

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA E ENGENHARIA DE  
ALIMENTOS

## **OTIMIZAÇÃO DO REUSO DE ÁGUA EM LAVADORES CONTÍNUOS DA INDÚSTRIA TÊXTIL**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química.

**Aline Resmini Melo**

Florianópolis, fevereiro de 2005.

---

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Edi e Zuleica, e a minha irmã, Carolina, que me apoiaram, incentivaram e me mostraram o caminho.

Ao Professor Antônio Augusto Ulson de Souza, pela orientação, incentivo e apoio a este trabalho.

À Professora Selene Maria de Arruda Guelli Ulson de Souza, por sua dedicação e amizade.

Aos amigos do LABSIN e LABMASSA que sempre estiveram dispostos a auxiliar e contribuir no que fosse preciso.

Aos colegas do SENAI de Blumenau, pela colaboração e fornecimento das condições técnicas para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina, seus professores e funcionários, pela colaboração para o desenvolvimento deste trabalho.

Às amigas Kenia Milanez e Tirzhá Lins Porto Dantas pela amizade e companheirismo durante este período.

A Cristiane Costa que demonstrou ser uma verdadeira amiga.

Às amigas e companheiras da turma: Estela Ferretti, Andréia Bonan, Adriana da Costa, Jaqueline Francischetti, Neiva Campregher, Roseli Fernandes, Marlene Guevara do Santos, pelos bons momentos que passamos juntas e pelo apoio e incentivo.

Aos grandes amigos, que embora não citados nominalmente, foram muito importantes para esta conquista.

A CAPES pelo apoio financeiro na concessão de bolsa.

À FINEP pelo financiamento do Projeto AGUATEX em conjunto com as empresas, COTEMINAS, BUETTNER, KARSTEN, MENEGOTTI e TAPAJÓS.

## ÍNDICE

Aline Resmini Melo .....	ii
ÍNDICE DE TABELAS .....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
RESUMO .....	xii
ABSTRACT.....	xiii
CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
<b>2.1 – IMPORTÂNCIA E CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA.....</b>	<b>5</b>
<b>2.2 – O SETOR TÊXTIL NO BRASIL .....</b>	<b>10</b>
<b>2.3 – CARACTERIZAÇÃO DOS EFLUENTES NA INDÚSTRIA TÊXTIL .....</b>	<b>13</b>
<b>2.4 – PROBLEMAS E SOLUÇÕES DOS RECURSOS HÍDRICOS .....</b>	<b>22</b>
<b>2.5 – OTIMIZAÇÃO VIA PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA .....</b>	<b>32</b>
<b>2.6 – SIMULAÇÃO NUMÉRICA E ESTRUTURA DOS PROGRAMAS EXECUTIVOS.....</b>	<b>33</b>
2.6.1 – Fase de entrada de dados .....	35
2.6.2 – Fase de processamento .....	36
2.6.3 – Fase de saída de dados.....	38
2.6.4 – Matrizes do Processo .....	38
CAPÍTULO 3 - DESENVOLVIMENTO DOS ALGORITMOS COMPUTACIONAIS	39
<b>3.1 – ESTRUTURAÇÃO DO PROGRAMA PRINCIPAL .....</b>	<b>39</b>
<b>3.2 – INTERFACE – DADOS DE ENTRADA E RESULTADOS .....</b>	<b>41</b>
<b>3.3 – CÁLCULO DAS MATRIZES.....</b>	<b>56</b>
3.3.1 – Matriz do Processo .....	56
3.3.2 – Matriz de Incidências.....	57
3.3.3 – Matriz Conexão das Correntes .....	58
3.3.4 – Matriz de Adjacências .....	59
<b>3.4 – IDENTIFICAÇÃO DOS RECICLOS .....</b>	<b>60</b>
<b>3.5 – DETERMINAÇÃO DAS CORRENTES DE CORTE.....</b>	<b>63</b>
<b>3.6 – DETERMINAÇÃO DA SEQÜÊNCIA DE CÁLCULOS .....</b>	<b>63</b>
<b>3.7 – INFORMAÇÕES DE CADA UNIDADE.....</b>	<b>64</b>
<b>3.8 – DADOS DAS CORRENTES DE ENTRADA .....</b>	<b>65</b>

---

<b>3.9 – ENTRADA DOS VALORES INICIAIS DAS CORRENTES DE CORTE .....</b>	<b>66</b>
<b>3.10 – CÁLCULO DOS FATORES FONTE .....</b>	<b>67</b>
<b>3.11 – PROCESSAMENTO DAS UNIDADES MODULARES .....</b>	<b>69</b>
3.11.1 – Ponto de Mistura.....	69
3.11.2 – Divisor de Correntes .....	71
3.11.3 – Unidade Caixa .....	73
<b>3.12 – TESTE DE CONVERGÊNCIA DOS RESULTADOS .....</b>	<b>75</b>
<b>3.12 – EQUAÇÃO PARA O CÁLCULO DE REMOÇÃO DE DQO DO TECIDO ....</b>	<b>79</b>
<b>CAPÍTULO 4 - ESTUDO DE CASOS .....</b>	<b>81</b>
<b>4.1 – CASO 1 .....</b>	<b>82</b>
4.1.1 – Caso 1 – A .....	82
4.1.2 – Caso 1 – B .....	98
4.1.3 – Comparações entre o Caso 1 – A e o Caso 1 – B .....	100
<b>4.2 – CASO 2 .....</b>	<b>105</b>
4.2.1 – Caso 2 – A e Caso 2 - B .....	106
4.2.2 – Comparações entre o Caso 2 – A e o Caso 2 – B .....	108
<b>4.3 – CASO 3 .....</b>	<b>117</b>
4.3.1 – Execução do Caso 3.....	118
4.3.2 – Comparações entre o Caso 1 – A e o Caso 3.....	119
<b>CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>126</b>
<b>5.1 – LAVANDERIA 1 .....</b>	<b>126</b>
<b>5.2 – LAVANDERIA 2 .....</b>	<b>148</b>
<b>5.3 – LAVANDERIA 3 .....</b>	<b>166</b>
<b>5.4 – COMPARAÇÕES ENTRE AS TRÊS LAVANDERIAS.....</b>	<b>181</b>
<b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>	<b>183</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>186</b>
<b>ANEXO 1 – Diagnósticos de erros.....</b>	<b>191</b>

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Tabela de classificação de águas estaduais (Fonte: Deliberação Normativa COPAM 10/86).....	7
Tabela 2.2 – Índice de Qualidade de Água (IQA) (Fonte: FEAM).....	8
Tabela 2.3 – Consumo de água em função do substrato (Fonte: CPRH, 2001)....	12
Tabela 2.4 – Principais contaminantes de acordo com a operação unitária (Fonte: CONCON, 1999).....	17
Tabela 2.5 - Cargas dos despejos por etapa de processo (Fonte: CPRH, 2001)..	19
Tabela 2.6 – Exigências para lançamento de efluentes líquidos têxteis – direto e indireto (Fonte: CPRH, 2001). ....	29
Tabela 3.1 - Matriz do Processo referente ao fluxograma de informações da Figura 2.1.....	57
Tabela 3.2 – Matriz de Incidências referente ao fluxograma de informação da Figura 2.1. ....	58
Tabela 3.3 – Matriz Conexão das Correntes referente ao fluxograma de informações da Figura 2.1. ....	59
Tabela 3.4 – Matriz de Adjacências referente ao fluxograma de informações da Figura 2.1. ....	60
Tabela 4.1 – Informações sobre cada caixa do Caso 1 - A. ....	84
Tabela 4.2 – Informações sobre cada corrente de entrada do Caso 1 - A. ....	84
Tabela 4.3 – Informações sobre o valor de cada pick up do Caso 1 - A.....	85
Tabela 4.4 – Informações sobre cada corrente de entrada do Caso 1 - B. ....	99
Tabela 4.5 – Matriz do Processo para o Caso 1 – A e Caso 1 – B.....	100
Tabela 4.6 – Matriz Circuito Correntes para o Caso 1 – A e Caso 1 – B.....	100
Tabela 4.7 – Matriz Seqüência de Cálculo para o Caso 1 – A e Caso 1 – B.....	100
Tabela 4.8 – Valores dos Termos Fonte para o Caso 1 – A e Caso 1 – B. ....	101
Tabela 4.9 – Valores de vazão, concentração (no tempo de 3000 min) e temperatura para o Caso 1 – A e Caso 1 – B.....	101
Tabela 4.10 – Valores de concentração (no tempo de 3000 min) e temperatura para cada caixa e cada caso. ....	102
Tabela 4.11 – Valores de concentração (no tempo de 3000 min) sem a correção do termo fonte, para o Caso 1 – A e o Caso 1 – B. ....	103
Tabela 4.12 – Resultados do balanço mássico do Caso 1 – A e o Caso 1 - B....	104
Tabela 4.13 – Valores de remoção de DQO (no tempo de 3000 min) de cada unidade caixa para o Caso 1 – A e o Caso 1 – B. ....	105
Tabela 4.14 – Informações sobre cada caixa do Caso 2 – A e do Caso 2 - B....	107
Tabela 4.15 – Informações sobre cada corrente de entrada do Caso 2 – A e Caso 2 - B. ....	107
Tabela 4.16 – Informações sobre o valor de cada pick up do Caso 2 – A e do Caso 2 - B. ....	108
Tabela 4.17 – Matriz com os valores iniciais das correntes de corte para o Caso 2 – A e Caso 2 – B.....	109
Tabela 4.18 – Matriz do Processo para o Caso 2 – A e Caso 2 – B.....	109
Tabela 4.19 – Matriz Circuito Correntes para o Caso 2 – A e Caso 2 – B.....	110

---

Tabela 4.20 – Matriz Seqüência de Cálculo para o Caso 2 – A e Caso 2 – B....	110
Tabela 4.21 – Valores dos Termos Fonte para o Caso 2 – A e Caso 2 – B. ....	110
Tabela 4.22 – Valores de vazão, concentração (no tempo de 3000 min) e temperatura para o Caso 2 – A e Caso 2 – B.....	111
Tabela 4.23 – Valores de concentração (no tempo de 3000 min) e temperatura para cada unidade caixa do Caso 2 – A e Caso 2 - B. ....	112
Tabela 4.24 – Valores de concentração (no tempo de 3000 min) sem a correção do termo fonte para o Caso 2. ....	115
Tabela 4.25 – Resultados do balanço mássico do Caso 2. ....	116
Tabela 4.26 – Valores de remoção de DQO (no tempo de 3000 min) de cada unidade caixa para o Caso 2. ....	117
Tabela 4.27 – Matriz dos valores do fator de separação do divisor de correntes do Caso 3. ....	119
Tabela 4.28 – Matriz do Processo para o Caso 3.....	120
Tabela 4.29 – Matriz Circuito Correntes para o Caso 3.....	120
Tabela 4.30 – Matriz Seqüência de Cálculo para o Caso 3.....	120
Tabela 4.31 – Valores de vazão e concentração (no tempo de 3000 min), e temperatura para o Caso 3. ....	121
Tabela 4.32 – Valores de concentração (no tempo de 3000 min) e temperatura para cada caixa e cada caso. ....	122
Tabela 4.33 – Valores de concentração (no tempo de 3000 min) sem a correção do termo fonte para o Caso 3. ....	123
Tabela 4.34 – Resultados do balanço mássico do Caso 3. ....	124
Tabela 4.35 – Valores de remoção de DQO (no tempo de 3000 min) de cada unidade caixa para o Caso 3. ....	125
Tabela 5.1 – Informações sobre cada caixa da Lavanderia 1. ....	128
Tabela 5.2 – Informações sobre cada corrente de entrada da Lavanderia 1.....	128
Tabela 5.3 – Informações sobre o valor de cada pick up da Lavanderia 1.....	129
Tabela 5.4 – Resultados das unidades caixas da Lavanderia 1.....	130
Tabela 5.5 – Valores de vazão, concentração (no tempo de 500 min) e temperatura para Lavanderia 1.....	132
Tabela 5.6 – Valores dos erros calculados entre os valores experimentais e teóricos de concentração e temperatura de cada unidade caixa da Lavandera 1. ....	133
Tabela 5.7 – Valores de concentração (no estado estacionário) das correntes sem a correção do termo fonte na Lavanderia 1. ....	134
Tabela 5.8 – Valores dos erros nos balanços globais na Lavanderia 1.....	135
Tabela 5.9 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 1, remoção de DQO em mg/L.....	136
Tabela 5.10 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 1, remoção de DQO em gDQO/Kg tecido. ....	137
Tabela 5.11 – Informações sobre os fatores de divisão do divisor de correntes da proposta de otimização da Lavanderia 1 – Caso A. ....	138
Tabela 5.12 – Informações das correntes de entrada da proposta de otimização da Lavanderia 1 – Caso A. ....	138
Tabela 5.13 – Valores de concentração (no tempo de 500 min) e temperatura das unidades caixas da proposta de otimização da Lavanderia 1 – Caso A.....	139

---

Tabela 5.14 – Valores de vazão, concentração (no tempo de 500 min) e temperatura para a proposta de otimização da Lavanderia 1 – Caso A.....	139
Tabela 5.15 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 1 – Caso A, remoção de DQO em mg/L.....	141
Tabela 5.16 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 1 – Caso A, remoção de DQO em gDQO/Kg de tecido.....	141
Tabela 5.17 – Volume de água usada por massa de tecido seco e massa de DQO removida por massa de tecido seco (Lavanderia 1 - Caso A). ....	142
Tabela 5.18 – Parâmetros cada divisor de correntes da proposta de otimização da Lavanderia 1 – Caso B. ....	143
Tabela 5.19 – Valores de concentração (no tempo de 500 min) e temperatura das unidades caixas da proposta de otimização da Lavanderia 1 – Caso B.....	144
Tabela 5.20 – Valores de vazão, concentração (no tempo de 500 min) e temperatura para a proposta de otimização da Lavanderia 1 – Caso B.....	144
Tabela 5.21 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 1 – Caso B, remoção de DQO em mg/L.....	146
Tabela 5.22 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 1 – Caso B, remoção de DQO em gDQO/Kg tecido.....	147
Tabela 5.23 – Volume de água usada por massa de tecido seco e massa de DQO removida por massa de tecido seco [Lavanderia 1 - Caso B].....	147
Tabela 5.24 – Informações sobre cada caixa da Lavanderia 2. ....	149
Tabela 5.25 – Informações sobre cada corrente de entrada da Lavanderia 2.....	149
Tabela 5.26 – Informações sobre o valor de cada pick up da Lavanderia 2.....	150
Tabela 5.27 – Resultados das unidades caixas da Lavanderia 2.....	150
Tabela 5.28 – Valores de vazão, concentração (no tempo de 500 min) e temperatura para Lavanderia 2.....	152
Tabela 5.29 – Valores dos erros calculados entre os valores experimentais e teóricos de concentração e temperatura de cada unidade caixa da Lavanderia 2. ....	153
Tabela 5.30 – Valores de concentração (no estado estacionário) das correntes sem a correção do termo fonte na Lavanderia 2. ....	154
Tabela 5.31 – Valores dos erros nos balanços globais na Lavanderia 2.....	155
Tabela 5.32 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 2 remoção de DQO em mg/L.....	156
Tabela 5.33 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 2, remoção de DQO em gDQO/Kg tecido. ....	156
Tabela 5.34 – Informações sobre as correntes de entrada da proposta de otimização da Lavanderia 2 – Caso A. ....	158
Tabela 5.35 – Valores de concentração (no tempo de 500 min) e temperatura das unidades caixas da proposta de otimização da Lavanderia 2 – Caso A.....	158
Tabela 5.36 – Valores de vazão, concentração (no tempo de 500 min) e temperatura para a proposta de otimização da Lavanderia 2 – Caso A.....	159
Tabela 5.37 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 2 – Caso A, remoção de DQO em mg/L.....	160
Tabela 5.38 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 2 – Caso A, remoção de DQO em gDQO/Kg tecido.....	160

---

Tabela 5.39 – Volume de água usada por massa de tecido seco e massa de DQO removida por massa de tecido seco [Lavanderia 2 - Caso A].....	161
Tabela 5.40 – Informações sobre os fatores de divisão do divisor de correntes da proposta de otimização da Lavanderia 2 – Caso B. ....	162
Tabela 5.41 – Valores de concentração (no tempo de 500 min) e temperatura das unidades caixas da proposta de otimização da Lavanderia 2 – Caso B.....	163
Tabela 5.42 – Valores de vazão, concentração (no tempo de 500 min) e temperatura para a proposta de otimização da Lavanderia 2 – Caso B.....	163
Tabela 5.43 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 2 – Caso B, remoção de DQO em mg/L.....	164
Tabela 5.44 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 2 – Caso B, remoção de DQO em gDQO/Kg tecido.....	165
Tabela 5.45 – Volume de água usada por massa de tecido seco e massa de DQO removida por massa de tecido seco [Lavanderia 2 - Caso B].....	165
Tabela 5.46 – Informações sobre cada caixa da Lavanderia 3. ....	167
Tabela 5.47 – Informações sobre cada corrente de entrada da Lavanderia 3.....	167
Tabela 5.48 – Informações sobre o valor de cada pick up da Lavanderia 3.....	168
Tabela 5.49 – Resultados das unidades caixas da Lavanderia 3.....	169
Tabela 5.50 – Valores de vazão, concentração (no tempo de 200 min) e temperatura para Lavanderia 3.....	170
Tabela 5.51 – Valores dos erros calculados entre os valores experimentais e teóricos de concentração e temperatura de cada unidade caixa da Lavanderia 3. ....	172
Tabela 5.52 – Valores de concentração (no estado estacionário) das correntes sem a correção do termo fonte na Lavanderia 3. ....	172
Tabela 5.53 – Valores dos erros nos balanços globais na Lavanderia 3.....	174
Tabela 5.54 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 3, remoção de DQO em mg/L.....	175
Tabela 5.55 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 3, remoção de DQO em gDQO/Kg tecido. ....	176
Tabela 5.56 – Valores de concentração (no tempo de 200 min) e temperatura das unidades caixas da proposta de otimização da Lavanderia 3 – Caso A.....	177
Tabela 5.57 – Valores de vazão, concentração (no tempo de 200 min) e temperatura para a proposta de otimização da Lavanderia 3 – Caso A.....	177
Tabela 5.58 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 3 – Caso A, remoção de DQO em mg/L.....	179
Tabela 5.59 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 3 – Caso A, remoção de DQO em gDQO/Kg de tecido.....	180
Tabela 5.60 – Volume de água usada por massa de tecido seco e massa de DQO removida por massa de tecido seco (Lavanderia 3 – Caso A).....	180
Tabela 5.61 – Erro referente aos balanços globais mássicos de cada lavanderia. ....	181
Tabela 5.62 – Informações sobre a eficiência de cada lavanderia. ....	182

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fluxograma de informação de um processo químico qualquer. ....	36
Figura 3.1 – Fluxograma da Estrutura Principal.....	40
Figura 3.2 – Interface (dados de entrada e resultados). ....	42
Figura 3.3 – Interface referente à entrada dos dados de topologia do processo. ...	44
Figura 3.4 - Interface após o acionamento da tecla “Informações de cada unidade”. .....	45
Figura 3.5 – Interface da unidade caixa do lavador contínuo. ....	45
Figura 3.6 – Interface da unidade divisor de correntes.....	46
Figura 3.7 – Interface após o acionamento do botão “Correntes de Entrada (CE)”. .....	47
Figura 3.8 – Interface pelo acionamento do botão “Intervalo de tempo para os gráficos”.....	48
Figura 3.9 – Interface aberta ao acionamento do botão “Matrizes do Processo”, na coluna de resultados.....	50
Figura 3.11 - Interface aberta após o acionamento do botão “Concentrações no tempo “t””, na coluna de resultados. ....	51
Figura 3.12 - Interface aberta após o acionamento do botão “Temperaturas”, na coluna de resultados.....	52
Figura 3.13 - Interface aberta após o acionamento do botão “Gráficos da variação da concentração de cada caixa”, na coluna de resultados. ....	52
Figura 3.15 – Interface aberta para a escolha da opção para graficar os dados de cada caixa em gráficos separados. ....	54
Figura 3.16 - Representação gráfica da variação da concentração de DQO da caixa dois.....	54
Figura 3.17 - Interface aberta ao acionamento do botão “Gráficos da variação de concentração de cada caixa” da coluna RESULTADOS da interface principal. ....	55
Figura 3.18 - Interface aberta ao acionamento do último botão da coluna RESULTADOS da interface principal. ....	55
Figura 3.19 – Algoritmo de Tiernan para identificação de reciclos. ....	62
Figura 3.20 – Ponto de Mistura de Correntes.....	70
Figura 3.21 – Representação esquemática da Unidade Modular Divisor de Correntes.....	72
Figura 3.22 – Representação esquemática de uma Caixa. ....	73
Figura 3.23 – Fluxograma para o teste de convergência do cálculo das vazões. .	76
Figura 3.24 – Fluxograma para o teste de convergência do cálculo das concentrações. ....	77
Figura 3.25 – Fluxograma para o teste de convergência do cálculo das temperaturas.....	78
Figura 4.1 – Fluxograma do Caso 1 - A.....	82
Figura 4.2 – Fluxograma do Caso 2 – A e o Caso 2 - B. ....	106

Figura 4.3 – Gráfico representando a variação de concentração da Caixa 2, para o Caso 2. ....	113
Figura 4.4 – Gráfico representando a variação de concentração da Caixa 2, para o Caso 2, com intervalo e incrementos diferentes. ....	114
Figura 4.5 – Fluxograma do Caso 3. ....	118
Figura 5.1 – Fluxograma da Lavanderia 1. ....	127
Figura 5.2 – Fluxograma da proposta de otimização da Lavanderia 1 – Caso A. ....	137
Figura 5.3 – Fluxograma da proposta de otimização da Lavanderia 1 – Caso B. ....	143
Figura 5.4 – Fluxograma da Lavanderia 2. ....	148
Figura 5.5 – Fluxograma da proposta de otimização da Lavanderia 2 – Caso A. ....	157
Figura 5.6 – Fluxograma da proposta de otimização da Lavanderia 2 – Caso B. ....	162
Figura 5.7 – Fluxograma da Lavanderia 3. ....	166
Figura 5.8 – Fluxograma da proposta de otimização da Lavanderia 3 – Caso A. ....	176
Figura A1. 1 – Erro associado à entrada do número de unidades e correntes. ....	192
Figura A1. 2 – Erro associado à entrada do número de unidades. ....	192
Figura A1. 3 – Erro associado à entrada do número de correntes. ....	192
Figura A1. 4 – Erro associado à entrada do número de unidades e correntes: (NC=NU). ....	193
Figura A1. 5 – Erro associado à entrada do número de unidades e correntes: (NC<NU). ....	193
Figura A1. 6 – Erro associado à entrada do número de unidades e correntes: (NC≤0 e NU≤0). ....	193
Figura A1. 7 – Erro associado à entrada do número de unidades: (NU≤0). ....	194
Figura A1. 8 – Erro associado à entrada de dado da topologia do processo: $NCA1 \leq 0$ . ....	194
Figura A1. 9 – Erro associado à entrada de dado da topologia do processo: $NCA1 > NC$ . ....	194
Figura A1. 10 – Erro associado à entrada de dado da topologia do processo: $m < NCA1$ . ....	195
Figura A1. 11 – Erro associado à entrada de dado da topologia do processo: $m > NCA1$ . ....	195
Figura A1. 12 – Erro associado à entrada de dado da topologia do processo: $abs(MP3(i,j)) > NC$ . ....	195
Figura A1. 13 – Erro associado à entrada de dado da topologia do processo: $MP3(i,j) = 0$ . ....	196
Figura A1. 14 – Interface caso o valor do volume da caixa fornecido seja errado, menor ou igual a zero. ....	196
Figura A1. 15 – Interface caso as correntes de pick up fornecidas estejam fora de valores aceitáveis. ....	196
Figura A1. 16 – Interface caso as correntes de pick up fornecidas não existam. ....	197
Figura A1. 17 – Interface caso a concentração inicial da caixa fornecida seja menor que zero. ....	197
Figura A1. 18 – Interface para o caso do valor da concentração final da caixa seja menor ou igual a zero. ....	197
Figura A1. 19 – Interface para o caso do valor fornecido como corrente de saída seja menor ou igual a zero. ....	198

---

Figura A1. 20 – Interface projetada caso o valor fornecido como corrente de saída seja maior que o número de correntes do processo.....	198
Figura A1. 21 – Interface para o caso da quantidade de correntes de saída fornecidas não seja a mesma que o de fatores de divisão. ....	198
Figura A1. 22 – Interface caso o somatório dos fatores de divisão de todas as correntes de saída da unidade forem diferente de 1. ....	199
Figura A1. 23 – Interface caso um dos fatores de divisão das correntes seja um valor negativo ou zero. ....	199
Figura A1. 24 – Interface de aviso de erro caso a vazão fornecida seja um valor negativo ou zero. ....	199
Figura A1. 25 – Interface de aviso de erro caso a concentração fornecida seja um valor negativo. ....	200
Figura A1. 26 – Interface de aviso de erro caso a temperatura fornecida seja um valor negativo ou nulo.....	200
Figura A1. 27 - Erro associado à entrada do valor do tempo inicial.....	200
Figura A1. 28 - Erro associado à entrada do valor do tempo final.....	201
Figura A1. 29 - Erro associado à entrada do valor do incremento entre os tempos. ....	201
Figura A1. 30 – Erro associado ao valor da gramatura. ....	201
Figura A1. 31 – Erro associado ao valor da gramatura. ....	202
Figura A1. 32 – Interface de erro caso a velocidade do tecido fornecida seja um valor negativo ou zero. ....	202
Figura A1. 33 – Interface de erro caso a velocidade do tecido fornecida não seja um valor numérico. ....	202
Figura A1. 34 – Interface de erro caso a largura do tecido fornecida seja um valor negativo ou zero. ....	203
Figura A1. 35 – Interface de erro caso a largura do tecido fornecida não seja um valor numérico. ....	203
Figura A1. 36 – Erro associado ao valor do tempo estabelecido para o cálculo, caso o valor do tempo fornecido seja negativo.....	203
Figura A1. 37 – Erro associado ao valor do tempo estabelecido para o cálculo, caso o valor do tempo fornecido não seja numérico.....	204
Figura A1. 38 – Erro associado ao valor da vazão de tecido lavado, caso o valor seja negativo ou zero.....	204
Figura A1. 39 – Erro associado ao valor da vazão de tecido lavado, caso o valor não seja numérico. ....	204
Figura A1. 40 – Erro associado ao valor do número da caixa escolhida para fazer o gráfico, caso o valor fornecido seja negativo ou zero. ....	205
Figura A1. 41 – Erro associado ao valor do número da caixa escolhida para fazer o gráfico.....	205
Figura A1. 42 – Erro associado ao valor do número da corrente escolhida para fazer o gráfico da sua variação de DQO com o tempo. ....	205
Figura A1. 43 – Erro associado ao valor do número da corrente escolhida para fazer o gráfico.....	206

## RESUMO

No Brasil o setor têxtil possui uma grande importância, e vem se preocupando com a conservação dos recursos hídricos, pois a indústria têxtil requer grande volume de água para a produção de tecido. Logo, a minimização do consumo e da geração de efluentes, é uma importante meta da Indústria Catarinense, reduzindo o impacto ambiental e os custos na captação e tratamento de efluentes.

Este trabalho apresenta uma proposta de reuso de correntes aquosas de efluentes, visando aumentar a eficiência no uso de insumos, água e energia, através da minimização ou reciclagem de efluentes gerados no processo produtivo da lavanderia das Indústrias Têxteis. Para assim gerar um menor volume de efluentes, além de diminuir a captação de água bruta. Foi desenvolvido um algoritmo computacional para a determinação das possibilidades de reuso das correntes efluentes da etapa de lavagem contínua no processo têxtil, sendo este processo escolhido em função do elevado consumo de água, 30m<sup>3</sup>/h por máquina. A plataforma escolhida para o desenvolvimento do software foi o Matlab (Matricial Laboratory), com uma interface amigável com o usuário. Permitindo assim que o usuário tenha muita facilidade quanto à interação entre o operador e o software. Após o processamento, os dados são apresentados nos relatórios na forma de tabelas ou são transformados em gráficos para melhor compreensão. A visualização dos dados é uma parte importante na simulação, pois permite ao usuário uma rápida percepção da tendência dos dados.

O modelo proposto para a simulação dos processos de lavanderias contínuas mostrou-se eficaz na otimização de processos com reciclo, sendo possível simular várias possibilidades de reuso para um único caso.

## ABSTRACT

In Brazil, the textile sector is of great importance and has been taking into account the preservation of hydric resources, since the textile industry requires a big volume of water in order to produce textiles. So, the consumption minimization and reduction on the production of effluents are an important goal of Santa Catarina industry, reducing the environmental impact and the costs from water captation and effluents treatment. This work presents a proposal on the reuse of effluents aqueous effluents, with the aim of increasing the efficiency on water and energy consumption by minimizing or recycling effluents generated in the productive process of textile industry laundries. This way a lower volume of effluents is generated, besides lowering water captation. It was developed a computational algorithm to determine the reuse possibilities of effluents from the continuous laundry stage of the textile process, being this process chosen due to the high water consumption, 30m<sup>3</sup>/h per machine. The platform chosen for the software development was Matlab (Matricial Laboratory), with a user friendly interface, making easy the interaction between operator and software. After processing, the data is presented in the reports in tables or is transformed in charts for a better understanding. The data visualization is an important part of the simulation since it allows for the user to have a quick perception of the data tendency. The simulation model proposed for the continuous laundries processes showed efficiency on the optimization of processes with recycle, being possible to simulate several reuse possibilities for only one case.

## CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO

A água é um dos recursos naturais mais preciosos e importantes, sendo indispensável à vida dos homens. Baseado no conceito de ser um recurso inesgotável, que os reservatórios pudessem fornecer água pura para sempre, e também absorver os rejeitos sem problemas, durante décadas a água foi desperdiçada, mal administrada e utilizada em excesso.

Com o crescimento acelerado da população, a urbanização das cidades, o desenvolvimento industrial e tecnológico e a expansão das áreas agrícolas, as poucas fontes disponíveis de água estão comprometidas ou correndo risco (MACHADO, 2003). Por isso a humanidade está preocupada com a preservação dos recursos hídricos, querendo reverter o atual quadro de degradação.

É fundamental o aproveitamento dos recursos hídricos naturais, tendo em vista que as águas naturais se destinam a vários fins, tais como, abastecimento de populações, fins industriais, navegações e fins agropecuários, tornando-se necessário haver um planejamento da utilização dos recursos hídricos de uma região, de modo a satisfazer a essas variadas necessidades e também procurando proteger os mananciais de água de uma região, contra a poluição.

O tratamento “fim de tubo” foi a primeira forma de controle da poluição dos recursos hídricos pelo setor industrial. Uma visão moderna com relação a efluentes industriais não deve estar baseada no tratamento do efluente final

(tecnologias “*end of pipe*”) e sim na busca constante da minimização de resíduos gerados através de tecnologias limpas, ou seja, o foco deve se voltar para a fonte do efluente dentro da fábrica e não somente no problema após sua geração, pois neste último caso o tratamento agrupa todos os efluentes industriais, visando realizar um tratamento final dessa corrente global de efluentes.

No Brasil o setor têxtil possui uma grande importância estando, segundo CONCHON (1999), no quinto lugar em empregos diretos. Este setor vem se preocupando com a conservação dos recursos hídricos, pois a indústria têxtil requer grande volume de água para a produção de tecido, segundo FEITKENHAUER e MEYER (2001), cerca de 117 litros de água são consumidos por cada quilo de tecido produzido. Logo, a minimização do consumo e da geração de efluentes, é uma importante meta da Indústria Catarinense, reduzindo o impacto ambiental e os custos na captação e tratamento de efluentes.

Segundo FEITKENHAUER e MEYER (2001), o aumento dos custos da água afluente, do tratamento de efluentes do processo e da energia afetam a competitividade do acabamento têxtil exigindo esforços permanentes para aumentar a eficiência do processamento úmido. E em uma situação de crescimento competitivo, a diminuição do uso daqueles recursos será uma grande vantagem.

Este trabalho apresenta uma proposta de reuso de correntes aquosas de efluentes, visando aumentar a eficiência no uso de insumos, água e energia, através da minimização ou reciclagem de efluentes gerados no processo produtivo da lavanderia das Indústrias Têxteis. Para assim gerar um menor volume de efluentes, além de diminuir a captação de água bruta. Outro aspecto importante é que com a reutilização da água, ocorre uma preservação do meio ambiente, reduzindo os riscos de penalizações advindas de danos ambientais, e acaba favorecendo a obtenção de selos e certificações ambientais como, por exemplo, a ISO-14000.

Em um processo têxtil os efluentes gerados nas diversas fases do processo, apresentam teores de contaminantes distintos, e variáveis, característicos a cada tipo de preparação e tingimento, dificultando o seu uso direto.

No presente trabalho foi desenvolvido um algoritmo computacional para a determinação das possibilidades de reuso das correntes efluentes da etapa de lavagem contínua no processo têxtil, sendo este processo escolhido em função do elevado consumo de água, 30m<sup>3</sup>/h por máquina. A plataforma escolhida para o desenvolvimento do software foi o Matlab (Matricial Laboratory), com uma interface amigável com o usuário. Permitindo assim que o usuário tenha muita facilidade quanto à interação entre o operador e o software. Após o processamento, os dados são apresentados nos relatórios na forma de tabelas ou são transformados em gráficos para melhor compreensão. A visualização dos dados é uma parte importante na simulação, pois permite ao usuário uma rápida percepção da tendência dos dados.

O presente trabalho de dissertação compreende seis capítulos. A seguir, apresenta-se um resumo do conteúdo dos próximos capítulos.

## CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:

Neste capítulo é apresentado um contexto geral da problemática dos recursos hídricos e da geração de efluentes altamente contaminados pela indústria têxtil. Os principais assuntos apresentados são: características e tratamentos da água; o uso da água na indústria têxtil; a situação do setor têxtil no Brasil, simulação numérica e estrutura dos programas executivos.

## CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO DOS ALGORITMOS COMPUTACIONAIS:

É apresentado o funcionamento da interface, assim como alguns dos fluxogramas referentes à estrutura do software. Sendo cada um deles explicado

em detalhes, juntamente com os balanços dos modelos matemáticos de cada unidade modular.

#### CAPÍTULO 4 – ESTUDO DE CASOS:

É apresentada a comparação feita entre diferentes casos hipotéticos, a fim de se comprovar a eficiência de cada estrutura do algoritmo. Como por exemplo, o cálculo das correntes de corte, da Matriz Seqüência de Cálculo, o cálculo da vazão, temperatura e concentração de cada corrente, entre outros.

#### CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES:

Os resultados obtidos através da resolução dos modelos matemáticos desenvolvidos são apresentados neste capítulo. São estudados casos reais, de algumas empresas, feitas propostas de otimização, e os resultados obtidos são comparados e analisados.

#### CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES:

As conclusões obtidas a partir da análise dos resultados, juntamente com as sugestões para o desenvolvimento de futuros trabalhos nessa área, encontram-se neste último capítulo.

## **CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 – IMPORTÂNCIA E CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA**

A água é a substância mais amplamente encontrada na natureza. A sua qualidade depende das suas características físicas, químicas e biológicas. O conceito de impureza de uma água tem significado relativo, pois deve ser analisado o seu uso. Por exemplo, aquela destinada a uso doméstico não deve apresentar gosto ou cheiro, já a usada numa caldeira de indústria, este fator não é relevante.

Segundo PUIGJANER et al. (2000), a água é principalmente usada na indústria para três principais propósitos: ser incorporada em produtos específicos, como um fluido térmico para propósito de aquecimento ou resfriamento e para eliminar componentes indesejáveis.

Para caracterizar uma água, são determinados diversos parâmetros, os quais representam as suas características físicas, químicas e biológicas. Esses parâmetros são indicadores da sua qualidade e constituem impurezas quando alcançam valores superiores aos estabelecidos para determinado uso. Os principais indicadores de qualidade da água são discutidos a seguir, separados sob os aspectos físicos, químicos e biológicos.

- Parâmetros físicos:

A temperatura é um parâmetro importante, pois influi em algumas propriedades da água (densidade, viscosidade, oxigênio dissolvido). Sabor e odor, que resultam de esgotos domésticos ou industriais, de algas, compostos orgânicos, etc. A cor, que pode ser resultante da presença de ferro ou manganês. Turbidez, que é a presença de matéria em suspensão na água, como por exemplo, argila e organismos microscópicos.

- Parâmetros químicos:

O pH baixo torna a água corrosiva, águas com pH elevado tendem a formar incrustações nas tubulações. A alcalinidade é causada por sais alcalinos, principalmente de sódio e cálcio, que em teores elevados, pode proporcionar sabor desagradável. A dureza resulta principalmente de sais alcalinos terrosos (cálcio e magnésio), causa sabor desagradável, reduz a formação da espuma do sabão, provoca incrustações nas tubulações e caldeiras. Oxigênio dissolvido, matéria orgânica, DBO, DQO, componentes inorgânicos e orgânicos.

- Parâmetros biológicos:

Os coliformes indicam a presença de microorganismos patogênicos. Como é encontrado em grande quantidade nas fezes humanas, quando encontrados na água, significa que a mesma recebeu esgotos domésticos. As algas em excesso podem causar alguns inconvenientes, como: sabor, odor, toxicidade, turbidez e cor.

No Brasil, a classificação das águas foi definida pela Resolução nº 20 de 18 de junho de 1986, do Conselho Nacional do Meio Ambiente. Esta Resolução estabeleceu nove classes, sendo cinco de águas doces (com salinidade igual ou inferior a 0,5 %), duas de águas salobras (salinidade entre 0,5 e 30%), e 2 de águas salinas (salinidade igual ou superior a 30 %).

As classes Especiais de um a quatro referem-se às águas doces; as classes cinco e seis, às águas salinas; e as classes sete e oito, às águas salobras.

As coleções de águas estaduais são classificadas, segundo seus usos preponderantes, em cinco classes (Deliberação Normativa COPAM 10/86), como mostra a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Tabela de classificação de águas estaduais (Fonte: Deliberação Normativa COPAM 10/86).

Uso preponderante de água	Classificação				
	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
Abastecimento doméstico, sem prévia ou com simples desinfecção.	X				
Abastecimento doméstico, após tratamento simplificado.		X			
Abastecimento doméstico, após tratamento convencional.			X	X	
Preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas.	X				
Proteção das comunidades aquáticas.		X	X		
Recreação de contato primário (natação, esqui aquático e mergulho).		X	X		
Irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvem rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película.		X			
Irrigação de hortaliças e plantas frutíferas.			X		
Irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas				X	

e forrageiras.					
Criação natural e/ou intensiva (aqüicultura) de espécies destinadas à alimentação humana.		X	X		
Navegação					X
Harmonia paisagística.					X
Usos menos exigentes.					X

Os indicadores da situação ambiental das águas adotadas pela FEAM (Fundação Estadual do Meio Ambiente) são o Índice de Qualidade de Água - IQA e a contaminação por tóxicos. No cálculo do IQA são considerados os seguintes parâmetros: oxigênio dissolvido, coliformes fecais, pH, demanda bioquímica de oxigênio, nitratos, fosfatos, temperatura da água, turbidez e sólidos totais, gerando um índice com valores variando de 0 a 100, que correspondem aos níveis de qualidade descritos na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Índice de Qualidade de Água (IQA) (Fonte: FEAM).

<b>Nível de Qualidade</b>	<b>Faixa de variação do IQA</b>	<b>Cor de referência</b>
Excelente	$90 < IQA \leq 100$	Azul
Bom	$70 < IQA \leq 90$	Verde
Médio	$50 < IQA \leq 70$	Amarelo
Ruim	$25 < IQA \leq 50$	Marrom
Muito Ruim	$50 < IQA \leq 0$	Vermelho

Assim definido, o IQA reflete a contaminação por esgotos sanitários e por outros materiais orgânicos, por nutrientes e por sólidos.

A contaminação por tóxicos é avaliada considerando-se os seguintes componentes: amônia, arsênio, bário, cádmio, chumbo, cianetos, cobre, cromo hexavalente, índice de fenóis, mercúrio, nitritos e zinco. Em função das concentrações observadas a contaminação é caracterizada como Baixa, Média ou Alta. A denominação Baixa refere-se a ocorrência de concentrações iguais ou inferiores a 20% do limite da classe de enquadramento do trecho do curso d'água na respectiva estação de amostragem, conforme padrões definidos pelo Conselho Estadual do Política Ambiental – COPAM na Deliberação Normativa N° 10/86. A contaminação Média refere-se a faixa de concentrações entre 20% a 100% do limite mencionado, enquanto que a Alta é superior a 100% do mesmo.

A qualidade das águas é avaliada anualmente a partir dos resultados das quatro campanhas de amostragem. O nível de qualidade reportado refere-se à média aritmética dos valores de IQA da estação e a contaminação por tóxicos representa a pior condição identificada em cada estação. Os resultados são transportados para o Mapa de Qualidade das Águas, publicado anualmente pela FEAM.

A utilização econômica fez com que a água passasse a ser reconhecida como um recurso hídrico, semelhante aos recursos minerais quando utilizados economicamente (BARTH e BARBOSA, 1999).

É por isso, e também, segundo FARIA (2004), por causa do aumento das exigências ambientais, que as indústrias estão se preocupando em reduzir o consumo de água e fazer o seu reuso.

**2.2 – O SETOR TÊXTIL NO BRASIL**

A indústria têxtil brasileira tem uma participação histórica e decisiva no processo de desenvolvimento industrial do País, porquanto foi um dos primeiros setores industriais a ser implantado, remontando aos tempos do Império (VIEIRA, 1995). O processo produtivo têxtil é caracterizado por um elevado consumo de água, gerando um grande volume de efluentes líquidos; além de ter uma concentração elevada de matéria orgânica (DBO).

Segundo CONCHON (1999) há dez anos atrás, quando a água era barata, era normal uma indústria têxtil ter uma relação de banho na ordem de 400 litros gerados de efluente por Kg de produto têxtil produzido. Mas com a escassez de água, e conseqüente elevação do seu custo, hoje é possível encontrar uma relação entre 50 e 60 (litros de efluente/Kg de produto). Mesmo os grandes geradores se encontram na marca de 100 L/Kg.

