

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

USO INTEGRADO E EFICIENTE DA ÁGUA NAS INDÚSTRIAS TÊXTEIS CATARINENSES

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química para
obtenção do título de Doutor em Engenharia Química.

Aline Resmini Melo

Orientador: Prof. Dr. Antônio Augusto Ulson de Souza
Co-orientadores: Prof. Dr. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa
 Prof. Dra. Selene Maria de Arruda Guelli Ulson de Souza

Florianópolis, dezembro de 2008.

CONFIDENCIAL

Este documento é parte integrante dos resultados do projeto INOTEXTIL/FINEP e seu conteúdo está protegido pelo caráter de confidencialidade, sendo expressamente proibida a divulgação, parcial ou total, do conteúdo do mesmo, por qualquer meio, ou mesmo a utilização total ou parcial de qualquer procedimento, teoria, algoritmo decorrente da presente pesquisa sem autorização prévia dos autores. Os autores reservam os direitos de patentear ou registrar o invento, modelo de utilidade, algoritmo, software, desenho industrial ou outra criação, fruto desta pesquisa apoiada no CONVÊNIO FINEP, antes referido, no Instituto Nacional da Propriedade Industrial - INPI ou equivalente. Desde já ficando estendida esta reserva a quaisquer alterações que venham a ser consubstanciadas em futuras atualizações, modificações ou derivações tecnológicas.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Edi e Zuleica, e a minha irmã, Carolina, pelo apoio, estímulo e carinho ao longo deste e de todos os outros desafios de minha vida.

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

Ao Professor Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, que com toda a sua calma conseguiu me ensinar muitas coisas em tão pouco tempo. Das quais foram essenciais para a elaboração de todo este trabalho.

À Professora Selene Maria de Arruda Guelli Ulson de Souza, que contribuiu para o bom desenvolvimento deste trabalho.

Aos queridos colegas que passaram ou ainda permanecem no LABSIN e LABMASSA, os quais sempre se mostraram dispostos a contribuir e auxiliar 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, em especial ao Edevilson.

Ao amigo João, com todo o meu carinho, que me apoiou, incentivou e me mostrou o caminho da tranquilidade e da fé.

Às amigas Kenia e Karine, que mesmo parecendo a elas um pequeno gesto o que fizeram por mim, na verdade me auxiliaram muito, tanto na apresentação deste trabalho como no meu futuro profissional.

Aos amigos José Luiz, Renata e Susana, que se mostraram amigos de verdade, para todas as horas. Obrigada pelo apoio, pela companhia do início ao fim da minha apresentação.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	VI
LISTA DE FIGURAS	X
RESUMO	XII
ABSTRACT	XIII
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 – CONTRIBUIÇÕES DO PRESENTE TRABALHO	2
1.2 – ESTRUTURA BÁSICA	4
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 – CONSERVAÇÃO E USORACIONAL DA ÁGUA	6
2.2 – QUALIDADE DA ÁGUA E CARACTERIZAÇÃO DOS EFLUENTES NO PROCESSO TÊXTIL.....	11
2.3 – EVOLUÇÃO DA LEGISLAÇÃO DO BRASIL.....	15
2.4 – O SETOR TÊXTIL BRASILEIRO	20
2.5 – PROCESSO PRODUTIVO TÊXTIL.....	23
2.5.1 – Beneficiamento (produção da fibras)	24
2.5.2 – Fiação (produção do fio).....	24
2.5.3 – Tecelagem e malharia (produção do tecido).....	25
2.5.4 – Acabamento (tingimento, amaciamento e/ou estamparia).....	26
2.5.5 – Confeccção (produção da roupa).....	28
2.6 – TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE ÁGUA	28
2.7 – INTERFACE GRÁFICA DE USUÁRIO.....	33
2.8 – O MÉTODO DO DIAGRAMA DE FONTES DE ÁGUA	34
2.8.1 – Reúso Máximo	35
2.8.2 – Restrição de vazão.....	43
2.8.3 – Múltiplas Fontes de Água.....	44
2.8.4 – Regeneração com Reúso.....	44
CAPÍTULO 3 - DESENVOLVIMENTO DOS ALGORITMOS COMPUTACIONAIS.....	45
3.1 – ESTRUTURAÇÃO DO PROGRAMA PRINCIPAL	45
3.2 – INTERFACE – DADOS DE ENTRADA E RESULTADOS	48
3.3 – CÁLCULO DAS MATRIZES	54
3.3.1 – Matriz do Processo	55
3.3.2 – Matriz de Incidências.....	56
3.3.3 – Matriz Conexão das Correntes.....	57
3.3.4 – Matriz de Adjacências.....	57
3.4 – IDENTIFICAÇÃO DOS RECICLOS.....	58
3.5 – DETERMINAÇÃO DAS CORRENTES DE CORTE.....	60
3.6 – DETERMINAÇÃO DA SEQÜÊNCIA DE CÁLCULOS	61
3.7 – CÁLCULO DOS FATORES FONTE	61
3.8 – PROCESSAMENTO DAS UNIDADES MODULARES	63
3.8.1 – Ponto de Mistura	64
3.8.2 – Divisor de Correntes.....	65
3.8.3 – Unidade Caixa.....	66
3.9 – TESTE DE CONVERGÊNCIA DOS RESULTADOS	67
3.10 – EQUAÇÃO PARA O CÁLCULO DE REMOÇÃO DE DQO DO TECIDO.....	68
CAPÍTULO 4 – DFA MODIFICADO.....	70
4.2 – MODELO MATEMÁTICO.....	70
4.3 – REÚSO MÁXIMO.....	73
4.4 – RESTRIÇÃO DE VAZÃO.....	77
4.5 – MÚLTIPLAS FONTES DE ÁGUA	77
4.6 – REGENERAÇÃO COM REÚSO.....	80

4.7 – AVALIAÇÃO ECONÔMICA	81
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	84
5.1 – RESULTADOS	84
5.2 – LAVANDERIA 1	84
5.2.1 – DFA Modificado utilizando o caso de Reúso Máximo	90
5.2.2 – DFA Modificado utilizando o caso de Restrição de Vazão.....	97
5.3 – LAVANDERIA 2	101
5.3.1 – DFA Modificado utilizando o caso de Múltiplas Fontes de Água.....	105
5.4 – LAVANDERIA 3	112
5.4.1 – DFA Modificado utilizando o caso de Regeneração com Reúso.....	116
5.5 – LAVANDERIA 4	123
5.5.1 – Caso de Reúso Máximo	127
5.5.2 – Caso de Restrição de Vazão.....	133
5.5.3 – Caso de Múltiplas Fontes de Água	137
5.5.4 – Caso de Regeneração com Reúso	141
5.5.5 – Resultados da Avaliação Econômica.....	146
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	149
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	151
APÊNDICE 1 – MEMÓRIA DE CÁLCULO PARA O DFA MODIFICADO DA FIGURA 5.2.....	156

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Cargas das águas residuais das indústrias têxteis da Alemanha.	13
Tabela 2.2 – Classes de água de reúso pela NBR-13.969 e padrões de qualidade.	18
Tabela 2.3 – Dados do problema exemplo (Yang <i>et al.</i> , 2000).	35
Tabela 2.4 – Comparação do consumo de água fresca no processo com e sem reúso de água.	43
Tabela 3.1 - Matriz do Processo referente ao diagrama de informações da Figura 3.10.	55
Tabela 3.2 – Matriz de Incidências referente ao diagrama de informação da Figura 3.10.	56
Tabela 3.3 – Matriz Conexão das Correntes referente ao diagrama de informações da Figura 3.10.	57
Tabela 3.4 – Matriz de Adjacências referente ao diagrama de informações da Figura 3.10.	58
Tabela 4.1 – Dados para a avaliação econômica (Wang e Smith, 1994b; Gomes, 2002).	82
Tabela 5.1 – Informações sobre cada caixa da Lavanderia 1.	85
Tabela 5.2 – Informações sobre cada corrente de entrada da Lavanderia 1.	86
Tabela 5.3 – Informações sobre o valor de cada pick up da Lavanderia 1.	86
Tabela 5.4 – Resultados das unidades caixas da Lavanderia 1.	87
Tabela 5.5 – Valores de vazão e concentração (no regime estacionário) para Lavanderia 1.	89
Tabela 5.6 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 1, remoção de DQO em mg/L e gDQO/Kg tecido.	90
Tabela 5.7 – Informações de cada operação da Lavanderia 1, para o caso de Reúso Máximo do DFA Modificado.	91
Tabela 5.8 – Informações de cada operação da Lavanderia 1, para a construção dos intervalos do DFA Modificado para o caso de Reúso Máximo.	91
Tabela 5.9 – Matriz do Processo referente à Lavanderia 1A.	94
Tabela 5.10 – Informações sobre os fatores de divisão do divisor de correntes da Lavanderia 1A.	95
Tabela 5.11 – Informações das correntes de entrada da Lavanderia 1A.	95
Tabela 5.12 – Valores de concentração (no regime estacionário) das unidades caixas da Lavanderia 1A.	95
Tabela 5.13 – Comparação do consumo de água tratada no processo da Lavanderia 1 e da Lavanderia 1A.	96
Tabela 5.14 – Resultados da avaliação econômica da Lavanderia 1.	97

