastewater minimization. *Chemical Engineering Science*, v. 49, n. 7, p. 981-1006, 1994.
- WHITE, G. C. *Handbook of chlorination for potable water: wastewater, cooling water, industrial processes, and swimming pools*, New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1972.
- ZBONTAR, L. e GLAVIC, P. Total site: wastewater minimization: Wastewater reuse and regeneration reuse. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 30, n. 4, p. 261-275, 2000.
- ZUBAIR, S. M.; KHAN, J. U. R. e YAQUB, M. Performance characteristics of counter flow wet cooling towers. *Energy Conversion & Management*, v. 44, p. 2073-2091, 2003.

## APÊNDICE A

# RESULTADOS DOS TESTES REALIZADOS NA TORRE DE RESFRIAMENTO

**Tabela A.1.** Resultado dos testes realizados na torre de resfriamento usando procedimento descrito na norma ATC – 105 do Cooling Tower Institute.

Data	Temperatura da água quente (°C)	Temperatura da água fria (°C)	Temperatura de bulbo úmido do ar de entrada (°C)	Temperatura de bulbo seco do ar de entrada (°C)	Vazão de água (t.h <sup>-1</sup> )	Potência média do motor dos ventiladores (HP)
Abril - 2003	43,78	30,23	19,71	28,59	31987	178,55
Novembro - 2003	46,33	29,23	24,01	30,46	30170	203,00

### RESULTADOS DO TESTE DE PERFORMANCE REALIZADO EM ABRIL DE 2003.

**Tabela A.2.** Valores de Temperatura de água fria (Taf) e Temperatura de água quente (Taq) para o teste de performance realizado em abril de 2003.

Taf oeste 1 (°C)	Taf oeste 2 (°C)	Taf oeste 3 (°C)	Taf leste 1 (°C)	Taf leste 2 (°C)	Taf leste 3 (°C)	Taq col.1 (°C)	Taq col.2 (°C)
29,10	29,10	32,20	29,20	29,70	31,90	39,90	45,20
29,00	28,50	31,90	29,60	30,50	31,60	41,30	45,30
29,20	27,70	31,40	29,30	29,10	32,00	42,20	46,00
29,10	28,90	32,20	29,30	29,90	31,90	42,20	46,40
28,80	28,70	32,20	29,30	30,70	31,20	42,00	45,50
29,00	28,80	32,10	29,10	30,10	31,90	42,40	46,30
29,00	29,10	32,20	29,90	30,30	31,90	41,90	46,00
29,50	29,50	32,80	29,20	30,60	32,00	42,10	46,20
29,50	29,10	32,40	29,30	30,60	32,00	45,70	49,40
28,70	29,10	32,10	29,30	29,90	31,80	41,70	45,50
Temperatura média da água fria (°C) =					<b>30,23</b>		
Temperatura média da água quente (°C) =					<b>43,78</b>		

onde oeste e leste 1, 2 e 3 são os locais das medições na bacia de coleta da água de resfriamento nos dois lados da torre de resfriamento, e col. 1 e 2 são os coletores de água quente em ambos lados. A penúltima medida de temperatura da água quente foi desprezada no cálculo da média por apresentar um valor muito superior aos demais.

**Tabela A.3.** Valores de Temperatura de bulbo úmido (Tbu) e bulbo seco (Tbs) do ar de entrada para o teste realizado em abril de 2003.

Tbu (oeste) (°C)	Tbu (leste) (°C)	Tbs (oeste) (°C)	Tbs (leste) (°C)
19,99	19,43	26,50	27,15
19,98	18,90	30,50	26,65
20,00	18,84	30,50	26,95
21,10	19,15	31,00	26,10
20,90	18,90	31,35	26,50
19,55	19,20	31,00	27,00
20,38	19,10	31,15	27,70
20,00	19,85	30,35	27,00
20,45	19,09	30,05	26,85
20,27	19,15	30,65	26,90
20,26	19,16	30,31	26,88
Temperatura média de bulbo úmido (°C) =			<b>19,71</b>
Temperatura média de bulbo seco (°C) =			<b>28,59</b>

As temperaturas de bulbo úmido e bulbo seco do ar de entrada foram medidas em ambos lados da torre de resfriamento, leste e oeste.