O custo associado para o uso da água em uma indústria depende de fatores diferentes, tal como a fonte de fornecimento da água, o processo de produção, o nível de tecnologia, o meio de administração do sistema, a condição geográfica, o sistema de tratamento de efluente e distribuição. Apesar do custo da água ter um valor específico para cada planta, ele pode atingir 6% do custo de produção (ALMATÓ et. al., 1999).

A indústria têxtil representa um extraordinário valor econômico-social, absorvendo expressiva quantidade de mão-de-obra. No Brasil, há cerca de 5000 indústrias têxteis, assim distribuídas: 11% de grande porte; 21% de pequeno porte; e 68% como micro-empresas. Situa-se na economia brasileira, dentre 24 setores de atividades industriais, no quinto lugar em empregos diretos, e no sexto em faturamento (CONCHON, 1999).

De acordo com VIEIRA (1995), o setor têxtil gera milhões de empregos, sejam eles diretos, na fase de produção fabril, ou indiretos, na produção de matérias-primas e vários outros insumos. Acaba estimulando a criação de outras

indústrias, entre as quais de máquinas têxteis, de fibras artificiais e sintéticas, de embalagens e corantes. Não esquecendo também da imensa massa trabalhadora, existente na produção de fibras naturais, na lavoura e na pecuária ovina.

O setor têxtil brasileiro, de confecção e moda, vive um período de crescimento que ganha viés histórico. Conta atualmente com 30 mil empresas, sendo a quinta mais importante cadeia têxtil do mundo, ficando atrás da China, Índia, Estados Unidos e Taiwan. Segundo a entidade, o crescimento do mercado têxtil brasileiro deve-se principalmente às exportações do setor como um todo. De janeiro a julho de 2004, as vendas para o exterior atingiram a cifra de US\$ 1,052 milhão, 23,73% a mais do que no mesmo período de 2003 (FOLHA DE SÃO PAULO, 2004).

As fibras de algodão são as mais populares e as mais importantes entre as fibras usadas pela indústria nacional. Suas excelentes características de absorção e o fato de serem agradáveis ao uso, aliadas ao seu preço acessível, contribuem para que o seu mercado se mantenha estável (COELHO, 1996).

De acordo com “Resultados e Expectativas do Setor Têxtil” (2004), a cadeia têxtil brasileira – desde a produção de fios até as confecções – deve chegar ao fim de 2004 com um faturamento de cerca de US\$ 25 bilhões e criar 50 mil empregos. As previsões são de Paulo Skaf, presidente da ABIT – Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção.

A diminuição no consumo de água em seus vários processamentos tem sido uma das metas da indústria têxtil, nos últimos anos. Notadamente na área de beneficiamento e/ou tinturaria, os esforços têm sido mais intensos, haja visto que representam cerca de 90% do consumo geral da indústria. Através de modificações nos processos de beneficiamento e da substituição de equipamentos antigos, é possível obter-se uma redução significativa do consumo de água. Há empresas que produzem tecidos de algodão, cujo processo de mercerização, tingimento e estampagem é conseguido com um consumo médio de 60 m<sup>3</sup> de água/t. Não há dúvida que a redução volumétrica provoca no efluente uma

concentração em proporção inversa. A  $DBO_{5,20}$ , por exemplo, alcança valores da ordem de 1.800 mg/L e a DQO acima de 5.000 mg/L (CPRH, 2001).

Isso significa uma série de benefícios, dentre os quais pode-se citar (CPRH, 2001):

- menor custo operacional no tratamento de água;
- menor custo operacional no tratamento de efluentes;
- menor consumo de auxiliares têxteis;
- menor consumo de energia térmica.

O consumo de água em processos úmidos de acabamento é uma função direta do tipo de substrato têxtil, assim como do próprio tipo de acabamento (CPRH, 2001).

Tabela 2.3 – Consumo de água em função do substrato (Fonte: CPRH, 2001).

	Consumo de água (L/Kg)		
	Mínimo	Médio	Máximo
Lã – lavagem	4,2	11,7	77,5
Lã- acabamento	110,9	283,6	657,2
Tecidos acabamento			
Processo simples	12,5	78,4	275,2
Processo complexo	10,8	86,7	276,9
Processo complexo + desengomagem	5,0	113,4	507,9
Malha			
Processo simples	8,3	135,9	392,8
Processo complexo	20,0	83,4	377,8

Meias	5,8	69,2	289,4
Carpetes	8,3	46,7	162,6
Fios – acabamento	3,3	100,1	557,1
Não tecidos	2,5	40,0	82,6
Feltrados	33,4	212,7	930,7

### 2.3 – CARACTERIZAÇÃO DOS EFLUENTES NA INDÚSTRIA TÊXTIL

A indústria têxtil requer elevados volumes de água para produção de tecido e, conseqüentemente, gera elevados volumes de águas residuárias. A literatura, entretanto, registra grande variação de consumo de água devido aos diversos produtos, processos e equipamentos empregados (SANTOS e SANTAELLA, 2002).

É muito comum o desperdício de água quando a captação é própria da indústria, pois os custos se resumem somente ao consumo de energia pelas bombas e à manutenção destas. Com o consumo excessivo da água, a vazão afluyente para a estação de tratamento será maior, conseqüentemente as unidades terão maiores dimensões, o consumo de produtos químicos e de energia elétrica será mais elevado e os equipamentos deverão ser maiores e mais potentes. Uma forma de reduzir o consumo de água na indústria é a recuperação através da recirculação de despejos de setores em que as águas podem ser reaproveitadas em outros (NUNES, 1996).

A indústria têxtil, com os seus mais variados processos, cada qual com suas características próprias, apresenta uma elevada diversificação de fluxos produtivos, matérias-primas e produtos químicos utilizados. Em razão dessa grande gama de variedades, é impraticável a descrição detalhada de todos os processos geradores de efluentes.

As operações de limpeza, tingimento e acabamento na indústria têxtil dão origem a uma grande quantidade de efluentes. A recirculação destes efluentes e recuperação de produtos químicos e subprodutos constituem os maiores desafios enfrentados pela indústria têxtil, com o fim de reduzir os custos com o tratamento de seus efluentes (COELHO, 1996).

As indústrias têxteis, para efeito de estudo de seus efluentes, são agrupadas em três categorias principais: tecidos de algodão, de lã e sintéticos. Os efluentes gerados pela indústria variam à medida que a pesquisa e o desenvolvimento produzem novos reagentes, novos processos, novos maquinários, novas técnicas, e também, conforme a demanda do consumidor por outros tipos de tecidos e cores (COELHO, 1996).

De acordo com SANTOS e SANTAELLA (2002), os efluentes têxteis são altamente coloridos devido aos corantes que não aderem às fibras nas operações de acabamento, cuja eficiência de fixação varia com a classe do corante utilizado. Temperatura elevada, ambiente alcalino e alta concentração de sais (40 a 100 g/L) são condições normalmente utilizadas para otimizar a fixação do corante à fibra (CARLIELI et al., 1998). Entretanto para algumas classes de corantes utilizados nas operações de tingimento, como por exemplo, a dos corantes reativos (aplicados aos tecidos de algodão), cerca de 50% dos corantes aplicados são descartados nas águas residuárias (O'NEILL et al., 1999), aumentando a concentração de Demanda Química de Oxigênio (DQO) não biodegradável e cor. Adicionalmente, produtos químicos como amido, álcool polivinílico (PVA), surfactantes, seqüestrantes, amaciantes, etc., provenientes das outras etapas do processo industrial também contribuem para as variações de DQO e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) (EPA, 1996). Corantes são fabricados para resistirem ao tempo e exposição à luz, água e sabão, além de que geralmente são adicionados agentes bactericidas e fungicidas, para tornar as fibras mais resistentes à degradação biológica (O'NEILL et al., 1999). Conseqüentemente, a água residuária têxtil possui baixa relação DBO/DQO devido principalmente à natureza pouco biodegradável dos corantes. O WORLD BANK GROUP (1998) cita

que a relação DBO/DQO é entre 0,2 e 0,5 com DBO variando de 700 mg/L a 2000 mg/L, ao passo que PAGGA e BROWN (1986) apresentam valores da relação DBO/DQO inferiores a 0,1.

Segundo CIARDELLI et al. (2000), os processos úmidos nas indústrias têxteis requerem água de qualidade muito boa e baixos índices de corantes, detergentes e sólidos suspensos. Logo, um tratamento de purificação para reciclo de água deve ter um desempenho melhor do que para a descarga simples de acordo com os limites impostos pela legislação.

O processo têxtil de produção de tecidos é dividido em fiação, tecelagem e acabamento. Na etapa de fiação a matéria-prima (algodão) é processada nos abridores, batedores, cardas, passadores, penteadeiras, maçaroqueiras, filatórios, retorcedeiras e conicaleiras. Nesta etapa não há geração de efluentes líquidos, pois todas as operações ocorrem a seco. Na etapa de tecelagem os fios tintos ou crus são transformados em tecidos nos teares. Esta etapa trata-se de um processo seco, portanto não ocorre a geração de efluentes líquidos, muito embora a etapa posterior de desengomagem seja uma importante fonte geradora de efluentes líquidos poluidores (BRAILE E CAVALCANTI, 1993).

Na etapa de acabamento os tecidos são tratados para adquirirem as características de toque, impermeabilidade, estabilidade dimensional, etc. Esta etapa é dividida em (ARAÚJO E CASTRO, 1984):

- Tratamento prévio ou Preparação: Nesta etapa eliminam-se as impurezas das fibras e melhora-se a estrutura do material para prepará-lo para as operações de tingimento, estamparia e acabamento.

- Tingimento: Nesta etapa os materiais têxteis devem ser coloridos uniformemente.

- Estamparia: Esta etapa consiste na aplicação de um desenho colorido no material têxtil.

- Acabamentos: São operações que conferem as características essenciais de aspecto, brilho, toque, caimento, amarrotamento, resistência, etc.

A qualidade da água utilizada no processo têxtil possui limites de tolerância e restrições que variam conforme o autor. Para ARAÚJO E CASTRO (1984), a água é o insumo em maior quantidade empregada no acabamento têxtil e deve seguir as seguintes exigências de qualidade: ausência de sólidos em suspensão e de substâncias que possam provocar manchas durante o processamento dos artigos; não haver excesso de ácido nem álcali. O pH deve estar compreendido entre 5 e 9, mas o mais próximo possível de 7; ausência de substâncias que afetam as operações de acabamento, como sais de ferro, de manganês, cálcio, magnésio e metais pesados, nitritos, cloro, etc.; não ser corrosiva para tanques e tubulações; ausência de substâncias que provocam a formação de espuma e cheiros desagradáveis.

O efluente gerado pela indústria têxtil varia conforme a moda, a tecnologia empregada nas etapas de fabricação, os processos e maquinários utilizados e dos reagentes químicos envolvidos. A identificação dos tipos genéricos de águas residuárias das variadas operações de processamento empregado pela indústria é a primeira etapa para a proposição de tecnologias adequadas à redução de poluição. A extrema diversidade de matéria-prima e esquemas de produção empregados pela indústria têxtil dificultam a determinação das características dos efluentes. É necessário o entendimento do processo, das operações e das características de seus efluentes individuais para identificar a principal origem de poluição, propor uma estratégia de redução de poluição e avaliar a necessidade de sistema de tratamento de águas residuárias (FREITAS, 2002).

Estima-se que pelo menos 20% dos corantes têxteis sejam descartados em efluentes, devido a perdas ocorridas durante o processo de fixação da tinturaria às fibras. A remoção desses compostos dos rejeitos industriais é um dos grandes problemas ambientais enfrentados pelo setor têxtil. Sobretudo considerando que os corantes não pertencem a uma mesma classe de compostos químicos, mas

englobam diversas substâncias com grupos funcionais diferenciados, com grande variedade na reatividade, solubilidade, volatilidade, estabilidade, etc. que, por sua vez, requerem métodos específicos para identificação, quantificação e degradação (ZANONI e CARNEIRO, 2001).

Os efluentes têxteis caracterizam-se por serem altamente coloridos, devido à presença de corantes que não se fixam na fibra durante o processo de tingimento. A poluição dos corpos d'água com estes compostos provocam, além da poluição visual, alterações em ciclos biológicos afetando principalmente processos de fotossíntese. Além desse fato, estudos tem mostrado que algumas classes de corantes, principalmente azocorantes, e seus subprodutos, podem ser carcinogênicos e/ou mutagênicos (KUNZ et al., 2002).

Os principais contaminantes de acordo com a operação unitária em uma planta destinada ao processo de acabamento de tecidos de algodão são de acordo com CONCHON (1999), apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Principais contaminantes de acordo com a operação unitária (Fonte: CONCON, 1999).

OPERAÇÃO	CONTAMINANTE
Engomagem	DBO/DQO
Preparação (purga, alvejamento)	DBO/DQO
Tingimento	DBO/DQO/Toxicidade
Estamparia	DBO/DQO/Solventes/SST
Acabamento	DBO/DQO

DBO – demanda bioquímica de oxigênio; DQO – demanda química de oxigênio; SST – sólidos suspensos totais.

No setor têxtil, a água é utilizada em grande quantidade nas etapas de preparação e fiação, tingimento e lavagem do tingimento. O tratamento dos efluentes têxteis deve ser realizado para garantir um efluente final dentro dos

padrões previstos na Legislação Ambiental. A escolha do processo ou da seqüência do processo de tratamento depende de uma série de fatores, tais como: características do efluente, qualidade do efluente após o tratamento, custo, disponibilidade de área e disponibilidade tecnológica.

Os efluentes têxteis apresentam uma variação muito grande na sua composição devido aos vários tipos de corantes e produtos químicos utilizados, e isto faz o seu tratamento ser um problema complexo. Como a cor forte é a característica visual mais notória do efluente têxtil, a descoloração tem sido parte integral do processo de tratamento destes efluentes.

Segundo a CPRH (2001), existem algumas medidas de controle que as empresas têxteis podem tomar para que seja otimizado o seu processo e por conseqüência direta a diminuição da geração de efluentes. Isto acaba acarretando uma economia no tratamento dos efluentes e diminui os custos de produção. Abaixo serão citados alguns exemplos (CPRH, 2001):

- Controle da relação de banho: o controle adequado das dosagens dos produtos químicos, além de gerar economia para a empresa, diminui a carga de efluentes.

- Separação e recuperação das águas de resfriamento e lavagem: a recirculação das águas, e o reaproveitamento de alguns produtos químicos devem constituir metas de todas as empresas, pois representam grande economia e diminuição na geração de efluentes.

- Controle da umidade do produto têxtil: diminuição do consumo de água, com o reaproveitamento da água extraída do processo de centrifugação e, conseqüentemente menor geração de efluentes.

- Substituir ácidos orgânicos por inorgânicos (por exemplo, o ácido acético pelo gás carbônico) e, na escolha de dispersantes, emulsionantes, igualisantes e outros produtos, preferir os que apresentam a menor DBO (ou DQO).

A indústria têxtil gera efluentes líquidos, gasosos e resíduos sólidos. Os efluentes originários dos diversos processos têxteis são uma função direta do tipo de substrato têxtil que está sendo processado, dos corantes utilizados e do tipo de equipamento. Portanto, pode-se observar uma gama enorme de variações das características quantitativas e qualitativas dos efluentes, principalmente dos efluentes líquidos. A geração de efluentes líquidos na indústria têxtil está localizada principalmente na área de beneficiamento. É nessa área onde ocorrem os processos de alvejamento, tingimento e estampagem, dentre outros. (CPRH, 2001).

A qualidade e quantidade do efluente líquido em função do tipo de processo são mostradas na Tabela 2.5 (CPRH, 2001):

Tabela 2.5 - Cargas dos despejos por etapa de processo (Fonte: CPRH, 2001).

Etapa do processo	Volume (m <sup>3</sup> /t)	DBO <sub>5</sub> (Kg/t)	SST (Kg/t)	SDT (Kg/t)	pH
Engomagem de fios	4,2	2,8	-	57	7-12,5
Desengomagem	22	58	30	53	7
Cozimento	100	53	22	65	10-13
Alvejamento	100	8	5	35	8,5-9,6
Mercerização	35	8	2,5	33	5,5-9,5
Tingimento	50	60	25	70	5-10
Estampagem	14	54	12	71	-

De acordo com CPRH (2001), a carga poluidora dos efluentes líquidos pode ser classificada da seguinte maneira:

- Sólidos sedimentáveis (SS):

Os valores dos SS podem variar muito, dependendo de fatores como tipo de processo de beneficiamento aplicado, tipo de fibra, tipo de tecido, tipo de tratamento, etc. Em geral, os valores encontram-se abaixo de 50 ml/L.

- Metais pesados:

A carga de efluentes têxteis por metais pesados é pouca, quando aplicado o alto padrão técnico disponível hoje em dia. O cádmio é praticamente ausente e o mercúrio pode estar presente em poucas quantidades (através de soda cáustica e ácido clorídrico produzidos por eletrodos de mercúrio); cromo, cobalto e cobre podem chegar aos efluentes, dependendo do processo de tingimento usado (em geral abaixo de 1 mg/L).

- Hidrocarbonetos:

Uma carga importante dos efluentes têxteis constitui-se de hidrocarbonetos provenientes da engomagem dos fios e/ou acabamento do tecido.

- Compostos orgânicos halogenados:

Outra carga importante dos efluentes é formada por compostos orgânicos halogenados, que geralmente são medidos através do parâmetro AOX (compostos orgânicos halogenados adsorvíveis em carvão ativado). Eles compõem uma gama de substâncias diferentes, como hidrocarbonetos clorados, PVC, pigmentos verdes (não tóxicos), fenóis clorados (tóxicos), etc. As principais fontes no processo produtivo são o alvejamento, tingimento de fibras sintéticas e corantes reativos (contendo cloro).

- Detergentes e agentes tensoativos:

Essas substâncias são usadas como detergentes para lavagem, emulsificadores, agentes humidificantes, agentes de correção no tingimento e agentes para aumentar a lisura e maciez do tecido. Muitas delas não são biodegradáveis. Os agentes tensoativos (detergentes, emulsionantes e

dispersantes) podem ser os principais responsáveis pela toxicidade dos efluentes têxteis, e, daí, a necessidade de um critério rigoroso na escolha dos mesmos. Aminas quaternárias usadas, por exemplo, em processos de amaciamento, são muito tóxicas e devem ser evitadas - sempre que possível.

- Cor, Temperatura e pH:

Os efluentes têxteis podem apresentar alterações intensas na coloração (dependendo dos colorantes e pigmentos usados), na temperatura (às vezes acima de 40°C) e no pH. Os efluentes provenientes de um processo com lã mostram, normalmente, um pH baixo (ácido), enquanto processos com algodão têm efluentes com pH altos (alcalino).

Segundo CPRH (2001), algumas das principais características dos efluentes de uma indústria têxtil são a presença de cor, elevado pH e variação de vazão. Afora isso, o efluente apresenta características de biodegradabilidade, como qualquer outro efluente que possua carga orgânica, podendo, portanto, ser tratado por via biológica. Mas a sua biodegradação é difícil.

Segundo CIARDELLI et al. (2000), para conseguir atender às exigências legislativas, os efluentes têxteis são tratados geralmente através de processos físico-químicos ou, mas freqüentemente por plantas de lodo ativado.

De acordo com o levantamento realizado pela empresa CLEV Engenheiros Associados S/C Ltda. Na região de Blumenau-SC, em 14 indústrias têxteis que dispõem de tratamento de efluentes, em 1997, observa-se que (CPRH, 2001):

- sete delas dispõem de tratamento biológico (lodos ativados) com remoção de cor simultânea;

- duas delas dispõem de tratamento biológico com remoção de cor posterior (polimento);

- cinco delas dispõem de tratamento biológico precedido de remoção de cor.

## **2.4 – PROBLEMAS E SOLUÇÕES DOS RECURSOS HÍDRICOS**

A explosão demográfica que ocorre neste século, associada a fatores como a intensa industrialização, carência de alimentos, poluição e exaustão dos recursos naturais, que relacionados entre si, têm provocado, nos últimos anos, grande preocupação com o meio ambiente, em particular a água, em âmbito mundial. Dentro desta realidade, a degradação ambiental tem se agravado nas últimas décadas, particularmente, no que se refere à poluição dos recursos hídricos. O desenvolvimento industrial vem se caracterizando como uma das principais causas para o agravamento desse problema, pois seus processos geram diferentes tipos de resíduos e efluentes na forma líquida, sólida e gasosa, que geralmente são descartados, de maneiras inadequadas (BRESAOLA E CANTELLI, 2000).

A poluição das águas se processa num ritmo muito mais assustador que a poluição da atmosfera. O número de compostos nocivos lançados nas águas é muito maior que o número de poluentes encontrados no ar (FELLENBERG, 1980).

Segundo MACHADO (2003), os problemas do Brasil em relação aos recursos hídricos estão relacionados não somente com o crescimento acelerado da população, a urbanização, desenvolvimento industrial e expansão das áreas agrícolas. Estão relacionados também com a distribuição irregular dos recursos hídricos e ao desperdício presente em todos os níveis da sociedade.

Setenta por cento da água brasileira está na região Norte, onde vivem apenas 7% da população; a região Sudeste, que tem a maior concentração populacional (42,63%), dispõe apenas de 6% dos recursos hídricos e a região Nordeste que abriga 28,91% da população dispõe apenas de 3,3%. Entre 40% e

60% da água tratada pela maioria dos serviços estaduais de abastecimento de água, em média, é perdida no percurso entre a captação e os domicílios, em função de tubulações antigas, vazamentos, desvios clandestinos e tecnologias obsoletas. Como se não bastasse esse desequilíbrio geográfico, a água no Brasil está também ameaçada pela poluição, pela erosão, pela desertificação e pela contaminação do lençol freático (MACHADO, 2003).

De acordo com ALMATÓ et. al. (1999), hoje em dia as indústrias de processos devem construir estratégias de administração global dos recursos hídricos disponíveis na planta a fim de que ocorra a sua minimização. Não esquecendo, porém de satisfazer à legislação ambiental existente.

Com a globalização da economia, e a conscientização da necessidade de um desenvolvimento mais próximo possível do sustentável, visando à preservação do meio ambiente e a manutenção dos ecossistemas, as indústrias têm que se adequar para atender a rigorosos padrões de qualidade, inclusive os relacionados ao desempenho ambiental. Através da certificação ISO 14.000 (BRESAOLA E CANTELLI, 2000).

A SECRETARIA DOS RECURSOS HÍDRICOS, SANEAMENTO E OBRAS (1994), através da lei nº 7.663, de 30 de dezembro de 1991, que estabelece normas de orientação à Política Estadual de Recursos Hídricos, bem como ao Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos, prevê-se a cobrança pelo uso das águas superficiais e subterrâneas, tornando assim o seu consumo, bem como, a qualidade dos efluentes líquidos lançados, fatores importantes na determinação de custos finais. Desta forma, aumenta o interesse pela nova diretriz tecnológica para o tratamento de efluentes líquidos industriais, que se fundamenta na utilização de matérias primas alternativas não poluidoras, na redução do consumo, reuso e/ou reciclagem (BREASOLA E CANTELLI, 2000).

Todos estes problemas fizeram com que houvesse uma revisão da legislação brasileira sobre o uso da água, através da Lei Federal nº9.433 de 08 de

janeiro de 1997. Logo, há oito anos, a gestão dos recursos hídricos no Brasil vem passando por uma transição institucional.

A Lei nº 9.433/97, conhecida como Lei das Águas, instituiu a Política Nacional dos Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, definindo, para tanto, um conjunto de instrumentos institucionais voltados para o gerenciamento dos recursos hídricos do país. A Lei das Águas almeja disciplinar o uso das águas, incorporando em seu texto algumas importantes inovações conceituais, jurídicas e institucionais que vinham sendo propostas e debatidas nacional e internacionalmente pelos diversos setores envolvidos com a administração e o uso dos recursos hídricos, assim como com a questão ambiental, particularmente desde a década de 1980 no país e no exterior (MACHADO, 2003).

Como o uso da água envolve um conjunto significativo de interesses sociais diversos, a Lei da Águas tem como objetivo na sua gestão contemplar seu uso múltiplo, não favorecendo determinada atividade ou grupo social, por isso sendo integrada, descentralizada e contando com ampla participação social.

Segundo MACHADO (2003), o Plano de Recursos Hídricos, tem como conteúdo mínimo:

- diagnóstico da situação atual dos recursos hídricos;
- análise de alternativas de crescimento demográfico, de evolução de atividades produtivas e de modificações dos padrões de ocupação do solo;
- balanço entre disponibilidades e demandas futuras dos recursos hídricos, em quantidade e qualidade, com identificação de conflitos potenciais;
- metas de racionalização de uso, aumento da quantidade e melhoria da qualidade dos recursos hídricos disponíveis;

- medidas a serem tomadas, programas a serem desenvolvidos e projetos a serem implantados, para o atendimento das metas previstas;
- prioridades para outorga de direitos de uso de recursos hídricos;
- diretrizes e critérios para a cobrança pelo uso dos recursos hídricos;
- propostas para a criação de áreas sujeitas a restrição de uso, com vistas à proteção dos recursos hídricos.

Segundo FELLEBERG (1980), as principais fontes de poluição das águas são:

- Águas residuárias urbanas (esgotos): que contêm, além de detritos orgânicos, restos de alimentos, sabões e detergentes, portanto, essencialmente contêm carboidratos, gorduras, material protéico, detergentes, fosfatos e bactérias. Trazendo assim consigo três grandes problemas: a contaminação com bactérias em parte patogênicas para o homem, contaminação com substâncias degradáveis por bactérias e contaminação com sais de degelo.

- Águas residuárias de origem agropecuária: que possuem uma grande variedade de poluentes característicos. Sendo que os fatores mais importantes decorrem da pecuária e armazenagem de forragem em silos, fertilizantes e praguicidas.

- Águas residuárias industriais: sendo a indústria a responsável pela maioria das diferentes substâncias poluentes encontradas na água. Estes diferentes contaminantes podem ser divididos em dois grupos: os compostos orgânicos e os inorgânicos. Dentro dos compostos orgânicos estão o petróleo e seus derivados, os detergentes (encontrados nos produtos de limpeza domésticos e industriais), fenóis (encontrado em diversos ramos da indústria química e petroquímica e da indústria farmacêutica), derivados halogenados do naftaleno (empregado entre outros usos, como plastificantes na indústria de plásticos) e difenilo (encontram emprego como praguicidas). E nos compostos inorgânicos pode-se citar o

mercúrio, cádmio e outros metais pesados (zinco, níquel, cromo, arsênico e cobalto).

A indústria têxtil, especialmente o setor de beneficiamento, é responsável pela poluição, principalmente dos corpos de água, das regiões em que atua. As exigências impostas pela legislação e cobranças sociais foram ajustando os valores limites dos parâmetros controlados para proteger o meio ambiente. Esses valores são estabelecidos para cada indústria e diferem segundo os países. Os padrões quantitativos usuais de referência para a indústria têxtil, estabelecendo os índices máximos nas correntes de despejos de efluentes líquidos são em função das variáveis: vazão, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), sólidos em suspensão (SS), pH e temperatura. Em alguns casos se adiciona a cor e o cromo. Atualmente, as indústrias utilizam sistemas de gestão ambiental para aumentar a sua produtividade, seja na eficiência das máquinas, na redução dos custos ou agregando alguma característica ao produto final, que possa valorizá-lo no mercado, gerando a menor quantidade de resíduos possível (FREITAS, 2002).

Segundo o Banco Mundial (BIRD), o consumo de água no mundo aumentará 50% nos próximos 30 anos e quase metade da população global enfrentará grave escassez por volta de 2025. A falta de água afetará a maior parte da África, do Oriente Médio e do Sul da Ásia.

Se não forem tratados adequadamente antes de lançados nos cursos d'água, os efluentes provenientes de processos envolvendo tinturaria têxtil podem modificar o ecossistema ou atingir a saúde da população. Ao diminuir a transparência da água e impedir a penetração da radiação solar, esses rejeitos coloridos diminuem a atividade fotossintética e provocam distúrbios na solubilidade dos gases, causando danos nas guelras e brânquias dos organismos aquáticos, além de perturbar seus locais de desova e refúgio. Esses compostos podem permanecer por cerca de 50 anos em ambientes aquáticos, pondo em

risco a estabilidade desses ecossistemas e a vida em seu entorno (ZANONI e CARNEIRO, 2001).

Segundo ZANONI e CARNEIRO (2001), dependendo da forma e do tempo de exposição ao corante, as pessoas podem ter problemas de saúde, como por exemplo, asma, rinite alérgica e dermatites.

De acordo com KUNZ et al. (2002), a indústria têxtil de pequeno porte usa processos de coagulação química, adsorção em carbono ativado e, menos freqüentemente processos de ultrafiltração para diminuir a carga de contaminantes no efluente. Já as de grande porte utilizam processos biológicos, principalmente sistema de lodos ativados, são utilizados preferencialmente.

As técnicas de tratamento fundamentadas em processos de coagulação, seguidas de separação por flotação ou sedimentação, apresentam uma elevada eficiência na remoção de material particulado. No entanto, a remoção de cor e compostos orgânicos dissolvidos mostram-se deficientes. Os processos de adsorção em carvão ativado apresentam uma eficiência significativamente maior, contudo em função da superfície química do carvão ser positiva, a adsorção de corantes de caráter catiônico é uma limitação bastante importante (KUNZ et al., 2002).

Segundo KUNZ et al. (2002), os processos citados anteriormente têm mais uma desvantagem, a de serem todos não destrutivos. O volume dos resíduos é diminuído, mas a disposição das fases sólidas continua sendo um problema sem solução. Por isso existe uma preferência por processos destrutivos, que degradam as espécies de interesse. Os mais utilizados são os processos biológicos, devido à relativa facilidade encontrada na implementação de sistemas que operem em grande escala, sendo os sistemas de lodo ativado usado com maior freqüência. Este sistema apresenta uma eficiência relativamente alta, permitindo a remoção de aproximadamente 80% da carga de corantes. Mas existe um problema neste sistema, que é o acúmulo do lodo, pois este tem um teor de corantes adsorvidos muito alto, impedindo qualquer possibilidade de reaproveitamento. Por todos estes

motivos, o estudo de novas alternativas para o adequado tratamento de efluentes deve ser considerado como uma prioridade dos profissionais que atuam nesta área de trabalho.

Sem dúvida, a contaminação de águas naturais tem sido um dos grandes problemas da sociedade moderna. A economia de água em processos produtivos vem ganhando especial atenção devido ao valor agregado que tem sido atribuído a este bem, através de princípios como consumidor pagador e poluidor pagador recentemente incorporados em nossa legislação. Aliados a isso têm previsões não muito animadoras para o século que se inicia, como por exemplo, a previsão feita pela Companhia de Saneamento do estado de São Paulo (SABESP), que estima que já em 2010 a demanda de água será superior a capacidade hídrica dos mananciais do estado (KUNZ et al., 2002).

Segundo CONCHON (1999), com as sucessivas campanhas de economia de água, houve uma concentração dos contaminantes. É comum encontrar valores de DBO entre 750 e 3000mg/L. Para se ter uma idéia melhor do potencial poluidor da indústria têxtil, basta fazer uma comparação com os efluentes domésticos, cuja DBO oscila de 200 a 300 mg/L.

As águas residuárias, após tratamento e lançamento nos corpos d'água receptores, devem atender aos limites máximos ou mínimos. No Brasil, a Resolução nº 20/86 do CONAMA estabelece os padrões de qualidade e de lançamento expressos no Art.21 da deferida resolução, refere-se aos efluentes. Os Estados podem legislar sobre o assunto, ressalvando-se que a Legislação Estadual pode ser mais restritiva que a Legislação Federal (NUNES, 1996).

A Tabela 2.6 apresenta as exigências da Legislação Federal (CONAMA) e das legislações dos estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Santa Catarina e Pernambuco (CPRH, 2001).

Tabela 2.6 – Exigências para lançamento de efluentes líquidos têxteis – direto e indireto (Fonte: CPRH, 2001).

		Federal	RJ	SP	SC	PE
Parâmetro	Unidade	Art. 21 Res. COMANA N° 20	Diretriz DZ – 205	Art. 18 Dec. N° 8468	Art. 19 Dec. N° 14.250	Art. 29 Dec. N° 7.269
pH		5,0 - 9,0		5,0 – 9,0	6,0 – 9,0	5,0 – 9,0
Temperatura	°C	< 40		< 40	< 40	< 40
Material sedimentável	ml/L	1,0		1,0	< 1,0	< 1,0
Material flutuante	mg/L	ausente				ausente
DBO <sub>5,20</sub>	%			60	60	
Red. DBO <sub>5,20</sub>	%			80	80	
Carga ≤ 100 Kg/d	%		70			
Carga > 100 Kg/d	%		90			
DQO	mg/L		200			
P, total	mg/L				1,0	
N-NH <sub>4</sub>	mg/L	5				
Fe	mg/L	15		15	15	
As	mg/L	0,5		0,2	0,1	
Ba	mg/L	5		5	5	

B	mg/L	5		5	5	
Cd	mg/L	0,2		0,2	0,1	
Pb	mg/L	0,5		0,5	0,5	
Cu	mg/L	1,0		1,0	0,5	
Cr VI	mg/L	0,5		1,0	1,0	
Cr III	mg/L	2,0				
Cr total	mg/L			5,0	5,0	
Ni	mg/L	2,0		2,0	1,0	
Ag	mg/L	0,1		0,02	0,02	
Se	mg/L	0,05		0,05	0,02	
Zn	mg/L	5,0		5,0	1,0	
F <sup>-</sup>	mg/L	10,0		10,0	10,0	
CN <sup>-</sup>	mg/L	0,2		0,2	0,2	
SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	mg/L	1,0				
S <sup>-2</sup>	mg/L	1,0			1,0	
OG mineral	mg/L	50		100	20	50
Fenóis	mg/L	0,5		0,5	0,2	
Tricloro-eteno	mg/L	1,0			1,0	
Tetracloro-eteno	mg/L	1,0			1,0	
Tetraclorometano	mg/L	1,0			1,0	
Dicloro-eteno	mg/L	1,0			1,0	

O licenciamento ambiental de uma indústria têxtil existente ou a se instalar, deve considerar os padrões de lançamento e as reais necessidades do corpo receptor, para resguardar as suas características de uso exigidas. Isto quer dizer que, embora a indústria têxtil possa oferecer padrões de emissão dentro das especificações previstas, é preciso restringi-las e/ou adequá-las em favor da qualidade do corpo receptor (CPRH, 2001).

Recomenda-se, ainda, utilizar os padrões constantes na resolução nº 20 do CONAMA.

Em função das experiências acumuladas em várias estações de tratamento de efluentes líquidos de indústrias têxteis, indica-se alguns parâmetros de qualidade de efluentes finais factíveis de alcance, quais sejam (CPRH, 2001).

DQO = 200 mg/l

DBO<sub>5,20</sub> = 93% (eficiência)

Cor = 75 mg/L PtCo (aparente)

Além desses parâmetros, é necessário monitorar, também, outros indicadores de lançamento, através das seguintes análises (CPRH, 2001):

- Análise de surfactantes: é um teste interessante sob o ponto de vista do meio ambiente e também da indústria, pois mede eventuais excessos de detergentes. Os surfactantes são substâncias tensoativas que reagem ao azul de metileno.

- Análise de hidrocarbonetos: esse teste objetiva identificar poluentes utilizados na indústria têxtil, notadamente na estamparia, onde ainda se emprega, em alguns casos, o varsol.

**2.5 – OTIMIZAÇÃO VIA PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA**

Nos últimos anos, processos contínuos têm sido estudados a partir de aspectos de integração de energia (LINHOFF e HINDMARSH, 1983), minimização do efluente (WANG e SMITH, 1994 a; DHOLE, RAMCHANDANI, TAINSH e WASILEWSKI, 1996), geração de água, na planta de tratamento de efluentes (WANG e SMITH, 1994b) e recuperação de contaminantes (EL-HALWAGI e MANOUSIOUTHAKIS, 1989). Os resultados obtidos por algumas daquelas metodologias tem sido altamente satisfatórios (ALMATÓ et al., 1999).

A simulação de processos químicos tem sido muito utilizada pelas indústrias, sendo um meio importante para a análise e otimização de novos processos e de processos já existentes.

Otimizar é planejar ou desenvolver com o máximo de eficiência um processo para se obter o melhor resultado tanto financeiro como o de qualidade do produto final. Otimização é uma área de estudo que utiliza computadores, estatística e modelagem matemática.

Os objetivos de otimização seguem a seguinte seqüência:

- Converter dados em informações significativas, ou seja, transformar dados brutos em informações gerenciais que podem ser utilizadas no processo de tomada de decisão;

- Apoiar o processo de tomada de decisão. Que seria o processo de identificar o problema ou uma oportunidade e selecionar uma linha de ação para resolvê-lo. Um problema ocorre no momento em que o estado atual de uma situação é diferente do estado desejado. E uma oportunidade ocorre quando as circunstâncias oferecem a chance da organização ultrapassar seus objetivos e/ou metas;

- Criar sistemas computacionais úteis para os usuários.

Segundo BAGAJEWICZ (2000), uma programação matemática pode produzir soluções globalmente ótimas e soluções sub-ótimas importantes.

## **2.6 – SIMULAÇÃO NUMÉRICA E ESTRUTURA DOS PROGRAMAS EXECUTIVOS**

O uso de técnicas numéricas para a solução de problemas complexos da engenharia e da física é hoje uma realidade, graças ao desenvolvimento de computadores de alta velocidade e de grande capacidade de armazenamento (CASTRO et al.,2000). Em função dessa disponibilidade computacional, que cresce exponencialmente, tem ocorrido o desenvolvimento de algoritmos para a solução de diversos problemas.

Segundo CASTRO V. et al. (2000), a solução numérica pode apresentar dois tipos de erros, quando os resultados são comparados com a realidade dos problemas físicos em questão. Os erros numéricos propriamente ditos são um dos dois tipos de erros, que é resultado da má solução das equações diferenciais. Para detectá-los os resultados devem ser comparados com outras soluções, analíticas ou numéricas, verificando-se se a equação diferencial foi corretamente resolvida. Esta é a fase chamada de validação numérica, pois além da verificação da equação diferencial, a precisão da solução e a convergência do algoritmo também são testadas. O outro erro é resultado do uso de equações diferenciais que não representam adequadamente o fenômeno. Esta fase pode ser chamada de validação física, pois se preocupa com a fidelidade do modelo matemático para com o problema físico em questão.

A simulação de processos é um instrumento de uso crescente para o projeto, análise, controle e otimização de processos químicos. Este interesse é verificado pelo grande número de trabalhos de pesquisa desenvolvidos e em desenvolvimento nesta área.

Estes programas de acordo com suas estruturas e possibilidades de uso podem ser programas específicos para a simulação de um processo particular ou programas com estruturas modulares sendo assim de múltiplo uso.

Na estrutura modular, cada etapa do processo é descrito por um modelo matemático, denominado de unidade modular. As unidades modulares são conectadas através dos conjuntos de informações representativos das correntes materiais e do fluxo energético do processo, cabendo, ao programa executivo, supervisionar o fluxo de informações entre as unidades.

A sub-rotina de aquisição de informações acerca da topologia do processo, parâmetros de projeto e operações das unidades, e também dados referentes às correntes de entrada é o elemento inicial do programa executivo. Todas estas informações são verificadas por sub-rotinas do programa executivo, advertindo sempre o operador quanto a erros ou inconsistências.

Segundo ULSON de SOUZA (1985), estas são as informações básicas do processo, que são transferidas às unidades modulares, sendo estas executadas na seqüência determinada pela ordem de cálculo. A ordem de cálculo é a mesma do fluxo mássico, mas caso seja verificada a existência de algum reciclo esta ordem é alterada. Se no processo existir correntes de reciclo, este então é verificado, e é feita uma estimativa inicial da composição e das propriedades físicas de algumas das correntes que estão envolvidas; e estas serão chamadas de correntes de corte. Sendo feito então o cálculo através de métodos iterativos, até que se obtenha valores dentro de tolerâncias desejadas.

É possível distinguir três fases principais no programa de simulação: a entrada, processamento e saída de dados, as quais serão discutidas, em seus respectivos aspectos, nas próximas seções.

Para realização de um programa para simulação de processos químicos é preciso o conhecimento em três áreas. As operações de gerenciamento de banco de dados, possibilitando o armazenamento, resgate e a modificação de dados

devido aos processos iterativos. É necessário o conhecimento dos processos ligados à Engenharia Química, para assim fazer a modelagem matemática precisa de cada unidade. E a utilização de métodos matemáticos para os cálculos iterativos, assim como o desenvolvimento de algoritmos utilizados em diversas etapas do programa exige a aplicação de cálculo numérico.

### **2.6.1 – Fase de entrada de dados**

É nesta fase que ocorre a interação entre o usuário e o programa de simulação, sendo assim susceptível a erros de entrada de dados, cometidos pelo usuário. Por isso nesta parte do programa existem sub-rotinas que servem para verificar se existem inconsistências de dados. Sempre que houver, o operador é advertido, sendo emitido também um possível diagnóstico do erro, possibilitando assim a sua correção.

Os dados de entrada requeridos pelos programas são aqueles que fornecem informações acerca da topologia do processo, correntes de entrada, incluindo as propriedades físicas, parâmetros de projeto das unidades e critérios de convergência. E nos casos onde são feitos cálculos de otimização de custos, por exemplo, são necessários também parâmetros de custos e critérios de otimização.

A fim de exemplificar, a Figura 2.1 representa um fluxograma de um processo qualquer. Onde cada unidade é representada por um número. E as conexões entre as unidades (chamadas de correntes) representam o fluxo mássico e energético da planta do processo químico.

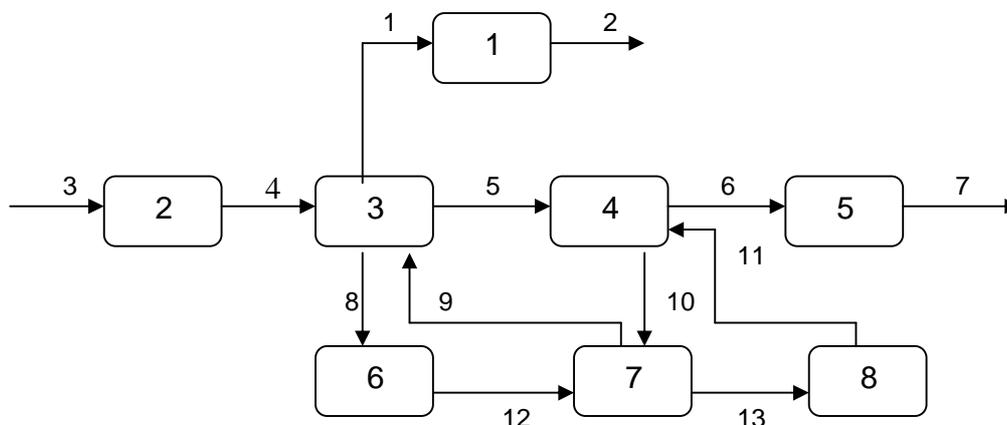


Figura 2.1 – Fluxograma de informação de um processo químico qualquer.