Tabela 5.15 – Informações de cada operação da Lavanderia 1A, para o caso de Restrição de Vazão do DFA Modificado.....	98
Tabela 5.16 – Matriz do Processo referente à Lavanderia 1B.	99
Tabela 5.17 – Informações das correntes de entrada da Lavanderia 1B.	99
Tabela 5.18 – Informações sobre os fatores de divisão do divisor de correntes da Lavanderia 1B.....	100
Tabela 5.19 – Informações sobre cada caixa da Lavanderia 2.....	102
Tabela 5.20 – Informações sobre cada corrente de entrada da Lavanderia 2.	103
Tabela 5.21 – Informações sobre o valor de cada pick up da Lavanderia 2.....	103
Tabela 5.22 – Resultados das unidades caixas da Lavanderia 2.	103
Tabela 5.23 – Valores de vazão e concentração (no regime estacionário) para Lavanderia 2.....	104
Tabela 5.24 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 2, remoção de DQO em mg/L e gDQO/Kg tecido.....	105
Tabela 5.25 – Valores de vazão e concentração da fontes de água.....	106
Tabela 5.26 – Informações de cada operação da Lavanderia 2, para o caso de Reúso Máximo do DFA Modificado.	106
Tabela 5.27 – Informações de cada operação da Lavanderia 2, para a construção dos intervalos do DFA Modificado para o caso de Múltiplas Fontes de Água.	107
Tabela 5.28 – Matriz do Processo referente à Lavanderia 2A.	107
Tabela 5.29 – Informações sobre os fatores de divisão do divisor de correntes da Lavanderia 2A.	109
Tabela 5.30 – Informações das correntes de entrada da Lavanderia 2A.	110
Tabela 5.31 – Valores de concentração (no regime estacionário) das unidades caixas da Lavanderia 2A.....	110
Tabela 5.32 – Comparação do consumo de água tratada no processo da Lavanderia 2 e da Lavanderia 2A.....	111
Tabela 5.33 – Resultados da avaliação econômica da Lavanderia 2.	112
Tabela 5.34 – Informações sobre cada caixa da Lavanderia 3.....	113
Tabela 5.35 – Informações sobre cada corrente de entrada da Lavanderia 3.	113
Tabela 5.36 – Informações sobre o valor de cada pick up da Lavanderia 3.....	114
Tabela 5.37 – Resultados das unidades caixas da Lavanderia 3.	114
Tabela 5.38 – Valores de vazão e concentração (no regime estacionário) para Lavanderia 3.....	115
Tabela 5.39 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 3, remoção de DQO em mg/L e gDQO/Kg tecido.....	116
Tabela 5.40 – Informações de cada operação da Lavanderia 3, para o caso de Regeneração com Reúso do DFA Modificado.....	117

Tabela 5.41 – Informações de cada operação da Lavanderia 2, para a construção dos intervalos do DFA Modificado para o caso de Múltiplas Fontes de Água.	117
Tabela 5.42– Matriz do Processo referente à Lavanderia 3A.	118
Tabela 5.43 – Informações sobre os fatores de divisão do divisor de correntes da Lavanderia 3A.	121
Tabela 5.44 – Informações das correntes de entrada da Lavanderia 3A.	121
Tabela 5.45 – Valores de concentração (no regime estacionário) das unidades caixas da Lavanderia 3A.	122
Tabela 5.46 – Comparação do consumo de água tratada no processo da Lavanderia 3 e da Lavanderia 3A.	122
Tabela 5.47 – Resultados da avaliação econômica da Lavanderia 3.	123
Tabela 5.48 – Informações sobre cada caixa da Lavanderia 4.	124
Tabela 5.49 – Informações sobre cada corrente de entrada da Lavanderia 4.	125
Tabela 5.50 – Informações sobre o valor de cada pick up da Lavanderia 4.	125
Tabela 5.51 – Resultados das unidades caixas da Lavanderia 4.	126
Tabela 5.52 – Valores de vazão e concentração (no regime estacionário) para Lavanderia 4.	126
Tabela 5.53 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 4, remoção de DQO em mg/L e gDQO/Kg tecido.	127
Tabela 5.54 – Informações de cada operação da Lavanderia 4, para o caso de Reúso Máximo do DFA Modificado.	128
Tabela 5.55 – Informações de cada operação da Lavanderia 4, para a construção dos intervalos do DFA Modificado para o caso de Reúso Máximo.	128
Tabela 5.56– Matriz do Processo referente à Lavanderia 4A.	129
Tabela 5.57 – Informações sobre os fatores de divisão do divisor de correntes da Lavanderia 4A.	129
Tabela 5.58 – Informações das correntes de entrada da Lavanderia 4A.	131
Tabela 5.59 – Valores de concentração (no regime estacionário) das unidades caixas da Lavanderia 4A.	132
Tabela 5.60 – Comparação do consumo de água tratada no processo da Lavanderia 4 e da Lavanderia 4A.	133
Tabela 5.61 – Informações de cada operação da Lavanderia 4A, para o caso de Restrição de Vazão do DFA Modificado.	134
Tabela 5.62 – Matriz do Processo referente à Lavanderia 4B.	134
Tabela 5.63 – Informações sobre os fatores de divisão do divisor de correntes da Lavanderia 4B.	136
Tabela 5.64 – Informações das correntes de entrada da Lavanderia 4B.	136
Tabela 5.65 – Valores de vazão e concentração da fontes de água.	137

Tabela 5.66 – Matriz do Processo referente à Lavanderia 4C.	137
Tabela 5.67 – Informações sobre os fatores de divisão do divisor de correntes da Lavanderia 4C.....	139
Tabela 5.68 – Informações das correntes de entrada da Lavanderia 4C.	140
Tabela 5.69 – Valores de concentração (no regime estacionário) das unidades caixas da Lavanderia 4C.....	140
Tabela 5.70 – Comparação do consumo de água tratada no processo da Lavanderia 4 e da Lavanderia 4C.....	141
Tabela 5.71– Matriz do Processo referente à Lavanderia 4D.....	142
Tabela 5.72 – Informações sobre os fatores de divisão do divisor de correntes da Lavanderia 4D.....	145
Tabela 5.73 – Informações das correntes de entrada da Lavanderia 4D.	145
Tabela 5.74 – Valores de concentração (no regime estacionário) das unidades caixas da Lavanderia 4D.....	145
Tabela 5.75 – Comparação do consumo de água tratada no processo da Lavanderia 4 e da Lavanderia 4D.....	146
Tabela 5.76 – Resultados da avaliação econômica da Lavanderia 4.	148

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema de um tratamento de efluentes em processos industriais...	10
Figura 2.2 – Minimização do consumo de água primária via (a) reúso; (b) regeneração com reúso; (c) regeneração com reciclo.....	31
Figura 2.3 – Representação do Diagrama de Fontes de Água (1° etapa).....	37
Figura 2.4 – Representação das operações do Diagrama de Fontes de Água (2° etapa).	38
Figura 2.5 – Representação no Diagrama de Fontes de Água da quantidade de massa transferida em cada processo (3° etapa).	38
Figura 2.6 – Representação do Diagrama de Fontes de Água das vazões consumidas (4° etapa).....	41
Figura 2.7 – Rede de transferência de massa para o máximo reúso correspondente ao diagrama da Figura 4.4.....	42
Figura 3.1 – Diagrama da Estrutura Principal.....	46
Figura 3.2 – Diagrama referente aos cálculos do lavador contínuo da indústria têxtil original.	47
Figura 3.3 – Interface (dados de entrada e resultados).....	49
Figura 3.4 – Interface referente à entrada dos dados de topologia do processo.	50
Figura 3.5 - Interface após o acionamento da tecla “Informações de cada unidade”.	51
Figura 3.6 – Interface da unidade caixa do lavador contínuo.....	52
Figura 3.7 – Interface da unidade divisor de correntes.....	52
Figura 3.8 – Interface após o acionamento do botão “Correntes de Entrada (CE)”.	53
Figura 3.9 – Interface pelo acionamento do botão “Intervalo de tempo para os gráficos”.....	53
Figura 3.10 – Diagrama de informação de um processo químico qualquer.....	55
Figura 3.11 – Algoritmo de Tiernan para identificação de reciclos.	60
Figura 3.12 – Ponto de Mistura de Correntes.....	64
Figura 3.13 – Representação esquemática da Unidade Modular Divisor de Correntes.	65
Figura 3.14 – Representação esquemática de uma Caixa.....	66
Figura 4.1 – Diagrama referente ao caso de Reúso Máximo no DFA Modificado....	74
Figura 4.2 – Diagrama referente ao caso de Restrição de Vazão no DFA Modificado.....	78