**Tabela A.4.** Dados de vazão de recirculação da água de resfriamento das áreas de aromáticos e olefinas registrados pelo sistema de controle durante o período de teste.

Vazão de água (t.h <sup>-1</sup> ) área aromáticos			Vazão de água (t.h <sup>-1</sup> ) área olefinas		
10148	8104	7937	23071	23606	23641
9370	7937	8748	22882	23710	23789
9985	8404	9625	22459	23638	23444
7814	8975	9660	23906	22167	23284
8605	8640	9340	23361	22888	23743
8638	7848	8268	23173	23412	23203
8291	8589	9419	23602	22675	22850
9589	7678	8912	22890	22810	23071
9084	8049	8599	21672	23620	23094
8663	9903	9258	23733	24559	22355
8465	9337	8720	23571	23511	23107
8291	8305	8442	23382	23507	22501
Média - vazão aromáticos (t.h <sup>-1</sup> ) =			8768		
Média - vazão olefinas (t.h <sup>-1</sup> ) =			23219		
Vazão Total (t.h <sup>-1</sup> ) =			<b>31987</b>		

**Tabela A.5.** Dados coletados dos ventiladores para o cálculo da potência durante o teste de performance realizado em abril de 2003.

Ventilador	Corrente (A)	Tensão (V)	Fator de Potência (%)	Potência (HP)
VT 01A	42,00	2379,51	90,66	181,69
VT 01B	42,00	2374,83	90,38	180,77
VT 01C	37,50	2373,57	91,05	162,51
VT 01D	45,00	2382,72	89,94	193,38
VT 01E	40,50	2382,89	90,60	175,33
VT 01F	39,00	2388,13	90,72	169,44
VT 01G	39,00	2387,42	91,27	170,41
VT 01H	40,50	2385,22	91,12	176,51
VT 01J	45,00	2386,08	89,79	193,33
VT 03A	40,50	2383,04	91,60	177,28
VT 03B	40,50	2387,94	91,30	177,06
VT 03C	42,00	2386,39	92,00	184,91
Média				<b>178,55</b>

Os valores de corrente, tensão e fator de potência são médias dos valores registrados durante o teste de performance. A amostragem foi de 10 minutos por ventilador e os dados foram registrados a cada meio segundo.

#### RESULTADOS DO TESTE DE PERFORMANCE REALIZADO EM NOVEMBRO DE 2003.

**Tabela A.6.** Valores de Temperatura de água fria (Taf) e Temperatura de água quente (Taq) para o teste de performance realizado em novembro de 2003.

Taf oeste 1 (°C)	Taf oeste 2 (°C)	Taf oeste 3 (°C)	Taf oeste 4 (°C)	Taf leste 1 (°C)	Taf leste 2 (°C)	Taf leste 3 (°C)	Taf leste 4 (°C)	Taq col.1 (°C)	Taq col.2 (°C)
30,91	28,46	30,13	32,45	28,33	28,02	28,87	32,71	44,20	48,37
30,62	28,36	31,14	32,50	28,90	27,84	28,38	32,84	44,33	48,32
30,80	27,66	30,86	32,80	28,10	26,35	28,38	32,80	44,33	48,50
31,91	25,91	31,09	32,60	27,79	24,95	30,00		44,28	48,30
31,16	25,73	30,73		27,63	24,44	29,90			
31,20	25,30	30,49		27,76	24,10	29,40			
31,10	26,90	30,74		28,09	25,95	29,16			
Temperatura média da água fria (°C) =				<b>29,23</b>					
Temperatura média da água quente (°C) =				<b>46,33</b>					

**Tabela A.7.** Valores de Temperatura de bulbo úmido (Tbu) e bulbo seco (Tbs) do ar de entrada para o teste de performance realizado em novembro de 2003.

Tbu (oeste) (°C)	Tbu (leste) (°C)	Tbs (oeste) (°C)	Tbs (leste) (°C)
22,90	24,20	29,00	30,00
24,10	24,00	31,00	30,00
24,00	24,00	30,00	30,00
24,50	23,80	31,00	30,00
23,60	24,10	29,00	32,00
	24,30		32,50
	24,60		31,00
Temperatura média de bulbo úmido (°C) =			<b>24,01</b>
Temperatura média de bulbo seco (°C) =			<b>30,46</b>

**Tabela A.8.** Média dos dados de vazão de recirculação da água de resfriamento das áreas de aromáticos e olefinas registrados pelo sistema de controle durante o período de teste.