Depois de fornecidos os dados do fluxograma de informações ao programa, este apresenta estes dados sob uma forma matricial, denominada Matriz do Processo. Desta são derivadas outras três matrizes, a Matriz de Adjacências, Matriz de Incidências e Matriz de Conexão das Correntes.

A cada dado fornecido existe uma verificação quanto a sua consistência, e então arquivados sob a forma matricial. Sendo organizados na forma de bancos de dados para posterior utilização e atualização.

### 2.6.2 – Fase de processamento

Esta é a fase onde ocorrem os cálculos, sendo estes feitos até que a convergência desejada seja alcançada.

É a fase que determina a eficiência do programa. Pois para cada etapa, como, por exemplo, determinação dos ciclos, ou na solução das equações algébricas, existe diferentes métodos que podem ser utilizados, sendo que a escolha do método pode influenciar na eficiência.

Fazendo-se referência à Figura 2.1, é possível verificar que, por exemplo, a concentração da corrente de número 4 pode ser facilmente calculada, pois todos os dados da corrente de entrada da unidade 2 (corrente de número 3) são conhecidos, assim como os parâmetros de projeto e processo desta unidade. Já a concentração da corrente número 5 não pode ser calculada, porque não há informações sobre a corrente 9 (que é uma corrente de reciclo).

Nesta mesma Figura 2.1, o problema ocorre não somente na unidade número 3, mas também na 4, 6, 7 e 8, que são conectadas pelas correntes de reciclo. Um importante aspecto a ser considerado é que os dados das correntes de reciclo não são conhecidos, e para se fazer o cálculo de qualquer corrente de saída de qualquer unidade é preciso conhecer os dados de todas as correntes que estão entrando na dada unidade. Para ser possível calcular estas correntes de reciclo, é preciso arbitrar o valor de algumas delas, obtendo-se então, através de cálculos iterativos, uma boa estimativa destes valores. As correntes que tiverem seus valores arbitrados, conforme ULSON de SOUZA (1985), são denominadas de correntes de corte, sendo obtidas por meio de métodos de decomposição.

Para a decomposição das correntes de reciclos, sob o ponto de vista computacional, o fluxograma de informações pode ser traduzido pela Matriz de Adjacências (ULSON de SOUZA, 1985).

Para a identificação dos reciclos foi usado o algoritmo de Tiernan (1970). Sendo este um algoritmo eficiente e rápido. Já para a determinação das correntes de corte, foi utilizado o método proposto por ULSON de SOUZA (1985).

Depois de abertos os reciclos do processo através das correntes de corte, a seqüência de cálculo é determinada, sendo feita uma execução iterativa das unidades modulares, e o processo é simulado.

### **2.6.3 – Fase de saída de dados**

No programa de simulação existem dois tipos de saída de resultados: os gráficos e os resultados em forma de matrizes.

O relatório final de apresentação dos resultados das correntes contém informações das composições e vazões na forma de matrizes. Assim como os dados referentes às correntes de entrada, topologia do processo, parâmetros do projeto, identificação de ciclos, correntes de corte (e seus valores iniciais), seqüência de cálculos e dado referente à tolerância da convergência dos resultados.

Além de todos estes dados referidos anteriormente, são fornecidos também mensagens de erro e seus diagnósticos.

### **2.6.4 – Matrizes do Processo**

Os dados são em sua maioria armazenados através de matrizes, por ser uma maneira eficiente e compacta para o seu manuseio.

As informações da topologia do processo são fornecidas aos programas de simulação através da Matriz do Processo. E a partir desta são geradas outras que auxiliam nos cálculos.

A representação matricial do fluxograma de informação é feita pelas seguintes matrizes, conforme ULSON de SOUZA (1985): Matriz do Processo, Matriz Conexão das Correntes, Matriz de Incidências e Matriz de Adjacências.

## **CAPÍTULO 3 - DESENVOLVIMENTO DOS ALGORITMOS COMPUTACIONAIS**

Neste capítulo serão apresentados alguns algoritmos computacionais utilizados no presente trabalho.

Será feita uma descrição da estrutura principal do programa e a partir desta uma descrição detalhada das principais etapas.

### **3.1 – ESTRUTURAÇÃO DO PROGRAMA PRINCIPAL**

Na estrutura principal são descritas as seguintes operações: entrada de dados através de uma interface com o usuário construída no Matlab; cálculo das Matrizes do Processo, Incidências, Conexão das Correntes e de Adjacências; identificação dos reciclos; determinação das correntes de corte; determinação da seqüência de cálculos, cálculo dos fatores fonte, execução da seqüência de cálculos, testes de convergência e apresentação dos resultados através de relatórios com matrizes e gráficos.

O fluxograma referente a esta estrutura principal é apresentado na Figura 3.1. E a seguir, serão descritas cada uma destas operações.

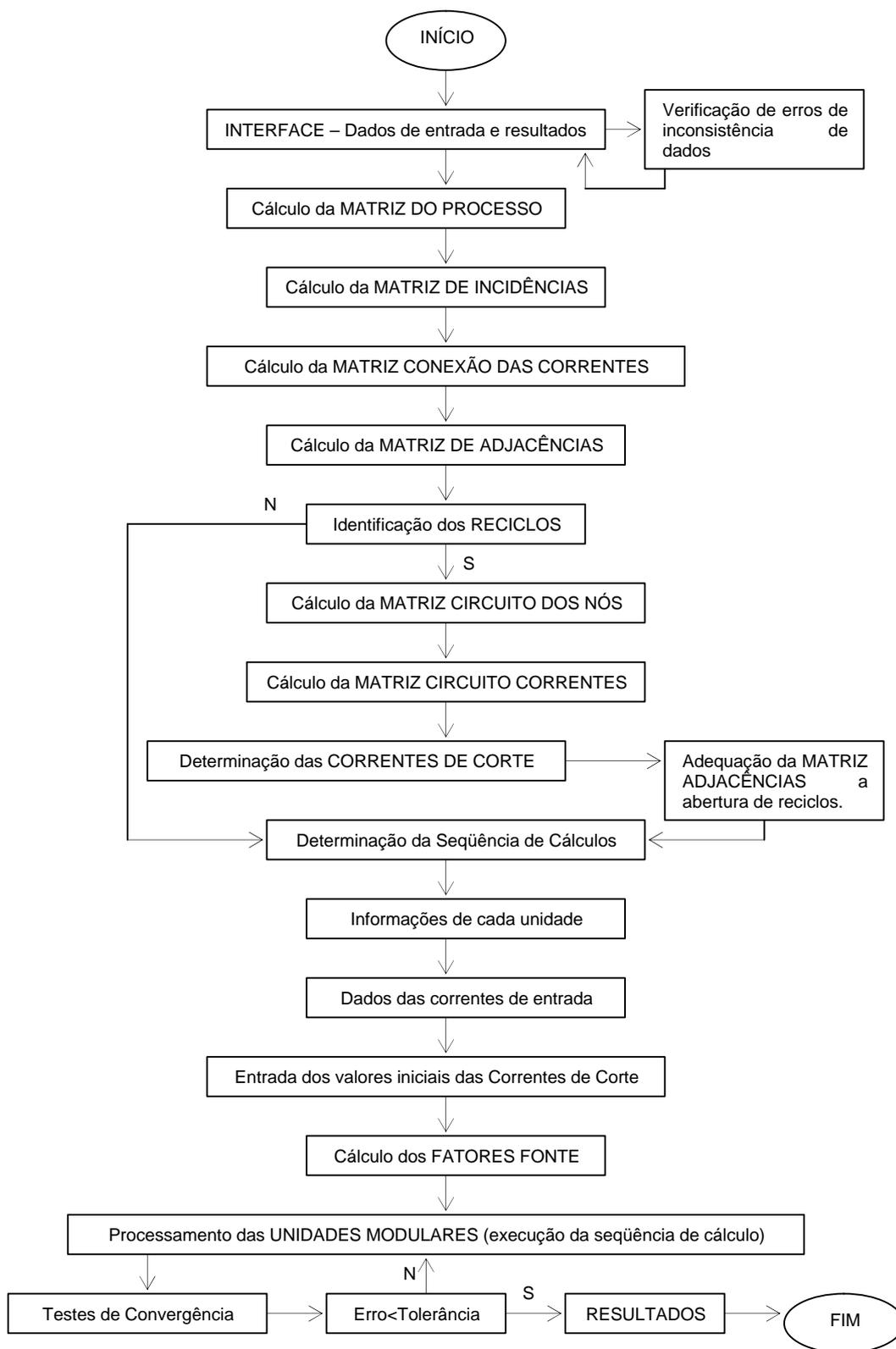


Figura 3.1 – Fluxograma da Estrutura Principal.

### **3.2 – INTERFACE – DADOS DE ENTRADA E RESULTADOS**

Uma importante etapa no processo de simulação é a visualização dos dados gerados na simulação, por isso foi implementado um programa no ambiente Matlab com uma interface amigável com o usuário. Sendo esta a parte do sistema visível para o operador, através da qual, ele se comunica para realizar suas tarefas; permitindo informar os parâmetros desejados, para que a simulação seja realizada.

A construção da interface foi feita com o auxílio da ferramenta gráfica GUIDE (Graphics User Interface Design Environment) do software Matlab. Esta ferramenta permite a criação de janelas gráficas com grande facilidade, bem com menus, caixas de texto, botões, entre outros elementos (CASTRO V. et al., 2000).

O Matlab é um software interativo de alta performance voltado para o cálculo numérico. Ele integra análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos em ambiente fácil de usar onde problemas e soluções são expressos somente como eles são escritos matematicamente, ao contrário da programação tradicional. É um sistema interativo cujo elemento básico de informação é uma matriz que não requer dimensionamento. Esse sistema permite a resolução de muitos problemas numéricos em apenas uma fração do tempo que se gastaria para escrever um programa semelhante em linguagem Fortran, Basic ou C. Além disso, as soluções dos problemas são expressas no Matlab quase exatamente como elas são escritas matematicamente.

O objetivo desta interface é fornecer uma interação pessoa-computador o mais “amigável” possível. Desta forma ela deve ser fácil de ser usada pelo usuário, fornecendo seqüências simples e consistentes de interação, mostrando claramente as alternativas disponíveis a cada passo da interação sem confundir nem deixar o usuário inseguro.

### CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO DOS ALGORITMOS COMPUTACIONAIS<sup>42</sup>

Através desta interface são especificados os seguintes dados de entrada: o número de unidades e correntes do processo, dados de topologia do processo, informações dos parâmetros de cada unidade, gramatura, velocidade e largura do tecido, vazão de tecido lavado, dados dos parâmetros das correntes de entrada e de corte, o tempo específico para o cálculo das concentrações de DQO ("t"), e o intervalo de tempo para a construção dos gráficos. Esta interface é apresentada na Figura 3.2.

The screenshot shows a software window titled "SIMULAÇÃO". It is divided into two main sections: "DADOS" (Data) on the left and "RESULTADOS" (Results) on the right. The "DADOS" section contains several input fields and buttons: "Número de Unidades:" (0), "Número de Correntes:" (0), "Matriz do Processo (MP)", "Informações de cada unidade", "Gramatura [g/m<sup>2</sup>]:" (0), "Velocidade do tecido [m/min]:" (0), "Largura do tecido [m]:" (0), "Vazão de tecido [ton/h]:" (0), "Correntes de Entrada (CE)", "Correntes de Corte (CC)", "Tempo [min]:" (0), "Intervalo de tempo para os gráficos", "Cálculo dos Fatores Fonte (alfa)", and two buttons: "CALCULAR" and "FECHAR". The "RESULTADOS" section contains a list of output options: "Matrizes do Processo", "Termo Fonte correspondente a cada caixa", "Concentrações no tempo 't'", "Vazão de cada corrente", "Temperaturas", "Concentração de cada corrente no intervalo de tempo 't'", "Concentração de cada caixa no intervalo de tempo 't'", "Gráficos da variação da concentração de cada caixa", "Gráficos da variação da concentração de cada corrente", and "Remoção de DQO".

Figura 3.2 – Interface (dados de entrada e resultados).

Para a execução do programa basta fornecer todos os dados requeridos através da interface, que estão na coluna da esquerda (coluna: DADOS). Na mesma ordem em que eles aparecem na interface.

### **CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO DOS ALGORITMOS COMPUTACIONAIS**<sup>43</sup>

Os primeiros dados de entrada requeridos pelo programa é o número de unidades e de correntes do processo. Após a entrada destes dados deve-se acionar o botão “Matriz do Processo (MP)”.

Todos os dados inseridos têm a supervisão de sub-rotinas de verificação de erros de inconsistência de dados. Quando algum erro é detectado, uma mensagem de advertência, com um possível diagnóstico do erro é apresentada ao usuário, permitindo que a correção seja feita imediatamente, conforme ilustrado nas Figuras A1. 1 a A1. 7, apresentadas no Anexo 1.

O diagnóstico de erros abrange diversos casos, como por exemplo: acesso de dados alfanuméricos em campos exclusivamente numéricos, superação do número máximo especificado para a corrente ou unidade, inserção de valores negativos, etc.

A topologia do processo é admitida através do acionamento do botão “Matriz do Processo (MP)”, onde então é requerido o número de correntes associado à unidade em questão e quais são as correntes pertencentes. Sendo que as correntes de entrada são positivas e as de saída da unidade em questão são negativas. A Figura 3.3 mostra a interface referente à entrada dos dados de topologia do processo.

No caso da inserção dos dados da Matriz do Processo os erros que podem ser detectados estão ilustrados através das Figuras A1. 8 a A1. 13, que se encontram no Anexo 1. Se algum deles for detectado, aparecerá o aviso correspondente e ocorrerá uma pausa de oito segundos, para retornar a tela representada na Figura 3.3. O retorno pode se dar antes deste tempo estabelecido caso seja acionada a tecla “OK”.

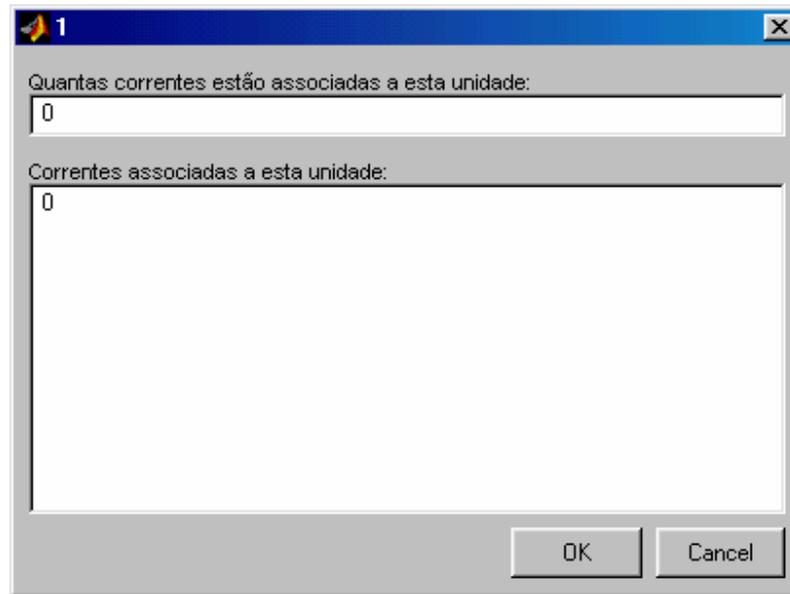


Figura 3.3 – Interface referente à entrada dos dados de topologia do processo.

As “Informações de cada unidade” se referem a parâmetros de cada unidade, dependendo se ela é uma caixa, um ponto de mistura ou um divisor de correntes. Cada uma destas unidades tem parâmetros específicos, exceto o ponto de mistura. Os parâmetros da caixa são: volume, correntes de pick up e seus respectivos valores, concentração inicial e final (no estado estacionário), para o divisor de correntes basta citar quais são as correntes de saída da unidade em questão e seus fatores de divisão correspondentes. No caso das caixas, as correntes de pick up fornecidas são todas positivas, independente se ela está saindo ou entrando na unidade, e os seus valores de pick up não podem ser menores ou igual a zero. O mesmo ocorre no fornecimento dos dados de uma unidade que seja um divisor de correntes, as correntes de saída têm todos valores positivos e seus fatores de divisão correspondentes são frações.

A Figura 3.4 representa a interface após o acionamento da tecla “Informações de cada unidade”. A partir desta é possível selecionar o tipo de unidade e então fornecer os parâmetros desejados. Para o caso de uma caixa do lavador contínuo, é apresentada na Figura 3.5 a nova interface desta unidade, para um misturador, retorna a interface da Figura 3.4, mas agora representando a

### CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO DOS ALGORITMOS COMPUTACIONAIS45

unidade seguinte, e para um divisor de correntes, a sua representação é ilustrada na Figura 3.6. Este procedimento se repete até a entrada dos parâmetros de todas as unidades do processo.



Figura 3.4 - Interface após o acionamento da tecla “Informações de cada unidade”.

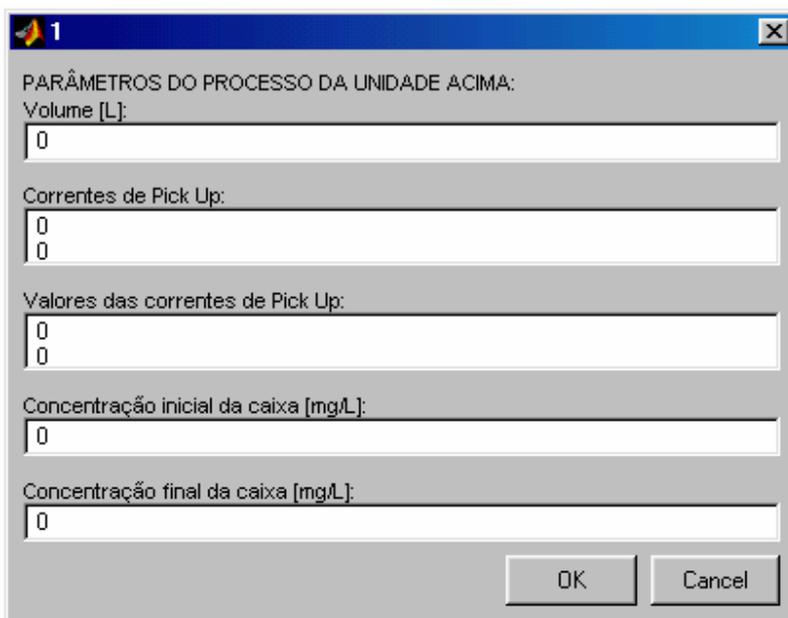
A screenshot of a parameter input dialog box with a blue title bar containing the number '1'. The title is 'PARÂMETROS DO PROCESSO DA UNIDADE ACIMA:'. It contains five input fields, each with the value '0':  
1. 'Volume [L]:'  
2. 'Correntes de Pick Up:' (with two sub-inputs, both showing '0')  
3. 'Valores das correntes de Pick Up:' (with two sub-inputs, both showing '0')  
4. 'Concentração inicial da caixa [mg/L]:'  
5. 'Concentração final da caixa [mg/L]:'  
At the bottom right are two buttons labeled 'OK' and 'Cancel'.

Figura 3.5 – Interface da unidade caixa do lavador contínuo.

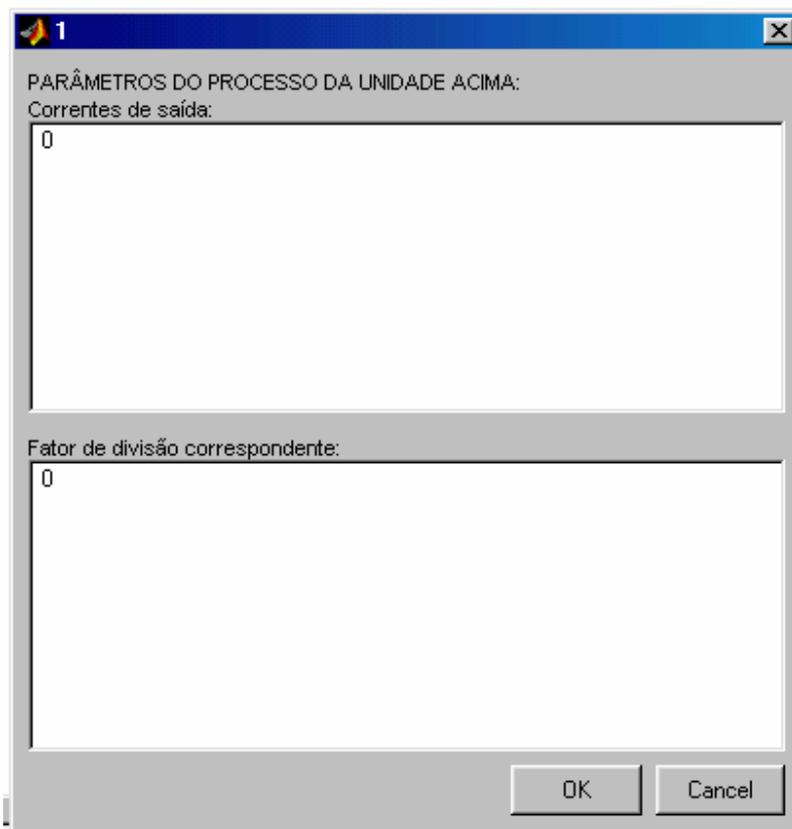


Figura 3.6 – Interface da unidade divisor de correntes.

Os possíveis erros de inconsistência detectados pelo programa ao fornecerem os parâmetros das caixas estão ilustrados através das Figuras A1. 14 a A1. 18, que se encontram no Anexo 1.

Os possíveis erros de inconsistência detectados pelo programa na entrada de dados dos parâmetros dos divisores de correntes estão ilustrados nas Figuras A1. 19 a A1. 23, no Anexo 1.

O botão “Correntes de Entrada (CE)” permite que o usuário possa informar todos os parâmetros de cada corrente de entrada do processo, sendo estes a vazão (em  $m^3/h$ ), concentração (em  $mg/L$ ) e temperatura (em  $^{\circ}C$ ). Já que estes são conhecidos. A Figura 3.7 apresenta a interface após o acionamento deste botão.

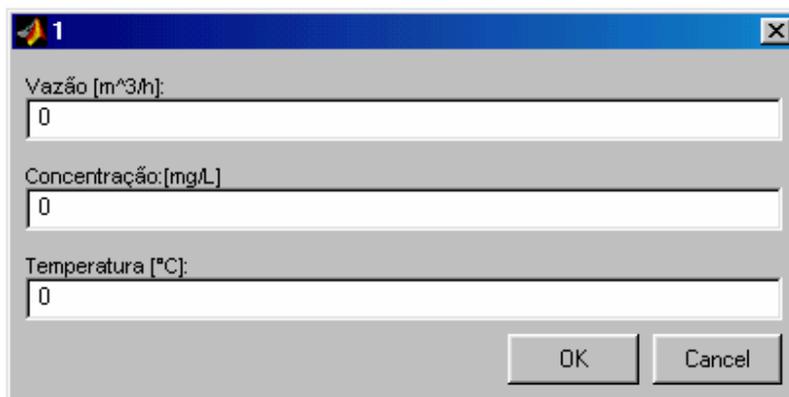


Figura 3.7 – Interface após o acionamento do botão “Correntes de Entrada (CE)”.

Existem três erros que podem ser detectados pelo programa no fornecimento destes dados, que estão representados através das Figuras A1. 24, A1. 25 e A1. 26, encontradas no Anexo 1.

Através do botão “Correntes de Corte (CC)”, é possível arbitrar valores iniciais para as correntes de corte, que são posteriormente convergidos através de iterações no processo de cálculo. A definição de “Correntes de Corte” pode ser vista na seção 3.5. A interface após o acionamento deste botão é a mesma da Figura 3.7. E os diagnósticos de erros do programa associados aos parâmetros fornecidos pelo operador também são os mesmos que no caso do fornecimento dos parâmetros das correntes de entrada, e estão representados através das Figuras A1. 24, A1. 25 e A1. 26, no Anexo 1.

No item “Intervalo de tempo para os gráficos” deverão ser fornecidos o tempo inicial, final e o intervalo de tempo incremental para a construção dos gráficos: variação da concentração de cada caixa e de cada corrente com o tempo. A Figura 3.8 representa a interface em questão. As Figuras A1. 27, A1. 28 e A1. 29 (que se encontram no Anexo 1) representam os possíveis diagnósticos de erros detectados pelo programa nesta etapa. No caso de erros, aparecerá o aviso correspondente e ocorrerá uma pausa de oito segundos, para retornar a tela representada na Figura 3.8. O retorno pode se dar antes deste tempo estabelecido caso seja acionada a tecla “OK”.

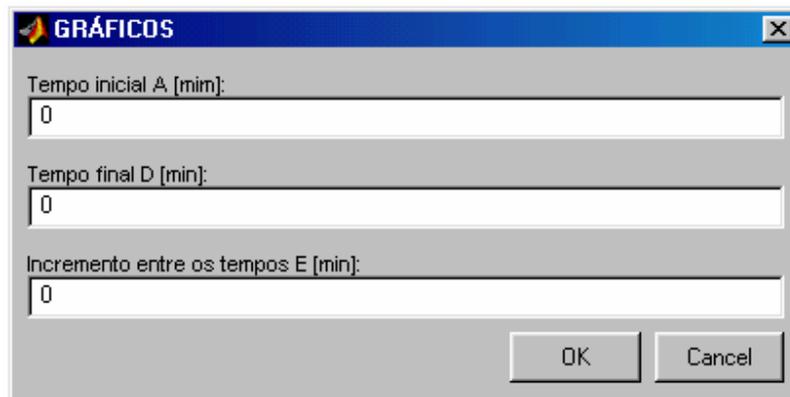


Figura 3.8 – Interface pelo acionamento do botão “Intervalo de tempo para os gráficos”.

Para o “cálculo final”, é necessário calcular-se os termos fontes, que estão melhores descritos na seção 3.10. É nesta etapa, e também na etapa do “cálculo final” que os erros de inconsistência associados à gramatura, velocidade e largura do tecido, vazão de tecido lavado, além do tempo selecionado são detectados. Sendo que as Figuras A1. 30 a A1. 39 representam os diagnósticos destes erros realizados pelo programa.

Depois de especificados todos os dados é possível realizar os cálculos através do acionamento do botão “CALCULAR”. Todos estes dados podem ser visualizados no vídeo. Ou através da interface, utilizando os botões da coluna da direita (RESULTADOS).

Acionando o botão “Matrizes do Processo”, é aberta outra interface (representada pela Figura 3.9), na qual é possível escolher a matriz desejada. Nesta lista estão as seguintes matrizes (todas descritas nas próximas seções):

- Matriz do Processo – MP;
- Matriz Conexão das Correntes – MCC;
- Matriz de Adjacências – MA;
- Matriz de Incidências – MI;
- Matriz Circuito dos Nós – MCN;

### CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO DOS ALGORITMOS COMPUTACIONAIS49

- Matriz Circuito Correntes - MCCO;
- Correntes de Corte – CC;
- Matriz Adjacências Corrigida – MAcorrigida;
- Seqüência de Cálculo – ART;
- Matriz das Concentrações Finais de cada caixa – Creal;
- Volume das Caixas – Vcaixas;
- Matriz das Concentrações Iniciais de cada caixa – Ccaixaszero;
- Matriz “Completa” (vazão, concentração e temperatura de cada corrente) – Matrizconvertida;
- Matriz das Correntes de Entrada das Caixas – CEC;
- Matriz das Correntes de Saída das Caixas – CSC1;
- Matriz dos Valores dos pick ups – VPU;
- Matriz dos Valores das Correntes de Entrada – VCE;
- Matriz dos Valores dos Divisores de Correntes – VDC;
- Matriz dos Valores dos Pontos de Mistura – VPM;
- Matriz dos Valores das Correntes de Corte – VCC;
- Matriz do Tempo – t;
  
- Matriz das Concentrações de cada correntes (sem a correção com o termo alfa).

A Figura 3.10 representa a forma de interface aberta após uma das matrizes da lista ser escolhida. Onde a matriz pode ser visualizada de duas formas, na coluna da esquerda (cada número separado por vírgula) e da direita.

Os botões de resultados: “Termo Fonte correspondente a cada caixa”, “Vazão de cada corrente”, “Concentração de cada corrente no intervalo de tempo “t” ” e “Concentração de cada caixa no intervalo de tempo “t” ”, funcionam de

### CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO DOS ALGORITMOS COMPUTACIONAIS50

maneira semelhante. Basta serem acionados para que apareça uma interface idêntica à da Figura 3.10, com a matriz escolhida.

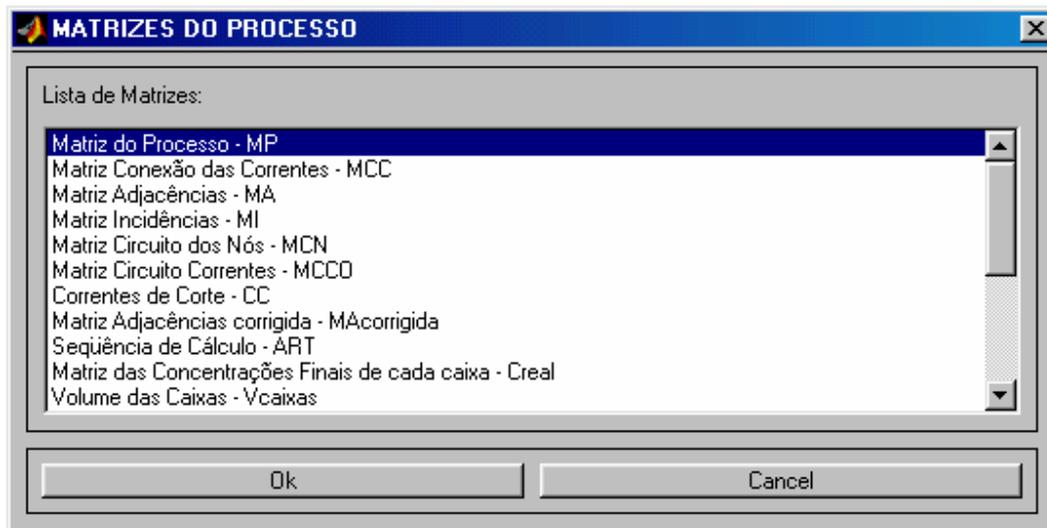


Figura 3.9 – Interface aberta ao acionamento do botão “Matrizes do Processo”, na coluna de resultados.

No entanto, os botões: “Concentrações no tempo  $t$ ” e “Temperaturas” são semelhantes ao primeiro citado (“Matrizes do Processo”). Já que o acionamento destes dois fazem aparecer outra janela de interface com opções de matrizes.

Para o caso do botão “Concentrações no tempo  $t$ ”, a interface é representada pela Figura 3.11. Cujas opções de matrizes se resumem em duas: Matriz da Concentração de cada corrente – Cconv e Matriz da Concentração de cada Caixa – Ccaixasconvertida.

O botão “Temperaturas” quando acionado abre uma interface muito semelhante a da Figura 3.11, mas agora com opções diferentes, mostrar a matriz que representa a temperatura de todas as correntes ou de cada caixa. Sendo estas temperaturas as do estado estacionário, assim como a vazão e a concentração. A Figura 3.12 ilustra esta interface. Depois de escolhida, a matriz aparece da mesma forma representada na Figura 3.10.

## CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO DOS ALGORITMOS COMPUTACIONAIS 51

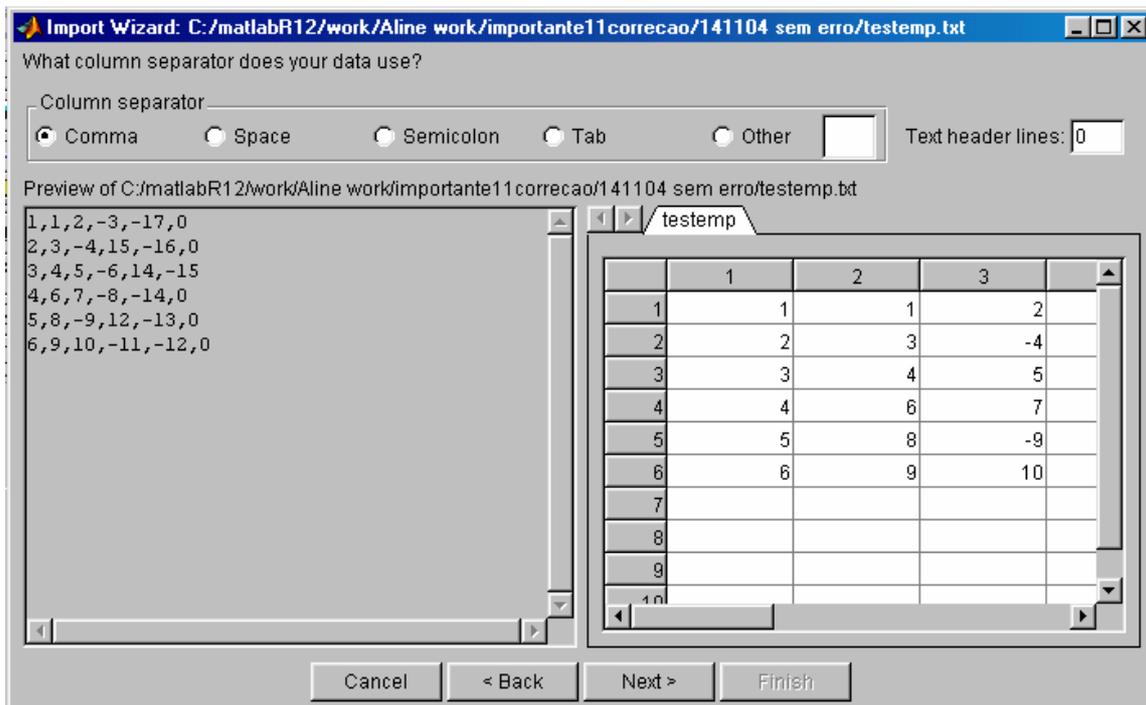


Figura 3.10 – Interface que representa a escolha da “Matriz do Processo – MP”.



Figura 3.11 - Interface aberta após o acionamento do botão “Concentrações no tempo “t””, na coluna de resultados.

Os botões “Gráficos da variação da concentração de cada caixa” e “Gráficos da variação da concentração de cada corrente” da coluna RESULTADOS servem não mais para apresentar resultados em forma de matrizes, e sim na forma de gráficos.

### CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO DOS ALGORITMOS COMPUTACIONAIS52

O primeiro deles, “Gráficos da variação da concentração de cada caixa”, quando acionado abre uma interface que está sendo apresentada na Figura 3.13. Na qual tem duas opções, a construção dos gráficos de todas as caixas na mesma tela, ou cada caixa em uma tela separada.



Figura 3.12 - Interface aberta após o acionamento do botão “Temperaturas”, na coluna de resultados.

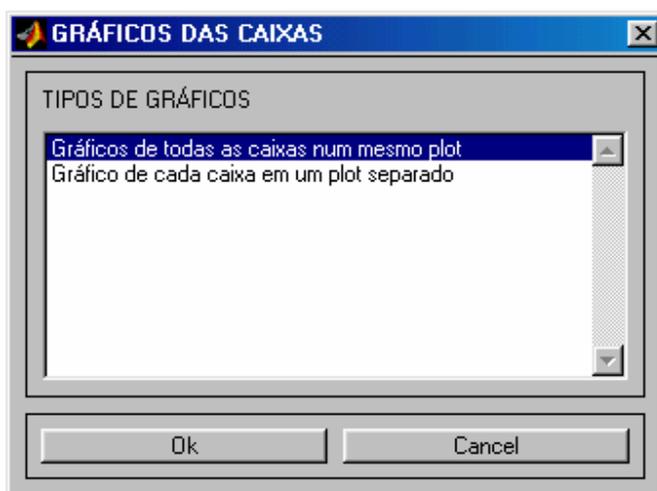


Figura 3.13 - Interface aberta após o acionamento do botão “Gráficos da variação da concentração de cada caixa”, na coluna de resultados.

As Figuras 3.14 e 3.16 servem para ilustrar a aparência dos gráficos apresentados. Sendo que este exemplo é de um processo com uma lavanderia de

### CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO DOS ALGORITMOS COMPUTACIONAIS53

sete caixas. Onde a variação da concentração de DQO com o tempo pode ser vista num gráfico só, com todas as caixas (Figura 3.14) ou em gráficos separados, como é o caso da Figura 3.16, representando a caixa número dois.

Se a opção escolhida for a de graficar a variação da concentração de cada caixa em gráficos separados, aparecerá outra janela de interface possibilitando a escolha da caixa. Esta interface está representada pela Figura 3.15. Nesta etapa também existe uma verificação de erro de inconsistência de dados pelo usuário, sendo os possíveis erros e suas mensagens apresentados nas Figuras A1. 40 e A1. 41, encontradas no Anexo 1.

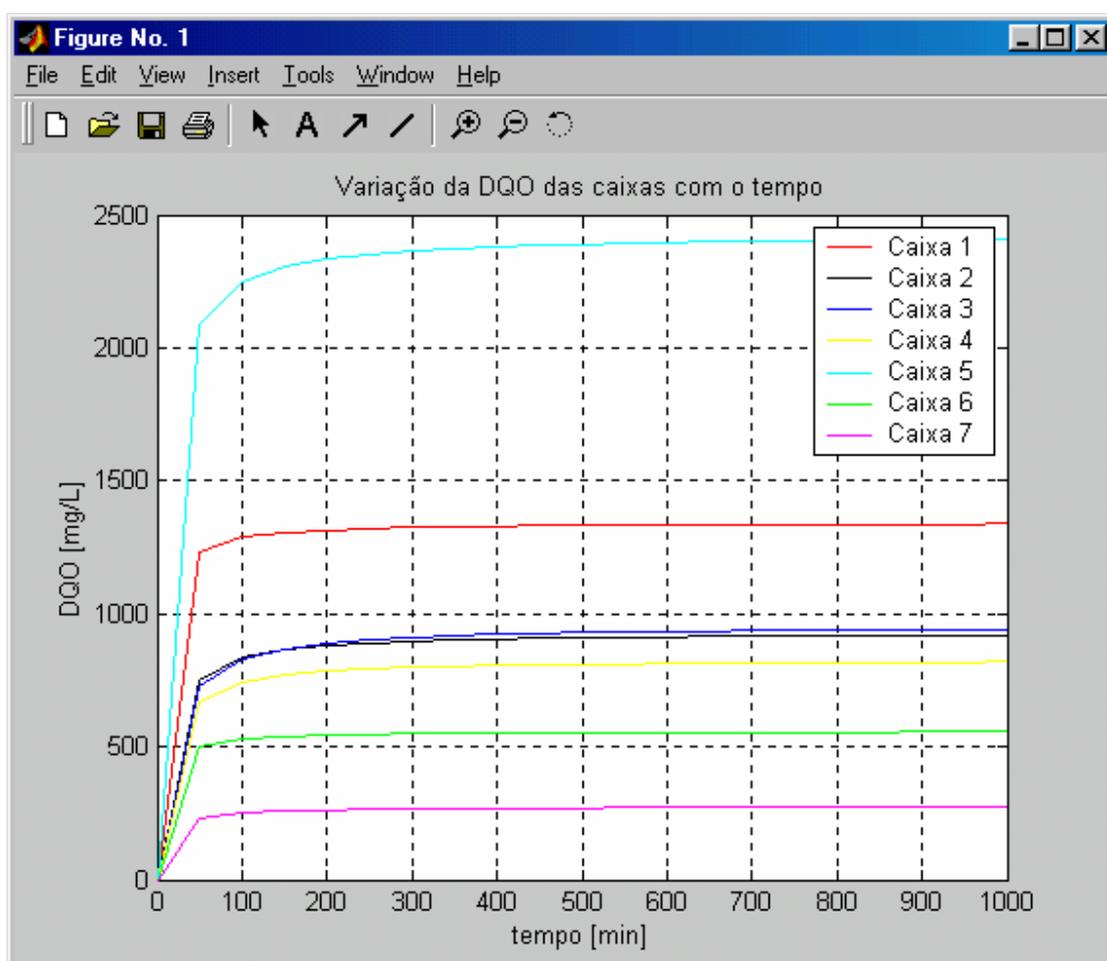


Figura 3.14 – Representação gráfica da variação da concentração de DQO de todas as caixas de um processo num mesmo gráfico.

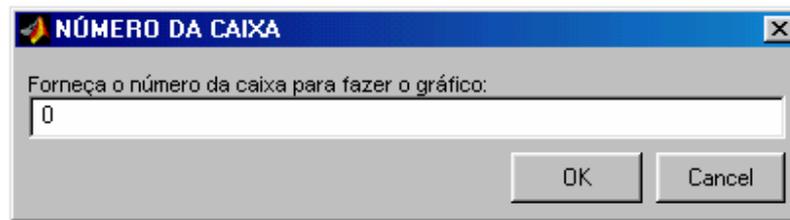


Figura 3.15 – Interface aberta para a escolha da opção para graficar os dados de cada caixa em gráficos separados.