Figura 4.3 – Diagrama referente ao caso de Múltiplas Fontes de Água no DFA Modificado.....	79
Figura 4.4 – Diagrama referente ao caso de Regeneração com Reúso no DFA Modificado.....	80
Figura 4.5 – Diagrama referente ao processo de avaliação econômica no DFA Modificado.....	82
Figura 5.1 – Diagrama da Lavanderia 1.	85
Figura 5.2 – Diagrama de Fontes de Água para a Lavanderia 1 (Reúso Máximo). ..	93
Figura 5.3 – Diagrama da Lavanderia 1A.	94
Figura 5.4 – Diagrama da Lavanderia 1B.	101
Figura 5.5 – Diagrama da Lavanderia 2.	102
Figura 5.6 – Diagrama de Fontes de Água para a Lavanderia 2 (Múltiplas Fontes de Água).	108
Figura 5.7 – Diagrama da Lavanderia 2A.	109
Figura 5.8 – Diagrama da Lavanderia 3.	112
Figura 5.9 – Diagrama de Fontes de Água para a Lavanderia 3 (Regeneração com Reúso).....	119
Figura 5.10 – Diagrama da Lavanderia 3A.....	120
Figura 5.11 – Diagrama da Lavanderia 4.	124
Figura 5.12 – Diagrama de Fontes de Água para a Lavanderia 4 (Reúso Máximo).	130
Figura 5.13 – Diagrama da Lavanderia 4A.....	131
Figura 5.14 – Diagrama da Lavanderia 4B.....	135
Figura 5.15 – Diagrama de Fontes de Água para a Lavanderia 4 (Múltiplas Fontes de Água).	138
Figura 5.16 – Diagrama da Lavanderia 4C.....	139
Figura 5.17 – Diagrama de Fontes de Água para a Lavanderia 4 (Regeneração com Reúso).....	143
Figura 5.18 – Diagrama da Lavanderia 4D.....	144

RESUMO

O setor têxtil é um dos segmentos de maior geração de empregos no segmento industrial, e assume papel relevante entre as indústrias no consumo de água e geração de efluentes. Esses efluentes, de matriz complexa e de elevado potencial poluidor, contêm elevada carga orgânica, cor acentuada e compostos químicos tóxicos ao homem e ao meio ambiente. Os processos têxteis são caracterizados por um grande número de operações e usos de equipamentos contínuos e em bateladas, utilizando um grande número de substâncias químicas, como os corantes, que variam em função da fibra que compõe os tecidos e da tendência da moda. Numerosas operações são necessárias a fim de dar ao tecido o máximo de propriedades, gerando assim, em cada etapa, diferentes despejos. A demanda por maior responsabilidade social e ecológica, a pressão dos órgãos ambientais e os custos de produção, têm levado as indústrias têxteis a adotarem estratégias ambientais preventivas, desenvolverem novas tecnologias e melhorarem as existentes para que possam gerar um diferencial competitivo. Portanto, novas tecnologias têm sido buscadas para a degradação ou eliminação dos efluentes aquosos. A redução do volume de efluentes através de recirculação e reaproveitamento de água e recuperação de produtos químicos e subprodutos, sem comprometimento da qualidade do produto acabado, constitui no maior desafio enfrentado pela indústria têxtil. Considerando este contexto, o presente trabalho tem como foco central apresentar um modelo de redução do consumo de água industrial através de reúso de água nos lavadores contínuos da indústria têxtil. Com esse objetivo, foi desenvolvida uma metodologia baseada no Método do Diagrama de Fontes de Água, DFA, visando à redução do consumo de água industrial, com uma estratégia para o reúso de efluentes oriundos da lavanderia têxtil. Os resultados preliminares demonstraram a eficácia na aplicação da metodologia proposta, onde nos estudos de casos apresentados foram geradas alternativas com redução significativa no consumo de água.

Palavras-chave: reúso de água, indústria têxtil, lavanderia, reutilização.

ABSTRACT

The textile sector is one of the segments which produce more jobs in the industry and plays a relevant role among industries in terms of water consumption and effluents' generation. These complex matrix and high polluting effluents have an elevated organic charge, accentuated color, and chemical compositions which are toxic to humankind and to the environment. The textile processes are characterized by a large number of operations and handling in terms of continuous equipments, using plenty of chemical substances, such as colorings, which vary according to the fiber's function in the fabrics and also according to fashion trends. Numerous operations are necessary in order to give the fabric the maximum of the properties, thus generating in each step different dumps. The demands for higher social and ecological responsibilities, the pressure by the environmental organs and the costs of production have led the textile industries to adopt preventive environmental strategies, developing new technologies and improving the existing ones in order to generate a competitive differential. Therefore, new technologies have been researched for the degradation or elimination of aqueous effluents. The reduction of effluents through recirculation and reuse of water and recovery of chemical products and sub-products without compromising the final product is the greatest challenge faced by textile industries. Considering this context, this study is aimed at presenting a model for reduction of industrial water consumption through water reuse in the continuous washings from the industries. A methodology based on the Method of Water Supply Diagram was developed, aiming at the reduction of industrial water consumption, with a strategy for the reuse of effluents originated in the textile laundries. The preliminary results have shown the effectiveness in the application of this proposed methodology, where in case studies, alternatives with meaningful reductions in terms of water consumption were presented.

Key-words: water reuse; textile industry; laundries; reutilization.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

O setor industrial é responsável por uma grande parte do consumo de água doce mundial, atingindo até 20% dos recursos disponíveis (BERNARDIS, 2002) e, ao mesmo tempo, é um dos principais causadores da sua contínua degradação. Isso ocorre devido ao rápido crescimento da população em todo o mundo, o que leva a uma necessidade sempre crescente de se aumentar a produção dos bens de consumo. O fato é que as indústrias se proliferam, consumindo quantidades cada vez maiores de energia e matérias-primas, gerando poluição e outros inconvenientes ao meio ambiente.

Apesar da cobrança pela captação de água bruta ainda ser baixa devido à abundância deste recurso natural, as leis ambientais e os custos envolvidos com o uso dos recursos hídricos estão se tornando cada vez mais presentes entre os fatores competitivos do setor têxtil.

Para reduzir o impacto ambiental, deve-se prioritariamente atuar sobre o consumo de água no sentido de sua redução através da adoção de tecnologias que permitam a minimização do consumo ou seu reúso. Em algumas empresas europeias, mediante tratamento, pode-se reciclar 100% do efluente, trabalhando com a concepção moderna de “geração zero” ou “princípio de descarga zero” (SILVA, 2005).

A adoção de metodologias de reciclagem/reúso das correntes de efluentes aquosos diminui a quantidade de água utilizada, pelos processos industriais, e implica em menores custos de captação e tratamento de água; tratamento e descarte de efluentes; e de disposição final de resíduos.

Outro aspecto importante é que, pela menor geração de efluentes líquidos, a reutilização constitui-se numa ferramenta útil para o controle da poluição e, conseqüentemente, preservação do meio ambiente. Assim, reduz os riscos com penalizações ambientais, melhora a imagem da indústria perante as comunidades,

clientes e órgãos de controle ambiental, bem como favorece a obtenção de selos e certificações como, por exemplo, a ISO-14000 (MUSTAFA, 1998).

Para que estas implementações de reúso e/ou reciclo sejam projetadas de forma a garantir o melhor reaproveitamento e alocação dos recursos e os menores custos, tecnologias de otimização são utilizadas. As principais opções para a otimização de sistemas de água são: tecnologia *Pinch*, redes de transferência de massa e otimização via programação matemática (MANN, 2003).