Vazão Média - área aromáticos (t.h <sup>-1</sup> ) =	8850
Vazão Média - área olefinas (t.h <sup>-1</sup> ) =	21320
Vazão Total (t.h <sup>-1</sup> ) =	<b>30170</b>

**Tabela A.9.** Dados coletados dos ventiladores para o cálculo da potência durante o teste de performance realizado em novembro de 2003.

Ventilador	Rotações de projeto (rpm)	Rotações de teste (rpm)	Potência de projeto (HP)	Potência de teste (HP)
VT 01A	1800	1781	197	191
VT 01B	1800	1780	197	191
VT 01C	1800	1783	197	191
VT 01D	1800	1783	197	191
VT 01E	1800	1783	197	191
VT 01F	1800	1785	197	192
VT 01G	1800	1784	197	192
VT 01H	1800	1783	197	191
VT 01J	1800	1780	197	191
VT 03A	1800	1779	245	237
VT 03B	1800	1780	245	237
VT 03C	1800	1785	245	239
Média				<b>203</b>

## APÊNDICE B

### RECONCILIAÇÃO DOS DADOS DE VAZÃO – ROTINA DE CÁLCULO REALIZADA EM MATLAB 5.3<sup>â</sup>

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%Reconciliação de dados através de Projeção Matricial  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%Matriz das correntes medidas  
%(AB, AC-torres, AC-coligadas, AF, AC-filtros, AH-  
consumidores, Permeado OI, Rejeito OI, AD-geração de vapor,  
AD-coligadas).
```

```
B1 = [ 1 0 0 0 -1 0 0 0 0 0;  
      0 -1 -1 -1 0 0 0 1 0 0;  
      0 0 0 0 1 -1 0 0 0 0;  
      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;  
      0 0 0 0 0 0 -1 -1 0 0;  
      0 0 0 0 0 0 1 0 0 0;  
      0 0 0 0 0 0 0 0 -1 -1];
```

```
%Matriz das correntes não medidas  
%(AC-Tanque, AH-Desmi, Alimentação da OI, Entrada dos vasos de  
resina mista).
```

```
B2 = [-1 0 0 0;  
      1 0 0 0;  
      0 -1 0 0;  
      0 1 -1 0;  
      0 0 1 0;  
      0 0 0 -1;  
      0 0 0 1];
```

```
%Matriz das vazões das correntes medidas
```

```
xtil = [ 2020 1050 520 120 780 155 429 110 320 65 ]';

%Matriz sigma - matriz covariância dos dados das correntes
medidas
s1 = [ (138^2) (90^2) (14^2) (60^2) (30^2) (16^2) (56^2)
       (10^2)(26^2) (4^2) ];

%Matriz diagonal das variâncias
sigma = diag(s1);

%Matriz identidade 7x7
e1 = eye(7);

%Permutações das linhas da matriz identidade para obter P
e = [e1(1,:); e1(3:4,:); e1(6,:); e1(2,:); e1(5,:); e1(7,:)];

%Matriz P (7x4)
g = e*B2;

%Matriz g1 (7x10). Efetua as mesmas operações de obtenção da
matriz P para a matriz B1
g1 = e*B1;

%Matriz P1 - matriz quadrada não singular (4x4)
P1 = g(1:4,:);

%Matriz P2 - o restante das linhas da matriz P (3x4)
P2 = g(5:end,:);

%Matriz B1 modificada (mesma troca de linhas para obter P1)
B11 = g1(1:4,:);

%Matriz Projeção Yt(3x7)
Yt = [-1*P2*inv(P1) eye(3)]*e;

%Ajuste pelo método de Lagrange
H = Yt*B1*sigma*B1'*Yt'

%Multiplicadores de Lagrange
lambda = -1*inv(H)*Yt*B1*xtil

%Ajuste para as vazões medidas
a = sigma*B1'*Yt'*lambda

%Valor das vazões reconciliadas
x = xtil+a

bb = B11*x;