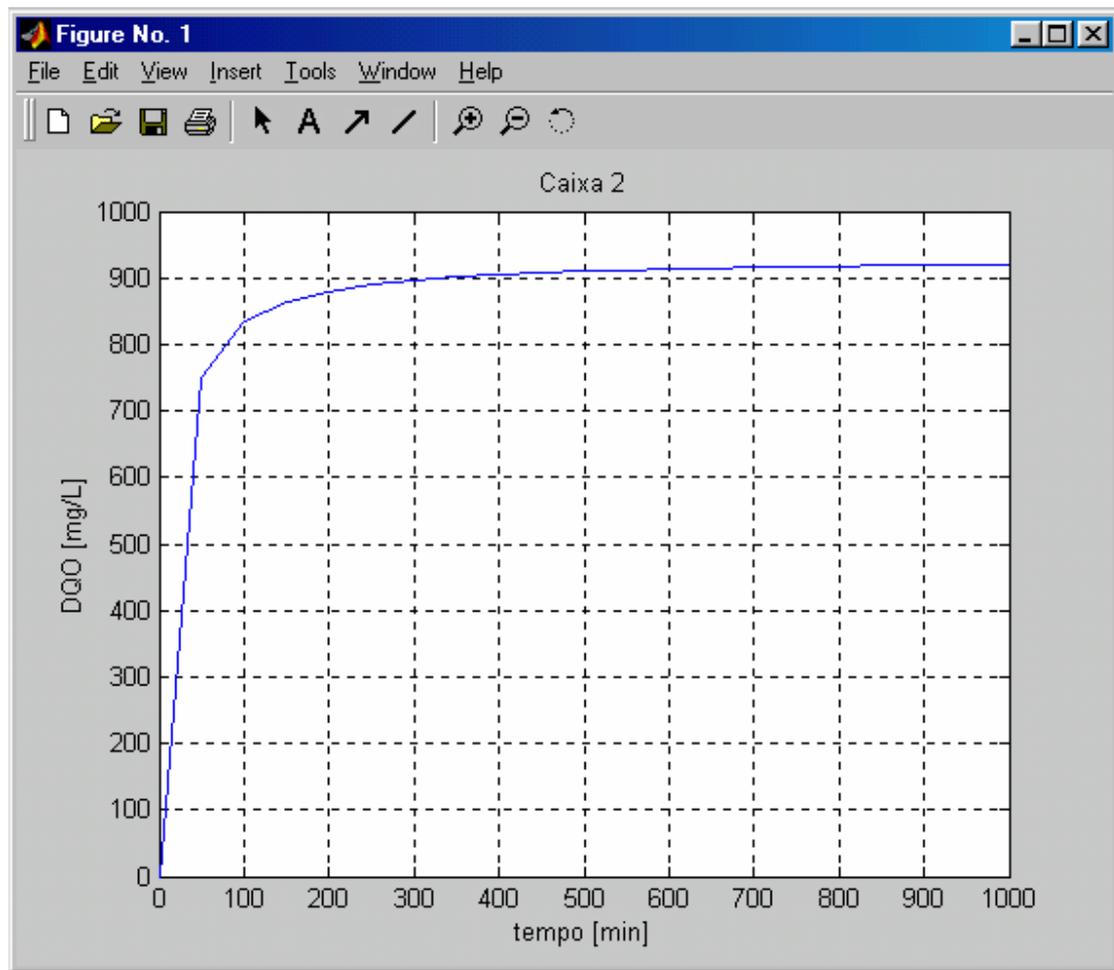


Figura 3.16 - Representação gráfica da variação da concentração de DQO da caixa dois.

O penúltimo botão da coluna RESULTADOS é semelhante ao último descrito, sendo que, o que difere neste caso, é que não é possível graficar a variação da concentração de todas as correntes de uma só vez, devido ao elevado número de correntes que possui cada processo. Portanto, ao acionar este botão

### CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO DOS ALGORITMOS COMPUTACIONAIS55

abrirá uma interface na qual é possível escolher o número da corrente a qual temos interesse em fazer o gráfico. Esta interface é apresentada na Figura 3.17. Assim como em todos os casos apresentados, este também tem uma verificação de erro de inconsistência de dados e as mensagens de erro são representadas nas Figuras A1. 42 e A1. 43, no Anexo 1.

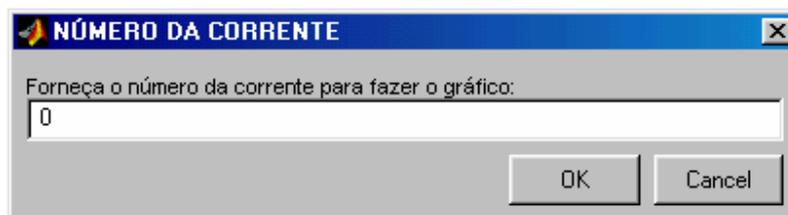


Figura 3.17 - Interface aberta ao acionamento do botão “Gráficos da variação de concentração de cada caixa” da coluna RESULTADOS da interface principal.

O último botão da coluna RESULTADOS (“Remoção de DQO”), quando acionado abre uma interface que está sendo apresentada na Figura 3.18. Na qual tem cinco opções, dentre as quais podemos escolher em que unidade serão apresentados os valores de remoção de DQO de cada caixa, assim como a remoção total da lavanderia contínua e a relação de volume de água da ETA gasto por massa de tecido processado. Após a escolha, é aberta uma interface semelhante à Figura 3.10 com os valores.

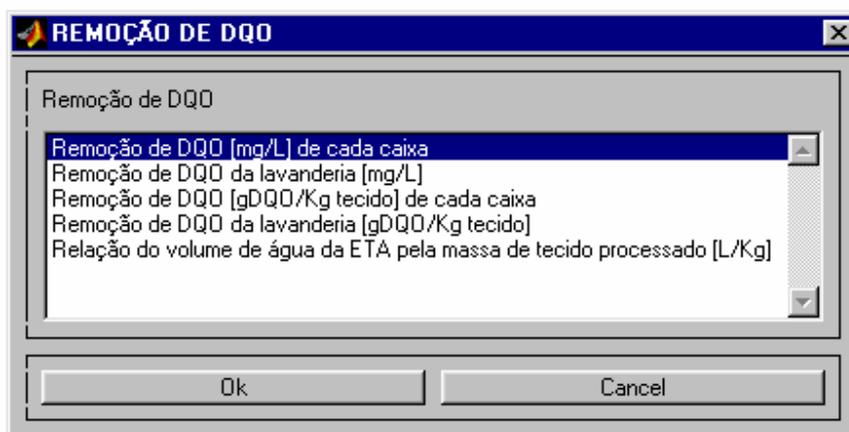


Figura 3.18 - Interface aberta ao acionamento do último botão da coluna RESULTADOS da interface principal.

### **3.3 – CÁLCULO DAS MATRIZES**

O tratamento dos dados de entrada, assim como os de saída na forma matricial, é uma maneira bastante eficiente e compacta para o processamento dos mesmos.

As informações da topologia do processo são armazenadas na forma de uma matriz chamada Matriz do Processo, sendo a partir desta criadas outras matrizes: Conexão das Correntes, de Incidências e de Adjacências. Estas matrizes são uma ferramenta importante para as etapas de cálculos posteriores, pois em determinados casos são mais apropriadas ao cálculo em questão.

A Matriz do Processo deve ser fornecida pelo usuário através da interface, acionando o botão “Matriz do Processo (MP)”, e a partir desta, aparecerá outra interface (representada na Figura 3.3 na seção 3.2), onde devem ser fornecidas pelo usuário as correntes associadas a cada unidade.

#### **3.3.1 – Matriz do Processo**

A Matriz do Processo é uma forma numérica de informação da topologia do processo, sendo apresentado um exemplo na Tabela 3.1. A partir dela é possível reconstituir totalmente o fluxograma do processo em questão.

A primeira coluna da matriz se refere às unidades do processo, e em cada coluna subsequente estão as correntes associadas à unidade da linha referente, sendo que o primeiro zero na linha indica o fim destas. As correntes que possuem valores positivos se referem às correntes de entrada e as que têm valores negativos são correntes de saída da unidade.

## CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO DOS ALGORITMOS COMPUTACIONAIS57

Tabela 3.1 - Matriz do Processo referente ao fluxograma de informações da Figura 2.1.

Unidades	Correntes associadas				
1	1	-2	0	0	0
2	3	-4	0	0	0
3	4	9	-1	-5	-8
4	5	11	-10	-6	0
5	6	-7	0	0	0
6	8	-12	0	0	0
7	12	10	-9	-13	0
8	13	-11	0	0	0

### 3.3.2 – Matriz de Incidências

A Matriz de Incidências, segundo ULSON de SOUZA (1985) é um outro método numérico de fornecer o fluxograma de informações do processo, apesar de possuir menos informações que a Matriz do Processo.

Toma-se como exemplo a Matriz de Incidências da Tabela 3.2, na primeira coluna estão às unidades do processo em questão, e na primeira linha as correntes. O elemento 1, significa que a corrente pertencente a esta coluna é de entrada da unidade pertencente a esta linha. Já o elemento -1 significa que a corrente é de saída da unidade em questão. Quando a corrente não for de entrada nem de saída da unidade em questão, é atribuído o valor zero.

Outra informação pode ser obtida desta matriz a partir da soma de cada coluna (não contando a primeira linha, que se refere as correntes). Se a soma resultar em zero quer dizer que esta corrente faz a conexão entre duas unidades,

## CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO DOS ALGORITMOS COMPUTACIONAIS58

mas se a soma for igual a 1 ou  $-1$  quer dizer que será uma corrente de alimentação ou de saída, respectivamente.

Tabela 3.2 – Matriz de Incidências referente ao fluxograma de informação da Figura 2.1.

Unidades	Corrente número												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14
1	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	-1	0	0	1	-1	0	0	-1	1	0	0	0	0
4	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	-1	1	0	0
5	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-1	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	1	-1
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	1

### **3.3.3 – Matriz Conexão das Correntes**

A Matriz Conexão das Correntes contem as informações sobre quais as correntes que estabelecem a conexão entre as unidades, não mencionando, entretanto o tipo de unidade computacional, nem a ordem de entrada e saída das unidades.

Como especificado na Tabela 3.3, a primeira coluna representa as correntes, a segunda e terceira coluna se referem respectivamente à unidade que a corrente sai e à unidade que a corrente entra. Sendo que o zero representa a “unidade” a qual as correntes de alimentação se originam e as de saída se destinam.

### CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO DOS ALGORITMOS COMPUTACIONAIS59

Tabela 3.3 – Matriz Conexão das Correntes referente ao fluxograma de informações da Figura 2.1.

Corrente Número	da unidade número	para a unidade número
1	3	1
2	1	0
3	0	2
4	2	3
5	3	4
6	4	5
7	5	0
8	3	6
9	7	3
10	4	7
11	8	9
12	6	7
13	7	8

#### **3.3.4 – Matriz de Adjacências**

A Matriz de Adjacências, Tabela 3.4, quando comparada às outras matrizes é a que possui o menor número de informações sobre o fluxograma do processo. Mesmo assim é de grande utilidade, pois é usada no reconhecimento de reciclos.

Esta é uma matriz quadrada, onde a primeira coluna e a primeira linha estão se referindo as unidades, e o elemento 1 significa que existe uma conexão entre as unidades que estão na mesma linha e coluna do elemento. Por exemplo,

### CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO DOS ALGORITMOS COMPUTACIONAIS60

observando a Tabela 3.4, é possível dizer que existe uma corrente que sai da unidade 2 e vai para a unidade 3, já da unidade 1 não sai nenhuma corrente que pode ligar esta à outra unidade. Quando não existe conexão o elemento representativo é o zero.

Tabela 3.4 – Matriz de Adjacências referente ao fluxograma de informações da Figura 2.1.

Unidade	Unidade							
0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	0	0	0	0	0
3	1	0	0	1	0	1	0	0
4	0	0	0	0	1	0	1	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	1	0
7	0	0	1	0	0	0	0	1
8	0	0	0	1	0	0	0	0

#### **3.4 – IDENTIFICAÇÃO DOS RECICLOS**

Nos processos onde não existem reciclos, a seqüência de cálculo obedece ao fluxo mássico. Mas quando reciclos são encontrados esta seqüência já não é mais obrigatoriamente obedecida. Para isto é necessário fazer a determinação de todos os reciclos, para posteriormente determinar a seqüência de cálculos.

Para fazer a identificação dos reciclos, foi usado o algoritmo de Tiernan (1970), sendo este eficiente e rápido, na busca exaustiva para encontrar todos os circuitos elementares de um grafo.

### CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO DOS ALGORITMOS COMPUTACIONAIS61

Três matrizes são utilizadas pelo algoritmo de Tiernan (Figura 3.19), a matriz G, P e a H. A matriz G (Matriz Acumuladora) é uma matriz quadrada, onde cada linha representa uma unidade, e nela estão os números das unidades para a qual a unidade em questão tem correntes de envio. A matriz P contém os vértices dos percursos elementares, enquanto que a Matriz H é inicialmente uma matriz nula, que no decorrer do programa começa a receber alguns valores, e estes vão sendo corrigidos a cada iteração, para que cada reciclo seja computado somente uma vez.

O primeiro percurso é iniciado no vértice 1, sendo que em cada arco percorrido as seguintes condições são verificadas:

- 1 – O vértice pesquisado não pode estar em P;
- 2 – O valor do vértice pesquisado precisa ser maior que o do primeiro vértice em P;
- 3 – O vértice pesquisado não pode ser fechado no último vértice de P.

A condição 1 assegura que um percurso elementar está sendo formado. A condição 2 assegura que cada circuito será considerado somente uma vez e a condição 3 que o percurso elementar não é considerado mais de uma vez.

Através do algoritmo de Tiernan, todos os reciclos presentes no processo químico, que se pretende simular, são identificados e o registro destes reciclos é feito em uma matriz onde cada linha da matriz corresponde a um reciclo e cada coluna a uma unidade pertencente ao reciclo. Os registros são feitos seqüencialmente, da esquerda para a direita, sendo que o primeiro zero na linha indica o fim dos registros. Segundo ULSON DE SOUZA (1985), esta matriz foi denominada de Matriz Circuito dos Nós, pois registra os reciclos através das unidades do processo.

A fim de relacionar os reciclos pelas correntes envolvidas, e não pelas unidades, o que constituirá numa convergência para os passos seguintes, foi

### CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO DOS ALGORITMOS COMPUTACIONAIS62

criada uma matriz na qual, cada linha representa um reciclo, e cada coluna uma corrente a ele pertencente. Segundo ULSON DE SOUZA (1985), esta matriz foi denominada Matriz Circuito Correntes.

EC1: (Iniciação)

1: Leitura de N e G  
 $P \leftarrow 0$   
 $H \leftarrow 0$   
 $K \leftarrow 1$   
 $P\{1\} \leftarrow 1$

EC2: (Extensão do Processo)

Pesquisa de  $G\{P(K), j\}$  para  $j=1,2,\dots,N$  de maneira que as seguintes condições sejam satisfeitas:

$G\{P(K), j\} > P\{1\}$

$G\{P(K), j\} \notin P$

$G\{P(K), j\} \notin H\{P(K), m\}$   $m=1,2,\dots,N$

Se  $j$  é encontrado, extensão do percurso:

$K \leftarrow K + 1$

$P\{K\} \leftarrow G\{P(K-1), j\}$

Vá para EC2

Se  $j$  não é encontrado satisfazendo as condições acima o percurso não pode ser estendido.

EC3: (Confirmação do Circuito)

Se  $P\{1\} \notin G\{P(K), j\}$ ,  $j=1,2,\dots,N$  então não foi formado um circuito, vá para EC4

Caso contrário o circuito é reportado

Escreva P.

EC4: (Incremento do Vértice)

Se  $K=1$ , então todos os circuitos contendo vértices  $P\{1\}$  foram considerados.

Vá para EC5.

Caso contrário,

$H\{P(K), m\} \leftarrow 0$ ,  $m=1,2,\dots,N$

$H\{P(K-1), m\} \leftarrow P\{K\}$

$P\{K\} \leftarrow 0$

$K \leftarrow K - 1$

Vá para EC2

EC5: (Avanço do Vértice Inicial)

Se  $P\{1\} = N$  então vá para EC6

Caso contrário,

$P\{1\} \leftarrow P\{1\} + 1$

$K \leftarrow 1$

$H \leftarrow 0$

Vá para EC2

EC6: (Término)

Figura 3.19 – Algoritmo de Tiernan para identificação de reciclos.

### **3.5 – DETERMINAÇÃO DAS CORRENTES DE CORTE**

Se no processo estudado existem ciclos, eles devem ser identificados e posteriormente encontradas as correntes de corte, visando encontrar a seqüência de cálculos mais adequada, sendo esta usada agora de um modo iterativo.

A estratégia de cálculo baseia-se no corte de um número mínimo de correntes do processo, de modo a abrir todas as malhas de ciclos. As correntes de corte são desdobradas em dois segmentos sob o ponto de vista matemático: o valor inicial e o valor calculado, correspondendo ao destino e à origem da corrente, respectivamente (ULSON DE SOUZA, 1985).

Os valores iniciais das correntes de corte são fornecidos pelo usuário através da interface já explicada anteriormente, sob a orientação da sub-rotina de entrada de dados.

Depois de calculadas todas as correntes de corte, são feitas modificações na Matriz de Adjacências, no sentido desta vir a representar o processo com a malha de ciclos aberta.

### **3.6 – DETERMINAÇÃO DA SEQÜÊNCIA DE CÁLCULOS**

Uma vez que a Matriz de Adjacências é modificada para representar o processo com a malha de ciclos aberta, é possível fazer a determinação da seqüência de cálculos.

A determinação da seqüência de cálculos é realizada a partir da Matriz de Adjacências, pela eliminação sucessiva das linhas correspondentes ao número da coluna cujo somatório é nulo. Este processo se repete NU vezes, onde NU é o número de unidades do processo. Sendo a primeira unidade, na seqüência de cálculos, aquela associada à primeira coluna cujo somatório é nulo e assim

## **CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO DOS ALGORITMOS COMPUTACIONAIS**<sup>64</sup>

sucessivamente. Após a n-ésima execução deste algoritmo, a Matriz de Adjacências deve resultar em uma matriz nula.

### **3.7 – INFORMAÇÕES DE CADA UNIDADE**

Para que seja possível a realização dos cálculos da vazão, da concentração de DQO, assim como das temperaturas, é preciso que sejam fornecidos os parâmetros de cada unidade, conforme a característica da unidade: uma caixa, um divisor de correntes ou um ponto de mistura. Isto é feito através do acionamento do botão “Informações de cada unidade” na interface. A inserção dos dados foi explicada em detalhes na seção 3.2.

A partir destes parâmetros fornecidos, foram construídas algumas matrizes auxiliares, que permitem que sejam realizados os cálculos futuros dos balanços de massa e energia em cada unidade.

As matrizes são:

- VDC (Valores dos Divisores de Correntes): uma matriz onde na primeira coluna estão listadas todas as unidades referentes aos divisores de correntes, na segunda estão as correntes de saída respectivamente, e na terceira os fatores de divisão de cada uma.

- VPM (Valores dos Pontos de Mistura): na primeira coluna estão os números referentes às unidades de ponto de mistura, e na mesma linha (na segunda coluna) a corrente de saída de cada unidade citada, e nas colunas subsequentes as correntes de entrada.

- CSC (Correntes de Saída das Caixas): a primeira coluna lista todas os números referentes às caixas, e as outras colunas as correntes de saída de cada caixa.

### **CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO DOS ALGORITMOS COMPUTACIONAIS65**

- VPU (Valores dos pick ups): matriz que lista todas as correntes de pick up existentes no processo (na primeira coluna), com seus respectivos valores de pick up na segunda coluna, e nas duas restantes estão os números relacionados às unidades que cada corrente sai e entra, respectivamente.

- CEC (Correntes de Entrada das Caixas): matriz que relaciona na primeira coluna os números referentes às unidades das caixas, e nas subseqüentes as correntes que entram.

- Ccaixaszero (Concentração inicial das caixas no tempo zero): a primeira coluna contém todos os números referentes às caixas e na segunda suas concentrações iniciais, em mg/L.

- Creal (Concentração final de cada caixa no regime estacionário): é semelhante a matriz citada anteriormente, mas agora a segunda coluna se refere não mais a concentração inicial e sim à final, em mg/L.

- Vcaixas (Volume das Caixas): segue a mesma linha das duas últimas citadas, só que agora a segunda coluna é referente aos volumes de cada caixa, em L.

#### **3.8 – DADOS DAS CORRENTES DE ENTRADA**

Além dos parâmetros de cada unidade do processo, são necessárias também informações de vazão, concentração e temperatura de todas as correntes de entrada do processo. Entendem-se como correntes de entradas aquelas que a origem não está associada a nenhuma unidade do processo.

Para isso, é preciso acionar o botão “Correntes de Entrada (CE)” que está na interface principal. E fornecer todos os dados necessários (explicados na Seção3.2).

### **CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO DOS ALGORITMOS COMPUTACIONAIS**66

Ao acionamento deste botão o programa gera primeiro uma matriz que contém os números referentes as correntes de entrada. Este cálculo é feito a partir da Matriz Conexão das Correntes, onde são verificadas quais são as correntes que possuem o valor zero na segunda coluna, pois isto significa que a corrente vem de uma fonte externa ao processo, e não de alguma unidade existente.

Com esta matriz (que foi chamada de CE) é possível que somente sejam pedidos os dados de vazão, concentração e temperatura das correntes de entrada.

À medida que estes dados estão sendo fornecidos, é gerada uma matriz auxiliar de grande importância para os cálculos posteriores, que é chamada de VCE (Valores das Correntes de Entrada). Sendo composta por quatro colunas, a primeira se referindo as correntes de entrada, a segunda a sua vazão (em m<sup>3</sup>/h), a terceira a concentração de DQO (em mg/L), que está sendo considerada constante durante todo o processo, e a quarta as temperaturas (em °C).

#### **3.9 – ENTRADA DOS VALORES INICIAIS DAS CORRENTES DE CORTE**

Se no processo estudado existirem recírculos, são calculadas as correntes de corte, que estão descritas na Seção 3.5. Estas correntes recebem uma estimativa inicial dos valores de vazão, concentração e temperatura, sendo os cálculos feitos de maneira iterativa, até a convergência.

Para a entrada destes dados, é necessário acionar o botão “Correntes de Corte (CC)” da interface principal, que tem seu funcionamento explicado na Seção 3.2.

À medida que estes dados são fornecidos é construída a matriz VCC (Valores das Correntes de Corte), que é idêntica a matriz VCE descrita na seção anterior.

### **3.10 – CÁLCULO DOS FATORES FONTE**

Antes de serem feitos os cálculos finais, é necessário o cálculo dos Termos Fontes, associados à atrição dos rolos nas unidades caixas do lavador contínuo. Estes são parâmetros adimensionais de processo nas caixas do lavador contínuo e serão chamados de parâmetro  $\alpha$ .

Na metodologia desenvolvida para a modelagem e simulação da lavanderia contínua o parâmetro de entrada (DQO de exaustão da etapa de tingimento) foi estimado através da seguinte equação:

$$C = \frac{(C_{\text{impreg}} - C_{\text{lavado}})}{PU} \quad (1)$$

Onde:

- $C_{\text{impreg}}$  = concentração em gDQO/Kg de tecido seco, do tecido que sai do banho de tingimento, medida através de ensaios feitos no laboratório do SENAI de Blumenau.
- $C_{\text{lavado}}$  = concentração em gDQO/Kg de tecido seco, medida a partir de uma amostra de tecido coletada na saída da última caixa do lavador contínuo.
- PU = valor do pick up (em Kg de água/Kg de tecido seco) referente a corrente de entrada.
- C = concentração (em gDQO/Kg de água) que deve ser fornecida como dado de concentração de entrada com o tecido no programa.

Esta estimativa pré-supõe que toda a DQO contida no tecido que acaba de sair do banho de tingimento esteja disponível na fase líquida. Isto porque a determinação deste valor de DQO, é feita através de uma amostra de tecido, lavado em laboratório. E a partir deste procedimento, é possível retirar toda a DQO contida no tecido, até aquela relativa ao corante e auxiliares químicos que

### CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO DOS ALGORITMOS COMPUTACIONAIS68

estão adsorvidos, que nem sempre conseguem ser totalmente transferidos para a fase líquida através da atrição dos rolos das caixas. Logo, para compatibilizar o modelo com a situação real do processo foi incorporado um parâmetro denominado parâmetro  $\alpha$ , sendo um termo fonte. Que neste caso é negativo, já que nem toda a DQO de entrada está disponível na fase líquida. Ajustando assim o excedente de concentração de DQO estimada a partir das lavagens sucessivas no laboratório do SENAI de Blumenau.

Quando o Termo Fonte for um valor positivo, é um indicativo que na unidade caixa ocorre um aporte ao valor de concentração de DQO resultante da ação da atrição dos rolos.

A equação utilizada para calcular os termos fontes é a seguinte:

$$a_i = \frac{C_{Ti}}{C^{\circ}_{Ti}} - 1 \quad (2)$$

Onde:

- $\alpha_i$  = Termo Fonte da caixa i;
- $C_{Ti}$  = Concentração experimental da caixa i, no estado estacionário (obtida através de amostras coletadas de cada caixa na empresa);
- $C^{\circ}_{Ti}$  = Concentração teórica da caixa i, no estado estacionário, calculada pelo programa.

O  $C^{\circ}_{Ti}$  utilizado é o calculado pela simulação feita de cada caixa após o cálculo do alfa.

Este parâmetro depende do ajuste dos rolos, afinidade do corante pela fibra, mesmo considerando o corante hidrolisado, da gramatura, velocidade do tecido e vazão de tecido lavado.

### **3.11 – PROCESSAMENTO DAS UNIDADES MODULARES**

Os modelos matemáticos adotados das unidades pertencentes ao processo têm que ser o mais representativo possível, para que os resultados da simulação do processo estejam os mais próximos possíveis dos resultados experimentais.

O modelo matemático de cada unidade do lavador contínuo constitui as Unidades Modulares. Este equipamento para lavagem consiste geralmente numa lavanderia contínua de 6 a 8 caixas com o banho em contracorrente.

Este programa admite três tipos de unidades modulares: as caixas, os divisores de correntes e os pontos de mistura. Sendo que para cada um destes foi feito um modelo matemático.

#### **3.11.1 – Ponto de Mistura**

A unidade modular Misturador de Correntes foi desenvolvida com o intuito de modelar um misturador de correntes de fluidos.

No desenvolvimento desta unidade foram adotadas as seguintes simplificações:

- Processo de mistura adiabática;
- Temperatura da corrente resultante igual à média ponderal das temperaturas das correntes de entrada;
- O número de correntes de entrada nesta unidade é variável, sendo especificada através da Matriz do Processo.

A representação esquemática da unidade modular misturador é representada pela Figura 3.20.

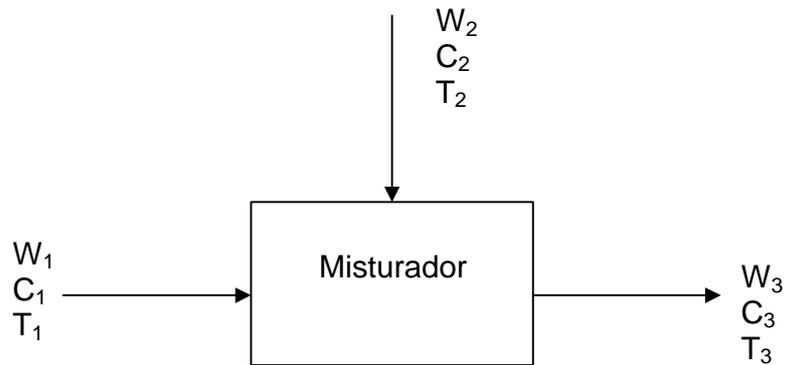


Figura 3.20 – Ponto de Mistura de Correntes

Onde:  $w_i$  – vazão mássica da corrente  $i$  (em  $m^3/h$ );

$C_i$  – concentração da corrente  $i$  (em  $mg/L$ );

$T_i$  – temperatura da corrente  $i$  (em  $^{\circ}C$ ).

Essas unidades são aquelas informadas pelo usuário através da interface. Logo, para a realização dos cálculos são necessárias algumas conversões de unidades, que são feitas direto pelo programa.

Na elaboração do modelo, as seguintes equações de balanço foram utilizadas:

$$w_f = \sum_{i=1}^n w_i \quad (3)$$

$$C_f = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot C_i}{w_f} \quad (4)$$

$$T_f = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot T_i}{w_f} \quad (5)$$

Onde  $w_f$ ,  $C_f$  e  $T_f$  são respectivamente a vazão, concentração e temperatura da corrente de saída do misturador. E  $w_i$ ,  $C_i$  e  $T_i$  são o valor da vazão, concentração e temperatura das correntes de entrada respectivamente. E “n” o número de correntes de entrada da unidade.

### **3.11.2 – Divisor de Correntes**

A unidade modular Divisor de Correntes foi desenvolvida com o intuito de modelar um divisor de correntes de fluidos.

No desenvolvimento desta unidade foram adotadas as seguintes simplificações:

- As correntes de saída da unidade têm a mesma concentração e temperatura da corrente de entrada;
- O número de correntes de saída é variável, sendo especificadas através da Matriz do Processo;
- Os fatores de divisão das correntes resultantes deverão ser fornecidos como parâmetros da unidade, através da interface (“Informações de cada unidade”), sendo obrigatoriamente a soma destes parâmetros igual a um.

A representação esquemática desta unidade modular é dada pela Figura 3.21.

### CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO DOS ALGORITMOS COMPUTACIONAIS72

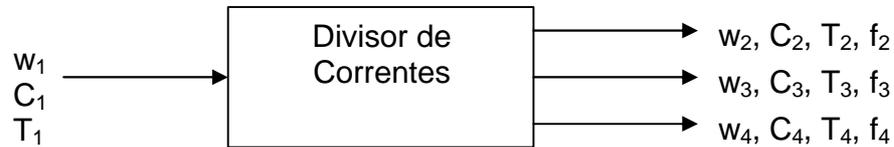


Figura 3.21 – Representação esquemática da Unidade Modular Divisor de Correntes.

Onde:  $w_i$  – vazão mássica da corrente  $i$  (em  $m^3/h$ );

$C_i$  – concentração da corrente  $i$  (em  $mg/L$ );

$T_i$  – temperatura da corrente  $i$  (em  $^{\circ}C$ );

$f_i$  – fator de divisão da corrente  $i$ .

Na elaboração do modelo, as seguintes equações de balanço foram utilizadas:

$$w_f = f_f \cdot w_i \quad (6)$$

$$C_f = \frac{f_f \cdot w_i \cdot C_i}{w_f} \quad (7)$$

$$T_f = T_i \quad (8)$$

Onde  $w_i$ ,  $C_i$  e  $T_i$  são respectivamente a vazão, concentração e temperatura das correntes de entrada do divisor de correntes. E  $w_f$ ,  $C_f$  e  $T_f$  são o valor da vazão, concentração e temperatura da corrente de saída respectivamente.

**3.11.3 – Unidade Caixa**

A caixa é uma unidade modular que representa cada tanque do lavador contínuo. Que tem como objetivo retirar o excesso de corante não fixado.

Para desenvolver esta unidade foram adotadas as seguintes simplificações:

- A corrente de saída da unidade tem a mesma concentração e temperatura do tanque sendo, portanto, a caixa considerada como totalmente agitada;
- Os valores de pick up deverão ser fornecidos como parâmetros da unidade, através da interface (“Informações de cada unidade”);
- Tanque de mistura contínua, ideal e homogênea;
- O volume do tanque é constante.

A representação esquemática desta unidade modular é representada pela Figura 3.22.

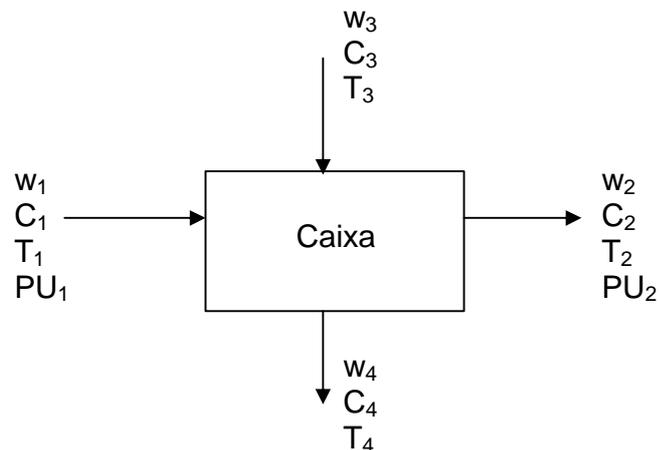


Figura 3.22 – Representação esquemática de uma Caixa.

### CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO DOS ALGORITMOS COMPUTACIONAIS74

Onde:  $w_i$  – vazão mássica da corrente  $i$  (em  $m^3/h$ );

$C_i$  – concentração da corrente  $i$  (em  $mg/L$ );

$T_i$  – temperatura da corrente  $i$  (em  $^{\circ}C$ );

$PU_i$  – pick up referente a corrente  $i$  que entra com o tecido (em %).

Na elaboração do modelo, as seguintes equações de balanço foram utilizadas:

$$w_i = G \cdot v \cdot lar \cdot PU_i \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^{ni} w_i = \sum_{f=1}^{nf} w_f \quad (10)$$

$$C_f = C_T \quad (11)$$

$$C_T = \frac{t \cdot \sum_{f=1}^{nf} (w_f \cdot C_f) + C_{T0} \cdot V \cdot r}{V \cdot r + t \cdot \sum_{i=1}^{ni} (w_i)} \quad (12)$$

$$T_f = T_T \quad (13)$$

$$T_T = \frac{\sum_{i=1}^{ni} (w_i \cdot T_i)}{\sum_{f=1}^{nf} (w_f)} \quad (14)$$

Onde “i” se refere as correntes de entrada, “f” as correntes de saída da caixa em questão, “T” a unidade caixa, sendo  $C_{T0}$  a concentração inicial da unidade caixa em questão. O “ni” é o número de correntes de entrada, e o “nf” o número de correntes de saída.

A equação 9 é usada somente nas correntes referentes ao tecido. Onde é fornecido o pick up de cada corrente. Ele determina o efeito espremedor do foulard ou retenção da solução pelo tecido, em um processo contínuo.

### **3.12 – TESTE DE CONVERGÊNCIA DOS RESULTADOS**

Na grande maioria dos processos químicos existem reciclos, então os cálculos são feitos através de um processo iterativo, com isso é necessário fazer um teste de convergência a cada iteração. Onde os resultados de cada corrente, referente a cada parâmetro são analisados.

Para isto são calculados os desvios relativos a partir da seguinte equação:

$$Dr = \left| \frac{VI(i) - VC(i)}{VI(i)} \cdot 100 \right| \quad (15)$$

Onde: Dr = Desvio relativo;

VI(i) = Valor inicial da corrente de corte i;

VC(i) = valor calculado da corrente de corte i.

### CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO DOS ALGORITMOS COMPUTACIONAIS76

O ciclo de cálculos se repete até o número de vezes necessário para que o desvio relativo seja menor ou igual à tolerância admitida pelo usuário. Se o desvio for maior, o ciclo de cálculos se repete sendo atribuído como novos valores iniciais das correntes de corte a média aritmética entre os valores iniciais e os calculados.

Os fluxogramas referentes à convergência dos resultados são apresentados nas Figuras 3.23, 3.24 e 3.25. No qual admite como parâmetros, as tolerâncias desejadas para o cálculo da vazão, concentração e temperatura respectivamente.

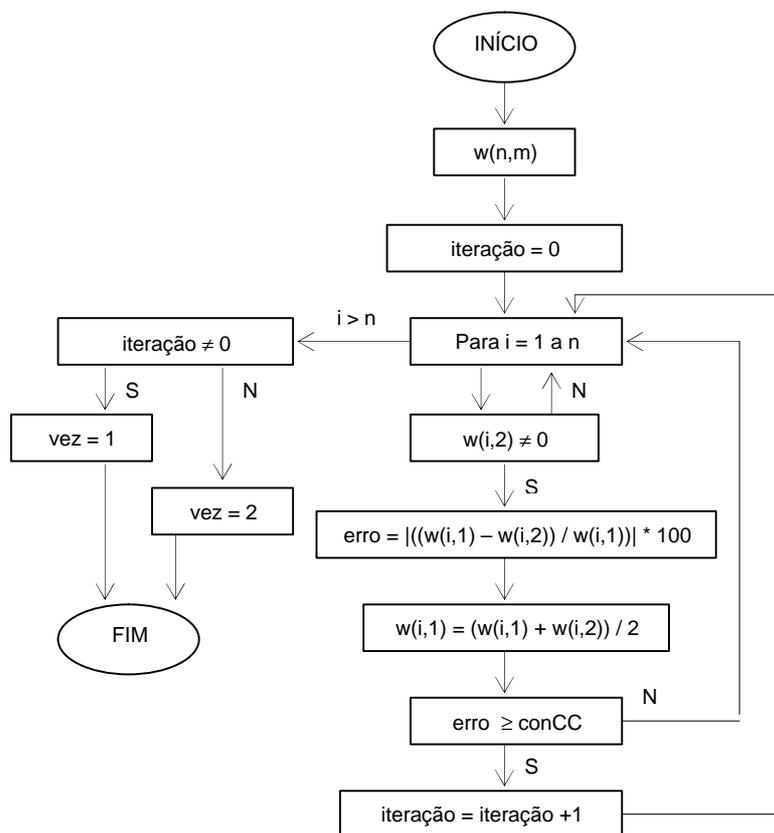


Figura 3.23 – Fluxograma para o teste de convergência do cálculo das vazões.

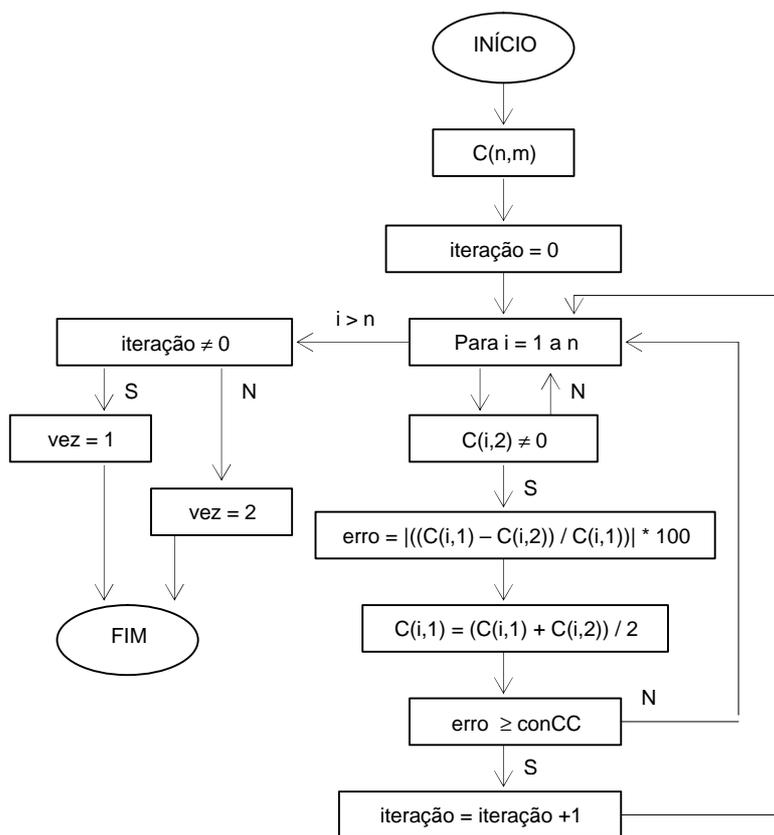


Figura 3.24 – Fluxograma para o teste de convergência do cálculo das concentrações.

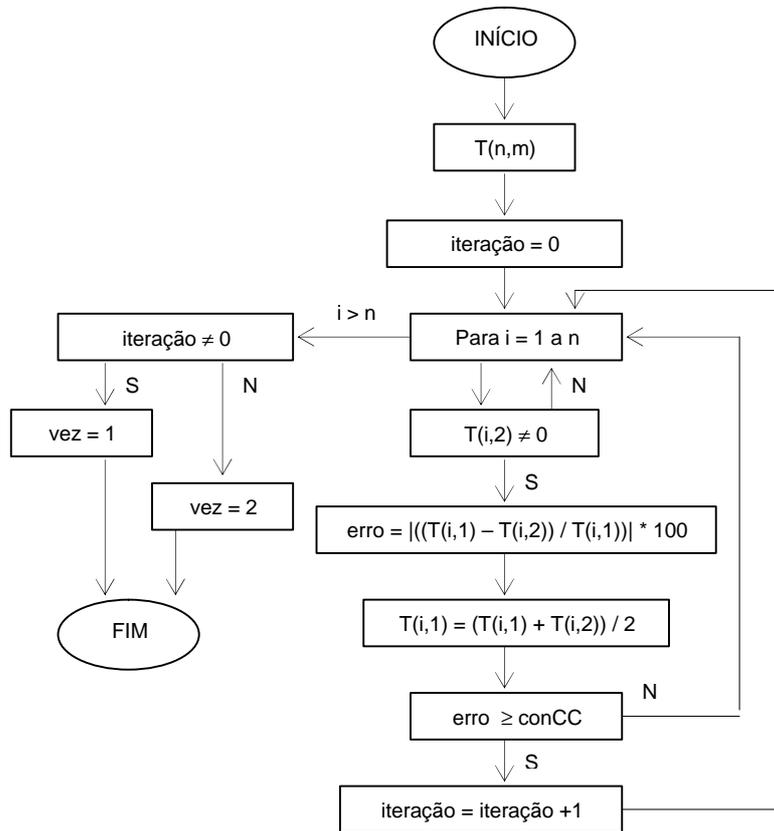


Figura 3.25 – Fluxograma para o teste de convergência do cálculo das temperaturas.

### **3.12 – EQUAÇÃO PARA O CÁLCULO DE REMOÇÃO DE DQO DO TECIDO**

O balanço de massa na unidade caixa para a DQO é dado pela equação:

$$\frac{d(MC)}{dq} - \sum w_f C + \sum w_i C_i = 0 \quad (16)$$

Onde os índices  $f$  e  $i$  referem-se às correntes de saída e de entrada na unidade caixa respectivamente.

O tempo de residência na unidade caixa é dado pela seguinte equação:

$$t = \frac{V}{\sum w_i} \quad (17)$$

Onde:

-  $\tau$ : é o tempo de residência do tecido dentro da unidade caixa [h];

-  $V$ : volume da caixa [m<sup>3</sup>];

-  $\sum w_i$ : é o somatório de todas as correntes que estão entrando na unidade caixa em questão.

Rearranjando a equação 16, considerando-se a hipótese de solução diluída, e utilizando a equação global da massa para regime permanente, obtêm-se:

$$C - \frac{\sum w_i C_i}{\sum w_i} = \tau t \frac{dC}{dq} \quad (18)$$

Integrando a equação 18 no intervalo de tempo  $0 < \theta < \tau$  obtêm-se a remoção de DQO do tecido,  $\Delta C$ , dada pela equação:

$$C - \frac{\sum w_i C_i}{\sum w_i} = \Delta C \quad (19)$$

### CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO DOS ALGORITMOS COMPUTACIONAIS80

A DQO de remoção também pode ser expressa em termos de g DQO/Kg de tecido. Para isso é utilizada a seguinte equação:

$$DQO_f = DQO_{remoção} \frac{Água_{alimentação}}{Vazão_{tecido seco}} \quad (20)$$

Onde:

-  $DQO_f$  [gDQO/Kg tecido]: eficiência na remoção de DQO por quilo de tecido lavado, levando em conta a DQO presente na água;

-  $DQO_{remoção}$  [mg/L]: remoção de DQO por litro de água, levando em conta a DQO presente na água total;

-  $Água_{alimentação}$  [ $m^3/h$ ]: (água pick up + água industrial + insumo químico + água de reciclo);

- Água pick up: vazão de água que entra em cada unidade caixa transportada pelo tecido;

- Água industrial: vazão de água que entra em cada unidade caixa, vindo da ETA, geralmente com valor zero de DQO;

- Insumo químico: vazão de insumo (tensoativos, amaciante ou ácido) que entra na unidade caixa.