Estas tecnologias são aplicadas de forma a atender às restrições impostas em cada etapa do processo, relativamente aos teores máximos permissíveis dos parâmetros relevantes a estas etapas, objetivando-se o reúso e o envio das correntes de efluentes menos contaminadas para os processos que gerem correntes de efluentes com maior grau de contaminação. Quando as restrições do processo inviabilizam este procedimento, diluições com outras correntes do processo e/ou água da estação de tratamento de afluente (ETA) da indústria são usadas. Tratamentos intermediários com processos regenerativos (como por exemplo, processos adsortivos, membranas, “strippers”, separadores água/óleo, unidades de coagulação, sedimentação e filtração, etc.) podem ser empregados, de maneira a tornar possível o reúso de correntes que não atendam às restrições. Entretanto, esta alternativa só é implementada quando a otimização global do modelo indicar ganhos econômicos.

Como alternativa para superar as dificuldades impostas por reduzir o consumo de água em uma lavanderia na indústria têxtil, sem alterar significativamente a configuração da planta da lavanderia, está o reúso e/ou reciclo de correntes atualmente enviadas para a estação de tratamento de efluentes já existentes.

1.1 – CONTRIBUIÇÕES DO PRESENTE TRABALHO

O objetivo geral deste trabalho é apresentar soluções para racionalizar as redes de água, seja minimizando o consumo da mesma e/ou reduzindo custos associados. Para tanto, neste trabalho propõe-se o desenvolvimento de uma metodologia de simulação para a obtenção de alternativas de reúso para as redes envolvendo correntes

aquosas em um lavador contínuo da indústria têxtil. Para alcançar um menor consumo de água e a diminuição do custo envolvido, considerando diversas opções características do reúso de efluentes aquosos, criando desde redes simples até redes mais complexas, considerando-se uma hierarquia de menor custo e condições de reúso.

Os resultados visam permitir a redução da captação da água bruta e a geração de efluentes de lavadores contínuos da indústria têxtil, que atualmente são enviadas para a estação de tratamento de efluentes. Este trabalho trouxe novas contribuições ao estado da arte, considerando que foi desenvolvida uma nova ferramenta para a finalidade proposta de racionalização e reúso de água na indústria têxtil.

A metodologia desenvolvida é baseada no Método do Diagrama de Fontes de Água, DFA, sendo que o desenvolvimento de todos os algoritmos está sendo realizado no ambiente de programação do Matlab. O algoritmo tem como parâmetros a vazão, a valor de DQO de cada corrente e os critérios restritivos do processo no qual ela está envolvida. Estes parâmetros foram obtidos através de ensaios laboratoriais de amostras coletadas no processo industrial em indústrias têxteis do Vale do Itajaí. Para a avaliação de custos, foram adicionados modelos econômicos, que envolvem custos de água bruta, de regeneração, operacional e de tratamento final.

Com base na metodologia proposta foi desenvolvido um software para simulação do processo visando: redução do consumo de água, geração de um menor volume de efluentes, diminuição da captação de água bruta e redução de custos.

Os objetivos específicos são:

- Redução do uso da água potável;
- Economia dos custos no tratamento de água;
- Adiamento dos investimentos de capital para a expansão das estações de tratamento de água potável;
- Aumento da disponibilidade de água para outros fins potáveis;
- Preservação do meio ambiente.

As principais contribuições e inovações deste trabalho foram:

- Modificação do método do Diagrama de Fontes de Água (DFA), introduzindo a estratégia de racionalização do uso de água para sistemas bifásicos;

- Desenvolvimento de algoritmos para a determinação do balanço mássico com unidades de reciclo, acopladas ao bloco de racionalização do uso de água empregando o DFA modificado;

- Desenvolvimento e validação de um software para a racionalização do uso de água em lavadores contínuos da indústria têxtil.

1.2 – ESTRUTURA BÁSICA

A apresentação escrita da Tese de Doutorado foi dividida em seis capítulos. A estrutura básica, com uma abordagem resumida de cada capítulo, é apresentada a seguir.

CAPÍTULO 1 – Introdução: Possui caráter introdutório, onde são apresentados os objetivos e a relevância do trabalho.

CAPÍTULO 2 – Revisão Bibliográfica: É feita uma revisão sobre o processo produtivo têxtil e os efluentes produzidos, as características gerais da água, discutindo sobre o seu uso racional e sua conservação. São abordadas as técnicas de racionalização dos sistemas de água, assim como a interface gráfica utilizada no desenvolvimento do software. Sendo feita uma revisão do processo utilizado para a racionalização da água em processos industriais (DFA – Diagrama de Fontes de Água).

CAPÍTULO 3 – Desenvolvimento dos Algoritmos Computacionais: É apresentada uma introdução teórica sobre os procedimentos adotados nos algoritmos desenvolvidos, visando subsidiar o desenvolvimento da solução proposta para a minimização do uso de água limpa.

CAPÍTULO 4 – DFA Modificado: É apresentado o procedimento algorítmico proposto (o método do Diagrama de Fontes de Água Modificado) para o reúso de água na lavanderia têxtil. Visando mostrar os ajustes feitos na metodologia clássica do DFA.

CAPÍTULO 5 – Resultados e Discussões: Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento da solução (de algumas lavanderias têxteis) de minimização do uso de água, utilizando-se o DFA Modificado e seus diferentes tipos de casos. A partir do processo real de quatro lavanderias têxteis são realizadas propostas de minimização de

efluente e sua avaliação econômica. A solução é obtida utilizando-se um software. Sendo todos os dados analisados e discutidos.

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 – CONSERVAÇÃO E USO RACIONAL DA ÁGUA**

A escassez de recursos hídricos em certas regiões está relacionada aos aspectos de quantidade e de qualidade. O mau uso e a demanda sempre crescente estão reduzindo o volume de rios e lençóis subterrâneos em todos os continentes (QUEIROZ E PESSOA, 2003).

No Brasil mais da metade dos 1785 municípios do nordeste estão à beira da seca. No estado de São Paulo, só no primeiro trimestre de 2001, foram perfurados 600 poços. É quase uma corrida pela água.

Entre mares, rios, geleiras e porções subterrâneas, há cerca de $1,39 \times 10^6$ metros cúbicos de água no planeta. Destes, estima-se que apenas 1% é própria para o consumo e de fácil acesso. O restante forma os oceanos e as geleiras, que podem representar uma solução caso a falta de água seja crônica no futuro, dependendo de tecnologias que viabilizem o seu tratamento e transporte. Não é por outra razão que a Organização das Nações Unidas qualifica a água como o “Petróleo do Século XXI” (QUEIROZ E PESSOA, 2003).

A utilização da água nas atividades humanas, sem que haja um devido tratamento para resíduos domésticos, industriais e agrícolas, pode provocar uma série de problemas, como a transmissão de doenças, contaminação e poluição de rios e da água subterrânea.

Historicamente o desenvolvimento urbano e industrial ocorreu ao longo dos rios devido à disponibilidade de água para abastecimento e a possibilidade de utilizar o rio como corpo receptor dos dejetos. O fato preocupante é o aumento tanto das populações

quanto das atividades industriais e o número de vezes que um mesmo rio recebe dejetos agrícolas, urbanos e industriais, a seguir servindo como manancial para a próxima cidade ribeirinha (GIORDANO, 2004).

Os efeitos da poluição ao meio ambiente podem ser diretos ou indiretos. Os diretos podem ser exemplificados pelas emissões que causam doses fatais de toxinas em peixes, animais e até mesmo no homem. Os indiretos têm como agentes os materiais tóxicos que não são biodegradáveis, tais como despejos de inseticidas e pesticidas manufaturados. Os poluentes não biodegradáveis, se liberados para o meio ambiente e forem absorvidos por microorganismos e entrarem na cadeia alimentar, poderão permanecer nesta por um longo período de tempo. O lento aparecimento de concentrações a cada estágio da cadeia alimentar pode tornar-se fatal para predadores situados no topo da cadeia. Assim, a emissão de poluentes não deve exceder níveis considerados prejudiciais (MENON *et al.*, 2001).

Estudos da HIDROGESP (Hidrogeologia, sondagens e perfurações) (CRUZEIRO NET, 2005), mostram que, se todas as indústrias brasileiras reutilizassem água, minimizaria cerca de 1,65 bilhões de litros por dia, suficientes para abastecer 8,2 milhões de pessoas.

O setor de papel e celulose usa 10% do total de água utilizada nas indústrias do Brasil e possui empresas que apresentam redução de consumo de mais de 40% nos últimos 10 anos. O setor de cervejarias, que no final da década de 80 utilizava entre 15 e 25 litros de água para produção de 1 litro de cerveja, atualmente possui média nacional de 5-8 litros de água por litro de cerveja e algumas indústrias apresentam consumo até 50% abaixo desta média (MACHADO, 2007).

A tecnologia de reúso está ocupando gradativamente espaço no meio industrial, principalmente pelo reconhecimento da economia propiciada por sua adoção.