%Estimativa para as vazões não medidas
v = -1*inv(P1)*bb
```

## **APÊNDICE C**

# **MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE DENSIDADE DE LODO DA ÁGUA - SDI (SILT DENSITY INDEX)**

O método segue o procedimento descrito no Standard Test Method for SILT DENSITY INDEX (SDI) OF WATER – Norma ASTM D - 4189.

### Objetivo

Determinar o índice estimado de quantidade de partículas presentes na água

### Equipamento

- 1) Kit para SDI: regulador de pressão, manômetro, filtro de linha 47mm Millipore, cronômetro, membrana HAWP 04700, 0,45um Millipore.
- 2) Proveta graduada de 500 mL.
- 3) Cronômetro.
- 4) Termômetro.

### Procedimento

- 1) Deixar por 3 a 5 minutos escoar a água na linha de teste antes de instalar o Kit para SDI (preferencialmente realizar o teste nas condições normais de operação).
- 2) Conectar o Kit no ponto da linha a ser testada sem a membrana do filtro.
- 3) Abrir a válvula e deixar drenando por 2 minutos com a água a ser testada, fazer a medida da temperatura.



- 4) Ajustar a pressão para 2 bars (30 psi) girando o parafuso do regulador de pressão.
- 5) Fechar a válvula da linha e soltar a pressão.
- 6) Colocar a membrana cuidadosamente no filtro e fechar apertando os parafusos.
- 7) Abrir parcialmente a válvula e, com a água escoando pelo Kit, soltar cuidadosamente 2 parafusos do filtro para eliminar o ar que possivelmente ainda possa estar no filtro.
- 8) Apertar os parafusos do filtro.
- 9) Posicionar a proveta graduada.
- 10) Simultaneamente abrir totalmente a válvula e direcionar o fluxo de água para dentro da proveta e acionar o cronômetro. Anotar o tempo (em segundos) gasto para o fluxo inicial encher 500 mL da proveta (Tempo Fluxo Inicial).
- 11) Fazer leituras do tempo gasto para encher 500mL da proveta em 5, 10 e 15 minutos.
- 12) Após as leituras dos tempos fechar a válvula totalmente.

### Princípio

Filtração: as partículas presentes na água são retidas na membrana causando seu entupimento e diminuição do fluxo de água no sistema.

### Cálculo

$$\% \text{ Entupimento} = \frac{t_f - t_i}{t_f} \times 100 \quad (\text{C.1})$$

$$SDI = \frac{\% \text{ Entupimento}}{t} \quad (\text{C.2})$$

onde:

$t_i$  = tempo inicial requerido para coletar 500mL da amostra (segundos);

$t_f$  = tempo final requerido para coletar 500mL da amostra (segundos) após transcorrido o tempo de filtragem;

$t$  = tempo de fluxo de água passado no teste.

NOTA:  $t_2$  não poderá ser 4 vezes maior que  $t_1$  (% de entupimento > 75 %). Se em  $t = 5$  minutos, a % de entupimento exceder 75 %, outro método deverá ser utilizado.

### Interferência

A variação da temperatura da água não deve exceder  $\pm 1^\circ\text{C}$ .

## APÊNDICE D

# PROCEDIMENTO DE CÁLCULO PARA A DETERMINAÇÃO DA TAXA DE EVAPORAÇÃO DA TORRE DE RESFRIAMENTO

### D.1 Rotina evap.m

```
%*****  
%Procedimento de cálculo para a obtenção da taxa de evaporação  
%da torre de resfriamento  
%*****  
  
Tbubase = input('Entre com o valor da temperatura de bulbo  
úmido da base em °C = ');  
TBUbase = Tbubase * 1.8 + 32; %converte °C para °F  
  
Tbsbase = input('Entre com o valor da temperatura de bulbo  
seco da base em °C = ');  
TBSbase = Tbsbase * 1.8 + 32;  
  
Tquente = input('Entre com o valor da temperatura de água  
quente em °C = ');  
Taq = Tquente * 1.8 + 32;  
  
Tfria = input('Entre com o valor da temperatura de água fria  
em °C = ');  
Taf = Tfria * 1.8 + 32;  
  
Vazao = input('Entre com o valor da vazão de água de  
recirculação em t/h = ');  
Lt = Vazao * 2204.6 / 60; %converte t/h para lb/min
```