- Água de reciclo: vazão de água que vem de outra unidade.

É calculada também a relação de água da ETA gasta no processo por massa de tecido processado.

As propostas de otimização sugeridas tem como critério o reuso de correntes com valor de DQO menor que a de saída da unidade caixa a qual ela está sendo destinada.

### **CAPÍTULO 4 - ESTUDO DE CASOS**

Neste capítulo serão apresentados os casos de teste escolhidos para a validação dos algoritmos implementados, procurando-se estabelecer uma conexão entre os problemas propostos para verificar a influência das variações no processo e seus efeitos na otimização visando a redução no consumo de água.

Estes casos são hipotéticos, não possuindo valores reais, tendo sido idealizados somente para validar os algoritmos implementados.

Com os casos estudados pretende-se validar os cálculos da vazão, temperatura e concentração de DQO final de cada corrente. Assim como provar que o programa calcula todos estes parâmetros para uma lavanderia contínua com qualquer número de unidades caixa. Mostra que os cálculos para se chegar na convergência dos valores de vazão, concentração e temperatura não dependem dos valores arbitrados nas correntes de corte. Assim, o valor final sempre será o mesmo, independente do valor inicial arbitrado. Que o programa é capaz de construir gráficos com os resultados, com incrementos diferentes, e iniciando do zero ou não. O cálculo também pode ser realizado se existir pontos de mistura ou divisor de correntes, validando também as equações do balanço de massa.

## 4.1 – CASO 1

Neste primeiro caso um processo semelhante é simulado duas vezes, com o mesmo número de caixas e correntes. As mudanças estão relacionadas aos valores de vazão, concentração e temperatura das correntes de entrada. Sendo este caso escolhido para provar que o programa está apto a simular processos com diferentes valores de correntes de entrada.

### 4.1.1 – Caso 1 – A

A Figura 4.1 representa o processo do Caso 1 – A, onde as unidades e as correntes foram numeradas.

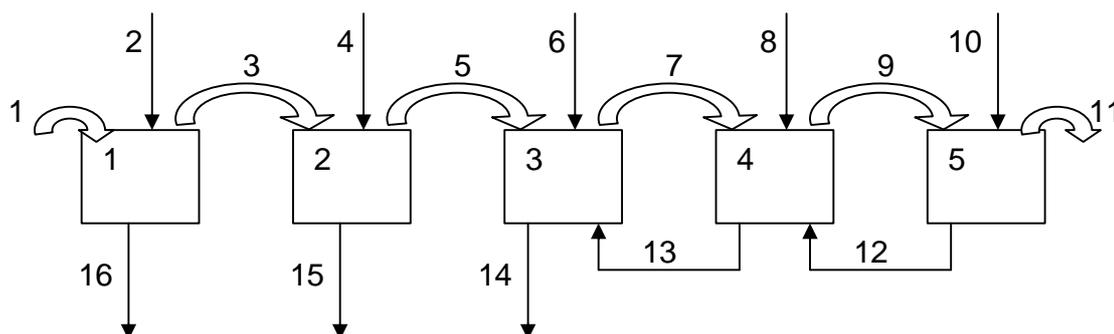


Figura 4.1 – Fluxograma do Caso 1 - A.

Neste caso, o número de correntes é 16 e o de unidades é 5. A gramatura do tecido considerada foi de  $300\text{g/m}^2$ , com velocidade de  $50\text{m/min}$  e largura de  $1,5\text{m}$ , a vazão de tecido lavado é de  $2,00\text{ton/h}$ . A concentração inicial de cada caixa é considerada zero. O pick up do tecido na entrada do processo será considerado como sendo 0,8.

Considerando que a DQO impregnada no tecido de entrada seja de  $15,5\text{g/Kg}$  de tecido e que o valor depois de lavado o tecido seja de  $4,2\text{g/Kg}$  de

tecido, é possível calcular, pela diferença destes dois valores, o valor de DQO que efetivamente foi removido do tecido, após o processo de lavagem. Este valor de DQO (11,3g/Kg tecido) será atribuído a DQO contida na fase líquida do tecido na entrada do processo.

O resultado anterior, dividido pelo pick up, e feitas algumas conversões de unidade podem ser expressos em mg DQO/L:

$$\frac{11,3gDQO}{Kg_{tecido}} \times \frac{1Kg_{tecido}}{0,80Kg_{\acute{a}gua}} = \frac{14,125gDQO}{Kg_{\acute{a}gua}} = \frac{14125mgDQO}{Kg_{\acute{a}gua}}$$

O resultado acima multiplicado pela massa específica e feita a conversão de unidades resulta:

$$\frac{14125mgDQO}{Kg_{\acute{a}gua}} \times \frac{10^3 Kg}{m^3} \times \frac{1m^3}{1000L} = \frac{14125mgDQO}{L}$$

Sendo este o valor de DQO usado como dado de entrada da corrente número 1, que é a corrente que representa o tecido entrando no lavador contínuo.

A vazão da corrente aquosa que é alimentada ao processo transportada pelo tecido, corrente 1 é calculada usando-se a equação número 9, descrita no Capítulo 3, como segue abaixo:

$$w = \frac{0,3Kg}{m^2} \times \frac{3000m}{h} \times 1,5m \times \frac{0,80Kg_{\acute{a}gua}}{Kg_{tecido}} = \frac{1080Kg_{\acute{a}gua}}{Kg_{tecido}} = \frac{1,08m^3}{h}$$

Na Tabela 4.1 estão os volumes de cada tanque assim como os valores de DQO de saída utilizados neste caso hipotético

Tabela 4.1 – Informações sobre cada caixa do Caso 1 - A.

Caixas	Volume [L]	DQO de saída [mg/L]
1	900,0	1110,00
2	1200,0	750,00
3	900,0	600,00
4	900,0	450,00
5	1000,0	200,00

Os valores das correntes de entrada também são todos conhecidos, e estão representados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Informações sobre cada corrente de entrada do Caso 1 - A.

Correntes	Vazão [m <sup>3</sup> /h]	Concentração [mg/L]	Temperatura [°C]
1	1,08	14125,00	20,0
2	12,00	0,00	80,0
4	8,00	0,00	85,0
6	6,00	0,00	60,0
8	5,00	0,00	60,0
10	3,00	0,00	50,0

Os valores de pick up de cada corrente aquosa associada à entrada do tecido nas caixas estão descritos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Informações sobre o valor de cada pick up do Caso 1 - A.

Correntes	Valor do pick up
1	0.8
3	1
5	1
7	1
9	1
11	0.6

Com estas informações é possível simular o processo e obter os valores de vazão, concentração e temperatura de cada corrente e de cada caixa, assim como o valor de remoção de DQO de cada caixa e do processo. Na presente simulação foram feitos os cálculos num intervalo de tempo de 0 a 1000 min, com intervalos de 100 em 100 min.

Concluído o processamento é apresentado na tela do vídeo os seguintes resultados:

Florianópolis,  
11-Jan-2005 23:16:46

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

PROGRAMA DE OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE LAVAGEM

Aline Resmini Melo - alinermelo@yahoo.com.br  
Antônio Augusto Ulson de Souza - augusto@enq.ufsc.br  
Selene Maria de Arruda Guelli Ulson de Souza - selene@enq.ufsc.br

-----

MATRIZ DO PROCESSO

MP =

1	1	2	-3	-16	0
2	3	4	-5	-15	0
3	5	6	-7	13	-14
4	7	8	-9	-13	12
5	9	10	-11	-12	0

MATRIZ DE INCIDÊNCIAS

MI =

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
2	0	0	1	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0
3	0	0	0	0	1	1	-1	0	0	0	0	0	1	-1	0	0
4	0	0	0	0	0	0	1	1	-1	0	0	1	-1	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	-1	-1	0	0	0	0
0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	-1	0	0	-1	-1	-1

MATRIZ CONEXÃO DAS CORRENTES

MCC =

1	0	1
2	0	1
3	1	2
4	0	2
5	2	3
6	0	3
7	3	4
8	0	4
9	4	5
10	0	5
11	5	0
12	5	4
13	4	3
14	3	0
15	2	0
16	1	0

MATRIZ DE ADJACÊNCIAS

MA =

0	1	2	3	4	5
1	0	1	0	0	0
2	0	0	1	0	0

3	0	0	0	1	0
4	0	0	1	0	1
5	0	0	0	1	0

-----

MATRIZ CIRCUITO DOS NÓS

MCN =

3	4
4	5

-----

MATRIZ CIRCUITO CORRENTES

MCCO =

7	13
9	12

-----

MATRIZ CORRENTES DE CORTE

CC =

7
9

-----

MATRIZ DE ADJACÊNCIAS (adequada a abertura de reciclos)

MAcorrigida =

0	1	0	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	1	0

-----

SEQÜÊNCIA DE CÁLCULOS

ART =

1	5	2	4	3
---	---	---	---	---

-----

Unidade =

1

Caixa  
Volume [L]:

V =

900

Correntes (primeira coluna) e pick up associados (segunda coluna):

pu =

1.0000	0.8000
3.0000	1.0000

Concentração inicial da caixa [mg/L]

C =

0

Concentração final da caixa [mg/L]

c =

1110

-----

Unidade =

2

Caixa  
Volume [L]:

V =

1200

Correntes (primeira coluna) e pick up associados (segunda coluna):

pu =

3	1
5	1

Concentração inicial da caixa [mg/L]

C =

0

Concentração final da caixa [mg/L]

c =

750

Unidade =

3

Caixa  
Volume [L]:

V =

900

Correntes (primeira coluna) e pick up associados (segunda coluna):

pu =

5	1
7	1

Concentração inicial da caixa [mg/L]

C =

0

Concentração final da caixa [mg/L]

c =

600

Unidade =

4

Caixa  
Volume [L]:

V =

900

Correntes (primeira coluna) e pick up associados (segunda coluna):

pu =

7	1
9	1

Concentração inicial da caixa [mg/L]

C =

0

Concentração final da caixa [mg/L]

c =

450

-----  
Unidade =

5

Caixa  
Volume [L]:

V =

1000

Correntes (primeira coluna) e pick up associados (segunda coluna):

pu =

9.0000	1.0000
11.0000	0.6000

Concentração inicial da caixa [mg/L]

C =

0

Concentração final da caixa [mg/L]

c =

200

-----  
Não existe divisor de correntes.

VDC =

0

-----  
Não existe ponto de mistura.

VPM =

0

-----  
 Valores das colunas: número da corrente, valor do pick up, número da unidade que a corrente sai e número da unidade que a corrente entra.

VPU =

1.0000	0.8000	0	1.0000
3.0000	1.0000	1.0000	2.0000
5.0000	1.0000	2.0000	3.0000
7.0000	1.0000	3.0000	4.0000
9.0000	1.0000	4.0000	5.0000
11.0000	0.6000	5.0000	0

-----  
 Na primeira coluna estão o número das unidades caixas e nas restantes as correntes que entram na mesma.

CEC =

1	1	2	0
2	3	4	0
3	5	6	13
4	7	8	12
5	9	10	0

-----  
 Na primeira coluna estão o número das unidades caixas e nas restantes as correntes que saem da mesma.

CSC =

1	3	16
2	5	15
3	7	14
4	9	13
5	11	12

-----  
 Coluna 1 = número da unidade caixa, coluna 2 = concentração de DQO de cada caixa [mg/L] (no tempo igual a zero):

Ccaixaszero =

1	0
2	0
3	0
4	0
5	0

Coluna 1 = número da unidade caixa, coluna 2 = concentração final de DQO de cada caixa [mg/L] (no tempo igual a zero):

Creal =

1	1110
2	750
3	600
4	450
5	200

-----

Parâmetros de cada coluna: corrente de entrada, vazão [m<sup>3</sup>/h], concentração de DQO [mg/L], temperatura [°C].

VCE =

1.0e+004 \*

0.0001	0.0001	1.4125	0.0020
0.0002	0.0012	0	0.0080
0.0004	0.0008	0	0.0085
0.0006	0.0006	0	0.0060
0.0008	0.0005	0	0.0060
0.0010	0.0003	0	0.0050

-----

Parâmetros de cada coluna: correntes de corte, vazão [m<sup>3</sup>/h], concentração [mg/L], temperatura [°C], unidades associadas às correntes (origem e destino, respectivamente).

VCC =

7	2	200	60	3	4
9	1	400	32	4	5

-----

Intervalo e incremento do tempo para os gráficos da concentração [min]:  
Tempo inicial [min]:

A =

0

Tempo final [min]:

D =

1000

Incremento entre os tempos [min]:

E =

100

-----  
 Concentração de todas as correntes no tempo "t" [min] (coluna 1 - correntes, coluna 2 - respectiva concentração de DQO [mg/L]):  
 (sem a correção com o termo fonte correspondente a cada caixa)

t =

10000

C11convertido =

1.0e+004 \*

0.0001	1.4125
0.0002	0
0.0003	0.1166
0.0004	0
0.0005	0.0168
0.0006	0
0.0007	0.0016
0.0008	0
0.0009	0.0002
0.0010	0
0.0011	0.0001
0.0012	0.0001
0.0013	0.0002
0.0014	0.0016
0.0015	0.0168
0.0016	0.1166

-----  
 Fatores Fonte referente a cada unidade caixa:

(A primeira coluna representa o número da unidade caixa e a segunda seu fator fonte correspondente).

alfa =

1.0000	-0.0479
2.0000	3.6797
3.0000	0.9635
4.0000	1.9318
5.0000	0.4321

-----  
 Vazão das correntes (coluna 1 - número da corrente, coluna 2 - vazão [m<sup>3</sup>/h]):

w11convertido =

1.0000	1.0800
--------	--------

2.0000	12.0000
3.0000	1.3500
4.0000	8.0000
5.0000	1.3500
6.0000	6.0000
7.0000	1.3500
8.0000	5.0000
9.0000	1.3500
10.0000	3.0000
11.0000	0.8100
12.0000	3.5400
13.0000	8.5400
14.0000	14.5400
15.0000	8.0000
16.0000	11.7300

-----

Concentração das correntes para um tempo "t" [min] escolhido (coluna 1 - número da corrente e coluna 2 - concentração de DQO [mg/L]):

t =

3000

C11convertido =

1.0e+004 \*

0.0001	1.4125
0.0002	0
0.0003	0.1109
0.0004	0
0.0005	0.0747
0.0006	0
0.0007	0.0579
0.0008	0
0.0009	0.0431
0.0010	0
0.0011	0.0191
0.0012	0.0191
0.0013	0.0431
0.0014	0.0579
0.0015	0.0747
0.0016	0.1109

-----

Matriz das concentrações de cada unidade caixa (coluna 1 - número da unidade caixa, coluna 2 - concentração de DQO [mg/L]).

No tempo de [min]:

t =

3000

Caixasconvertida =

1.0e+003 \*

0.0010	1.1089
0.0020	0.7474
0.0030	0.5786
0.0040	0.4307
0.0050	0.1906

-----  
Temperatura de todas as caixa (coluna 1 - número da unidade da caixa, coluna 2 - temperatura [°C]):

Tcaixas =

1.0000	75.0459
2.0000	83.5628
3.0000	60.5552
4.0000	57.3082
5.0000	52.2681

Temperatura de cada corrente (coluna 1 - número da corrente, coluna 2 - temperatura [°C]):

T1 =

1.0000	20.0000
2.0000	80.0000
3.0000	75.0459
4.0000	85.0000
5.0000	83.5628
6.0000	60.0000
7.0000	60.5552
8.0000	60.0000
9.0000	57.3082
10.0000	50.0000
11.0000	52.2681
12.0000	52.2681
13.0000	57.3082
14.0000	60.5552
15.0000	83.5628
16.0000	75.0459

Matriz resultante: Coluna 1 - Correntes, Coluna 2 - vazões [m<sup>3</sup>/h], Coluna 3 - concentrações de DQO [mg/L], Coluna 4 - temperaturas [°C].

No tempo de [min]:

t =

3000

Matrizconvertida =

1.0e+004 \*

0.0001	0.0001	1.4125	0.0020
0.0002	0.0012	0	0.0080
0.0003	0.0001	0.1109	0.0075
0.0004	0.0008	0	0.0085
0.0005	0.0001	0.0747	0.0084
0.0006	0.0006	0	0.0060
0.0007	0.0001	0.0579	0.0061
0.0008	0.0005	0	0.0060
0.0009	0.0001	0.0431	0.0057
0.0010	0.0003	0	0.0050
0.0011	0.0001	0.0191	0.0052
0.0012	0.0004	0.0191	0.0052
0.0013	0.0009	0.0431	0.0057
0.0014	0.0015	0.0579	0.0061
0.0015	0.0008	0.0747	0.0084
0.0016	0.0012	0.1109	0.0075

-----  
 Variação da concentração de todas as correntes do processo com o tempo [min]:  
 (a primeira coluna representa as correntes e a primeira linha os diferentes tempos)

Cgraficoconv =

1.0e+004 \*

Columns 1 through 9

0	0	0.0100	0.0200	0.0300	0.0400	0.0500	0.0600	0.0700
0.0001	1.4125	1.4125	1.4125	1.4125	1.4125	1.4125	1.4125	1.4125
0.0002	0	0	0	0	0	0	0	0
0.0003	0	0.1066	0.1088	0.1095	0.1099	0.1101	0.1103	0.1104
0.0004	0	0	0	0	0	0	0	0
0.0005	0	0.0669	0.0708	0.0722	0.0729	0.0733	0.0736	0.0738
0.0006	0	0	0	0	0	0	0	0
0.0007	0	0.0295	0.0391	0.0440	0.0471	0.0492	0.0507	0.0518
0.0008	0	0	0	0	0	0	0	0
0.0009	0	0.0183	0.0264	0.0308	0.0335	0.0353	0.0367	0.0377
0.0010	0	0	0	0	0	0	0	0
0.0011	0	0.0071	0.0110	0.0131	0.0144	0.0153	0.0159	0.0164
0.0012	0	0.0071	0.0110	0.0131	0.0144	0.0153	0.0159	0.0164
0.0013	0	0.0183	0.0264	0.0308	0.0335	0.0353	0.0367	0.0377
0.0014	0	0.0295	0.0391	0.0440	0.0471	0.0492	0.0507	0.0518
0.0015	0	0.0669	0.0708	0.0722	0.0729	0.0733	0.0736	0.0738
0.0016	0	0.1066	0.1088	0.1095	0.1099	0.1101	0.1103	0.1104

Columns 10 through 12

0.0800	0.0900	0.1000
1.4125	1.4125	1.4125
0	0	0
0.1105	0.1105	0.1106
0	0	0

0.0739	0.0741	0.0742
0	0	0
0.0527	0.0534	0.0540
0	0	0
0.0385	0.0391	0.0396
0	0	0
0.0168	0.0171	0.0174
0.0168	0.0171	0.0174
0.0385	0.0391	0.0396
0.0527	0.0534	0.0540
0.0739	0.0741	0.0742
0.1105	0.1105	0.1106

-----

Varição da concentração de cada unidade caixa com o tempo [min]:  
 (a primeira coluna representa as unidades caixas e a primeira linha os diferentes tempos)

Ccaixasgrafconv =

1.0e+003 \*

Columns 1 through 9

0	0	0.1000	0.2000	0.3000	0.4000	0.5000	0.6000	0.7000
0.0010	0	1.0664	1.0880	1.0954	1.0991	1.1014	1.1029	1.1039
0.0020	0	0.6690	0.7079	0.7216	0.7286	0.7329	0.7357	0.7378
0.0030	0	0.2945	0.3905	0.4403	0.4710	0.4917	0.5067	0.5181
0.0040	0	0.1828	0.2645	0.3079	0.3349	0.3533	0.3666	0.3767
0.0050	0	0.0714	0.1100	0.1308	0.1439	0.1528	0.1593	0.1642

Columns 10 through 12

0.8000	0.9000	1.0000
1.1048	1.1054	1.1059
0.7393	0.7405	0.7415
0.5270	0.5342	0.5400
0.3846	0.3910	0.3963
0.1681	0.1712	0.1737

-----

Intervalo de tempo para fazer os gráficos.

tempo =

0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------

-----

Valor da remoção de DQO da cada unidade caixa (coluna 1 - unidade caixa, coluna 2 - DQO de remoção [mg/L]):

DQOremocao =

1.0e+003 \*

0.0010	1.1089
0.0020	0.5872
0.0030	0.2836
0.0040	0.2836
0.0050	0.0569

-----

Remoção de DQO total da lavanderia [mg/L]:

somatorio1 =

2.3202e+003

-----

Valor da remoção de DQO da cada unidade caixa (coluna 1 - unidade caixa, coluna 2 - DQO de remoção [gDQO/Kg tecido]):

DQOgKg =

1.0000	7.2524
2.0000	2.7454
3.0000	2.2531
4.0000	1.4022
5.0000	0.1237

-----

Remoção de DQO total da lavanderia [gDQO/Kg tecido]:

somatorio2 =

13.7769

-----

Relação entre o volume de água da ETA gasto pela massa de tecido processado [L/Kg]:

relacao =

17

#### 4.1.2 – Caso 1 – B

Este caso em estudo difere do anterior nos valores de vazão, concentração e temperatura das correntes de entrada. Neste estudo de caso é verificado o

desempenho do processo onde os valores da vazão, concentração e temperatura das correntes de entrada são modificadas. A concentração inicial das unidades caixa continua sendo zero, e os valores de volume e DQO de saída de cada unidade caixa permanecem os mesmos.

Os valores das correntes de entrada também são todos conhecidos, e estão representados na Tabela 4.4.

Os valores de pick up são os mesmos do Caso 1 – A, assim como os valores de gramatura, velocidade e largura do tecido, e vazão do tecido lavado. Por isso que a vazão e a concentração da corrente 1 não se alteraram.

Com estas informações é possível simular o processo e obter os valores de vazão, concentração e temperatura das correntes e cada caixa, assim como os valores de remoção de DQO de cada caixa e do processo. Da mesma forma que na simulação anterior, os cálculos foram feitos num intervalo de tempo de 0 a 1000 min, com intervalos de 100 min.

Tabela 4.4 – Informações sobre cada corrente de entrada do Caso 1 - B.

Correntes	Vazão [m <sup>3</sup> /h]	Concentração [mg/L]	Temperatura [°C]
1	1,08	14125,00	20,0
2	10,00	0,00	85,0
4	9,00	0,00	90,0
6	6,00	0,00	70,0
8	5,00	0,00	60,0
10	4,00	0,00	50,0

### 4.1.3 – Comparações entre o Caso 1 – A e o Caso 1 – B.

A Matriz do Processo dos dois não se alteram, já que o número de caixas e de correntes é o mesmo, além do fato que o fluxo de nenhuma das correntes ter sido mudado. A Tabela 4.5 representa a Matriz do Processo.

Tabela 4.5 – Matriz do Processo para o Caso 1 – A e Caso 1 – B.

Unidades	Correntes associadas				
1	1	2	-3	-16	0
2	3	4	-5	-15	0
3	5	6	-7	13	-14
4	7	8	-9	-13	12
5	9	10	-11	-12	0

Como não existem mudanças no fluxograma a Matriz Circuito Correntes (Tabela 4.6) é a mesma para os dois casos. Logo, as correntes de corte também são as mesmas, sendo: 7 e 9. E conseqüentemente a seqüência de cálculo também permanece igual, sendo descrita na Tabela 4.7.

Tabela 4.6 – Matriz Circuito Correntes para o Caso 1 – A e Caso 1 – B.

Correntes	
7	13
9	12

Tabela 4.7 – Matriz Seqüência de Cálculo para o Caso 1 – A e Caso 1 – B.

Seqüência de Cálculo				
1	5	2	4	3

Os valores dos termos fonte são os mesmos, já que os processos têm o mesmo fluxograma. A Tabela 4.8 nos mostra os valores de alfa.

Tabela 4.8 – Valores dos Termos Fonte para o Caso 1 – A e Caso 1 – B.

Caixas	Caso 1 – A e Caso 1 - B
1	-0,05
2	3,68
3	0,96
4	1,93
5	0,43

Os valores de vazão, concentração e temperatura de cada corrente se alteram, já que os valores das correntes de entrada são diferentes nos dois casos. Sendo estes representados da Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Valores de vazão, concentração (no tempo de 3000 min) e temperatura para o Caso 1 – A e Caso 1 – B.

Correntes	Vazão [m <sup>3</sup> /h]		Concentração [mg/L]		Temperatura [°C]	
	A	B	A	B	A	B
1	1,08	1,08	14125,00	14125,00	20,0	20,0
2	12,00	10,00	0,00	0,00	80,0	85,0
3	1,35	1,35	1108,93	1308,77	75,0	78,6
4	8,00	9,00	0,00	0,00	85,0	90,0
5	1,35	1,35	747,36	797,02	83,6	88,5

6	6,00	6,00	0,00	0,00	60,0	70,0
7	1,35	1,35	578,59	441,50	60,5	64,2
8	5,00	5,00	0,00	0,00	60,0	60,0
9	1,35	1,35	430,75	285,72	57,3	57,1
10	3,00	4,00	0,00	0,00	50,0	50,0
11	0,81	0,81	190,57	102,87	52,3	51,8
12	3,54	4,54	190,57	102,87	52,3	51,8
13	8,54	9,54	430,75	285,72	57,3	57,1
14	14,54	15,54	578,59	441,50	60,5	64,2
15	8,00	9,00	747,36	797,02	83,6	88,5
16	11,73	9,73	1108,93	1308,77	75,0	78,7

Da mesma forma, os valores de concentração das caixas e temperatura também diferem, sendo mostrados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Valores de concentração (no tempo de 3000 min) e temperatura para cada caixa e cada caso.

Caixas	Concentrações [mg/L]		Temperaturas [°C]	
	Caso 1 – A	Caso 1 – B	Caso 1 – A	Caso 1 – B
1	1108,93	1308,77	75,0	78,7
2	747,36	797,02	83,6	88,5
3	578,59	441,50	60,5	64,2
4	430,75	285,72	57,3	57,1
5	190,57	102,87	52,3	51,8

A Tabela 4.11 mostra os valores de concentração de cada corrente para os dois casos, sem a correção do termo alfa.

Tabela 4.11 – Valores de concentração (no tempo de 3000 min) sem a correção do termo fonte, para o Caso 1 – A e o Caso 1 – B.

Correntes	Concentração [mg/L] para o Caso 1 – A	Concentração [mg/L] para o Caso 1 - B
1	14125,00	14125,00
2	0,00	0,00
3	1164,68	1374,57
4	0,00	0,00
5	167,73	178,88
6	0,00	0,00
7	15,51	15,49
8	0,00	0,00
9	2,37	2,14
10	0,00	0,00
11	0,73	0,54
12	0,73	0,54
13	2,37	2,14
14	15,51	15,49
15	167,73	178,88
16	1164,68	1374,57

É feito um balanço mássico para provar a eficiência da equação usada no balanço, para encontrar a concentração final no estado estacionário de cada corrente. É feito o somatório da vazão multiplicada pela concentração de cada corrente que entra, assim como a de cada corrente que sai. Os resultados encontram-se na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Resultados do balanço mássico do Caso 1 – A e o Caso 1 - B.

	$\Sigma(\text{vazão} \times \text{concentração})$ correntes de entrada [g/h]		$\Sigma(\text{vazão} \times \text{concentração})$ correntes de saída [g/h]		Erro [%]	
	Caso 1 – A	Caso 1 – B	Caso 1 - A	Caso 1 – B	A	B
Sem a correção do termo fonte	15255,00	15255,00	15229,64	15225,64	0,17	0,19
Com a correção do termo fonte	15255,00	15255,00	27495,53	26851,75	80,24	76,02

Quando o balanço é feito usando os valores de concentração sem a correção com o termo fonte, o erro é muito pequeno, provando que a equação do balanço mássico utilizada representa corretamente o processo de uma lavanderia contínua. No caso onde o balanço é feito usando os valores de concentração das correntes onde foi feita a correção com o termo fonte, este é elevado, mas não significa que a equação não se aplica. Se este fosse um caso real, significaria que os valores medidos de DQO final de cada tanque estariam com um erro de 80% no Caso 1 – A e de 76% no Caso 1 - B.

A Tabela 4.13 mostra os valores de remoção de DQO de cada unidade caixa tanto para o Caso 1 – A como para o Caso 1 - B.

Tabela 4.13 – Valores de remoção de DQO (no tempo de 3000 min) de cada unidade caixa para o Caso 1 – A e o Caso 1 – B.

Unidade caixa	DQOremoção [mg/l] Caso 1 - A	DQOremoção [mg/l] Caso 1 - B	DQOremoção [gDQO/Kg] Caso 1 - A	DQOremoção [gDQO/Kg] Caso 1 - B
1	1108,93	1308,77	7,25	7,25
2	587,25	626,31	2,74	3,24
3	283,59	216,41	2,25	1,83
4	283,56	188,11	1,40	1,02
5	56,89	30,77	0,12	0,08
$\Sigma$	2320,22	2370,37	13,76	13,34

E a relação de volume de água da ETA por massa de tecido processado é o mesmo para os dois casos, de 17,0L/Kg.

#### 4.2 – CASO 2

Este segundo caso serve para demonstrar que o processo de iteração para o cálculo da convergência das correntes de corte está corretamente implementado. Sendo simulado duas vezes, mas com os valores iniciais das correntes de corte diferentes, obtendo-se os mesmos valores finais de vazão, concentração e temperatura.

Além de também ilustrar os resultados na forma de gráficos, sendo estes começando ou não do zero, e com incrementos diferentes.

E quando comparado ao Caso 1, demonstra-se que o algoritmo permite a simulação com diferentes números de unidades caixa e valores de DQO impregnados no tecido de entrada e no tecido lavado.

#### 4.2.1 – Caso 2 – A e Caso 2 - B

A Figura 4.2 representa o processo do Caso 2 – A e do Caso 2 - B, onde as unidades e as correntes foram numeradas.

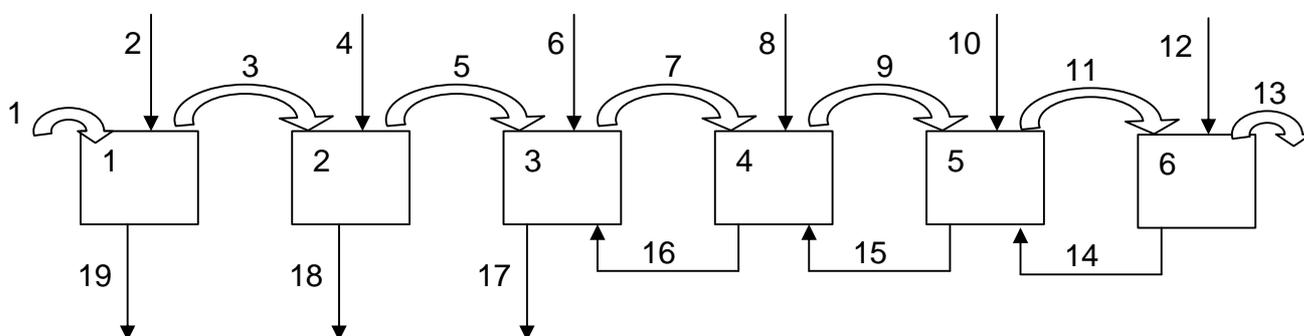


Figura 4.2 – Fluxograma do Caso 2 – A e o Caso 2 - B.

Neste caso, o número de correntes é 19 e de unidades é 6. A gramatura, velocidade, largura e vazão de tecido lavado são as mesmas do Caso 1, sendo respectivamente  $300\text{g/m}^2$ ,  $50\text{m/min}$ ,  $1,5\text{m}$  e  $2,00\text{ton/h}$ . A concentração inicial de cada caixa é considerada zero.

Considerando que a DQO impregnada no tecido de entrada seja de  $14,8\text{g/Kg}$  de tecido, e o valor depois de lavado o tecido seja de  $1,8\text{g/Kg}$  de tecido, e fazendo-se os mesmos cálculos feitos na seção 4.1.1, é alcançado um valor de DQO de entrada, da corrente 1 igual a  $16250\text{mgDQO/L}$ . Mas a vazão continua a mesma do Caso 1, de  $1,08\text{m}^3/\text{h}$ , já que a gramatura, velocidade, largura e vazão do tecido lavado, e o pick up não foram alterados.

Na Tabela 4.14 estão os volumes de cada tanque assim como os valores de DQO de saída.

Tabela 4.14 – Informações sobre cada caixa do Caso 2 – A e do Caso 2 - B.

Caixas	Volume [L]	DQO de saída [mg/L]
1	900,0	1110,00
2	1250,0	750,00
3	1000,0	600,00
4	900,0	480,00
5	900,0	310,00
6	1000,0	200,00

Os valores das correntes de entrada também são todos conhecidos, e estão representados na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 – Informações sobre cada corrente de entrada do Caso 2 – A e Caso 2 - B.

Correntes	Vazão [m <sup>3</sup> /h]	Concentração [mg/L]	Temperatura [°C]
1	1,08	16250,00	20,0
2	12,00	0,00	65,0
4	9,00	0,00	90,0
6	7,00	0,00	80,0
8	0,10	3000,00	70,0
10	5,00	0,00	60,0
12	3,00	0,00	50,0

Os valores de pick up de cada corrente que vem com o tecido estão descritos na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 – Informações sobre o valor de cada pick up do Caso 2 – A e do Caso 2 - B.

Correntes de pick up	Valor do pick up
1	0,8
3	1
5	1
7	1
9	1
11	1
13	0,6

Com estas informações foi simulado o processo e obtido os valores de vazão, concentração e temperatura das correntes de cada unidade caixa, além dos valores de remoção de DQO de cada caixa e do processo. Na simulação feita foram feitos os cálculos num intervalo de tempo de 0 a 1000 min, com intervalos de 100 min.

#### 4.2.2 – Comparações entre o Caso 2 – A e o Caso 2 – B

Nos dois casos estudados a única diferença entre eles são os valores iniciais das correntes de corte. Sendo assim todos os resultados e matrizes do processo são os mesmos. Verifica-se, portanto, que o processo de iteração está corretamente implementado.

A Tabela 4.17 mostra os valores iniciais atribuídos as correntes de corte no Caso 2 – A e no Caso 2 – B.

Tabela 4.17 – Matriz com os valores iniciais das correntes de corte para o Caso 2 – A e Caso 2 – B.

Correntes de Corte	Vazão [m <sup>3</sup> /h]		Concentração [mg/L]		Temperatura [°C]	
	A	B	A	B	A	B
7	2,00	3,00	500,00	300,00	50,0	90,0
9	3,00	2,00	400,00	750,00	60,0	10,0
11	2,00	1,00	300,00	100,00	80,0	20,0

A Tabela 4.18 representa a Matriz do Processo, para ambos os casos.

Tabela 4.18 – Matriz do Processo para o Caso 2 – A e Caso 2 – B.

Unidades	Correntes associadas				
1	1	2	-3	-19	0
2	3	4	-5	-18	0
3	5	6	-7	16	-17
4	7	8	-9	15	-16
5	9	10	-11	14	-15
6	11	12	-13	-14	0

A Matriz Circuito Correntes (Tabela 4.19) é a mesma para os dois casos. Logo, as correntes de corte também são as mesmas, sendo: 7, 9 e 11. E

conseqüentemente a seqüência de cálculo também permanece igual, sendo descrita na Tabela 4.20.

Tabela 4.19 – Matriz Circuito Correntes para o Caso 2 – A e Caso 2 – B.

Correntes	
7	16
9	15
11	14

Tabela 4.20 – Matriz Seqüência de Cálculo para o Caso 2 – A e Caso 2 – B.

Seqüência de Cálculo					
1	6	2	5	4	3

Os valores de alfa são os mesmos, já que o processo não se altera. A Tabela 4.21 mostra os valores de alfa encontrados.

Tabela 4.21 – Valores dos Termos Fonte para o Caso 2 – A e Caso 2 – B.

Caixas	Alfa
1	-0,17
2	4,18
3	0,10
4	0,82
5	1,02
6	1,01

Os valores de vazão e temperatura de cada corrente são os mesmos, já que somente os valores iniciais das correntes de corte é que são alterados nos dois casos. Sendo estes representados da Tabela 4.22.

Tabela 4.22 – Valores de vazão, concentração (no tempo de 3000 min) e temperatura para o Caso 2 – A e Caso 2 – B.

Correntes	Vazão [m <sup>3</sup> /h]	Concentração [mg/L]	Temperatura [°C]
1	1,08	16250,00	20,0
2	12,00	0,00	65,0
3	1,35	1108,93	61,3
4	9,00	0,00	90,0
5	1,35	747,47	86,2
6	7,00	0,00	80,0
7	1,35	549,72	69,8
8	0,10	3000,00	70,0
9	1,35	862,12	58,9
10	5,00	0,00	60,0
11	1,35	432,52	57,0
12	3,00	0,00	50,0
13	0,81	269,09	52,2
14	3,54	269,09	52,2
15	8,54	432,52	57,0
16	8,64	862,12	58,9
17	15,64	549,72	69,8
18	9,00	747,47	86,2
19	11,73	1108,93	61,3

Da mesma forma, os valores de concentração e temperatura das unidades caixa são os mesmos, sendo mostrados na Tabela 4.23.

Tabela 4.23 – Valores de concentração (no tempo de 3000 min) e temperatura para cada unidade caixa do Caso 2 – A e Caso 2 - B.

Caixas	Concentrações [mg/L]	Temperaturas [°C]
1	1108,93	61,3
2	747,47	86,2
3	549,72	69,8
4	862,12	58,9
5	432,52	57,0
6	269,09	52,2

Os resultados de concentração calculados para as correntes e as caixas podem ser apresentados também na forma de gráficos. Sendo que estes podem começar do zero, como o apresentado na Figura 4.3. Ou começar em qualquer outro valor, com o intervalo escolhido (inicial e final) e o incremento entre eles pode receber quaisquer valores, como mostrado na Figura 4.4.

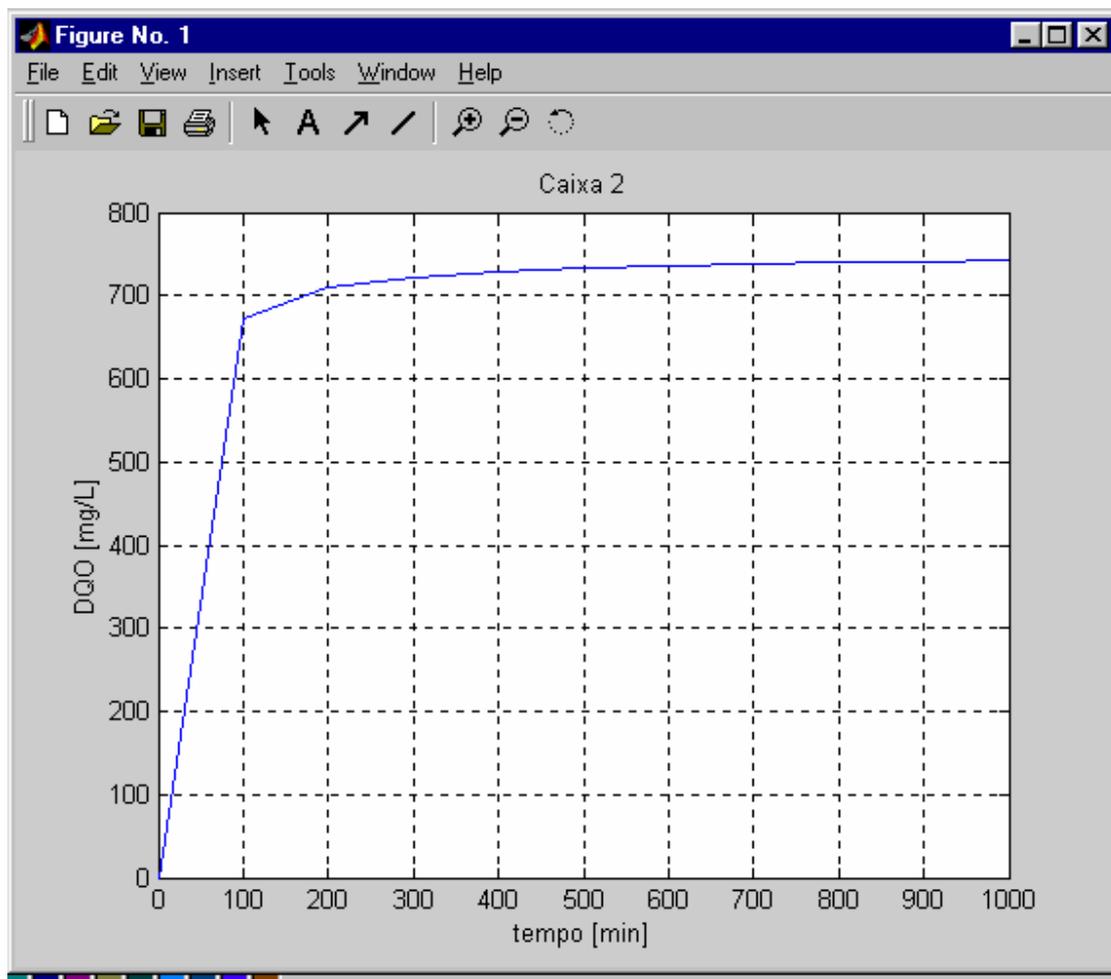


Figura 4.3 – Gráfico representando a variação de concentração da Caixa 2, para o Caso 2.