A racionalização do uso da água está presente em quase todos os setores industriais e a adoção da prática deixou de ser apenas um esforço sócio-ambiental para ser um grande diferencial competitivo, com notável valorização da imagem da empresa na comunidade.

Estima-se que a captação de água, no Mundo, aumentará em 22% por volta de 2025, comparado com os valores observados em 1995. Nos países em desenvolvimento

esse crescimento será de 27%, enquanto nos países desenvolvidos esse aumento será de apenas 11%. Juntos o consumo de água Doméstico, Industrial e Pecuária, ou seja, sem levar em conta a irrigação, crescerão 62% de 1995 a 2025. Por causa do rápido crescimento da população e do aumento do consumo per capita o consumo doméstico total crescerá no mesmo período, 71%, dos quais mais de 90% ocorrerão nos países em desenvolvimento (DOMINGUES, 2005).

O primeiro passo nos projetos de sistemas de tratamento de água é identificar e caracterizar a fonte de água a ser tratada. Isto inclui determinação das vazões mínima e máxima disponível, os parâmetros químicos e físicos da água, e a variabilidade desses itens juntamente com prévia determinação da faixa de variação. Esta informação tem uma relação direta com o tipo de processo de pré-tratamento requerido e também na seleção e tamanho do equipamento (CORRÊA JR. E FURLAN, 2003; GIORDANO, 1999; SILVERNS *et al.*, 2000).

O Conselho Econômico e Social da Organização das Nações Unidas – ONU, adota a diretriz segundo a qual, a não ser que haja grande disponibilidade, nenhuma água de boa qualidade deverá ser utilizada em atividades que tolerem águas de qualidade inferior.

A compreensão da água como bem de valor econômico e passível de cobrança pelo seu uso é recomendada pela própria Agenda 21. Esta Agenda é resultado da conferência da ONU sobre meio ambiente e desenvolvimento, realizada no Rio de Janeiro, em junho de 1992 (SANTILLI, 2001).

A cobrança sobre o uso é promovida com o intuito de cobrir os custos de construção de infra-estrutura para captação, distribuição, tratamento e controle da água. É também incentivo para conservá-la já que se paga pelo que se usa. Entretanto, fatores como medição e faturamento são tecnicamente difíceis, geram custos e podem causar oposição pública (DICK E ROSEGRANT, 2001; MENEZES, 2005a).

O desenvolvimento de tecnologia adequada para tratamento de efluentes tem sido objeto de grande interesse nos últimos tempos devido ao aumento da conscientização e rigidez das regras ambientais (GUARATINI E ZANONI, 2000).

A prática do reúso de água reduz a descarga de poluentes em corpos receptores e os custos associados a sua regeneração, conservando os recursos hídricos para o

abastecimento público e outros usos mais exigentes quanto à qualidade. Enfim, contribui para a proteção do meio ambiente e da saúde pública.

Apesar de serem claras as vantagens oferecidas pelos sistemas de prevenção da poluição na fonte, ainda existem alguns receios. Um fator que inibe a realização de atividades de prevenção da poluição na indústria é o temor de que as medidas de prevenção afetem a qualidade do produto, a ponto de torná-lo inaceitável pelos consumidores (FREEMAN *et al.*, 1992).

Segundo SUÁREZ *et al.* (2004), a contaminação originada da água usada em processos industriais gera grandes volumes, com muitos poluentes como por exemplo: DBO (demanda bioquímica de oxigênio), sólidos suspensos totais, DQO (demanda química de oxigênio), amônia, fluoretos, cloro, etc. (conforme o processo industrial), causando um forte impacto no ambiente. Um sistema de tratamento de efluente eficiente é essencial e pode influenciar significativamente no desempenho do processamento de uma indústria. A tarefa principal do sistema de tratamento de efluente é minimizar o impacto da descarga do poluente sobre o meio ambiente. Geralmente é usado nas indústrias um arranjo seqüencial de tratamento com dois ou três estágios, sendo que os custos deste tratamento depende do tipo de contaminante e da quantidade de efluente tratado.

Na maioria dos casos, um único processo de tratamento não pode realizar a tarefa por causa das restrições de concentração e de desempenho do processo de tratamento. Dois ou mais tipos de processo de tratamento são requeridos para correntes efluentes. A seqüência dos processos de tratamento é determinada por restrições de concentração ou considerações econômicas (WANG E SMITH, 1994a).

O tratamento de efluentes em processos industriais é mais freqüentemente realizado na saída em um processo de tratamento central (WANG E SMITH, 1994a), como ilustrado esquematicamente na Figura 2.1. A concentração de todos os contaminantes deve ser reduzida aos seus limites ambientais, antes da descarga.

Correntes efluentes vindas de vários processos são coletadas e misturadas antes de serem enviadas para a planta de tratamento (onde se encontra o tratamento primário, secundário e terciário). O tratamento primário é também chamado de tratamento preliminar, que prepara o efluente para o tratamento biológico; podendo ser,

dependendo do tipo de efluente, uma remoção de sólidos, ajuste de pH, etc. O tratamento secundário, que é o biológico, reduz a massa orgânica a níveis aceitáveis. Sendo o tratamento terciário realizado para levar o efluente a uma qualidade apropriada para descarga no corpo receptor. Empregando-se processos como, por exemplo: adsorção, remoção de nitrogênio e fósforo, etc (WANG E SMITH, 1994a).

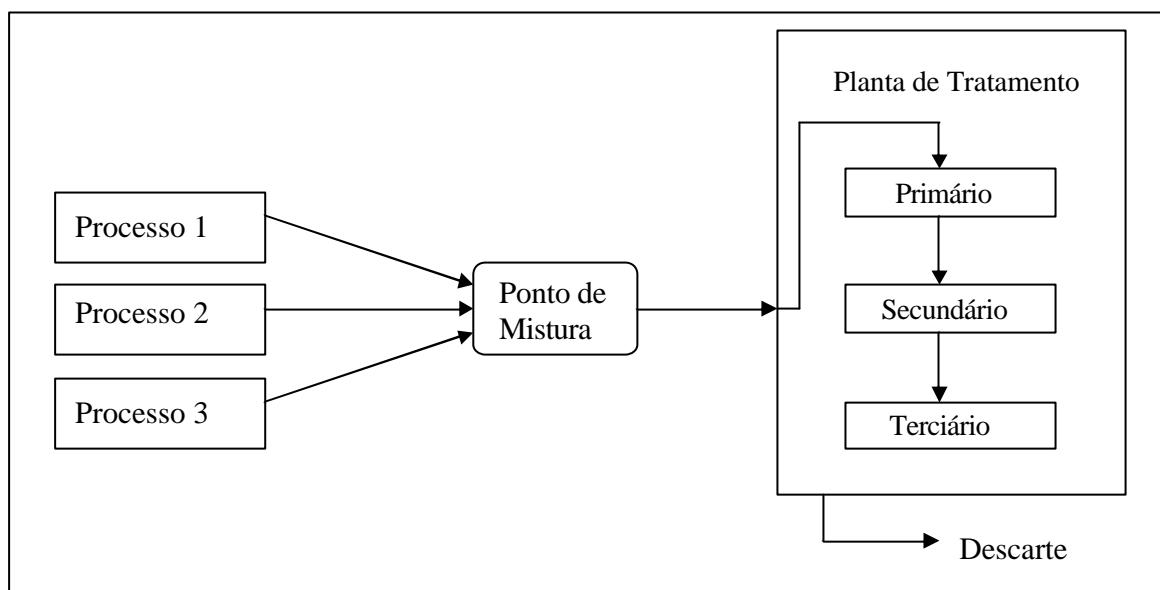


Figura 2.1 – Esquema de um tratamento de efluentes em processos industriais.

O tratamento de efluentes pode ser feito de maneira centralizada ou distribuída. O problema do tratamento centralizado é que este combina todas as correntes efluentes, que em muitos casos requerem tecnologias de tratamento diferentes, conduzindo assim a um custo de tratamento maior quando comparado com o tratamento distribuído, que seria o tratamento individual das correntes. Por outro lado, segundo WANG E SMITH (1994a), se duas correntes de efluentes requerem exatamente o mesmo tratamento é sensato combiná-las para que o tratamento obtenha economias.

ECKENFELDR *et al.* (1985), LANKFORT *et al.* (1988), HIGGINS (1989) e BUEB (1989) reconheceram que o tratamento de efluente distribuído (também chamado de tratamento da fonte, tratamento individual, tratamento separado, tratamento segregado ou tratamento descentralizado) pode ter avanços significativos sobre o tratamento de efluente centralizado (também chamado de tratamento combinado de efluente), sendo que o sistema de tratamento distribuído se torna melhor que o centralizado quando

existe a combinação de correntes com as mesmas características, sendo assim enviadas para a mesma planta de tratamento.