```
hp = input('Entre com o valor da potência dos ventiladores em
hp = ');
```

```
% Retorna os dados de projeto
[rho1p, rho2p, v1p, v2p, hpp, LGp, TBUtopoP, htopo, Lp] =
dadosprojeto1;
```

```
% Retorna os valores de volumes e umidades absolutas de
entrada e saída, temperatura e entalpia de topo.
[v1, v2, Hs2, H1, TBUtopoT, htopo] = volumes1( TBUbase,
TBSbase, Taq, Taf, Lt, hp, rho2p, v2p, hpp, LGp, Lp );
```

```
%Massa específica do ar de saída
rho2 = 1/v2;
```

```
%Razão L/G de teste
LGt = (Lt / Lp) * (hpp / hp)^(1/3) * (rho2 / rho2p)^(1/3) *
(v2 / v2p) * LGp
```

```
%Vazão de ar de teste
Gt = Lt / LGt;
```

```
%Taxa de evaporação em t/h
E = Gt * (Hs2 - H1) * 60 / 2204.6
```

## D.2 Rotina dadosprojeto1.m

```
*****
%Calcula os dados de projeto da torre
*****

function [rho1p, rho2p, v1p, v2p, hpp, LGp, TBUtopo, htopo,
Lp] = dadosprojeto1

% Temperatura da água quente (°F)
Taq = 113;

% Temperatura da água fria (°F)
Taf = 86;

% Temperatura (°F) de bulbo úmido do ar de entrada (base)
TBUbase = 78.8;

% Temperatura (°F) de bulbo seco do ar de entrada
TBSbase = 84.2;

% Vazão de líquido das duas torres (t/h)
L = 35467;
```

```

% Vazão mássica em lb/min
Lp = L * 2204.6/60;
% Média ponderada do L/G de projeto das duas torres (L/Gp =
0.96(9 células) e 0.842(3células))
LGp = 0.9194;

% Vazão mássica de ar (lb/min)
Gp = Lp/LGp;

% Potência total dos ventiladores (189.5 hp por ventilador)
hpp = 2274;

% Retorna os valores de volumes e umidades absolutas de
entrada e saída, temperatura e entalpia de topo de projeto
[v1p, v2p, H1, Hs2, TBUtopo, htopo] = volumes( TBUbase,
TBSbase, Taq, Taf, Gp, Lp );

% Massa específica do ar de entrada
rho1p = 1/v1p;

% Massa específica do ar de saída
rho2p = 1/v2p;

```

### D.3 Rotina volumes.m

```

%*****
% Calcula o volume específico de projeto do ar de entrada e de
saída da torre
%*****
function [v1, v2, H1, Hs2, TBUtopo, htopo] = volumes( TBUbase,
TBSbase, Taq, Taf, Gp, Lp )
% Constante universal dos gases (psi.ft3/lbmol°R)
R = 10.73164;

% Constantes (A,B,C) da eq. de Antoine(para temperatura em °F)
A = 6.53247;
B = 7173.79;
C = 389.4747;

% Pressão crítica do ar(lbf/in2)
Pc = 3206.7;

% Pressão atmosférica(lbf/in2)
P = 14.696;

% Massa molar do vapor(lb/lbmol)
Mv = 18;

% Massa molar do gás(lb/lbmol)
Mg = 29;

```

```

% Calor específico do vapor(Btu/lb°F)
Cpv = 0.45;

% Calor específico do gás(Btu/lb°F)
Cpg = 0.24;

% Equação de Antoine para o cálculo da pressão de
saturação(lbf/in2)
Ps = exp( A + log(Pc) - B / ( TBUbase + C ) );

% Cálculo do calor latente de vaporização(Btu/lb)
lambda = R * (TBUbase + 459.67)^2 * B / (TBUbase + C)^2 *
0.18505 / 18;
%(0.18505 é o fator de conversão de psi.ft3 para Btu)

% Cálculo da umidade absoluta de saturação do ar de entrada(lb
de vapor de água/lb de ar seco)
Hs1 = Ps * Mv / ( P - Ps ) / Mg;

% Cálculo da umidade absoluta do ar de entrada (base)
H1 = ( lambda * Hs1 - Cpg * ( TBSbase - TBUbase ) ) / ( Cpv *(
TBSbase - TBUbase ) + lambda );