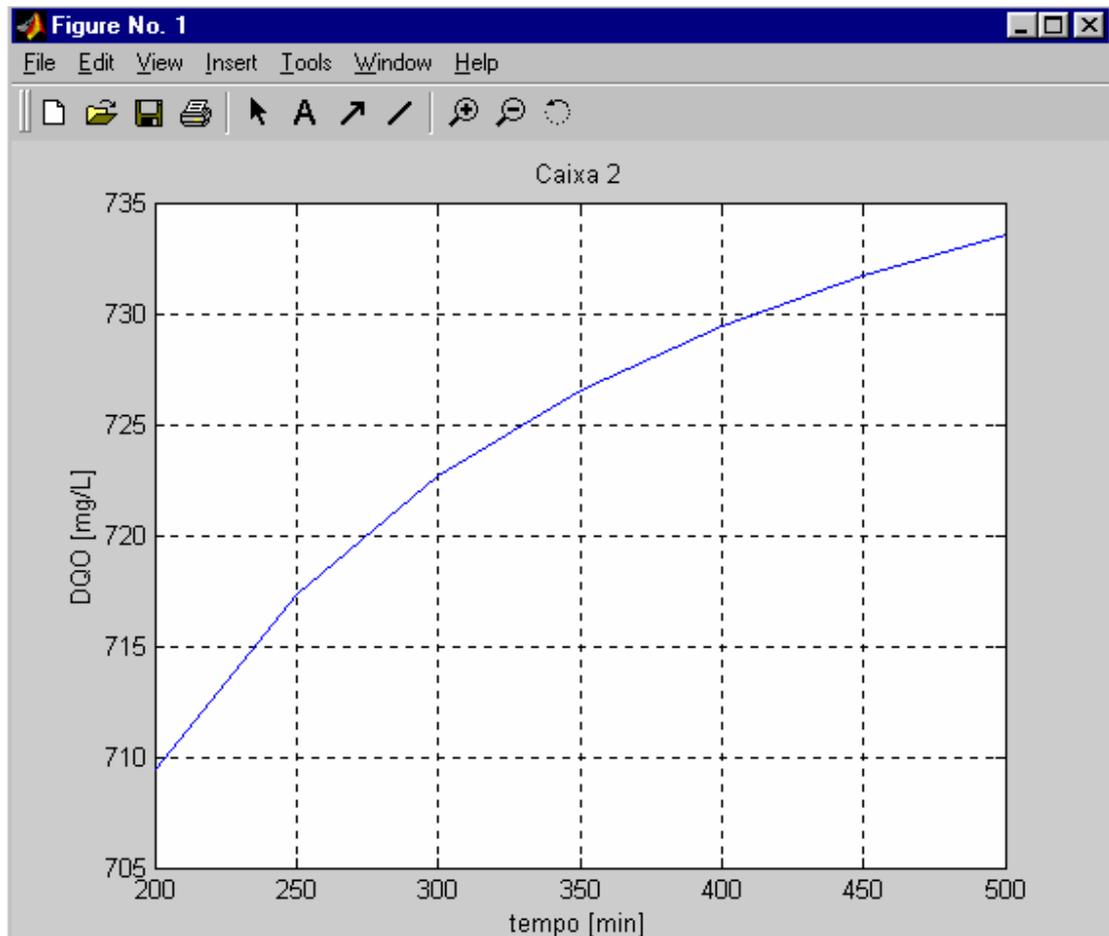


Figura 4.4 – Gráfico representando a variação de concentração da Caixa 2, para o Caso 2, com intervalo e incrementos diferentes.

A Tabela 4.24 mostra os valores de concentração de cada corrente para o Caso 2, sem a correção do termo alfa.

É feito um balanço mássico para provar a eficiência da equação usada no balanço, para encontrar a concentração final no estado estacionário de cada corrente. É feito o somatório da vazão multiplicada pela concentração de cada corrente que entra, assim como a de cada corrente que sai. Os resultados encontram-se na Tabela 4.25.

Tabela 4.24 – Valores de concentração (no tempo de 3000 min) sem a correção do termo fonte para o Caso 2.

Correntes	Concentração [m <sup>3</sup> /h] para o Caso 2
1	16250,00
2	0,00
3	1339,90
4	0,00
5	174,35
6	0,00
7	34,03
8	3000,00
9	39,76
10	0,00
11	6,09
12	0,00
13	1,88
14	1,88
15	6,09
16	39,76
17	34,03
18	174,35
19	1339,90

Tabela 4.25 – Resultados do balanço mássico do Caso 2.

	$\Sigma(\text{vazão} \times \text{concentração})$ correntes de entrada [g/h]	$\Sigma(\text{vazão} \times \text{concentração})$ correntes de saída [g/h]	Erro [%]
Sem a correção do termo fonte	17850,00	17821,73	0,16
Com a correção do termo fonte	17850,00	28550,56	59,95

Quando o balanço é feito usando os valores de concentração sem a correção com o termo fonte, o erro é muito pequeno, provando que a equação do balanço mássico utilizada representa corretamente o processo de uma lavanderia contínua. No caso onde o balanço é feito usando os valores de concentração das correntes onde foi feita a correção com o termo fonte, este é elevado, mas não significa que a equação não se aplica. Se este fosse um caso real, significaria que os valores medidos de DQO final de cada tanque estariam com um erro de praticamente 60%.

A Tabela 4.26 mostra os valores de remoção de DQO de cada unidade caixa para o Caso 2.

E a relação de volume de água da ETA por massa de tecido processado é o mesmo para os dois casos, de 18,0L/Kg.

Tabela 4.26 – Valores de remoção de DQO (no tempo de 3000 min) de cada unidade caixa para o Caso 2.

Unidade caixa	DQOremoção [mg/l]	DQOremoção [gDQO/Kg]
1	1108,93	7,25
2	602,83	3,12
3	51,91	0,44
4	388,06	1,94
5	218,52	1,08
6	134,85	0,29
$\Sigma$	2505,10	14,12

### 4.3 – CASO 3

Quando comparado com o Caso 1, o Caso 3 comprova que é possível simular um processo e depois fazer algumas alterações, como acrescentar pontos de mistura e divisor de correntes, para avaliar a influência dos valores de vazão, concentração e temperatura. Neste caso, como não ocorreram mudanças no processo que pudessem alterar os valores de alfa, estes continuaram os mesmos que no Caso 1 – A, já que as unidades caixa são as mesmas, assim como as características do tecido e insumos do processo.

Este caso demonstra que o algoritmo desenvolvido pode fazer o cálculo de processos que possuam quaisquer quantidades de ponto de mistura e divisor de correntes. Além de encontrar corretamente todos os ciclos do processo.

### 4.3.1 – Execução do Caso 3

A Figura 4.5 representa o processo do Caso 3, onde as unidades e as correntes foram numeradas.

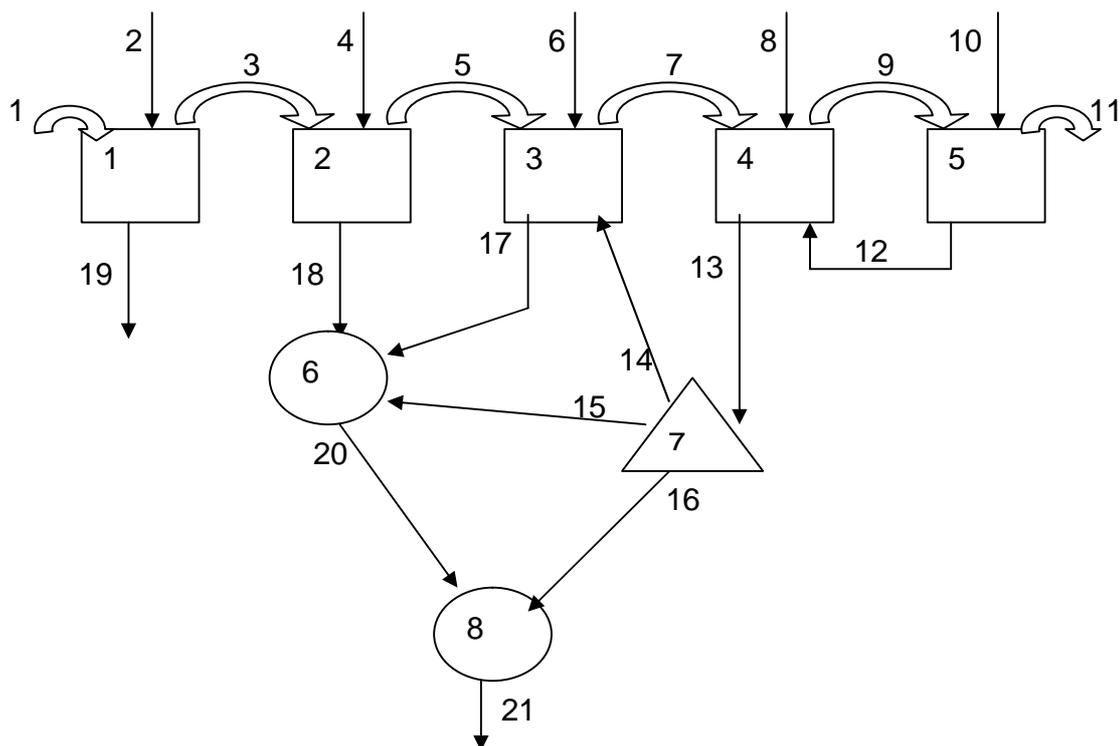


Figura 4.5 – Fluxograma do Caso 3.

Neste caso, o número de correntes é 21 e de unidades é 8. Foram utilizados os mesmos parâmetros do processo do Caso 1 – A. A gramatura considerada foi de  $300\text{g/m}^2$ , a velocidade do tecido é  $50\text{m/min}$  e a sua largura é  $1,5\text{m}$ , a concentração inicial de cada caixa é considerada zero, e a vazão de tecido lavado  $2,00\text{ton/h}$ .

Os valores dos fatores de separação associados a cada corrente de saída do divisor de correntes estão apresentados na Tabela 4.27.

Tabela 4.27 – Matriz dos valores do fator de separação do divisor de correntes do Caso 3.

Unidade	Correntes de saída	Fator de separação
7	14	0,3
7	15	0,2
7	16	0,5

Com estas informações é possível simular o processo e obter os valores de vazão, concentração e temperatura de cada corrente e cada caixa, assim como os valores de remoção de DQO de cada caixa e processo.

#### 4.3.2 – Comparações entre o Caso 1 – A e o Caso 3

A Matriz do Processo dos dois se alteram, já que no Caso 3, foram acrescentados dois pontos de mistura e um divisor de correntes. A Tabela 4.28 representa a Matriz do Processo no Caso 3.

Como existem mudanças no fluxograma a Matriz Circuito Correntes é diferente para os dois casos, sendo apresentada na Tabela 4.29. Mas as correntes de corte são iguais, por coincidência. E conseqüentemente a seqüência de cálculo (representada na Tabela 4.30) se altera, pois além de ter mais unidades, os fluxos sofreram mudanças.

Tabela 4.28 – Matriz do Processo para o Caso 3.

Unidades	Correntes associadas				
1	1	2	-3	-19	0
2	3	4	-5	-18	0
3	5	6	-7	14	-17
4	7	8	-9	-13	12
5	9	10	-11	-12	0
6	18	17	15	-20	0
7	13	-14	-15	-16	0
8	20	16	-21	0	0

Tabela 4.29 – Matriz Circuito Correntes para o Caso 3.

Correntes		
7	13	14
9	12	0

Tabela 4.30 – Matriz Seqüência de Cálculo para o Caso 3.

Seqüência de Cálculo							
1	5	2	4	7	3	6	8

Os valores de vazão, concentração e temperatura de cada corrente se alteram, já que o processo foi alterado. Sendo estes representados da Tabela 4.31.

Tabela 4.31 – Valores de vazão e concentração (no tempo de 3000 min), e temperatura para o Caso 3.

Correntes	Vazão [m <sup>3</sup> /h]	Concentração [mg/L]	Temperatura [°C]
1	1,08	14125,00	20,0
2	12,00	0,00	80,0
3	1,35	11008,93	75,0
4	8,00	0,00	85,0
5	1,35	747,36	83,5
6	6,00	0,00	60,0
7	1,35	320,32	62,6
8	5,00	0,00	60,0
9	1,35	238,47	57,6
10	3,00	0,00	50,0
11	0,81	105,50	52,4
12	3,54	105,50	52,4
13	8,54	238,47	57,6
14	2,56	238,47	57,6
15	1,71	238,47	57,6
16	4,27	238,47	57,6
17	8,56	320,32	62,6
18	8,00	747,36	83,6
19	11,73	1108,93	75,0
20	18,27	499,66	71,3
21	22,54	450,18	68,7

Da mesma forma, os valores de concentração das caixas e temperatura também diferem, sendo mostrados na Tabela 4.32.

Tabela 4.32 – Valores de concentração (no tempo de 3000 min) e temperatura para cada caixa e cada caso.

Caixas	Concentrações [mg/L]		Temperaturas [°C]	
	Caso 1 – A	Caso 3	Caso 1 – A	Caso 3
1	11008,93	1108,93	75,0	75,0
2	747,36	747,36	83,6	83,6
3	578,59	320,32	60,5	62,6
4	430,75	238,47	57,3	57,6
5	190,57	105,50	52,3	52,4

A Tabela 4.33 mostra os valores de concentração de cada corrente para os dois casos, sem a correção do termo alfa.

É feito um balanço mássico para provar a eficiência da equação usada no balanço, para encontrar a concentração final no estado estacionário de cada corrente. É feito o somatório da vazão multiplicada pela concentração de cada corrente que entra, assim como a de cada corrente que sai. Os resultados encontram-se na Tabela 4.34.

Tabela 4.33 – Valores de concentração (no tempo de 3000 min) sem a correção do termo fonte para o Caso 3.

Correntes	Vazão [m <sup>3</sup> /h] para o Caso 3
1	14125,00
2	0,00
3	1164,68
4	0,00
5	167,73
6	0,00
7	23,74
8	0,00
9	3,64
10	0,00
11	1,12
12	1,12
13	3,64
14	3,64
15	3,64
16	3,64
17	23,74
18	167,73
19	1164,68
20	84,91
21	69,51

Tabela 4.34 – Resultados do balanço mássico do Caso 3.

	$\Sigma(\text{vazão} \times \text{concentração})$ correntes de entrada [g/h]	$\Sigma(\text{vazão} \times \text{concentração})$ correntes de saída [g/h]	Erro [%]
Sem a correção do termo fonte	15255,00	15229,36	0,17
Com a correção do termo fonte	15255,00	23240,26	52,34

Quando o balanço é feito usando os valores de concentração sem a correção com o termo fonte, o erro é muito pequeno, provando que a equação do balanço mássico utilizada representa corretamente o processo de uma lavanderia contínua. No caso onde o balanço é feito usando os valores de concentração das correntes onde foi feita a correção com o termo fonte, este é elevado, mas não significa que a equação não se aplica. Se este fosse um caso real, significaria que os valores medidos de DQO final de cada tanque estariam com um erro de mais de 50%.

A Tabela 4.35 mostra os valores de remoção de DQO de cada unidade caixa para o Caso 3.

E a relação de volume de água da ETA por massa de tecido processado é de 17,0L/Kg.

Tabela 4.35 – Valores de remoção de DQO (no tempo de 3000 min) de cada unidade caixa para o Caso 3.

Unidade caixa	DQOremoção [mg/l]	DQOremoção [gDQO/Kg]
1	1108,93	7,25
2	587,25	2,74
3	156,89	0,78
4	156,98	0,78
5	31,49	0,07
$\Sigma$	2041,54	11,62

## **CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através da simulação de três unidades de lavagem contínua de indústrias do Vale do Rio Itajaí. Serão apresentados os valores de vazão, concentração e temperatura de todas as correntes. Serão feitos os balanços globais, análises dos termos fonte, o cálculo da eficiência de remoção da cada unidade caixa, e também será proposta uma nova rota para as correntes do processo, adicionando novas unidades, visando a aplicação do software desenvolvido como uma ferramenta auxiliar na otimização do processo.

### **5.1 – LAVANDERIA 1**

A Figura 5.1 representa o processo da Lavanderia 1, onde as unidades e as correntes foram numeradas.

Neste processo está sendo lavado um tecido escuro, de cor azul marinho, cuja gramatura é de  $360\text{g/m}^2$ , a largura é de 2,01m e a velocidade do tecido de 60m/min. Neste processo são lavadas 2,6 toneladas de tecido por hora.

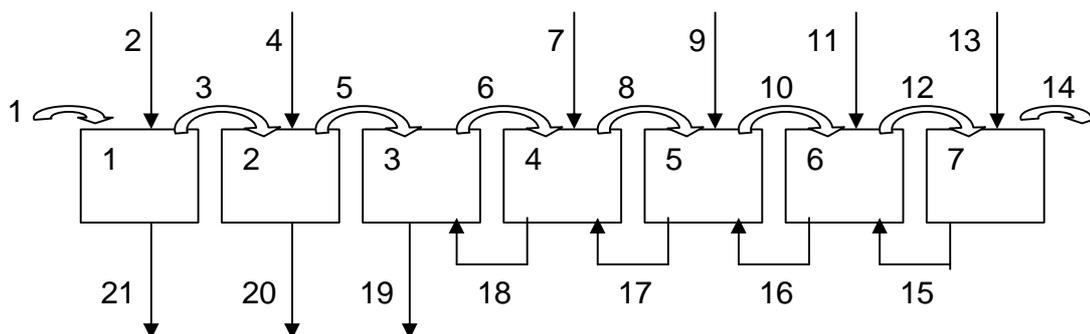


Figura 5.1 – Fluxograma da Lavanderia 1.

Foram retiradas amostras do tecido que saiu do banho de tingimento e está entrando na lavanderia e do tecido que sai ao final do processo de lavação. Foram realizados ensaios laboratoriais destas amostras envolvendo sucessivas lavagens no laboratório do SENAI (de Blumenau), determinando-se os seguintes valores de DQO:

- A DQO do tecido impregnado, vindo do banho de tingimento é de 18,96g/Kg de tecido;
- A DQO do tecido depois de lavado é de 4,28g/Kg de tecido.

Neste processo observa-se que na corrente de número nove é injetado um insumo, ácido acético, que tem como objetivo neutralizar o pH de processos anteriores onde se usou um meio fortemente alcalino e também para facilitar a ação de outros agentes auxiliares químicos têxteis.

Foram coletadas, no regime permanente, amostras das correntes de saída de cada unidade caixa e medidos os valores de DQO (em mg/L) em laboratório.

Na Tabela 5.1 estão os volumes de cada tanque assim como os valores de DQO de saída, medidos em laboratório.

Tabela 5.1 – Informações sobre cada caixa da Lavanderia 1.

Caixas	Volume [L]	DQO de saída [mg/L]	Temperatura [°C]
1	900,0	1334,00	60,0
2	1230,0	924,00	95,0
3	900,0	967,00	95,0
4	1230,0	841,00	95,0
5	1230,0	2460,00	60,0
6	900,0	575,00	60,0
7	900,0	286,00	50,0

Os valores das correntes de entrada também são todos conhecidos, e estão representados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Informações sobre cada corrente de entrada da Lavanderia 1.

Correntes	Vazão [m <sup>3</sup> /h]	Concentração de DQO [mg/L]	Temperatura [°C]
1	2,21	17270,00	20,0
2	10,00	0,00	71,3
4	8,00	0,00	109,8
7	6,00	0,00	100,0
9	0,14	63616,00	60,0
11	6,00	0,00	65,0
13	3,00	0,00	45,0

Os valores de pick up de cada corrente aquosa transportada pelo tecido estão descritos na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Informações sobre o valor de cada pick up da Lavanderia 1.

Correntes de pick up	Valor do pick up
1	0,85
3	1,00
5	1,00
6	1,00
8	1,00
10	1,00
12	1,00
14	0,61

Com estas informações é possível simular o processo e obter os valores de vazão, concentração e temperatura de cada corrente e cada unidade caixa.

Os valores dos Termos Fonte calculados para cada unidade caixa, assim como os valores da concentração (no tempo de 500 minutos) e temperatura, estão representados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Resultados das unidades caixas da Lavanderia 1.

Caixas	Termo Fonte	Concentração [mg/L]	Temperatura [°C]
1	-0,57	1322,89	62,0
2	1,82	903,73	98,0
3	0,13	925,43	80,8
4	-0,43	807,16	78,0
5	0,86	2383,16	64,3
6	-0,04	549,40	60,8
7	0,07	268,10	52,4

Na metodologia desenvolvida para a modelagem e simulação da lavanderia contínua o parâmetro de entrada (DQO de exaustão da etapa de tingimento) foi estimado pela equação 21. Esta estimativa pressupõe que toda a DQO removida no processo de lavagem industrial está disponível na fase líquida. Esta hipótese, no entanto, não leva em consideração uma parcela da DQO que é relativa ao corante e auxiliares químicos que estão adsorvidos no tecido e que somente passaram para a solução (fase líquida) devido à ação de atrição dos rolos e o tecido nas unidades caixas. Para compatibilizar o modelo com a situação real do processo, foi incorporado um parâmetro  $\alpha$  denominado “Fator Fonte”. Este parâmetro pode atuar ajustando o excedente de concentração de DQO estimada (atuando como fonte negativo) ou aportar acréscimos ao valor de concentração de DQO resultante da ação de atrição dos rolos (atuando como fonte positivo). Este parâmetro depende do ajuste dos rolos, afinidade do corante pela fibra, mesmo considerando o corante hidrolisado, da gramatura, velocidade do tecido e vazão de tecido lavado.

$$C_{entrada} = \frac{DQO_{tecidoimpregnado} - DQO_{tecidolavado}}{pickup_{entrada}} \quad (21)$$

Analisando os valores da segunda coluna da Tabela 5.4, verifica-se que:

- O termo fonte da primeira caixa é negativo porque nem toda a DQO que é dita entrando com o tecido está disponível na fase aquosa. Pois a DQO estimada de entrada foi um parâmetro obtido em laboratório, onde foi pega uma amostra de tecido vindo do banho de tingimento, e feitas sucessivas lavagens. Sendo assim, o valor de DQO muito elevado, pois foi retirada até a que estava adsorvida nas fibras.

- Nas unidades caixas 2 e 3 o termo fonte é positivo, isto significa que a atrição dos rolos das caixas e o tecido fizeram com que uma parte da DQO que estava adsorvida no tecido passasse para a fase líquida.

- Na caixa 4 o  $\alpha$  é negativo porque apesar da corrente 7 apresentar DQO zero a corrente 17 que trás consigo uma certa quantidade de ácido, recebida da unidade de caixa 5, sendo este adsorvido pela fibra e fazendo com que o termo fonte seja negativo.

- Já na caixa 5 o termo fonte é positivo apesar da entrada do insumo com elevado teor de DQO, que nesta etapa é utilizado somente para neutralizar o pH.

- Da caixa 5 para a 6, durante o arraste do tecido este retêm carga orgânica, sendo assim o termo fonte torna-se negativo, voltando a ser positivo na última unidade caixa, já que esta possui entrada de água industrial isenta de DQO.

Os valores de vazão, concentração (no tempo de 500 minutos) e temperatura de cada corrente são apresentados da Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Valores de vazão, concentração (no tempo de 500 min) e temperatura para Lavanderia 1.

Correntes	Vazão [m <sup>3</sup> /h]	Concentração [mg/L]	Temperatura [°C]
1	2,21	17270,00	20,0
2	10,00	0,00	71,3
3	2,60	1322,89	62,0
4	8,00	0,00	109,8
5	2,60	903,73	98,0
6	2,60	925,43	80,8
7	6,00	0,00	100,0
8	2,60	807,17	78,0
9	0,14	63616,00	60,0
10	2,60	2383,17	64,3
11	6,00	0,00	65,0
12	2,60	549,40	60,8
13	3,00	0,00	45,0
14	1,59	268,10	52,4
15	4,01	268,10	52,4
16	10,01	549,40	60,8
17	10,15	2383,17	64,3
18	16,15	807,17	78,0
19	16,15	925,43	80,8
20	8,00	903,73	98,0
21	9,61	1322,89	62,0

Foram calculados os erros entre os valores de concentração e temperatura obtidos a partir do processo industrial e de dados experimentais (obtidos em laboratório) de cada unidade caixa e os calculados através do programa, que são os chamados valores teóricos. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Valores dos erros calculados entre os valores experimentais e teóricos de concentração e temperatura de cada unidade caixa da Lavandera 1.

Caixa	Concentração [Erro %]	Temperatura [Erro %]
1	0,83	3,33
2	2,19	3,16
3	4,30	14,95
4	4,02	17,89
5	3,12	7,17
6	4,45	1,33
7	6,26	4,80

Os resultados da simulação obtidos para o caso da Lavandera 1 demonstram que os dados preditos pelos modelo estão com muita boa concordância com os obtidos junto ao processo industrial. Observa-se um erro máximo de 6,26% (na unidade caixa 7) no cálculo das concentrações. Já no caso do cálculo das temperaturas o erro máximo é maior, sendo de 17,89% (na unidade caixa 4). Na unidade caixa 3 também observa-se um erro elevado, 14,95%. Isto ocorre porque nestas duas unidades caixas (4 e 3), existe um sistema de aquecimento com vapor, não qualificado na planilha de dados disponível para a realização desta simulação.

Na Tabela 5.7, estão os valores de concentração de cada corrente no estado estacionário, sem a correção com o termo fonte.

Tabela 5.7 – Valores de concentração (no estado estacionário) das correntes sem a correção do termo fonte na Lavanderia 1.

Correntes	Concentração [mg/L]
1	17270,00
2	0,00
3	3129,35
4	0,00
5	768,15
6	662,70
7	0,00
8	645,92
9	63616,00
10	1023,69
11	0,00
12	247,79
13	0,00
14	115,05
15	115,05
16	247,79
17	1023,69
18	645,92
19	662,70
20	768,15
21	3129,35

Foram feitos os cálculos do balanço global tanto com os dados experimentais como com os valores teóricos calculados sem a correção do termo fonte e com a correção. Os valores obtidos estão representados na Tabela 5.8, onde a segunda coluna representa o balanço mássico das correntes de entrada e na terceira coluna o balanço mássico referente as correntes de saída, sendo que na quarta coluna estão os erros de fechamento dos balanços mássicos.

Tabela 5.8 – Valores dos erros nos balanços globais na Lavanderia 1.

Valores	$\Sigma$ Correntes de entrada [g/h]	$\Sigma$ Correntes de saída [g/h]	Erro [%]
Experimentais	47072,94	36286,53	22,91
Teóricos (com a correção do termo fonte)	47072,94	35314,79	24,98
Teóricos (sem a correção com o termo fonte)	47072,94	47103,79	0,06

O erro observado no fechamento do balanço mássico feito com os valores experimentais obtido no processo da Lavanderia 1 pode ser atribuído a erros experimentais ocorridos durante as medições junto às empresas. Salienta-se que existe uma influência entre os possíveis erros ocorridos nas determinações de DQO (amostragem e ensaios laboratoriais) pela comunicação das correntes aquosas nas diversas unidades caixas. Assim, o balanço mássico feito usando os valores de concentração corrigidos pelo termo fonte ( $\alpha$ ), tem que ser semelhante, como mostrado.

Já o erro do balanço mássico feito sem a correção do termo fonte trás um erro muito pequeno, provando assim que a equação do balanço mássico, usada na simulação do programa está corretamente implementada para o processo da lavanderia contínua.

Para analisar a eficiência de remoção de DQO de cada unidade caixa, foram usadas as equações 19 e 20, e os resultados apresentados nas Tabelas 5.9 e 5.10.

A unidade caixa que tem maior eficiência na remoção de DQO é a primeira, com 6,21 gDQO/Kg tecido. Nas caixas 4 e 6 existe um aumento de DQO no tecido, já que os termos fontes destas duas unidades caixa são negativos.

A relação de volume de água da ETA por massa de tecido processado é de 12,7L/Kg.

Tabela 5.9 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 1, remoção de DQO em mg/L.

Unidades Caixa	$\Delta C$ (remoção de DQO do tecido [mg/L])
1	1322,89
2	578,78
3	104,86
4	-610,88
5	1088,24
6	-27,59
7	12,76
	$\Sigma = 2469,06$

Tabela 5.10 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 1, remoção de DQO em gDQO/Kg tecido.

Unidade caixa	Água pick up [m <sup>3</sup> /h]	Água industrial [m <sup>3</sup> /h]	Insumo químico [m <sup>3</sup> /h]	Água de reciclo [m <sup>3</sup> /h]	DQO <sub>f</sub> [gDQO/Kg tecido]
1	2,21	10,00	0,00	0,00	6,21
2	2,60	8,00	0,00	0,00	2,36
3	2,60	0,00	0,00	16,15	0,76
4	2,60	6,00	0,00	10,15	-4,41
5	2,60	0,00	0,14	10,01	5,34
6	2,60	6,00	0,00	4,01	-0,13
7	2,60	3,00	0,00	0,00	0,03
$\Sigma_{MAX} = 14,68$ % Remoção = 69,21%					$\Sigma = 10,16$

Na procura de um modelo que otimize esta lavanderia foi proposto um esquema de fluxo como o representado na Figura 5.2. Onde foi proposto que se acrescentasse ao processo um divisor de correntes (representado pela unidade número 8) e foram feitas alterações nas correntes de entrada.

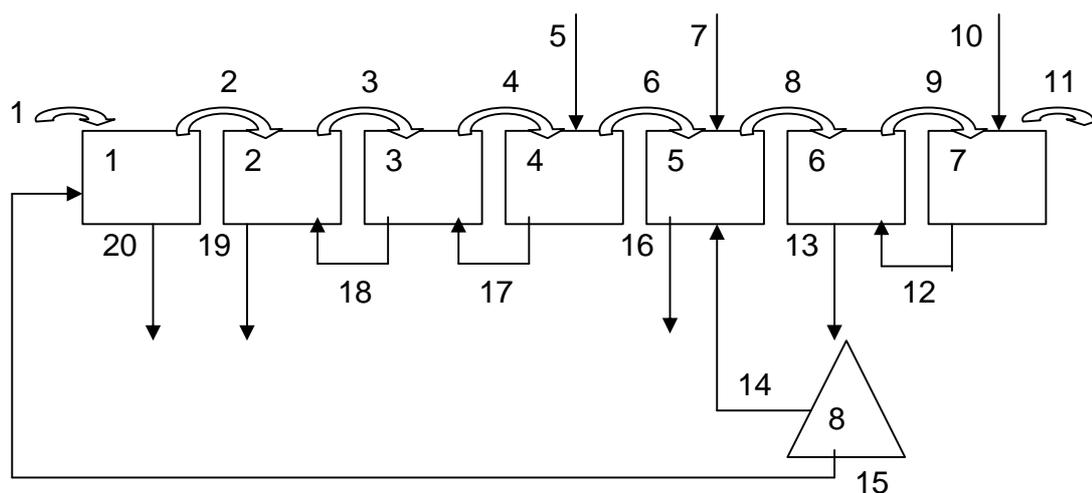


Figura 5.2 – Fluxograma da proposta de otimização da Lavanderia 1 – Caso A.

Comparando este fluxograma com o anterior, da Figura 5.1, além de ter um divisor de correntes, a corrente de número 5 neste caso, é a junção das correntes 7 e 4 do caso da Lavanderia 1, e a corrente de número 10 é a junção das correntes 13 e 2; e a corrente de número 11 da Lavanderia 1 não é usada.

A Tabela 5.11 apresenta os valores de divisão de cada corrente de saída relativo à unidade divisor de correntes.

Tabela 5.11 – Informações sobre os fatores de divisão do divisor de correntes da proposta de otimização da Lavanderia 1 – Caso A.

Número da unidade de divisor de correntes	Corrente de saída	Fator de divisão
8	14	0,5
8	15	0,5

As informações das correntes de entrada são apresentadas na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Informações das correntes de entrada da proposta de otimização da Lavanderia 1 – Caso A.

Número da corrente	Vazão [m <sup>3</sup> /h]	Concentração [mg/L]	Temperatura [°C]
1	2,21	17270,00	20,0
5	14,00	0,00	105,6
7	0,14	63616,00	60,0
10	13,00	0,00	65,2

O tecido foi considerado o mesmo, considerando sua velocidade e largura iguais as anteriores. Nestas condições, não foi necessário um novo cálculo dos termos fontes, pois estes permanecem inalterados.

Os resultados da simulação obtidos para este novo caso, com os valores de vazão, temperatura e concentração estão nas Tabelas 5.13 e 5.14.

Tabela 5.13 – Valores de concentração (no tempo de 500 min) e temperatura das unidades caixas da proposta de otimização da Lavanderia 1 – Caso A.

Caixas	Concentração [mg/L]	Temperatura [°C]
1	1869,56	56,0
2	1504,69	96,4
3	290,65	103,9
4	25,93	105,3
5	2192,09	77,4
6	382,39	67,4
7	67,84	65,7

Tabela 5.14 – Valores de vazão, concentração (no tempo de 500 min) e temperatura para a proposta de otimização da Lavanderia 1 – Caso A.

Correntes	Vazão [m <sup>3</sup> /h]	Concentração [mg/L]	Temperatura [°C]
1	2,21	17270,00	20,0
2	2,60	1869,56	56,0
3	2,60	1504,69	96,4
4	2,60	290,65	103,9

5	14,00	0,00	105,6
6	2,60	25,93	105,3
7	0,14	63616,00	60,0
8	2,60	2192,09	77,4
9	2,60	382,39	67,4
10	13,00	0,00	65,2
11	1,59	67,84	65,6
12	14,01	67,84	65,6
13	14,01	382,39	67,4
14	7,01	382,39	67,4
15	7,01	382,39	67,4
16	7,15	2192,09	77,5
17	14,00	25,93	105,3
18	14,00	290,65	103,9
19	14,00	1504,69	96,4
20	6,62	1869,56	56,0

A eficiência de remoção de DQO de cada caixa deste modelo proposto de otimização pode ser analisada através dos resultados apresentados nas Tabelas 5.15 e 5.16.

Tabela 5.15 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 1 – Caso A, remoção de DQO em mg/L.

Unidades Caixa	$\Delta C$ (remoção de DQO do tecido [mg/L])
1	1578,98
2	966,34
3	32,74
4	-19,67
5	997,21
6	-18,38
7	4,01
	$\Sigma = 3541,23$

Tabela 5.16 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 1 – Caso A, remoção de DQO em gDQO/Kg de tecido.

Unidade caixa	Água pick up [m <sup>3</sup> /h]	Água industrial [m <sup>3</sup> /h]	Insumo químico [m <sup>3</sup> /h]	Água de reciclo [m <sup>3</sup> /h]	DQO <sub>f</sub> [gDQO/Kg tecido]
1	2,21	0,00	0,00	7,01	5,60
2	2,60	0,00	0,00	14,00	6,17
3	2,60	0,00	0,00	14,00	0,21
4	2,60	14,00	0,00	0,00	-0,12
5	2,60	0,00	0,14	7,01	3,74
6	2,60	0,00	0,00	14,01	-0,12
7	2,60	13,00	0,00	0,00	0,02
$\Sigma_{MAX} = 14,68$ % Remoção = 102,52%					$\Sigma = 15,05$

A relação de volume de água da ETA por massa de tecido processado é de 10,4L/Kg.

Na Tabela 5.17 são apresentados os resultados referentes ao volume de água usado por massa de tecido seco, e a quantidade de massa de DQO removida por quilo de tecido seco, tanto para a Lavanderia 1 como para a alternativa proposta para a otimização.

Tabela 5.17 – Volume de água usada por massa de tecido seco e massa de DQO removida por massa de tecido seco (Lavanderia 1 - Caso A).

Processos	[L/Kg]	[gDQOremovido/Kg tecido]
Lavanderia 1	12,7	10,16
Proposta de otimização (Caso A)	10,4	15,05

Os resultados apresentados na Tabela 5.17 comprovam que o modelo constitui uma importante ferramenta para a otimização do processo, e que o modelo proposto pode ser utilizado, porque utiliza um menor volume de água no processo e remove uma quantidade maior de DQO que o atual.

Na procura de um segundo modelo que otimize a Lavanderia 1 foi proposto um esquema de fluxo como o representado na Figura 5.3. Onde foi proposto que se acrescentasse ao processo dois divisores de corrente (representados pelas unidades números 8 e 10) e um misturador (unidade número 9).

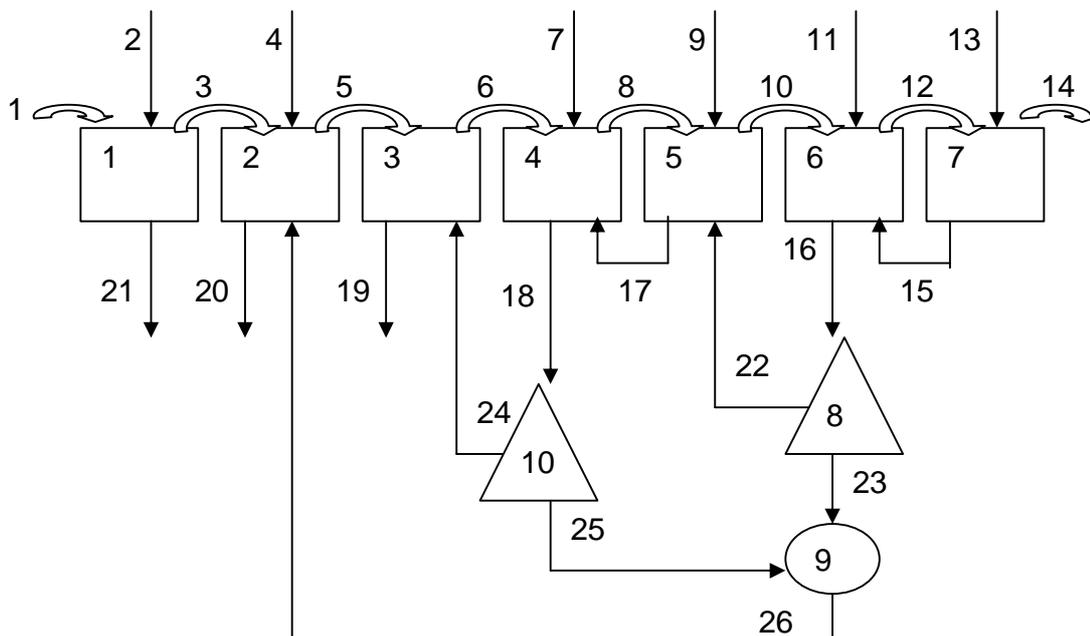


Figura 5.3 – Fluxograma da proposta de otimização da Lavanderia 1 – Caso B.

Comparando este fluxograma com o da Figura 5.1, além de neste caso ter dois divisores de correntes e um misturador a mais, a corrente de número 4, teve sua vazão reduzida de 8 m<sup>3</sup>/h para 5 m<sup>3</sup>/h.

A Tabela 5.18 apresenta os valores de divisão de cada corrente de saída relativos às unidades divisor de correntes.

Tabela 5.18 – Parâmetros cada divisor de correntes da proposta de otimização da Lavanderia 1 – Caso B.

Número da unidade de divisor de correntes	Corrente de saída	Fator de divisão
8	22	0,7
8	23	0,3
10	24	0,8
10	25	0,2

Todas as outras informações das correntes de entrada foram mantidas, assim como o tecido foi considerado o mesmo, considerando sua velocidade, gramatura e largura iguais as anteriores. Nestas condições, não foi necessário um novo cálculo dos termos fontes, pois estes permanecem inalterados.

Os resultados da simulação obtidos para este novo caso, com os valores de vazão, temperatura e concentração estão nas Tabelas 5.19 e 5.20.

Tabela 5.19 – Valores de concentração (no tempo de 500 min) e temperatura das unidades caixas da proposta de otimização da Lavanderia 1 – Caso B.

Caixas	Concentração [mg/L]	Temperatura [°C]
1	1322,89	62,0
2	1639,82	83,9
3	1151,33	82,5
4	870,45	82,1
5	2956,60	66,9
6	681,88	61,5
7	332,75	52,6

Tabela 5.20 – Valores de vazão, concentração (no tempo de 500 min) e temperatura para a proposta de otimização da Lavanderia 1 – Caso B.

Correntes	Vazão [m <sup>3</sup> /h]	Concentração [mg/L]	Temperatura [°C]
1	2,21	17270,00	20,0
2	10,00	0,00	71,3
3	2,60	1322,89	62,0

4	5,00	0,00	109,8
5	2,60	1639,82	83,9
6	2,60	1151,33	82,5
7	6,00	0,00	100,0
8	2,60	870,45	82,1
9	0,14	63616,00	60,0
10	2,60	2956,60	66,9
11	6,00	0,00	65,0
12	2,60	681,88	61,5
13	3,00	0,00	45,0
14	1,59	332,75	52,6
15	4,01	332,75	52,6
16	10,01	681,88	61,5
17	7,15	2956,60	66,9
18	13,15	870,75	82,1
19	10,52	1151,33	82,5
20	10,63	1639,82	83,9
21	9,61	1322,89	62,0
22	7,01	681,88	61,5
23	3,00	681,88	61,5
24	10,52	870,75	82,1
25	2,63	870,75	82,1
26	5,63	770,04	71,1

A eficiência de remoção de DQO de cada caixa deste modelo proposto de otimização pode ser analisada através dos resultados apresentados nas Tabelas 5.21 e 5.22.

A relação de volume de água da ETA por massa de tecido processado é de 11,5L/Kg.

Na Tabela 5.23 são apresentados os resultados referentes ao volume de água usado por massa de tecido seco, e a quantidade de massa de DQO removida por quilo de tecido seco, tanto para a Lavanderia 1 como para a alternativa proposta para a otimização.

Através dos resultados apresentados na Tabela 5.23 comprovam que o modelo constitui uma importante ferramenta para a otimização do processo, e que o modelo proposto pode ser utilizado, porque utiliza um menor volume de água no processo e remove uma quantidade maior de DQO que o atual.

Tabela 5.21 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 1 – Caso B, remoção de DQO em mg/L.

Unidades Caixa	$\Delta C$ (remoção de DQO do tecido [mg/L])
1	1322,89
2	1051,81
3	127,95
4	-661,50
5	1321,19
6	-34,24
7	15,84
	$\Sigma = 3143,94$

Tabela 5.22 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 1 – Caso B, remoção de DQO em gDQO/Kg tecido.

Unidade caixa	Água pick up [m <sup>3</sup> /h]	Água industrial [m <sup>3</sup> /h]	Insumo químico [m <sup>3</sup> /h]	Água de reciclo [m <sup>3</sup> /h]	DQO <sub>f</sub> [gDQO/Kg tecido]
1	2,21	10,00	0,00	0,00	6,21
2	2,60	5,00	0,00	5,63	5,36
3	2,60	0,00	0,00	10,52	0,64
4	2,60	6,00	0,00	7,15	-4,01
5	2,60	0,00	0,14	7,01	4,96
6	2,60	6,00	0,00	4,01	-0,17
7	2,60	3,00	0,00	0,00	0,03
$\Sigma_{MAX} = 14,68$ % Remoção = 88,69%					$\Sigma = 13,02$

Tabela 5.23 – Volume de água usada por massa de tecido seco e massa de DQO removida por massa de tecido seco [Lavanderia 1 - Caso B].