A primeira abordagem do processo para a redução do consumo de água é por técnicas de Produção Mais Limpa (PML), que consiste na aplicação contínua de uma estratégia econômica, ambiental e tecnológica integrada aos processos e produtos, a fim de aumentar a eficiência no uso de matérias-primas, água e energia através da não geração, minimização ou reciclagem de resíduos gerados em todos os setores produtivos (CECCHIN,2003; GUARATINI E ZANONO, 2000).

2.2 – QUALIDADE DA ÁGUA E CARACTERIZAÇÃO DOS EFLUENTES NO PROCESSO TÊXTIL

A geração de efluentes líquidos pelo setor têxtil é um fator potencialmente poluidor. Além disso, é um dos setores industriais que mais consomem água em seu processo produtivo. Segundo ULSON DE SOUZA (2006), um dos maiores problemas ambientais gerados durante o processo de lavagem nas lavanderias industriais é a grande quantidade de despejos altamente poluidores, contendo elevada carga de substâncias tóxicas, dentre estas os corantes.

É incontestável que a água é a matéria-prima de maior consumo na indústria têxtil, conseqüentemente um dos produtos mais importantes no processo produtivo. Na produção de tecido de algodão, por exemplo, o consumo de água pode variar de 100 a 300L/kg de tecido, ressaltando-se que a maior parte deste volume é consumido nos setores de lavagem, alvejamento, tingimento, estampagem e secagem (HASSEMER, 2006).

A composição de um efluente misto em uma indústria de processamento têxtil, normalmente apresenta as seguintes características (BITENCOURT, 2002):

- Cor intensa, devido a grande quantidade de corantes não fixados;
- Altas temperaturas, devido ao emprego destas, em algumas etapas do processamento;
- Concentração de matéria orgânica equivalente a de esgoto doméstico;

- Grande quantidade de DQO devido a corantes de alta massa molecular;
- Altas concentrações de AOX (Organohalogenados Adsorvíveis), sulfitos e metais pesados encontrados nos alvejantes e halógenos, enxofre ou metal pesado que se encontram presentes muitas vezes nos corantes.

A presença de cor é a característica visual mais notória do efluente têxtil; está associada aos corantes, principalmente aos corantes solúveis em água. A coloração é devida à presença dos corantes que não se fixam nas fibras durante o processo de tingimento e que posteriormente na lavagem, transferem-se para o efluente.

Os descartes de efluentes sem tratamento nas águas superficiais podem modificar a sua coloração natural e formação de espumas na superfície de corpos hídricos. A espuma reduz a taxa de transferência do oxigênio através da superfície do rio e limita a capacidade de autodepuração da corrente, como é o caso da espuma estável que se forma ao contato de tensoativos não iônicos com aniônicos na relação de 1 a 0,4 mg/L, de acordo com GARDINER e BORNE (1978).

A fração de descarga dos efluentes facilmente biodegradáveis ocasiona diminuição do oxigênio dissolvido na água, extinguindo a vida aquática diretamente ou até os peixes mais susceptíveis aos efeitos tóxicos de outras substâncias. Os compostos tóxicos e metais pesados podem acumular-se em pequenas concentrações nos tecidos dos peixes e outros invertebrados aquáticos da cadeia alimentar, aumentando o nível tóxico da água nos rios. Apesar de seus efeitos serem observados em longo prazo, não deixam de ser perigosos, sendo na maioria das vezes mais difíceis e custosos de tratar. Observa-se também o efeito de eutrofização artificial nos corpos de água, ocasionado pelo descarte de efluentes ricos em fósforo e nitrogênio, os quais conseqüentemente modificam a população de algas e peixes, com o surgimento de novas espécies e desaparecimento de outras, provocando um esgotamento do nível de oxigênio dissolvido (OD) na água e sua conseqüente extinção (SILVA, 2005).

Devido à sua própria natureza, os corantes são altamente detectáveis a olho nu, sendo visíveis em alguns casos mesmo em concentrações tão baixas quanto 1 ppm (1 mg/L). Este comportamento apresenta vantagens e desvantagens, pois uma pequena quantidade lançada em efluentes aquáticos pode causar uma acentuada mudança de

coloração dos rios, mas pode também ser facilmente detectada pelo público e autoridades que controlam os assuntos ambientais (GUARATINI E ZANONI, 2000).

Deste modo, métodos para a remoção de cor das águas de rejeito têm recebido enorme atenção nos últimos anos.

Como dados gerais, pode-se dizer que para a fabricação e beneficiamento de uma tonelada de um produto têxtil, consomem-se aproximadamente 200 toneladas de água. De todos os insumos químicos utilizados para o beneficiamento têxtil, mais de 90% são descartados após cumprir o seu papel requerido. Esses dados mostram bem que a indústria têxtil é potencialmente poluidora, seja pela alta demanda de água utilizada, seja porque a grande maioria dos produtos químicos utilizados é descartada (MENEZES, 2005b).

A carga contaminante das águas residuais das indústrias têxteis tem uma DQO de aproximadamente 1.700 mg O₂/litro, como média. Isso significa três vezes acima das águas residuais comuns (MENEZES, 2005b). Na Tabela 2.1 são apresentadas as cargas residuais das indústrias têxteis da pesquisa.

Tabela 2.1 – Cargas das águas residuais das indústrias têxteis da Alemanha.

Grupo de produto	% sobre DQO total
Agentes de engomagem	57%
Umectantes e detergentes	18%
Auxiliares de tingimento	7%
Ácidos orgânicos	7%
Preparação da fiação	5%
Redutores	3%
Corantes branqueadores ópticos	1%
Outros	1%

Fonte: MENEZES, 2005b.

A matéria orgânica está contida na fração de sólidos voláteis, mas normalmente é medida de forma indireta pelas demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO). A DBO mede a quantidade de oxigênio necessária para que os microorganismos biodegradem a matéria orgânica. A DQO é a medida da quantidade de oxigênio necessária para oxidar quimicamente a matéria orgânica. A matéria orgânica ao ser biodegradada nos corpos receptores causa um decréscimo da

concentração de oxigênio dissolvido (OD) no meio hídrico, deteriorando a qualidade ou inviabilizando a vida aquática.

As indústrias têxteis têm abrangência desde a produção dos fios sejam sintéticos ou naturais beneficiados, até a produção dos tecidos ou produtos finais. A produção envolve diversas etapas incluindo diversos tratamentos químicos.

Os processos de tratamento objetivam clarificar os efluentes e reduzir a toxicidade inerente aos produtos químicos utilizados, a carga orgânica, os detergentes e a cor oriunda da mistura de corantes aplicados. As etapas de tratamento estão indicadas a seguir: Preliminar (peneiramento para a remoção de fios e equalização); Primário (eletrocoagulação). Normalmente são utilizados processos de coagulação química e flotação, seguido de lodos ativados. Estes efluentes, antes de serem lançados ao corpo receptor, são submetidos a tratamento biológico aeróbio para remoção da matéria orgânica e ainda atender os padrões de emissão exigidos pela legislação ambiental (FIGUEIREDO et. al., 2002).

No setor de tingimento, o produto fibra natural, passa por etapas de caustificação ou mercerização, onde recebe solução alcalina. Com a finalidade de neutralizar este efeito, adicionam-se ácidos orgânicos, tais como o ácido acético ou cítrico, durante o processo.

No processo de acabamento, a fibra natural pode receber diferentes tratamentos com amaciantes, resinas, enzimas, umectantes, dispersantes e até mesmo corantes.

Nas indústrias onde os processos industriais são descontínuos, os despejos lançados na estação de tratamento de efluentes (ETE's) geralmente apresentam grande variação de carga, acarretando baixo desempenho no tratamento e comprometendo a qualidade do efluente final lançado no corpo receptor.

A toxicidade dos resíduos têxteis é uma das questões mais relevantes no âmbito dos impactos ambientais, tanto para os órgãos ambientais quanto para a própria sociedade. Essa toxicidade é mais relevante quanto mais se faz uso de corantes baseados em metais pesados, enxofre e grupamentos azóicos, além evidentemente, de outros compostos, como os surfactantes, os produtos auxiliares não degradáveis, e outros compostos como fenóis, solventes aromáticos, metileno, cloretos, entre outros.

Entre os diferentes tipos de corantes existentes no mercado, os que apresentam maior toxicidade são os do grupo azo, pois o meio redutor se apresenta como um ambiente propício para a clivagem reductiva nos anéis aromáticos e conseqüente formação de amins aromáticas com potencial carcinogênico e mutagênico (PINHEIRO et al., 2004).