% Cálculo do volume específico do ar de entrada(ft3/lb de ar
seco)
v1 = R * (TBSbase + 459.67)/ ( P * Mg ) * ( 1 + H1 * Mg / Mv );

% Cálculo da entalpia do ar de entrada(Btu/lb), considerando a
temperatura de referência Tref = 0°C = 32°F
hbase = Cpg * ( TBSbase - 32 ) + H1 * Cpv * (TBSbase - 32) +
H1 * lambda;

% Método iterativo:
% Arbitrar uma temperatura de saturação (média da temperatura
de água quente e de água fria)
Tarb = (Taq + Taf)/2;

op = optimset;

% Cálculo da temperatura de bulbo úmido do ar de saída
TBUtopo = fsolve( 'solvetbu', Tarb, op, A, B, C, Pc, Mv, Mg,
P, R, htopo, Cpg, Cpv );

% Cálculo da pressão de saturação do ar de saída(lbf/in2)
Ps2 = exp( A + log(Pc) - B / ( TBUtopo + C ) );

% Cálculo da umidade absoluta de saturação do ar de saída(lb
de vapor de água/lb de ar seco)
Hs2 = Ps2 * Mv / ( P - Ps2 ) / Mg;

```

```
% Cálculo do volume específico do ar de saída(ft3/lb de ar
seco)
v2 = R * (TBUtopo + 459.67)/ (P * Mg) * ( 1 + Hs2 * Mg / Mv );
```

## D.4 Rotina solvetbu.m

```
*****
% Calcula a temperatura de bulbo úmido de projeto do ar de
saída
*****

function E = solvetbu( Tarb, A,B,C,Pc,Mv,Mg,P,R,htopo,Cpg,Cpv)

Ps2 = exp( A + log(Pc) - B / ( Tarb + C ) );
Hs2 = Ps2 * Mv / ( P - Ps2 ) / Mg;
lambda2 = R * (Tarb + 459.67)^2 * B / (Tarb + C)^2 * 0.18505 /
18;
E = 32 + (htopo - Hs2 * lambda2) / (Cpg + Hs2 * Cpv) - Tarb;
```

## D.5 Rotina volumes1.m

```
*****
% Calcula o volume específico do ar de entrada e de saída da
torre
*****

function [v1, v2, Hs2, H1, TBUtopo, htopo] = volumes1(
TBUbase, TBSbase, Taq, Taf, Lt, hp, rho2p, v2p, hpp, LGp, Lp )

% Constante universal dos gases (psi.ft3/lbmol°R)
R = 10.73164;

% Constantes (A,B,C) da eq. de Antoine(para temperatura em °F)
A = 6.53247;
B = 7173.79;
C = 389.4747;

% Pressão crítica do ar(lbf/in2)
Pc = 3206.7;

% Pressão atmosférica(lbf/in2)
P = 14.696;

% Massa molar do vapor(lb/lbmol)
Mv = 18;

% Massa molar do gás(lb/lbmol)
Mg = 29;
```

```

% Calor específico do vapor(Btu/lb°F)
Cpv = 0.45;

% Calor específico do gás(Btu/lb°F)
Cpg = 0.24;

% Equação de Antoine para o cálculo da pressão de
saturação(lbf/in2)
Ps = exp( A + log(Pc) - B / ( TBUbase + C ) );

% Cálculo do calor latente de vaporização(Btu/lb)
lambda = R * (TBUbase + 459.67)^2 * B / (TBUbase + C)^2 *
0.18505 / 18;
%(0.18505 é o fator de conversão de psi.ft3 para Btu)

% Cálculo da umidade absoluta de saturação do ar de entrada(lb
de vapor de água/lb de ar seco)
Hs1 = Ps * Mv / ( P - Ps ) / Mg;

% Cálculo da umidade absoluta do ar de entrada (base)
H1 = ( lambda * Hs1 - Cpg * ( TBSbase - TBUbase ) ) / ( Cpv * (
TBSbase - TBUbase ) + lambda );

% Cálculo do volume específico do ar de entrada(ft3/lb de ar
seco)
v1 = R * (TBSbase + 459.67) / ( P * Mg ) * (1 + H1 * Mg / Mv
);