Processos	[L/Kg]	[gDQOremovido/Kg tecido]
Lavanderia 1	12,7	10,16
Proposta de otimização (Caso B)	11,5	13,02

## 5.2 – LAVANDERIA 2

A Figura 5.4 representa o processo da Lavanderia 2, onde as unidades e as correntes foram numeradas.

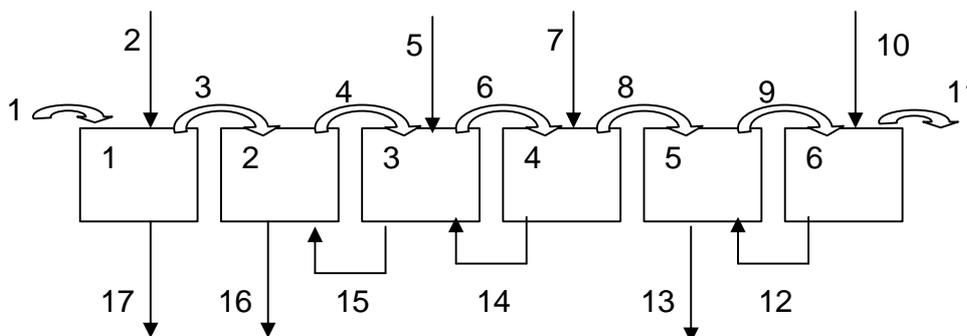


Figura 5.4 – Fluxograma da Lavanderia 2.

Neste estudo de caso é considerado um processo de lavagem de um tecido de cor escura, verde intenso, cuja gramatura é de  $600\text{g/m}^2$ , a largura é de  $1,5\text{m}$  e velocidade de  $60\text{m/min}$ . Neste processo é lavado  $3,24$  toneladas de tecido por hora.

O valor de DQO do tecido que saiu do banho de tingimento é de  $15,98\text{gDQO/Kg}$  de tecido, e do tecido lavado pelo processo representado na Figura 5.4, é  $4,34\text{gDQO/Kg}$  de tecido.

Neste processo na corrente de número dez é injetado um insumo, ácido acético, que tem como objetivo a neutralização de processos anteriores, onde se usou um meio forte alcalino e também para facilitar a ação de outros agentes auxiliares químicos têxteis.

Na Tabela 5.24 são apresentados os volumes de cada tanque assim como os valores de DQO de saída, medidos em laboratório.

Tabela 5.24 – Informações sobre cada caixa da Lavanderia 2.

Caixas	Volume [L]	DQO de saída [mg/L]	Temperatura [°C]
1	650,00	1946,00	55,0
2	800,00	809,00	95,0
3	1100,00	346,00	95,0
4	1000,00	220,00	75,0
5	1300,00	1207,00	40,0
6	1100,00	2404,00	40,0

Os valores das correntes de entrada são conhecidos e estão representados na Tabela 5.25.

Tabela 5.25 – Informações sobre cada corrente de entrada da Lavanderia 2.

Correntes	Vazão [m <sup>3</sup> /h]	Concentração [mg/L]	Temperatura [°C]
1	2,75	13694,00	20,0
2	9,00	0,00	65,0
5	9,00	0,00	115,0
7	7,50	0,00	70,0
10	0,90	7898,00	40,0

Os valores de pick up de cada corrente aquosa transportada pelo tecido estão descritos na Tabela 5.26.

Tabela 5.26 – Informações sobre o valor de cada pick up da Lavanderia 2.

Correntes de pick up	Valor do pick up
1	0,85
3	1
4	1
6	1
8	1
9	1
11	0,61

Com este conjunto de informações é possível simular o processo e obter os valores de vazão, concentração e temperatura de cada corrente e cada caixa, assim como os valores de remoção de DQO de cada unidade caixa e do processo.

Os valores dos Termos Fonte calculados para cada unidade caixa estão representados na Tabela 5.27, assim como os valores de concentração (no tempo de 500 minutos) e temperatura.

Tabela 5.27 – Resultados das unidades caixas da Lavanderia 2.

Caixas	Termo Fonte	Concentração [mg/L]	Temperatura [°C]
1	-0,39	1933,81	54,4
2	0,33	784,21	89,9
3	0,60	329,52	96,7
4	1,11	207,20	78,1
5	0,10	1102,22	73,3
6	-0,10	2257,94	66,0

Analisando os valores da segunda coluna da Tabela 5.27, verifica-se que:

- O termo fonte da primeira caixa é negativo porque nem toda a DQO que é dita entrando com o tecido está disponível na fase aquosa. Pois a DQO estimada na entrada, parâmetro determinado em laboratório, foi obtida a partir de uma amostra de tecido vindo por tanto do banho de tingimento, e feitas sucessivas lavagens. Este valor de DQO é muito elevado, pois considera-se neste caso também a DQO que estava adsorvida nas fibras.

- Nas unidades caixas 2 e 3 o termo fonte é positivo, isto significa que a atrição dos rolos das caixas e o tecido fizeram com que uma parte da DQO que estava adsorvida no tecido passasse para a fase líquida, sendo maior na caixa 3, porque nesta existe a entrada de água industrial isenta de DQO, sendo assim a DQO presente na água total é menor, logo qualquer extração feita de DQO da fibra já vai representar um valor maior no termo fonte do que na caixa 2, onde a DQO presente na água total é maior.

- Nas unidades caixas 4 e 5, o termo fonte é positivo, porque parte da DQO adsorvida na fibra é retirada pela atrição dos rolos e do tecido. Sendo menor na caixa 5, pois nesta caixa a DQO presente na água total é maior que na caixa 4, devido ao reciclo (corrente 12), que trás consigo uma DQO elevada devido à entrada de insumo na caixa 6.

- Na última caixa o termo fonte volta a se tornar negativo devido à entrada do insumo, ácido acético, que acaba sendo adsorvido pela fibra.

Os valores de vazão, concentração (no tempo de 500 minutos) e temperatura de cada corrente estão apresentados da Tabela 5.28.

Tabela 5.28 – Valores de vazão, concentração (no tempo de 500 min) e temperatura para Lavanderia 2.

Correntes	Vazão [m <sup>3</sup> /h]	Concentração [mg/L]	Temperatura [°C]
1	2,75	13694,00	20,0
2	9,00	0,00	65,0
3	3,24	1933,81	54,4
4	3,24	784,21	89,9
5	9,00	0,00	115,0
6	3,24	329,52	96,9
7	7,50	0,00	70,0
8	3,24	207,20	78,1
9	3,24	1102,22	73,3
10	0,90	7898,00	40,0
11	1,98	2257,94	66,0
12	2,16	2257,94	66,0
13	2,16	1102,22	73,3
14	7,50	207,20	78,1
15	16,50	329,52	96,9
16	16,50	784,21	89,9
17	8,51	1933,81	54,4

Foram calculados os erros entre os valores de concentração e temperaturas experimentais (obtidos em laboratório) de cada unidade caixa e os calculados

através do programa, que são os chamados valores teóricos. Os resultados estão demonstrados na Tabela 5.29.

Tabela 5.29 – Valores dos erros calculados entre os valores experimentais e teóricos de concentração e temperatura de cada unidade caixa da Lavanderia 2.

Caixa	Concentração [Erro %]	Temperatura [Erro %]
1	0,63	0,99
2	3,06	5,37
3	4,76	1,96
4	5,82	4,1
5	8,68	83,18
6	6,07	65,10

Os resultados da simulação obtidos para o caso da Lavanderia 2 demonstram que os dados preditos pelo modelo estão com muita boa concordância com os obtidos junto ao processo industrial. Observa-se um erro máximo de 8,68% (na unidade caixa 5) no cálculo das concentrações. Já no caso do cálculo das temperaturas existem duas caixas com erros muito elevados, que são a caixa 5 com 83,18% e a caixa 6 com 65,10%. Isto ocorre porque estas duas unidades caixas (5 e 6), apresentam um sistema de aquecimento com vapor não quantificado na planilha de dados disponível para a realização desta simulação.

Na Tabela 5.30, estão os valores de concentração de cada corrente no estado estacionário, sem a correção com o termo fonte.

Tabela 5.30 – Valores de concentração (no estado estacionário) das correntes sem a correção do termo fonte na Lavanderia 2.

Correntes	Concentração [mg/L]
1	13698,00
2	0,00
3	3207,48
4	622,76
5	0,00
6	115,40
7	0,00
8	34,79
9	1027,08
10	7898,00
11	2516,75
12	2516,75
13	1027,08
14	34,79
15	115,40
16	622,76
17	3207,48

Foram feitos os cálculos do balanço global tanto com os dados experimentais como com os valores teóricos calculados sem a correção do termo fonte e com a correção. Os valores obtidos estão representados na Tabela 5.31,

onde a segunda coluna representa o balanço mássico das correntes de entrada e na terceira coluna o balanço mássico referente as correntes de saída, sendo que na quarta coluna estão os erros de fechamento dos balanços mássicos.

Tabela 5.31 – Valores dos erros nos balanços globais na Lavanderia 2.

Valores	$\Sigma$ Correntes de entrada [g/h]	$\Sigma$ Correntes de saída [g/h]	Erro [%]
Experimentais	44766,70	37276,00	16,73
Teóricos (com a correção do termo fonte)	44766,70	36247,70	19,03
Teóricos (sem a correção com o termo fonte)	44766,70	44772,85	0,01

O erro observado no fechamento do balanço mássico, feito com os valores experimentais obtido no processo da Lavanderia 2 pode ser atribuído a erros experimentais ocorridos durante as medições junto às empresas. Salienta-se que existe uma influência entre os possíveis erros ocorridos nas determinações de DQO (amostragem e ensaios laboratoriais) pela comunicação das correntes aquosas nas diversas unidades caixas. O erro na medida da DQO final da caixa acaba sendo acumulativo quando inserido no programa. Assim, o balanço mássico feito usando os valores de concentração corrigidos pelo termo fonte ( $\alpha$ ), tem que ser semelhante, como mostrado.

Já o erro do balanço mássico feito sem a correção do termo fonte trás um erro muito pequeno, provando assim que a equação do balanço mássico, usada na simulação do programa está corretamente implementada para o processo da lavanderia contínua.

Para analisar a eficiência de remoção de DQO das unidades caixa foram utilizadas as informações apresentadas nas Tabelas 5.32 e 5.33.

Tabela 5.32 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 2 remoção de DQO em mg/L.

Unidades Caixa	$\Delta C$ (remoção de DQO do tecido [mg/L])
1	1933,81
2	191,38
3	122,07
4	107,80
5	73,90
6	-321,62
$\Sigma = 2107,34$	

Tabela 5.33 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 2, remoção de DQO em gDQO/Kg tecido.

Unidade caixa	Água pick up [m <sup>3</sup> /h]	Água industrial [m <sup>3</sup> /h]	Insumo químico [m <sup>3</sup> /h]	Água de reciclo [m <sup>3</sup> /h]	DQO <sub>f</sub> [gDQO/Kg tecido]
1	2,75	9,00	0,00	0,00	7,01
2	3,24	0,00	0,00	16,50	1,17
3	3,24	9,00	0,00	7,50	0,74
4	3,24	7,50	0,00	0,00	0,36
5	3,24	0,00	0,00	2,16	0,12
6	3,24	0,00	0,90	0,00	-0,41
$\Sigma_{MAX} = 11,64$ % Remoção = 77,23%					$\Sigma = 8,99$

A unidade caixa que tem maior eficiência na remoção de DQO é a primeira, com 7,01 gDQO/Kg tecido. Na última caixa o valor negativo significa que ao invés de a caixa estar tirando DQO do tecido, este está adsorvendo, devido à entrada do insumo.

A relação de volume de água da ETA por massa de tecido processado é de 7,9L/Kg.

Na Figura 5.5 é apresentado um fluxograma alterando a disposição das correntes no processo.

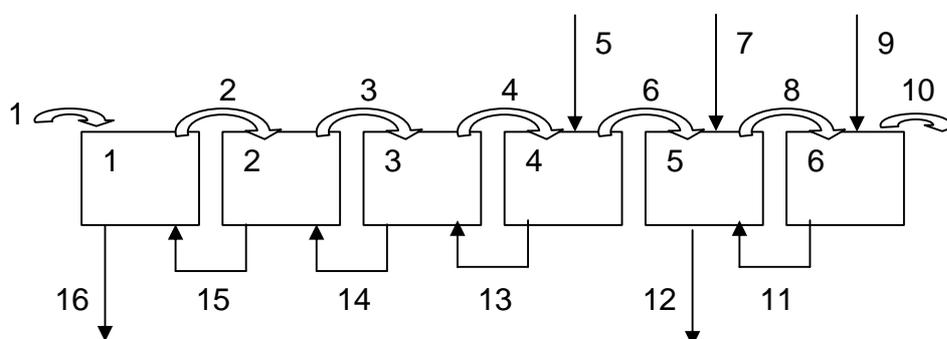


Figura 5.5 – Fluxograma da proposta de otimização da Lavanderia 2 – Caso A.

Comparando este fluxograma com o anterior, da Figura 5.4, a corrente número 5 é a junção das correntes 5 e 7 da Figura 5.4, e a corrente de saída da segunda caixa é enviada para a primeira.

As informações das correntes de entrada são apresentadas na Tabela 5.34.

Tabela 5.34 – Informações sobre as correntes de entrada da proposta de otimização da Lavanderia 2 – Caso A.

Número da corrente	Vazão [m <sup>3</sup> /h]	Concentração [mg/L]	Temperatura [°C]
1	2,75	13694,00	20,0
5	16,50	0,00	94,5
7	0,90	7898,00	40,0
9	9,00	0,00	65,0

O tecido foi considerado o mesmo, considerando sua velocidade, gramatura e largura iguais as anteriores. Nestas condições, não foi necessário um novo cálculo dos termos fontes, pois estes permanecem inalterados.

Os resultados da simulação obtidos para este novo caso, com os valores de vazão, temperatura e concentração estão nas Tabelas 5.35 e 5.36.

Tabela 5.35 – Valores de concentração (no tempo de 500 min) e temperatura das unidades caixas da proposta de otimização da Lavanderia 2 – Caso A.

Caixas	Concentração [mg/L]	Temperatura [°C]
1	1556,21	81,7
2	719,62	92,0
3	345,24	94,0
4	118,71	94,4
5	695,42	71,2
6	164,49	66,6

Tabela 5.36 – Valores de vazão, concentração (no tempo de 500 min) e temperatura para a proposta de otimização da Lavanderia 2 – Caso A.

Correntes	Vazão [m <sup>3</sup> /h]	Concentração [mg/L]	Temperatura [°C]
1	2,75	13694,00	20,0
2	3,24	1556,21	81,7
3	3,24	719,62	92,0
4	3,24	345,24	94,0
5	16,50	0,00	94,5
6	3,24	118,71	94,5
7	0,90	7898,00	40,0
8	3,24	695,42	71,2
9	9,00	0,00	65,0
10	1,98	164,49	66,6
11	10,26	164,49	66,6
12	11,16	695,42	71,2
13	16,50	118,71	94,4
14	16,50	345,24	94,0
15	16,50	719,62	92,0
16	16,01	1556,21	81,7

A eficiência de remoção de DQO de cada caixa deste modelo proposto de otimização pode ser analisada através dos resultados apresentados nas Tabelas 5.37 e 5.38.

Tabela 5.37 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 2 – Caso A, remoção de DQO em mg/L.

Unidades Caixa	$\Delta C$ (remoção de DQO do tecido [mg/L])
1	939,52
2	175,61
3	127,90
4	62,05
5	58,00
6	-19,59
	$\Sigma = 1343,49$

Tabela 5.38 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 2 – Caso A, remoção de DQO em gDQO/Kg tecido.

Unidade caixa	Água pick up [m <sup>3</sup> /h]	Água industrial [m <sup>3</sup> /h]	Insumo químico [m <sup>3</sup> /h]	Água de reciclo [m <sup>3</sup> /h]	DQO <sub>f</sub> [gDQO/Kg tecido]
1	2,75	0,00	0,00	16,50	5,58
2	3,24	0,00	0,00	16,50	1,07
3	3,24	0,00	0,00	16,50	0,78
4	3,24	16,50	0,00	0,00	0,38
5	3,24	0,00	0,90	10,26	0,26
6	3,24	9,00	0,00	0,00	-0,07
$\Sigma_{MAX} = 11,64$					$\Sigma = 8,00$
% Remoção = 68,73%					

A relação de volume de água da ETA por massa de tecido processado é de 7,9L/Kg.

Na Tabela 5.39 são apresentados os resultados referentes ao volume de água usado por massa de tecido seco, e a quantidade de massa de DQO removida por quilo de tecido seco, tanto para a Lavanderia 2 como para a alternativa proposta para a otimização.

Tabela 5.39 – Volume de água usada por massa de tecido seco e massa de DQO removida por massa de tecido seco [Lavanderia 2 - Caso A].

Processos	[L/Kg]	[gDQOremovido/Kg tecido]
Lavanderia 2	7,9	8,99
Proposta de otimização	7,9	8,00

Os resultados apresentados na Tabela 5.39 comprovam que o modelo proposto para a otimização do processo pode ser utilizado porque remove praticamente a mesma quantidade de DQO por massa de tecido seco que o atual.

Na Figura 5.6 é apresentado um fluxograma, alterando-se a disposição das correntes no processo, onde foi proposto que se acrescentasse um divisor de corrente (representado pelo número 7).

Comparando este fluxograma com da Figura 5.4, além de ter um divisor de corrente, a corrente de número 2, tem sua vazão reduzida de 9 m<sup>3</sup>/h para 5 m<sup>3</sup>/h.

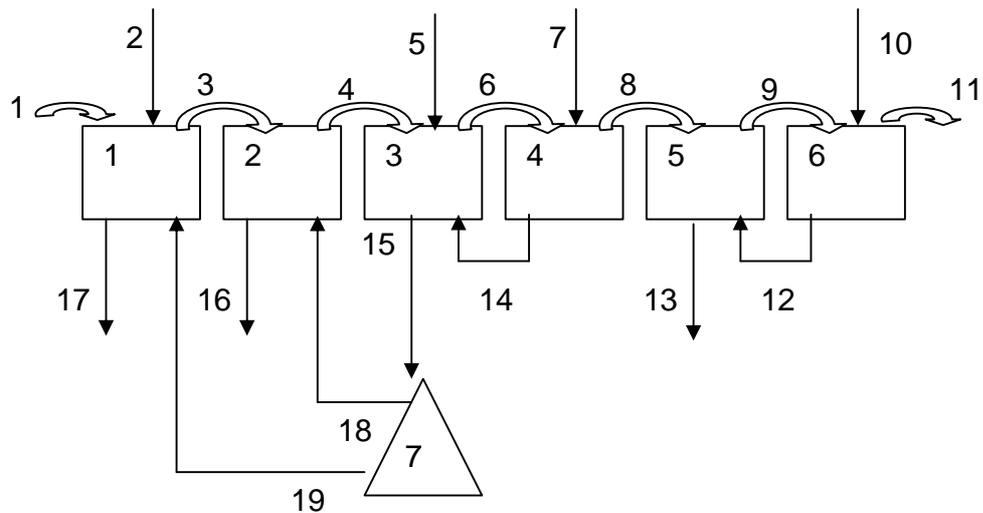


Figura 5.6 – Fluxograma da proposta de otimização da Lavanderia 2 – Caso B.

A Tabela 5.40 apresenta os valores de divisão de cada corrente de saída do divisor de correntes.

Tabela 5.40 – Informações sobre os fatores de divisão do divisor de correntes da proposta de otimização da Lavanderia 2 – Caso B.

Número da unidade de divisor de correntes	Corrente de saída	Fator de divisão
7	18	0,7
7	19	0,3

Todas as outras informações das correntes de entrada continuaram as mesmas, assim como o tipo de tecido, a sua velocidade, gramatura e a largura permaneceram iguais às especificadas anteriormente. Com isso, não foi necessário um novo cálculo dos termos fontes.

Os resultados obtidos após a simulação do processo de vazão, temperatura e concentração estão apresentados nas Tabelas 5.41 e 5.42.

Tabela 5.41 – Valores de concentração (no tempo de 500 min) e temperatura das unidades caixas da proposta de otimização da Lavanderia 2 – Caso B.

Caixas	Concentração [mg/L]	Temperatura [°C]
1	1886,21	67,7
2	967,65	90,6
3	409,11	97,0
4	259,83	78,1
5	1150,14	73,3
6	2290,76	66,1

Tabela 5.42 – Valores de vazão, concentração (no tempo de 500 min) e temperatura para a proposta de otimização da Lavanderia 2 – Caso B.

Correntes	Vazão [m <sup>3</sup> /h]	Concentração [mg/L]	Temperatura [°C]
1	2,75	13694,00	20,0
2	5,00	0,00	65,0
3	3,24	1886,21	67,7
4	3,24	967,65	90,6
5	9,00	0,00	115,0
6	3,24	409,11	97,0
7	7,50	0,00	70,0
8	3,24	259,83	78,1
9	3,24	1150,14	73,3
10	0,90	7898,00	40,0

11	1,98	2290,76	66,1
12	2,16	2290,76	66,1
13	2,16	1150,14	73,3
14	7,50	259,83	78,1
15	16,50	409,11	97,0
16	11,55	967,65	90,6
17	9,46	1886,21	67,5
18	11,55	409,11	97,0
19	4,95	409,11	97,0

Para analisar a eficiência de remoção de DQO de cada caixa deste modelo proposto de otimização foram utilizadas as informações apresentadas nas Tabelas 5.43 e 5.44.

Tabela 5.43 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 2 – Caso B, remoção de DQO em mg/L.

Unidades Caixa	$\Delta C$ (remoção de DQO do tecido [mg/L])
1	1726,80
2	234,96
3	151,56
4	136,42
5	77,11
6	-326,30
	$\Sigma = 2000,55$

Tabela 5.44 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 2 – Caso B, remoção de DQO em gDQO/Kg tecido.

Unidade caixa	Água pick up [m <sup>3</sup> /h]	Água industrial [m <sup>3</sup> /h]	Insumo químico [m <sup>3</sup> /h]	Água de reciclo [m <sup>3</sup> /h]	DQO <sub>f</sub> [gDQO/Kg tecido]
1	2,75	6,00	0,00	4,95	6,77
2	3,24	0,00	0,00	11,55	1,07
3	3,24	9,00	0,00	7,50	0,92
4	3,24	7,50	0,00	0,00	0,45
5	3,24	0,00	0,00	2,16	0,13
6	3,24	0,00	0,90	0,00	-0,42
$\Sigma_{MAX} = 11,64$					$\Sigma = 8,92$
$\% \text{ Remoção} = 76,63\%$					

A relação de volume de água da ETA por massa de tecido processado é de 6,6L/Kg.

Na Tabela 5.45 são apresentados os resultados referentes ao volume de água usado por massa de tecido seco, e a quantidade de massa de DQO removida por quilo de tecido seco, tanto para a Lavanderia 2 como para a alternativa proposta para a otimização.

Tabela 5.45 – Volume de água usada por massa de tecido seco e massa de DQO removida por massa de tecido seco [Lavanderia 2 - Caso B].

Processos	[L/Kg]	[gDQOremovido/Kg tecido]
Lavanderia 2	7,9	8,99
Proposta de otimização (Caso B)	6,6	8,92

Os resultados apresentados na Tabela 5.45 comprovam que o modelo proposto para a otimização do processo pode ser utilizado porque utiliza um menor volume de água por massa de tecido seco, e remove praticamente a mesma quantidade de DQO por massa de tecido seco que o atual.

### 5.3 – LAVANDERIA 3

A Figura 5.7 representa o processo da Lavanderia 3, onde as unidades e as correntes foram numeradas.

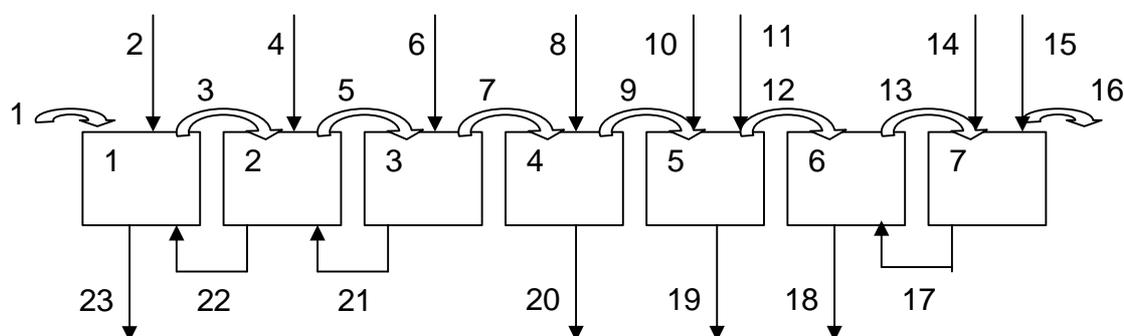


Figura 5.7 – Fluxograma da Lavanderia 3.

Neste processo está sendo lavado um tecido escuro, de cor vermelho escuro, gramatura de  $301\text{g/m}^2$ , largura de  $1,83\text{m}$  e velocidade de  $50\text{m/min}$ , com vazão de  $1,65$  toneladas de tecido lavado por hora.

O valor de DQO do tecido que saiu do banho de tingimento é de  $7,93\text{gDQO/Kg}$  de tecido, e do tecido lavado é  $2,93\text{gDQO/Kg}$  de tecido.

Neste processo, na corrente de número dez, é introduzido o ácido acético, que tem como objetivo neutralizar o pH. O tecido antes de passar pela unidade de caixa 7, passa por um “chuveiro”, e esta água entra na caixa 7, sendo computada pela corrente de número 15.

Na Tabela 5.46 estão os volumes de cada tanque assim como os valores de DQO de saída medidos em laboratório.

Tabela 5.46 – Informações sobre cada caixa da Lavanderia 3.

Caixas	Volume [L]	DQO de saída [mg/L]	Temperatura [°C]
1	1500,0	434,00	30,0
2	1000,0	314,00	50,0
3	1000,0	237,00	50,0
4	1000,0	842,00	50,0
5	3000,0	389,00	95,0
6	1000,0	264,00	95,0
7	1000,0	131,00	25,0

Os valores das correntes de entrada são conhecidos, e estão representados na Tabela 5.47.

Tabela 5.47 – Informações sobre cada corrente de entrada da Lavanderia 3.

Correntes	Vazão [m <sup>3</sup> /h]	Concentração [mg/L]	Temperatura [°C]
1	0,91	9090,00	20,0
2	7,25	0,00	10,0
4	3,63	0,00	50,0
6	4,35	0,00	50,0
8	2,42	0,00	50,0
10	0,12	2739,00	95,0

11	3,63	0,00	95,0
14	2,42	0,00	25,0
15	4,84	139,00	25,0

Os valores de pick up de cada corrente que vem com o tecido estão descritos na tabela 5.48.

Tabela 5.48 – Informações sobre o valor de cada pick up da Lavanderia 3.

Correntes de pick up	Valor do pick up
1	0,55
3	0,55
5	0,55
7	0,55
9	0,55
12	0,55
13	0,55
16	0,55

Com a simulação do processo a partir das informações anteriormente descritas obtêm-se os valores de vazão, concentração e temperatura de cada corrente e cada caixa, assim como os valores de remoção de DQO de cada caixa e do processo.

Os valores dos Termos Fonte calculados para cada unidade caixa estão representados na Tabela 5.49, assim como os valores de concentração (no tempo de 200 minutos) e temperatura.

Tabela 5.49 – Resultados das unidades caixas da Lavanderia 3.

Caixas	Termo Fonte	Concentração [mg/L]	Temperatura [°C]
1	-0,20	512,31	29,2
2	0,96	293,47	47,7
3	3,37	209,55	49,6
4	12,01	682,94	49,9
5	0,66	283,93	86,2
6	0,65	221,72	32,5
7	0,17	121,04	25,8

Analisando os valores da segunda coluna da Tabela 5.49, é possível chegar as seguintes conclusões:

- O termo fonte da primeira caixa é negativo porque nem toda a DQO que é dita entrando com o tecido está disponível na fase aquosa. Pois a DQO estimada de entrada foi um parâmetro levantado em laboratório, onde foi pega uma amostra de tecido vindo do banho de tingimento, e feitas sucessivas lavagens. Sendo assim, o valor de DQO muito elevado mesmo, pois foi retirada até a que estava adsorvida nas fibras.

- No restante das unidades caixas o termo fonte é positivo, isto significa que a atrição dos rolos das caixas e o tecido fizeram com que uma parte da DQO que estava adsorvida no tecido passasse para a fase líquida.

- Na unidade caixa número 4, o termo fonte é muito elevado. Isso se explica pelo fato que antes de ser lavado este tecido, foi feita a lavagem de outro com cor de intensidade média, e neste caso é adicionado ácido acético nesta caixa. E ao trocar o tecido, não é feita a limpeza de cada unidade caixa, logo, existe ainda ácido acético no banho da caixa 4, fazendo com que se tenha uma falsa imagem de que se esteja retirando muita DQO do tecido, o que não é verdade.

Os valores de vazão, concentração (no tempo de 200 minutos) e temperatura de cada corrente estão sendo apresentados da Tabela 5.50.

Tabela 5.50 – Valores de vazão, concentração (no tempo de 200 min) e temperatura para Lavanderia 3.

Correntes	Vazão [m <sup>3</sup> /h]	Concentração [mg/L]	Temperatura [°C]
1	0,91	9090,00	20,0
2	7,25	0,00	10,0
3	0,91	512,31	29,2
4	3,63	0,00	50,0
5	0,91	293,47	47,7
6	4,35	0,00	50,0
7	0,91	209,55	49,6
8	2,42	0,00	50,0
9	0,91	682,94	49,9
10	0,12	2739,00	95,0
11	3,63	0,00	95,0
12	0,91	283,93	86,2

13	0,91	221,72	32,5
14	2,42	0,00	25,0
15	4,84	139,00	25,0
16	0,91	121,04	25,8
17	7,26	121,04	25,8
18	7,26	221,72	32,5
19	3,75	282,93	86,2
20	2,42	682,94	49,9
21	4,35	209,55	49,6
22	7,98	293,47	47,7
23	15,23	512,31	29,2

Foram calculados os erros entre os valores de concentração e temperaturas experimentais (obtidos em laboratório) de cada unidade caixa os calculados através do programa, que são os chamados valores teóricos. Os resultados estão demonstrados na Tabela 5.51.

Foram feitos os cálculos do balanço global tanto com os dados experimentais como com os valores teóricos calculados sem a correção do termo fonte.

Na Tabela 5.52, estão os valores de concentração de cada corrente no estado estacionário, sem a correção com o termo fonte.

Tabela 5.51 – Valores dos erros calculados entre os valores experimentais e teóricos de concentração e temperatura de cada unidade caixa da Lavanderia 3.

Caixa	Concentração [Erro %]	Temperatura [Erro %]
1	18,04	2,69
2	6,54	4,65
3	11,58	0,80
4	18,89	0,22
5	27,01	9,26
6	16,01	65,73
7	7,60	3,36

Tabela 5.52 – Valores de concentração (no estado estacionário) das correntes sem a correção do termo fonte na Lavanderia 3.

Correntes	Concentração [mg/L]
1	9090,00
2	0,00
3	541,49
4	0,00
5	60,43
6	0,00
7	10,43
8	0,00
9	2,84
10	2739,00

11	0,00
12	70,83
13	89,83
14	0,00
15	139,00
16	92,28
17	92,28
18	89,83
19	70,83
20	2,84
21	10,43
22	60,43
23	541,49

Foram feitos os cálculos do balanço global tanto com os dados experimentais como com os valores teóricos calculados sem a correção do termo fonte e com a correção. Os valores obtidos estão representados na Tabela 5.53, onde a segunda coluna representa o balanço mássico das correntes de entrada e na terceira coluna o balanço mássico referente as correntes de saída, sendo que na quarta coluna estão os erros de fechamento dos balanços mássicos.

Tabela 5.53 – Valores dos erros nos balanços globais na Lavanderia 3.

Valores	$\Sigma$ Correntes de entrada [g/h]	$\Sigma$ Correntes de saída [g/h]	Erro [%]
Experimentais	9273,34	12142,06	30,93
Teóricos (com a correção do termo fonte)	9273,34	12236,02	31,95
Teóricos (sem a correção com o termo fonte)	9273,34	9255,52	0,19

O erro observado no fechamento do balanço mássico, feito com os valores experimentais obtido no processo da Lavanderia 3 pode ser atribuído a erros experimentais ocorridos durante as medições junto às empresas. Salienta-se que existe uma influência entre os possíveis erros ocorridos nas determinações de DQO (amostragem e ensaios laboratoriais) pela comunicação das correntes aquosas nas diversas unidades caixas. O erro na medida da DQO final da caixa acaba sendo acumulativo quando inserido no programa. Assim, o balanço mássico feito usando os valores de concentração corrigidos pelo termo fonte ( $\alpha$ ), tem que ser semelhante, como mostrado.

Já o erro do balanço mássico feito sem a correção do termo fonte trás um erro muito pequeno, provando assim que a equação do balanço mássico, usada na simulação do programa está corretamente implementada para o processo da lavanderia contínua.

Se fosse feita somente uma análise da Tabela 5.51, poderia ser dito que os resultados preditos pelo modelo não estariam de acordo com o obtidos junto à indústria, sendo este um modelo falho. Mas, ao se fazer o balanço mássico, é provado que os dados obtidos junto à indústria já vem carregado de um certo erro,

que acaba justificando os encontrados através da análise dos resultados gerados pelo programa.

Observa-se um erro muito grande na temperatura da unidade caixa 6, isto se deve ao sistema de aquecimento com vapor não quantificado na planilha de dados disponível para a realização desta simulação.

Para analisar a eficiência de remoção de DQO de cada caixa serão utilizados os resultados apresentados nas Tabelas 5.54 e 5.55.

A unidade caixa que tem maior eficiência na remoção de DQO é a primeira, com 3,59 gDQO/Kg tecido. Todas as unidades caixas tiveram valores positivos, o que significa que em todas elas existe uma remoção de DQO.

A relação de volume de água da ETA por massa de tecido processado é de 17,3L/Kg.

Tabela 5.54 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 3, remoção de DQO em mg/L.

Unidades Caixa	$\Delta C$ (remoção de DQO do tecido [mg/L])
1	367,20
2	138,54
3	158,83
4	625,72
5	79,16
6	82,66
7	14,01
	$\Sigma = 1466,12$

Tabela 5.55 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 3, remoção de DQO em gDQO/Kg tecido.

Unidade caixa	Água pick up [m <sup>3</sup> /h]	Água industrial [m <sup>3</sup> /h]	Insumo químico [m <sup>3</sup> /h]	Água de reciclo [m <sup>3</sup> /h]	DQO <sub>f</sub> [gDQO/Kg tecido]
1	0,91	7,25	0,00	7,98	3,59
2	0,91	3,63	0,00	4,35	0,75
3	0,91	4,35	0,00	0,00	0,51
4	0,91	2,42	0,00	0,00	1,26
5	0,91	3,63	0,12	0,00	0,22
6	0,91	0,00	0,00	7,26	0,41
7	0,91	7,26	0,00	0,00	0,07
Σ <sub>MAX</sub> = 5,00                      % Remoção = 136,20%					Σ = 6,81

Na Figura 5.8 é proposto que se acrescentasse ao processo um misturador (que seria a unidade número 8).

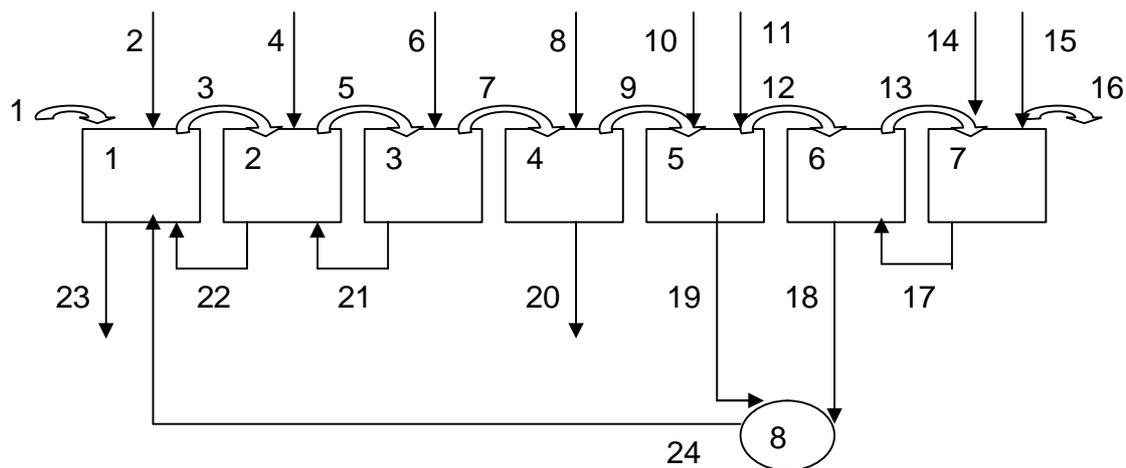


Figura 5.8 – Fluxograma da proposta de otimização da Lavanderia 3 – Caso A.

Comparando este fluxograma com o anterior, da Figura 5.7, neste caso foi adicionado um misturador e a corrente de número 2 teve sua vazão reduzida de 7,25 m<sup>3</sup>/h para 4 m<sup>3</sup>/h.

Todas as outras informações das correntes de entrada continuaram as mesmas, assim como o tecido, a sua velocidade e a largura, e a vazão de tecido lavado. Desta forma, não foi necessário um novo cálculo dos termos fontes.

Os resultados da simulação estão nas Tabelas 5.56 e 5.57.

Tabela 5.56 – Valores de concentração (no tempo de 200 min) e temperatura das unidades caixas da proposta de otimização da Lavanderia 3 – Caso A.

Caixas	Concentração [mg/L]	Temperatura [°C]
1	454,16	42,3
2	297,00	49,1
3	219,16	49,8
4	751,55	49,9
5	334,00	86,2
6	243,67	32,5
7	126,49	25,8

Tabela 5.57 – Valores de vazão, concentração (no tempo de 200 min) e temperatura para a proposta de otimização da Lavanderia 3 – Caso A.

Correntes	Vazão [m <sup>3</sup> /h]	Concentração [mg/L]	Temperatura [°C]
1	0,91	9090,00	20,0
2	4,00	0,00	10,0

3	0,91	454,46	42,2
4	3,63	0,00	50,0
5	0,91	297,00	49,1
6	4,35	0,00	50,0
7	0,91	219,16	49,8
8	2,42	0,00	50,0
9	0,91	751,55	49,9
10	0,12	2739,00	95,0
11	3,63	0,00	95,0
12	0,91	334,00	86,2
13	0,91	243,67	32,5
14	2,42	0,00	25,0
15	4,84	139,00	25,0
16	0,91	126,49	25,8
17	7,26	126,49	27,8
18	7,26	243,67	32,5
19	3,75	334,00	86,2
20	2,42	751,55	49,9
21	4,35	219,16	49,8
22	7,98	297,00	49,1
23	22,99	454,46	42,2
24	11,01	274,42	50,8

Nas Tabelas 5.58 e 5.59 são apresentadas informações que serão utilizadas para a análise da eficiência na remoção de DQO das unidades caixa.

A relação de volume de água da ETA por massa de tecido processado é de 15,3L/Kg.

Na Tabela 5.60 são apresentados os resultados referentes ao volume de água usado por massa de tecido seco, e a quantidade de massa de DQO removida por quilo de tecido seco, tanto para a Lavanderia 3 como para a alternativa proposta para a otimização.

Tabela 5.58 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 3 – Caso A, remoção de DQO em mg/L.

Unidades Caixa	$\Delta C$ (remoção de DQO do tecido [mg/L])
1	228,87
2	143,27
3	167,84
4	691,71
5	116,80
6	94,10
7	17,02
	$\Sigma = 1459,61$

Tabela 5.59 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 3 – Caso A, remoção de DQO em gDQO/Kg de tecido.

Unidade caixa	Água pick up [m <sup>3</sup> /h]	Água industrial [m <sup>3</sup> /h]	Insumo químico [m <sup>3</sup> /h]	Água de reciclo [m <sup>3</sup> /h]	DQO <sub>f</sub> [gDQO/Kg tecido]
1	0,91	4,00	0,00	18,99	3,31
2	0,91	3,63	0,00	4,35	0,77
3	0,91	4,35	0,00	0,00	0,53
4	0,91	2,42	0,00	0,00	1,39
5	0,91	3,63	0,12	0,00	0,33
6	0,91	0,00	0,00	7,26	0,46
7	0,91	7,26	0,00	0,00	0,08
$\Sigma_{MAX} = 5,00$ % Remoção = 137,40%					$\Sigma = 6,87$

Tabela 5.60 – Volume de água usada por massa de tecido seco e massa de DQO removida por massa de tecido seco (Lavanderia 3 – Caso A).

Processos	[L/Kg]	[gDQOremovido/Kg tecido]
Lavanderia 3	17,3	6,81
Proposta de otimização (Caso A)	15,3	6,87

Os resultados apresentados na Tabela 5.60 comprovam que o modelo proposto para a otimização do processo pode ser utilizado porque remove praticamente a mesma quantidade de DQO por massa de tecido seco que o atual, e utiliza um menor volume de água industrial por massa de tecido.

#### 5.4 – COMPARAÇÕES ENTRE AS TRÊS LAVANDERIAS

Um padrão esperado na lavanderia contínua é que a concentração final de DQO de cada caixa vá diminuindo, à medida que o tecido vai passando na seqüência das caixas pois ele vai ficando com menor quantidade de DQO para ser removida. A concentração só aumenta devido a reciclos ou adição de insumos como tensoativos ou ácidos orgânicos.

Na Tabela 5.61 estão os resultados dos cálculos dos erros dos balanços mássicos de cada lavanderia.

Tabela 5.61 – Erro referente aos balanços globais mássicos de cada lavanderia.

Lavanderias	Erros [%] (valores experimentais)	Erros [%] (valores teóricos)	Erros [%] (valores teóricos, sem a correção com o termo fonte)
1	22,91	24,98	0,06
2	16,73	19,03	0,01
3	30,93	31,95	0,19

Os erros dos balanços mássicos quando calculados com os valores de concentração sem o uso dos termos fonte são pequenos, e isto prova que a equação do balanço mássico usada na simulação do programa está corretamente implementada para o processo da lavanderia contínua.