Segundo BRITO *et al.* (2004) muitos estudos têm sido realizados com intuito de desenvolver tecnologias capazes de minimizar o volume e a toxicidade dos efluentes industriais, de forma a permitir não somente a remoção de substâncias contaminantes, mas também sua completa mineralização. A toxicidade associada aos efluentes industriais pode estar intimamente relacionada com a presença de compostos recalcitrantes (ou refratários), que são compostos que não são biodegradados pelos organismos normalmente presentes em sistemas biológicos de tratamento, nos usuais tempos de retenção hidráulica aplicados sendo, então, lançados nos corpos aquáticos receptores. Devido ao efeito de acumulação, podem atingir concentrações superiores à dose letal de alguns organismos, como invertebrados e peixes, levando à ocorrência de morte. Além disso, os efeitos cancerígenos e mutagênicos eventualmente podem ser observados em seres humanos como resultado da bioacumulação ao longo da cadeia alimentar (ALMEIDA *et al.*, 2004).

2.3 – EVOLUÇÃO DA LEGISLAÇÃO DO BRASIL

Poucas empresas têxteis nacionais têm Certificação ISO e raríssimas têm uma Certificação Ambiental quando comparadas às empresas têxteis européias.

A legislação ambiental é muito complexa, mesmo aquela somente aplicada à indústria. Os padrões de lançamento dos efluentes são diferentes para cada Estado brasileiro. Sendo importante ressaltar que as diferenças das legislações muitas vezes inviabilizam a cópia de uma estação de tratamento que apresente sucesso em um Estado para outro.

Evolução da Legislação no Brasil (CNRH):

- O Código da Águas de 1934 (Decreto Federal 24.643, de 10/07/1934): assegura o uso gratuito de qualquer corrente ou nascente de água para as primeiras necessidades da vida e impede a derivação das águas públicas para aplicação na agricultura, indústria e higiene sem a existência da concessão e da autorização nos outros casos.

- O SISNAMA (Sistema Nacional do Meio Ambiente): a Lei 6.938, de 31 de agosto de 1981, estabeleceu a Política nacional de meio ambiente e criou o SISNAMA: Conjunto de órgãos e instituições dos diversos níveis do Poder Público incumbidos da proteção do meio ambiente.

- RESOLUÇÃO Nº20 do CONAMA, de 18 de junho de 1986, Art.21.

De forma a controlar a emissão de efluentes altamente contaminados nos corpos de água, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabelece critérios de lançamento de efluentes de qualquer fonte poluidora, seja direta ou indiretamente. Estes padrões de lançamento são definidos pela RESOLUÇÃO Nº20 do CONAMA, de 18 de junho de 1986, Art.21.

A antiga Resolução CONAMA Nº20/86 e a sua sucessora Nº. 357/05, não fixam limites de cor para lançamento de efluentes, em razão disso durante muitos anos se subestimou o impacto ambiental causado pelo lançamento de efluentes com níveis de cor elevados, se destacando neste caso os efluentes têxteis, muitas vezes considerando a cor como um caráter meramente de natureza visual e estética. Entretanto, se for feita uma análise mais criteriosa da referida Resolução, é observado que a mesma fixa, de forma indireta, limites para a cor como parâmetro de qualidade para classificação das águas, quando determina que “nenhum efluente lançado num corpo receptor poderá alterar suas características de qualidade”. Apenas por essa ótica, já se torna relevante o monitoramento da cor, contudo esse parâmetro quando alterado num corpo receptor pelo lançamento de efluentes provoca degradação ambiental considerável. Em função dessa interpretação duvidosa da legislação vigente, só recentemente os Órgãos Ambientais vêm se preocupando em atuar junto às indústrias têxteis, no sentido de que sejam também instalados sistemas de tratamento para remoção de cor dos efluentes (SILVA, 2005).

- A Constituição de 1988: é a constituição em vigor atualmente, e estabelece que a água é um bem da União ou dos estados, ressaltando que o seu aproveitamento econômico e social deve buscar a redução de desigualdades.

- Lei das Águas 9.433/1997: as regulamentações dos recursos hídricos estão presentes na Lei da Política Nacional de Recursos Hídricos nº 9433/97, que impõe critérios para cobrar pelo uso da água. Esta legislação tem o intuito de conservar e recuperar os recursos hídricos e melhorar a qualidade de água que chega à população, buscando dotar a água de um valor econômico, como um instrumento de gestão e como instrumento econômico a ser aplicado tanto para os usos quantitativos quanto para os usos qualitativos (SANTOS, 2002).

- Lei de Criação da ANA (Agência Nacional de Águas) 9984/2000: tem como objetivo implementar a Política Nacional de Recursos Hídricos e Coordenar o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Missão:

- Regular o acesso à água e os seus usos (PNRH);
- Regras que disciplinem o acesso aos recursos hídricos e os usos deste bem público (relação do usuário com o bem público);
- Regras que administrem as relações entre os atores sociais envolvidos no processo de gestão integrada das águas (relação dos usuários entre si).

Além de ser uma forma mais agressiva ao ambiente fazer o tratamento de todo o efluente somente no final do processo global, este gera mais custos, tanto em termos de maiores gastos com os insumos das estações de tratamento de água e de efluentes, quanto pelas recentes taxações pela captação de água impostas pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). Aprovada em 14 de março de 2002. Esta cobrança foi baseada na Lei de Política Nacional de Recursos Hídricos nº. 9.433/97.

Antes da promulgação da lei que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei 9.433/97) no Brasil em termos legais a água era considerada como um bem inesgotável. Em 2003 foi assinado o Decreto Estadual 48.138, que instituiu o Programa de Uso Racional da Água.

A primeira regulamentação que tratou de reúso de água no Brasil foi a norma técnica NBR-13.696, de setembro de 1997. Na norma, o reúso é abordado como uma opção à destinação de esgotos de origem essencialmente doméstica ou com

características similares. Quatro classes de água de reúso e seus respectivos padrões de qualidade foram definidos na norma e são apresentados na Tabela P1.1.

Tabela 2.2 – Classes de água de reúso pela NBR-13.969 e padrões de qualidade.

Água de reúso	Aplicações	Padrões de Qualidade
Classe 1	Lavagem de carros e outros usos com contato direto com o usuário.	Turbidez < 5uT Coliformes Termotolerantes < 200 NMP / 100 mL Sólidos Dissolvidos Totais < 200 mg/L pH entre 6 e 8 Cloro residual entre 0,5 mg/L a 1,5 mg/L
Classe 2	Lavagem de pisos, calçadas e irrigação de jardins, manutenção de lagos e canais paisagísticos, exceto chafarizes.	Turbidez < 5uT Coliformes Termotolerantes < 500 NMP / 100 mL Cloro residual superior a 0,5 mg/L
Classe 3	Descargas em vasos sanitários.	Turbidez < 10uT Coliformes Termotolerantes < 500 NMP / 100 mL
Classe 4	Irrigação de pomares, cereais, forragens, pastagem para gados e outros cultivos através de escoamento superficial ou por sistema de irrigação pontual.	Coliformes Termotolerantes < 5000 NMP / 100 mL Oxigênio dissolvido > 2,0 mg/L

Fonte: MANUAL DE CONSERVAÇÃO E REÚSO DA ÁGUA NA INDÚSTRIA, 2006.

Com o crescente interesse pelo tema, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), publicou a Resolução nº 54, em 2005, que estabelece os critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água. Nessa resolução, são definidas as cinco modalidades de reúso de água: reúso para fins urbanos; reúso para fins agrícolas e florestais; reúso para fins ambientais; reúso para fins industriais; reúso na aquicultura.

A Resolução CNRH nº 54: Reúso Direto não Potável de Água (28 de novembro de 2005), considera que:

- O reúso de água constitui prática de racionalização;
- A escassez está relacionada a aspectos de qualidade e quantidade de água;
- São elevados os custos de tratamento de água;
- A prática de reúso contribui para a proteção do meio ambiente.

A finalidade da resolução é estabelecer modalidades, diretrizes, critérios gerais que regulamentem e estimulem a prática de reúso no Brasil.

Bases institucionais da legislação brasileira:

- Política Nacional de Recursos Hídricos: divide-se em fundamentos (ponto de partida para implementação), objetivos (ponto de chegada), diretrizes de ação (o caminho que deve ser percorrido) e os instrumentos (recursos a serem utilizados).