% Cálculo da entalpia do ar de entrada(Btu/lb), considerando a
temperatura de referência Tref = 0°C = 32°F
hbase = Cpg * ( TBSbase - 32 ) + H1 * Cpv * (TBSbase - 32) +
H1 * lambda;

% Método iterativo:
% Arbitrar uma temperatura de saturação (média da temperatura
de água quente e de água fria)
Tarb = (Taq + Taf)/2;

op = optimset;

% Cálculo da temperatura de bulbo úmido do ar de saída
TBUtopo = fsolve( 'solvetbul', Tarb, op, A, B, C, Pc, Mv, Mg,
P, R, Cpg, Cpv, hbase, Lt, hp, rho2p, v2p, hpp, LGp, Lp, Taq,
Taf );

% Cálculo da pressão de saturação do ar de saída(lbf/in2)
Ps2 = exp( A + log(Pc) - B / ( TBUtopo + C ) );

% Cálculo da umidade absoluta de saturação do ar de saída(lb
de vapor de água/lb de ar seco)
Hs2 = Ps2 * Mv / ( P - Ps2 ) / Mg;

```



```
% Cálculo do volume específico do ar de saída(ft3/lb de ar
seco)
v2 = R * (TBUtopo + 459.67)/ (P * Mg) * ( 1 + Hs2 * Mg / Mv );

% Massa específica do ar de saída (lb de ar seco/ft3)
rho2 = 1/v2;
```

## D.6 Rotina solvetbu1.m

```
*****
% Calcula a temperatura de bulbo úmido do ar de saída
*****

function E = solvetbul( TBUtopo, A, B, C, Pc, Mv, Mg, P, R,
Cpg, Cpv, hbase, Lt, hp, rho2p, v2p, hpp, LGp, Lp, Taq, Taf )

Ps2 = exp( A + log(Pc) - B / ( TBUtopo + C ) );
Hs2 = Ps2 * Mv / ( P - Ps2 ) / Mg;
v2 = R * (TBUtopo + 459.67)/ (P * Mg) * ( 1 + Hs2 * Mg / Mv );
rho2 = 1/v2;

%Entalpia do ar de saída(Btu/lb)usando a equação da linha de
operação
h2t = (Lt / Lp) * (hpp / hp)^(1/3) * (rho2 / rho2p)^(1/3) *
(v2 / v2p) * LGp * (Taq - Taf) + hbase;

%Calor latente de vaporização(Btu/lb)
lambda2 = R * (TBUtopo + 459.67)^2 * B / (TBUtopo + C)^2 *
0.18505 / 18;

E = 32 + (h2t - Hs2 * lambda2) / (Cpg + Hs2 * Cpv) - TBUtopo;
```

## APÊNDICE E

# PROCEDIMENTO DE CÁLCULO PARA MINIMIZAÇÃO DO CUSTO DO TRATAMENTO DE EFLUENTES DA TORRE DE RESFRIAMENTO

### E.1 Rotina custo.m

```
%*****  
% Procedimento de cálculo para a obtenção do custo mínimo de  
% tratamento de efluentes da torre de resfriamento  
%*****  
  
E = input('Entre com o valor da taxa de evaporação em t/h =  
    ');  
  
R = input('Entre com o valor da taxa de perdas por respingos  
em t/h =    ');  
  
Xm = input('Entre com o valor da concentração de DQO na água  
de make up em g/m3 =    ');  
  
Vr = input('Entre com o valor da vazão de rejeito em t/h =  
    ');  
  
perc = input('Entre com o valor da percentagem de recuperação  
do rejeito =    ');  
  
Vt = input('Entre com o valor da vazão total de AC em t/h =  
    ');  
  
ph = input('Entre com o valor do pH da água de resfriamento =  
    ');
```

```
perc = perc/100;
Crz = 93;    % Concentração de Sílica no rejeito da osmose
inversa (ppm de SiO2)

Clz = 15;    % Concentração de Sílica na água clarificada (ppm
de SiO2)

Cry = 46;    % Concentração de Dureza Magnésio no rejeito da
osmose inversa (ppm CaCO3)

Cly = 14;    % Concentração de Dureza Magnésio na água
clarificada (ppm CaCO3)