Já os erros observados no fechamento do balanço mássico feito com os valores experimentais obtidos nos processos, podem ser atribuídos a erros experimentais ocorridos durante as medições junto às empresas, ou quando as medições foram realizadas, a concentração das unidades caixas não estivessem ainda em regime permanente.

Analisando os termos fontes, é possível concluir que quanto mais concentrada estiver a solução da caixa, mais difícil é esta caixa ter um termo fonte grande. Pois para isso é preciso extrair uma grande quantidade de DQO da fibra.

A Tabela 5.62 trás as informações de cada lavanderia sobre o volume de água gasto por massa de tecido, e também a massa de DQO removida por volume de água.

Tabela 5.62 – Informações sobre a eficiência de cada lavanderia.

Lavanderias	[L/Kg]	[mgDQOremovido/L]	[gDQOremovido/Kg]	% Remoção
1	12,7	2469,06	10,07	69,21
2	7,9	2107,34	8,99	77,23
3	17,3	1466,12	6,81	136,20

Com os dados da Tabela 5.62 é possível dizer que a lavanderia que é mais eficiente é a 2. Apesar da Lavanderia 3 remover 136,20% da DQO de entrada (este erro está dentro do esperado segundo o balanço mássico), a mais eficiente é a Lavanderia 2, que remove apenas 77,23% da DQO, mas utiliza um menor volume de água, além de poder ser otimizada.

Conforme pode ser verificado através das modificações propostas nas condições de operação das três lavanderias contínuas estudadas, a eficiência de remoção de DQO é influenciada pela estratégia de fluxo e reciclos das correntes das diferentes unidades caixas.

O software desenvolvido constitui-se em uma eficiente ferramenta para auxiliar na otimização da lavanderia contínua, podendo predizer, através da simulação, a concentração e temperatura das unidades caixas e das correntes associadas ao processo, assim como a vazão de cada corrente e a eficiência de remoção de cada unidade caixa.

## **CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

O setor industrial a cada dia que passa vem se preocupando mais com a questão da água e seu reuso. E as indústrias têxteis por utilizarem um elevado volume de água estão buscando alternativas de reuso que gerem soluções eficazes, minimizando o consumo de água e conseqüentemente menor geração de efluentes.

Este trabalho buscou contribuir para encontrar a melhor maneira de reusar as correntes aquosas em uma lavanderia contínua de um processo têxtil; empregando o reuso de correntes aquosas que são atualmente enviadas para o tratamento final. Através de seu reuso direto, ou sendo diluída com água da fonte, ou até mesmo diluindo-as entre si.

Para validar os algoritmos implementados e verificar a influência das variações no processo e seus efeitos na otimização visando a redução no consumo de água, foram apresentados casos de teste. Sendo estes, casos hipotéticos, sido construídos somente para validar os algoritmos implementados.

No primeiro caso estudado (Caso 1), foi simulado duas vezes um processo semelhante, com o mesmo número de caixas e correntes, mudando apenas os valores de vazão, concentração e temperatura das correntes de entrada, e a concentração de DQO na saída das caixas.

Neste caso foi comprovado que o programa está apto a simular processos com diferentes valores de correntes de entrada, e saída das caixas.

Com o segundo caso teste (Caso 2), ficou comprovado a correta implementação do algoritmo para o cálculo da convergência das correntes de corte. Foi criado um caso teste hipotético, onde foi simulado duas vezes, nas mesmas condições, alterando-se apenas o valor inicial das correntes de corte, obtendo-se os mesmos valores finais de vazão, concentração e temperatura. Seus resultados foram ilustrados na forma de gráficos, sendo estes começando ou não do zero, e com incrementos de tempo diferentes, comprovando assim a independência dos valores iniciais e a flexibilidade do software para a projeção dos resultados na forma de gráficos.

Foi comprovado que o algoritmo está apto a fazer cálculos com número de caixas diferentes.

A partir do terceiro caso (Caso 3) simulado conclui-se que é possível simular um processo e depois sugerir algumas alterações, visando a sua otimização. É possível a predição através da simulação das diferentes condições operacionais, de vazão, concentração e temperatura verificou-se que o algoritmo desenvolvido pode fazer o cálculo de processos variando-se as unidades, como por exemplo acrescentando misturadores e divisores de correntes, além de encontrar corretamente todos os reciclos do processo.

Foram estudados 3 casos reais, de indústrias têxteis catarinenses, nos quais foram feitas as simulações das condições operacionais de cada empresa e feita novas propostas de outras condições operacionais a fim de verificar a influência dos parâmetros modificados no processo. As principais conclusões a partir da simulação destes problemas foram:

- Nem toda a DQO removida no processo está inicialmente na fase fluida, a atrição dos rolos das unidades caixas com o tecido fazem com que uma parte da DQO adsorvida pela fibra passe para a fase líquida. Para que este efeito fosse

considerado no software desenvolvido foi adicionado um termo fonte, para compatibilizar o modelo com a situação real do processo. Este parâmetro atua ajustando o excedente de concentração de DQO estimada (atuando como fonte negativo) ou aporta acréscimos ao valor de concentração de DQO, resultante da ação de atrição dos rolos (atuando como fonte positivo). Ele depende do ajuste dos rolos, afinidade do corante pela fibra, mesmo considerando o corante hidrolisado, da gramatura e velocidade do tecido.

- Os resultados da simulação obtidos nos três casos das lavanderias demonstraram que os dados preditos pelo modelo estão com muita boa concordância com os obtidos junto ao processo industrial, concluindo assim que o modelo proposto no programa faz uma modelagem real do processo de uma lavanderia contínua. Por isso os erros observados no fechamento dos balanços mássicos obtidos nos processos analisados são atribuído a erros experimentais ocorridos durante as medições junto às empresas.

- O modelo proposto para a simulação dos processos de lavanderias contínua mostrou-se eficaz na otimização de processos com reciclo, sendo possível simular várias possibilidades de reuso para um único caso.

Com base nos estudos apresentados, é possível apresentar algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Introduzir outros parâmetros nos critérios de otimização como cor, turbidez, pH, etc;
- Acrescentar os custos envolvidos com a implementação da otimização;
- Estudar possibilidades de reuso usando processos regenerativos;
- Implementar modelos matemáticos de otimização, a fim de gerar propostas para o reuso das correntes de efluentes aquosos, considerando-se os custos associados ao envio, insumo, processos regenerativos entre outros.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ALMATÓ, M., ESPUÑA, A., PUIGJANER, L., **Optimisation of Water Use in Batch Process Industries**. Computers and Chemical Engineering, Vol. 23, 1427-1437, 1999.

ARAÚJO, M., CASTRO, E.M.M., **Manual de Engenharia Têxtil**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, Vol. 2, 1984.

BAGAJEWICZ, M.J., **A Review of Recent Design Procedures for Water Network in Refineries and Process Plants**. Computers and Chemical Engineering, Vol. 24, 2093-2113, 2000.

BARTH, F.T., BARBOSA, W.E.S., **Recursos Hídricos**. São Paulo, 1999. Disponível on-line em: <http://www.dec.feis.unesp.br/recursos.pdf>

BIRD, Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento.

BRAILE, P.M., CAVALCANTI, J.E.W.A., **Manual de Tratamento de Águas Residuárias Industriais**. CETESB, São Paulo, Brasil, 1993.

BRESAOLA J., R., CANTELLI, D.L., **Tratamento de Efluentes Líquidos de uma Indústria Têxtil e seu Reuso**. Anais do XXVII Congresso Interamericano de engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Alegre, 2000.

CARLIELI, C.M., BARCLAY, J.S., SHAW, C., WHEATLEY, A.D., BUCKLEY, C.A., **The Effect of Salts Used in Textile Dyeing in Microbial Decolourisation of a Reactive Azo Dye**. Environmental, V. 19, 1133-1137, 1998.

CASTRO V., A.S.C., ASENJO, E.O.B., SILVA, J., **Uma Ferramenta na Simulação / Visualização de Fluidos**. Revista de Pesquisa e Pós-Graduação, Erechim, RS, Brasil, 2000.

CIARDELLI, G., CORSI, L., MARCUCCI, M., **Membrane Separation for Wastewater Reuse in the Textile Industry**. Resources, Conservation and Recycling, V. 31, 189-197, 2000.

COELHO, C.C.S.R., **A Questão Ambiental Dentro das Indústrias de Santa Catarina: Uma Abordagem para o Segmento Industrial Têxtil**. Florianópolis, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas. Dissertação – Universidade Federal de Santa Catarina, 1996.

CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), **Resolução nº 20 do CONAMA**. Brasília, 1986.

CONCHON, J.A., **Tratamento de Efluentes na Indústria Têxtil**. Transcrição do artigo publicado na revista Base Têxtil, da Federación Argentina de la Industria Têxtil, nº 123, junho, 1999.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resoluções CONAMA: 1984/1991. IBAMA. Brasília. 1992.

CPRH – Companhia Pernambucana do Meio Ambiente. **Roteiro Complementar de licenciamento e fiscalização para tipologia têxtil**. Recife, 2001. Disponível on-line em: <http://www.cprh.pe.gov.br/downloads/roteiro-textil.pdf>

DHOLE, V.R., RAMCHANDANI, N., TAINSH, R.A., WASILEWSKI, M., **Make Your Process Water Pay for Itself**. Chemical Engineering, 103, 100-103, 1996.

EL-HALWAGI, M., MANOUSIOUTHAKIS, V., **Synthesis of Mass Exchange Networks**. American Institute of Chemical Engineering Journal, 8, 1233-1244, 1989.

EPA, United States Environmental Protection Agency. **Best Management Practices for Pollution Prevention in the Textile Industry**. Washington, Office of Compliance, 296p., 1996.

FAEM, Fundação Estadual do Meio Ambiente.  
<http://www.feam.br/Consultas/Html%20D%20-%20L/indica.htm>

FARIA, D.C., **Reuso das Correntes de Efluentes Aquosos em Refinarias de Petróleo**. Florianópolis, 2004. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina.

FEITKENHAUER, H., MEYER, U., **Integration of Biotechnological Wastewater Treatment Units in Textile Finishing Factories: from end of the pipe Solutions to Combined Production and Wastewater Treatment Units**. Journal of Biotechnology 89 (2001) 185–192.

FELLENBERG, G., **Introdução aos Problemas da Poluição Ambiental**. São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo, 1980.

FOLHA DE SÃO PAULO, nº11, ano 3, 15/10/2004.

FREITAS, K.R., GUELLI U. SOUZA, S.M.A., ULSON DE SOUZA, A.A., **Caracterização e Reuso de Efluentes do Beneficiamento da Indústria Têxtil**. IX Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas, 2002.

KUNZ, A., ZAMORA, P.P., MORAES, S.G., DURAN, N., **Novas Tendências no Tratamento de Efluentes Têxteis**. Química Nova, Vol. 25, nº1, 78-82, 2002.

LINHOFF, B., HINDMARSH, E., **The Pinch Design Method for Heat Exchanger Networks**. Chemical Engineering Science, 38, 745-763, 1983.

MACHADO, C.J.S., **Ciência Cultura**., nº4, 22-26, outubro/ novembro/ dezembro, 2003.

NUNES, J.A., **Tratamento Físico-Químico de Águas Residuárias Industriais**. 2° Ed., Gráfica Editora J.Andrade, Aracajú, 1996.

O'NEILL, C., HAWKES, F.R., HAWKES, D.L., LOURENÇO, N.D., PINHEIRO, H.M., DELEE, W. **Colour in Textile Effluents – Sources, Measurements, Discharge Consents and Simulation: a Review.** Journal of Chemical Technology and Biotechnology, V. 74, 1009-1018, 1999.

PAGGA, U., BROWN, D., **The Degradation of Dyestuffs: Part II – Behavior of Dyestuffs in Aerobic Biodegradation Tests.** Chemosphere, V. 15, n° 4, 479-491, 1986.

PUIGJANER, L., ESPUÑA, A., ALMATÓ, M., **A Software Tool for Helping in Decision-Making About Water Management in Batch Process Industries.** Waste Management, V. 20, 645-649, 2000.

Resultados e Expectativas do Setor Têxtil, 10/08/2004. Disponível em: <http://www.brasilnews.com.br/fonte2.php3?Codreg=969&CodNext=999>

SANTOS, A.B., SANTAELLA, S.T., **Remoção de DQO de Água Residuária de Indústria Têxtil Empregando o Processo de Lodos Ativados em Batelada.** Engenharia Sanitária e Ambiental, Artigo Técnico, Vol. 7, n° 4, 151-155, out/dez 2002.

TIERNAN, J.C., **“An Efficient Search Algorithm to Find the Elementary Circuits of a Graph”**, Comm. ACM, 13, 722, 1970.

ULSON DE SOUZA, A.A., **Desenvolvimento de um Programa Executivo para a Simulação de Processos Químicos.** Campinas. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, 1985.

VIEIRA, D.P., **Facilitadores no Processo de Inovação Tecnológica.** Florianópolis, Departamento de Engenharia de Produção, Programa de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, 1995.

ZANONI, M.V.B., CARNEIRO, P.A., **O descarte dos corantes têxteis.** Ciência Hoje, agosto de 2001.

WANG, Y., SMITH, R., **Waster Minimisation**. Chemical Engineering Science, 49, 981-1006, 1994a.

WANG, Y., SMITH, R., **Design of Distributed Effluent Treatment**. Chemical Engineering Science, 49, 3127-3145, 1994b.

WORLD BANK GROUP. **Pollution Prevention and Abatement Handbook**. P. 408-412, 1998.

**ANEXO 1 – Diagnósticos de erros**

Este anexo apresenta algumas Figuras constando os diagnósticos de erros (mensagens de advertência), caso algum erro seja detectado, permitindo assim que a correção seja feita.

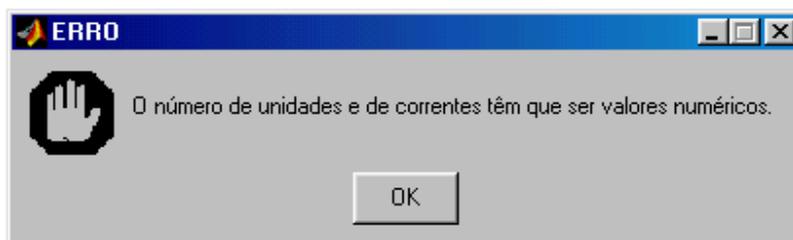


Figura A1. 1 – Erro associado à entrada do número de unidades e correntes.

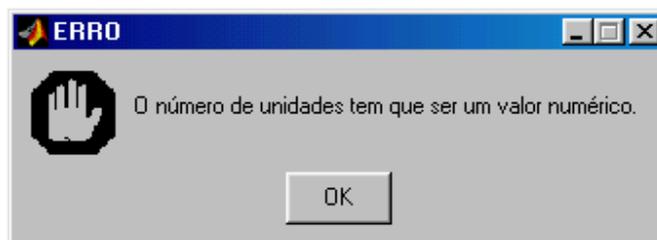


Figura A1. 2 – Erro associado à entrada do número de unidades.

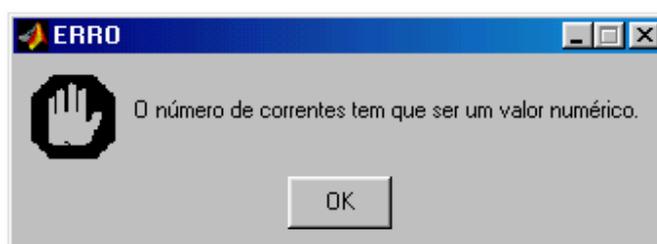


Figura A1. 3 – Erro associado à entrada do número de correntes.

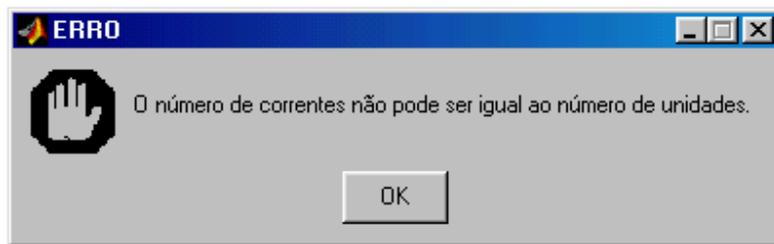


Figura A1. 4 – Erro associado à entrada do número de unidades e correntes:  $(NC=NU)$ .

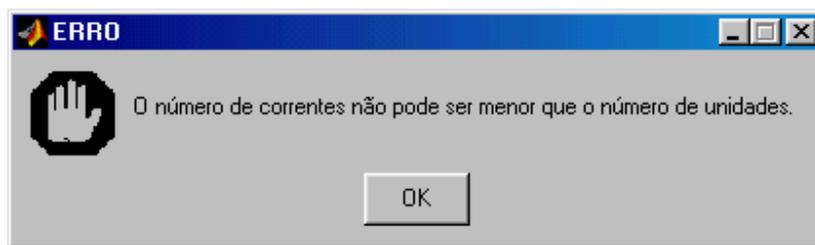


Figura A1. 5 – Erro associado à entrada do número de unidades e correntes:  $(NC < NU)$ .

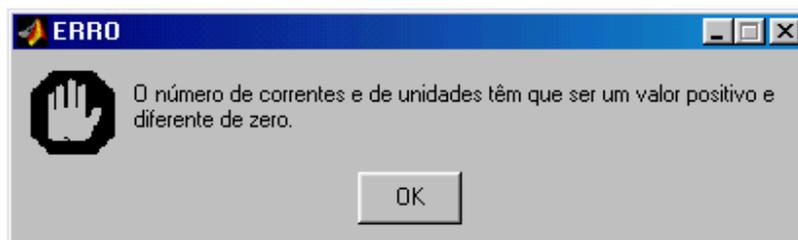
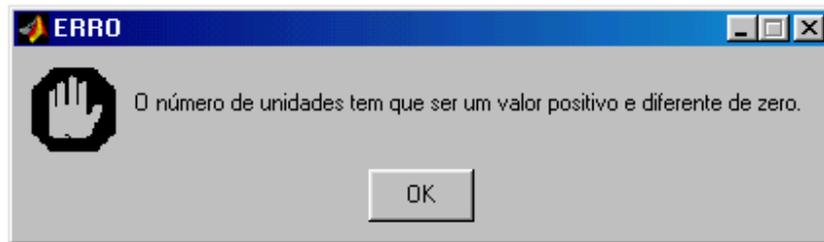
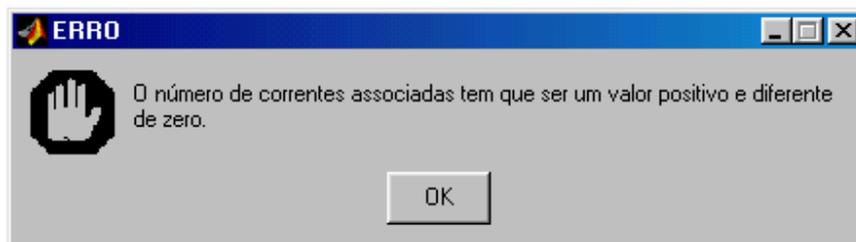
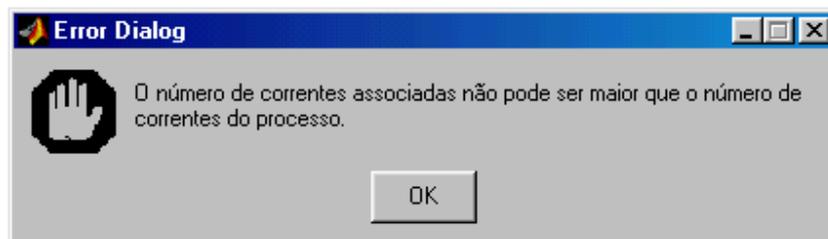


Figura A1. 6 – Erro associado à entrada do número de unidades e correntes:  $(NC \leq 0 \text{ e } NU \leq 0)$ .

Figura A1. 7 – Erro associado à entrada do número de unidades:  $(NU \leq 0)$ .Figura A1. 8 – Erro associado à entrada de dado da topologia do processo:  $NCA1 \leq 0$ .Figura A1. 9 – Erro associado à entrada de dado da topologia do processo:  $NCA1 > NC$ .

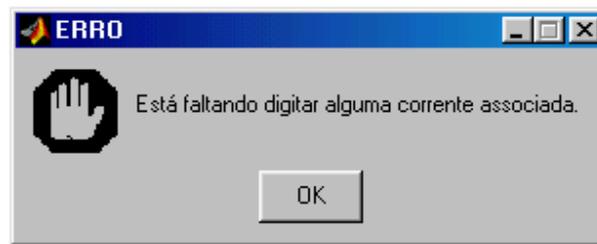


Figura A1. 10 – Erro associado à entrada de dado da topologia do processo:  $m < NCA1$ .

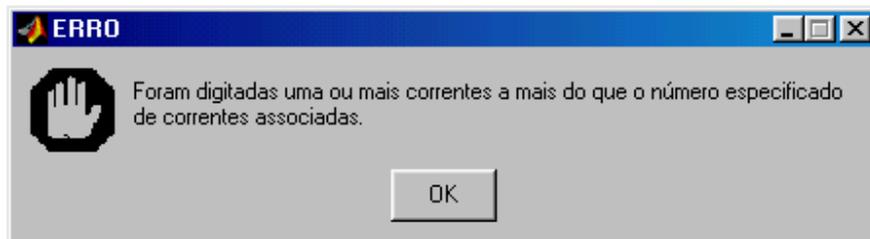


Figura A1. 11 – Erro associado à entrada de dado da topologia do processo:  $m > NCA1$ .

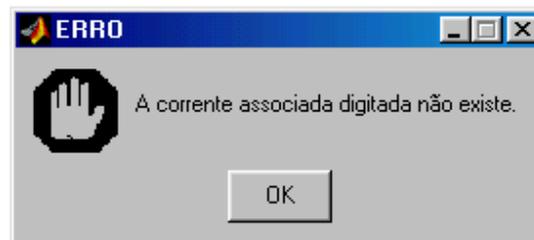


Figura A1. 12 – Erro associado à entrada de dado da topologia do processo:  $abs(MP3(i,j)) > NC$ .

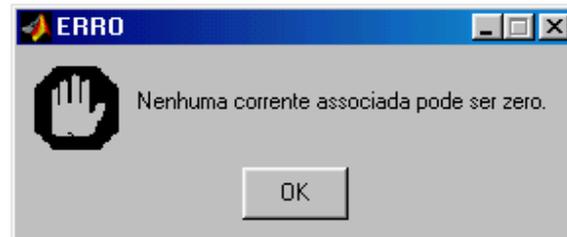


Figura A1. 13 – Erro associado à entrada de dado da topologia do processo:  $MP3(i,j)=0$ .

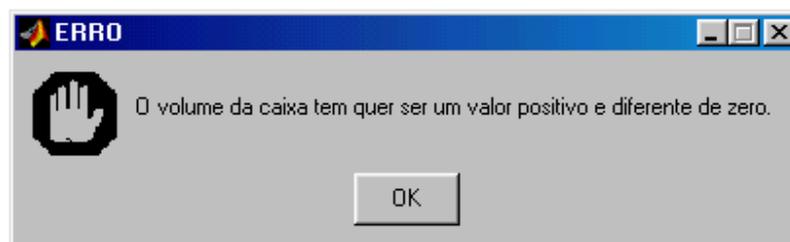


Figura A1. 14 – Interface caso o valor do volume da caixa fornecido seja errado, menor ou igual a zero.

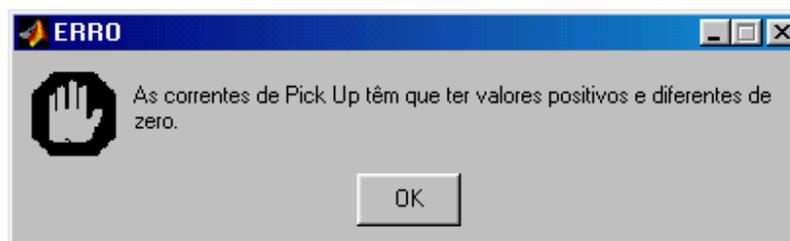


Figura A1. 15 – Interface caso as correntes de pick up fornecidas estejam fora de valores aceitáveis.

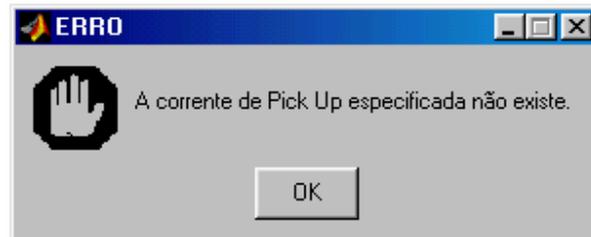


Figura A1. 16 – Interface caso as correntes de pick up fornecidas não existam.

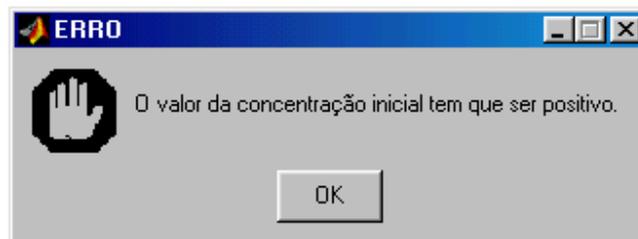


Figura A1. 17 – Interface caso a concentração inicial da caixa fornecida seja menor que zero.

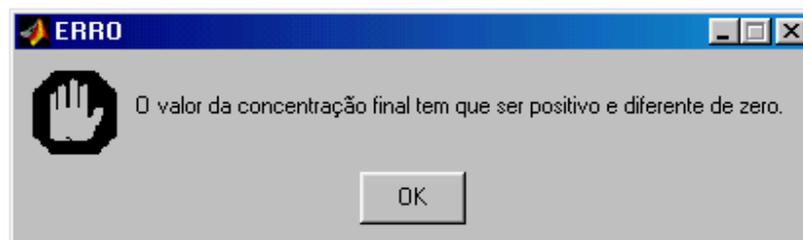


Figura A1. 18 – Interface para o caso do valor da concentração final da caixa seja menor ou igual a zero.

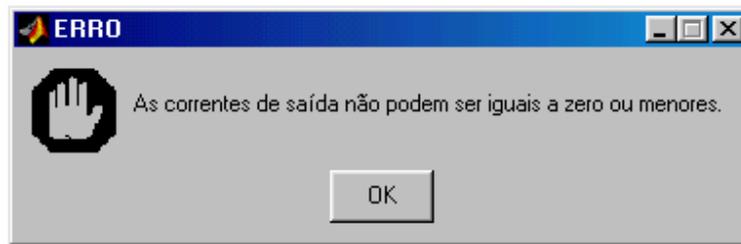


Figura A1. 19 – Interface para o caso do valor fornecido como corrente de saída seja menor ou igual a zero.

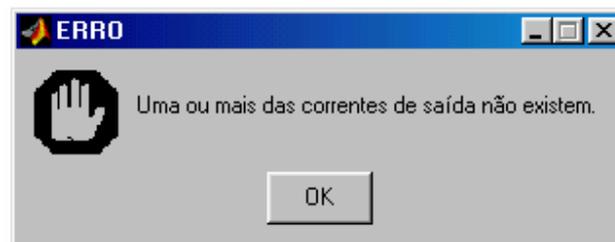


Figura A1. 20 – Interface projetada caso o valor fornecido como corrente de saída seja maior que o número de correntes do processo.

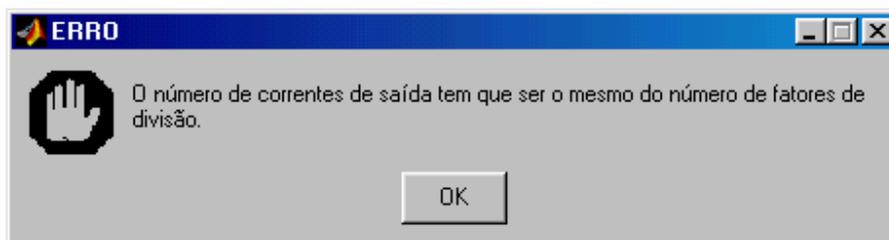


Figura A1. 21 – Interface para o caso da quantidade de correntes de saída fornecidas não seja a mesma que o de fatores de divisão.

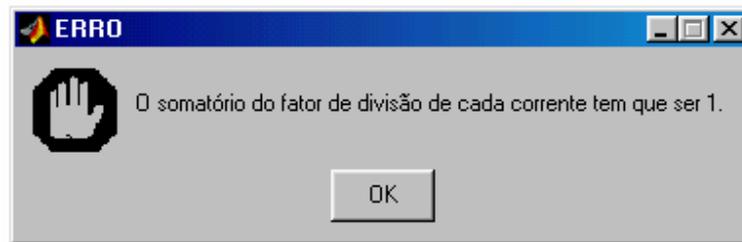


Figura A1. 22 – Interface caso o somatório dos fatores de divisão de todas as correntes de saída da unidade forem diferente de 1.

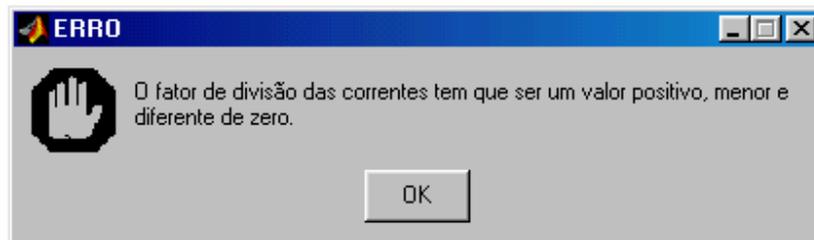


Figura A1. 23 – Interface caso um dos fatores de divisão das correntes seja um valor negativo ou zero.

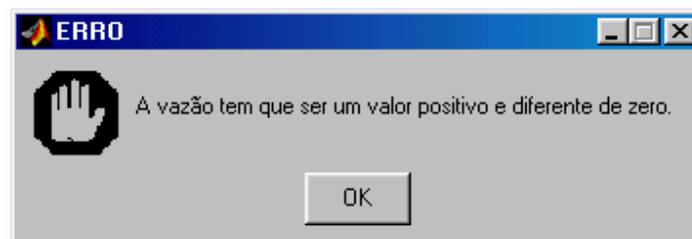


Figura A1. 24 – Interface de aviso de erro caso a vazão fornecida seja um valor negativo ou zero.

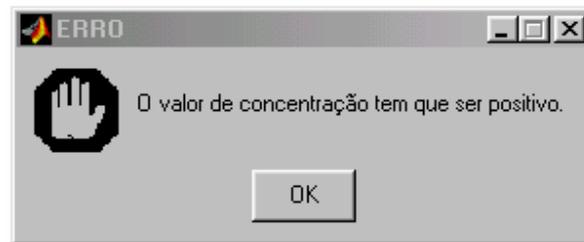


Figura A1. 25 – Interface de aviso de erro caso a concentração fornecida seja um valor negativo.

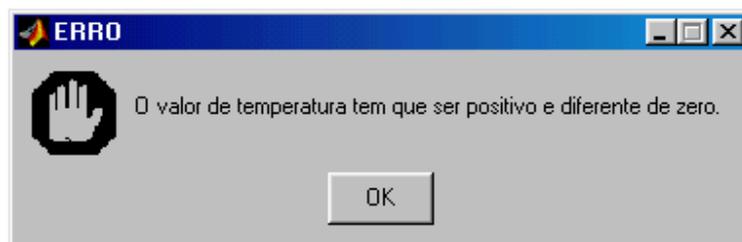


Figura A1. 26 – Interface de aviso de erro caso a temperatura fornecida seja um valor negativo ou nulo.

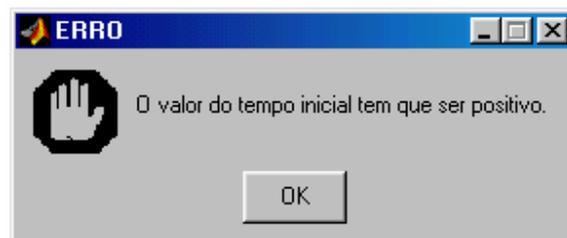


Figura A1. 27 - Erro associado à entrada do valor do tempo inicial.

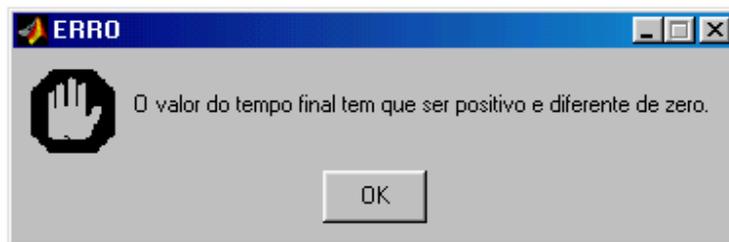


Figura A1. 28 - Erro associado à entrada do valor do tempo final.

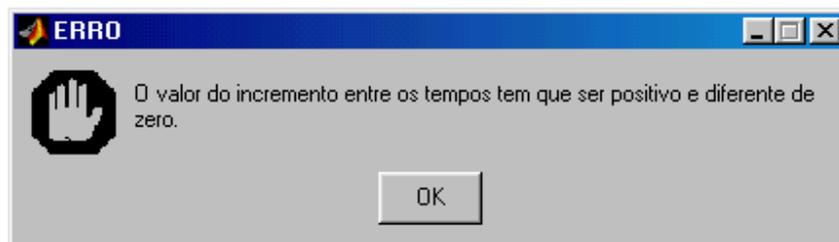


Figura A1. 29 - Erro associado à entrada do valor do incremento entre os tempos.

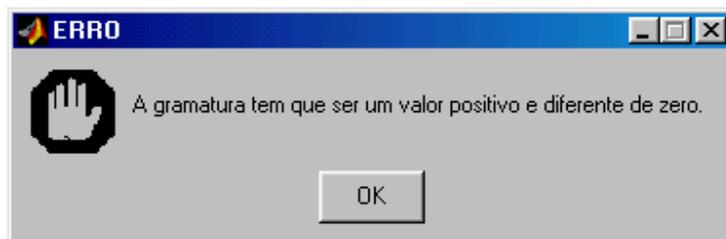


Figura A1. 30 – Erro associado ao valor da gramatura.

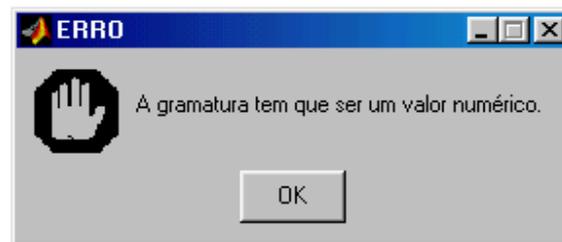


Figura A1. 31 – Erro associado ao valor da gramatura.

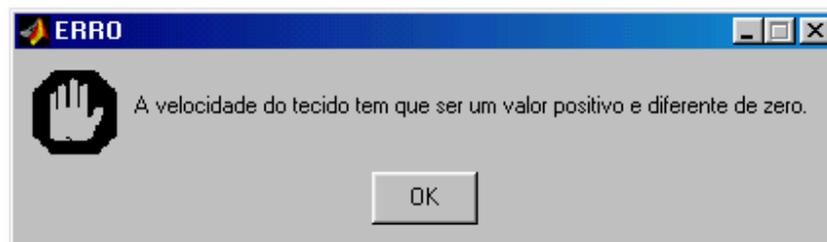


Figura A1. 32 – Interface de erro caso a velocidade do tecido fornecida seja um valor negativo ou zero.

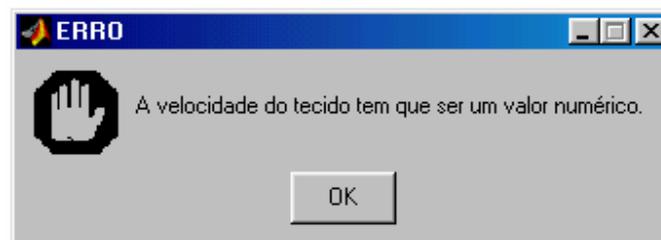


Figura A1. 33 – Interface de erro caso a velocidade do tecido fornecida não seja um valor numérico.

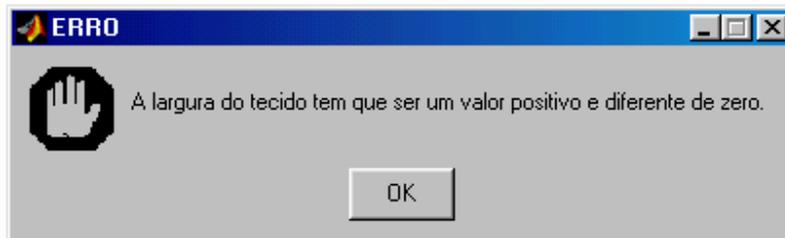


Figura A1. 34 – Interface de erro caso a largura do tecido fornecida seja um valor negativo ou zero.

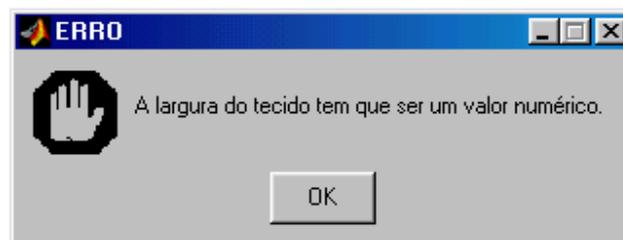


Figura A1. 35 – Interface de erro caso a largura do tecido fornecida não seja um valor numérico.

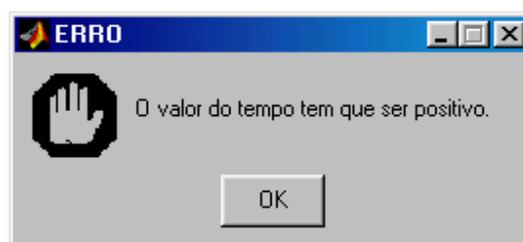


Figura A1. 36 – Erro associado ao valor do tempo estabelecido para o cálculo, caso o valor do tempo fornecido seja negativo.

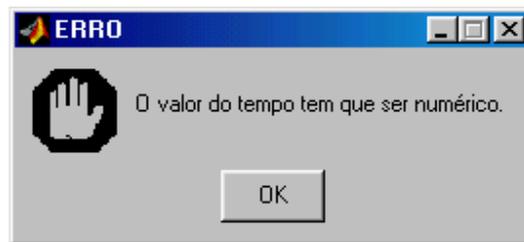


Figura A1. 37 – Erro associado ao valor do tempo estabelecido para o cálculo, caso o valor do tempo fornecido não seja numérico.

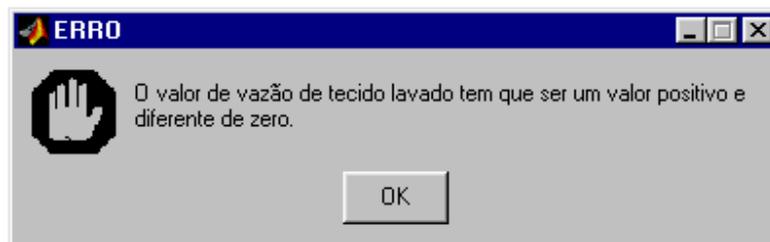


Figura A1. 38 – Erro associado ao valor da vazão de tecido lavado, caso o valor seja negativo ou zero.

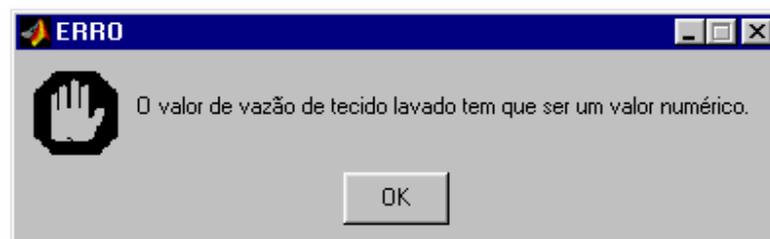


Figura A1. 39 – Erro associado ao valor da vazão de tecido lavado, caso o valor não seja numérico.

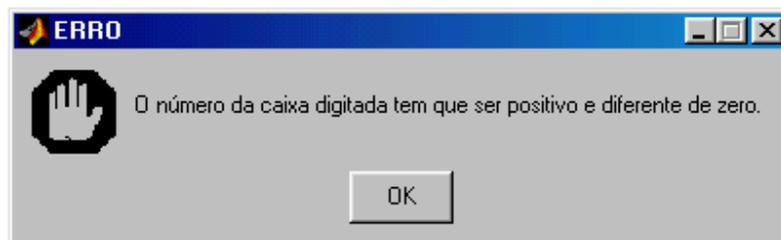


Figura A1. 40 – Erro associado ao valor do número da caixa escolhida para fazer o gráfico, caso o valor fornecido seja negativo ou zero.

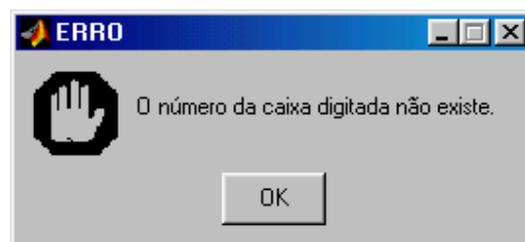


Figura A1. 41 – Erro associado ao valor do número da caixa escolhida para fazer o gráfico.

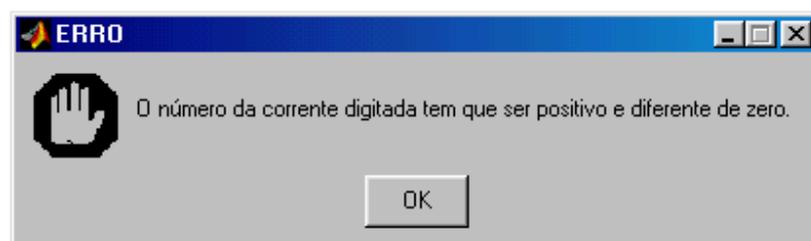


Figura A1. 42 – Erro associado ao valor do número da corrente escolhida para fazer o gráfico da sua variação de DQO com o tempo.

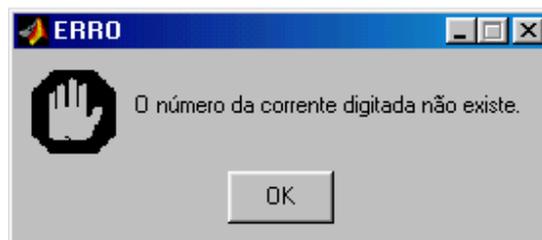


Figura A1. 43 – Erro associado ao valor do número da corrente escolhida para fazer o gráfico.