Vl = Vt - Vr; % Volume da água clarificada sem o rejeito da
OI (m3)

Zm = (Crz * Vr * perc + Clz * Vl) / Vt; % Silica no makeup
(ppm)

Ym = (Cry * Vr * perc + Cly * Vl) / Vt; % Dureza Mg no makeup
(ppm)

ra = 0.6;    % Taxa de consumo de DQO dentro da torre (g/h.m3)
Q = 10500;   % Carga de DQO dos produtos químicos (g/h)

% Limites inferiores (kpsi) e superiores (kpss) para a
% Constante de solubilidade do silicato de magnésio (kps)
kpsi = 1e-30;
kpss = 1e-29;

% Cálculo da concentração de sílica na purga (Zp) para
satisfazer os valores limites de kps (ppm)
Zpi = (kpsi * (Zm/Ym)^3 * 6^4 ./ 10.^(-59 + 2 * ph)).^(1/7);
Zps = (kpss * (Zm/Ym)^3 * 6^4 ./ 10.^(-59 + 2 * ph)).^(1/7);

% Cálculo da concentração de dureza magnésio na purga
(Yp)(ppm)
Ypi = Zpi * (Ym/Zm);
Yps = Zps * (Ym/Zm);

% Cálculo dos limites de vazão de purga (P) (m3/h)
Ps = (R*Ypi - (R + E)*Ym) ./ (Ym - Ypi);
Pi = (R*Yps - (R + E)*Ym) ./ (Ym - Yps);

% Chute inicial para o cálculo da taxa de purga
P0 = (Pi + Ps) / 2;

% Cálculo da taxa de purga que minimiza o custo de tratamento
de efluentes
op = optimset;
```

```

[Potim, C] = fmincon('custo2', P0, [],[],[],[], Pi, Ps, [],
op, ra, E, R, Q, Xm );

% Valor da taxa de purga otimizada (m³/h)
Purga_Otimizada = Potim
disp('t/h')

% Custo mensal do efluente da purga (R$)
Custo_mensal_do_efluente = C
disp('R$')

% Concentração de DQO na purga (ppm de O₂)
Xp = (((E + R) * Xm + Q + Potim * Xm)- ra*18000) / (Potim +
R);
Concentracao_de_DQO = Xp
disp('g/m³')
% Volume do sistema = 18000 m³

% Custo mensal total do tratamento de efluentes = custo da
purga + custo do rejeito
Custo_mensal_total = C + (Vr - Vr * perc) * 0.45 * 720
disp('R$')

% Gráfico da taxa de purga versus pH da água de resfriamento
figure(2);
ph1=7:0.25:9;
Zps1 = (kpss * (Zm/Ym)^3 * 6^4 ./ 10.^(-59 + 2 *
ph1)).^(1/7);
Yps1 = Zps1 * (Ym/Zm);
P = (R*Yps1 - (R + E)*Ym) ./ (Ym - Yps1);
plot(ph1,P)
xlabel('ph'); ylabel('P (t/h)');

```

## E.2 Rotina custo2.m

```

%*****
%Calcula a taxa de purga que minimiza o custo de tratamento de
efluentes
%*****
function C = custo2( P, ra, E, R, Q, Xm )
% Concentração de DQO do efluente de purga (ppm O₂)
Xp = (((E + R) * Xm + Q + P * Xm)- ra*18000) / (P + R);

if ( Xp > 50 )
    % Custo para o tratamento de efluente com concentração de
DQO superior a 50 ppm
    C = (P + 10*P*( Xp / 1000 - 0.05))*0.45 * 720;
else

```

---

```
% Custo para o tratamento de efluente com concentração de
DQO igual ou inferior a 50 ppm
```

```
    C = P * 0.45 * 720;
```

```
end
```

```
% Gráfico do custo de tratamento de efluente versus taxa de
purga
```

```
%figure(1);
```

```
%for P=1:200,
```

```
    %C(P) = custo2( P, 0.6, 698, 48, 10500, 10 );
```

```
%end;
```

```
%plot(C)
```

```
%xlabel('P (m3/h)'); ylabel('Custo (R$/mês)');
```

## **APÊNDICE F**

### **SISTEMA DE CANAIS PARA A RECUPERAÇÃO DE EFLUENTES**