- Instrumentos para gerenciamento dos recursos hídricos: visam fundamentar e orientar a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e o gerenciamento dos recursos. Deve conter: diagnóstico da situação atual dos recursos hídricos, análises e estudos da dinâmica sócio-econômica, identificação de conflitos, metas de racionalização de uso, projetos a serem implantados, entre outros. Serão elaborados por estado, por bacia hidrográfica, e para o País.

- Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos: tem por objetivos: coordenar a gestão integrada das águas, arbitrar administrativamente os conflitos relacionados com os recursos hídricos, implementar a Política Nacional de Recursos Hídricos, planejar, regular e controlar o uso, a preservação e a recuperação dos recursos hídricos.

- Conselho Nacional de Recursos Hídricos: recentemente implantado, tem por objetivos: promover a articulação do planejamento de recursos hídricos com os planejamentos nacional, regional, estadual e dos setores usuários; deliberar sobre os projetos de aproveitamento de recursos; acompanhar a execução do Plano Nacional de Recursos Hídricos e estabelecer critérios gerais para a outorga de direitos de uso dos recursos hídricos e para cobrança pelo seu uso.

- Comitês de Bacias Hidrográficas: se responsabilizam, entre outras ações, por promover o debate das questões relacionadas aos recursos hídricos da bacia e articular a atuação das entidades intervenientes.

- Agências da Água (Lei 9.984, de 17 de julho de 2000.): serão as responsáveis pela cobrança, pelo uso de recursos hídricos em sua jurisdição e exercerão a função de Secretaria Executiva do respectivo comitê da Bacia Hidrográfica.

2.4 – O SETOR TÊXTIL BRASILEIRO

A indústria têxtil foi implantada no Brasil em caráter industrial após a proclamação da independência, mais precisamente no período que vai de 1844 até o final da 1ª guerra mundial; o processo de industrialização não se deu de imediato, foi lento. Em 1864, o Brasil já tinha uma razoável cultura algodoeira, matéria-prima básica da indústria têxtil, mão de obra abundante e um mercado consumidor em crescimento (IEMI, 2002).

O setor têxtil se compõe de cerca de 19.000 empresas (14.000 de confecções, 3.000 malharias, 1.000 de fiação e 1.000 de tecelagem plana) e emprega, diretamente, 1,5 milhões de trabalhadores, o que o classifica entre os primeiros lugares no conjunto da indústria de transformação, em termos de geração de emprego.

Segundo ANDRADE (2002), a indústria têxtil apresenta diversos ramos de atividades, podendo constituir-se de um complexo industrial desde o beneficiamento de fibras (fibras naturais) ou a sua fabricação (fibras químicas), até a produção de seus diversos itens, como fios, cordas, tecidos variados, etc. O segmento atende a diversos segmentos industriais, indo desde o setor de confecções e vestuário, passando pelas indústrias químicas, automobilísticas, colchões e calçados, cama e mesa, moveleiras e tantas outras.

As indústrias têxteis constituem fator de grande importância na economia brasileira e são agrupadas em três categorias principais de fibras: tecidos de algodão, de lã e sintéticos.

Segundo SILVA (2005), o setor têxtil produz vários tipos de produtos, como artigos de mesa, banho, cortinas, tapetes, lonas industriais, jeans, etc. Sendo cada um destes produzidos de forma distinta, gerando uma gama considerável de fluxos produtivos. O perfil do setor se caracteriza por empresas de porte pequeno e médio,

cujas tecnologias adotadas comparadas com as dos países desenvolvidos ainda necessitam implementar melhorias tecnológicas.

O setor têxtil vem passando por mudanças visíveis nos últimos anos no Brasil, tanto com a melhora acentuada da qualidade dos produtos nacionais, como com a concorrência dos produtos têxteis asiáticos que são os principais concorrentes no nosso mercado.

O grande centro têxtil do Brasil se concentra nas regiões Sul e Sudeste com cerca de 80% das indústrias instaladas, destacando-se o Estado de São Paulo, onde se situam cerca de 30% desse parque industrial, conforme diagnóstico realizado pelo Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior – MDICE (SILVA, 2005).

No contexto do consumo de água, os maiores setores consumidores da água doce disponível são a agricultura e as indústrias, sendo o setor têxtil responsável por 15% da água consumida pelas indústrias. O complexo industrial têxtil do Estado de Santa Catarina encontra-se concentrado no Vale do Rio Itajaí, basicamente na Bacia do Rio Itajaí-Açú, onde se encontram 75 indústrias, sendo 36 têxteis, o que gera grande preocupação regional em resolver os problemas de poluição ambiental decorrentes dessa atividade industrial (TWARDOKUS, 2004).

O setor têxtil brasileiro está perdendo a competitividade devido a fatores como a carga tributária, custo financeiro, infra-estrutura deficiente e leis trabalhistas perversas. Esses problemas desestimulam os investimentos, que nem sempre apresentam retorno satisfatório. Infelizmente, as aplicações financeiras e não produtivas oferecem estímulos mais atrativos, embora não gerem empregos. Outro agravante é que, além da ausência do retorno, não há desoneração sobre novos investimentos (SKAF, 2005).

Um dos mais significativos mercados de consumo de produtos químicos é o setor têxtil, tanto na fabricação de fibras sintéticas e artificiais quanto na utilização de produtos químicos auxiliares. Fibras sintéticas requerem matérias-primas petroquímicas enquanto que as artificiais são obtidas a partir de modificações químicas da celulose. Os produtos químicos auxiliares são indispensáveis para tornar eficientes as etapas de fabricação de fibras, fios e tecidos, bem como no acabamento destes materiais (ANCÂNTARA E DALTIM, 1996).

O Brasil é um tradicional produtor têxtil, figurando entre os oito maiores fabricantes de tecidos do mundo. O consumo anual de fibras têxteis por brasileiro é de 8 quilos por habitante e para 2020 temos uma projeção de consumo de quase 9 quilos de fibras têxteis por habitante/ano. Nos países desenvolvidos, o consumo de fibras têxteis por habitante é de 21 quilos por ano (TOLEDO, 2003).

A primeira pesquisa feita pelo IBGE sobre a indústria brasileira foi realizada em 1907 e chamou-se Inquérito Industrial. Além das 194 empresas de fiação e tecelagem que já existiam, fábricas de chapéus (existiam 107), espartilhos, gravatas, luvas e passamanarias, entre outras, completavam a relação das 365 indústrias do setor têxtil, que era então responsável por quase 27% da produção industrial do Brasil. Quase 100 anos depois, algumas dessas pioneiras resistem às mudanças por que passaram o país e o setor e ajudam a manter esse segmento em destaque, embora os menos de 10% que o setor têxtil representa hoje na produção industrial seja uma fração do passado. Cedro (fundada em 1872), Hering (1880), Karsten (1880), Döhler (1881) e Paramount (1893) são apenas alguns exemplos de empresas que se mantiveram atuantes e modernas com o passar dos anos (FRAGA, 2005).

O estado de Santa Catarina é o segundo maior pólo têxtil em volume de produção do Brasil, respondendo por aproximadamente 26% do valor da transformação industrial catarinense. O setor é formado por dois grupos, segundo as atividades, dentro das indústrias de transformação (IBGE, 2005):

1. Fabricação de produtos têxteis (7%) – responsável pelo beneficiamento de fibras têxteis naturais, fiação, tecelagem fabricação de artefatos têxteis, acabamento em fios, tecidos e artigos têxteis para terceiros, fabricação de artefatos têxteis a partir de tecidos (exceto vestuário) e de outros artigos têxteis, fabricação de tecidos e artigos de malha;

2. Confecção de artigos do vestuário e acessórios (19%); responsável pela confecção de artigos do vestuário, e fabricação de acessórios do vestuário e de segurança profissional (exceto calçados).

No Vale do Itajaí se encontra o maior pólo têxtil da América Latina. A região de Blumenau se destaca como um dos maiores pólos têxteis de malhas e tecidos de cama, mesa e banho. Blumenau é considerada a capital do pólo têxtil catarinense, tido como o

segundo maior do mundo, com mais de 120 grandes empresas e um total de 339 unidades. Em Brusque se concentra um grande número de indústrias direcionadas para os tecidos planos. Pode-se afirmar que a história da região se confunde com a própria história da indústria têxtil no Brasil (CARREIRA, 2006).

Em todo o Estado são mais de 4.500 empresas, empregando 86.000 funcionários. Apresenta um volume de exportação de 11% e um ICMS de 6,7% do volume gerado no Estado (HASSEMER, 2006).

2.5 – PROCESSO PRODUTIVO TÊXTIL

A indústria têxtil tem como objetivo a transformação de fibras em fios, de fios em tecidos e de tecidos em peças de vestuário, têxteis domésticos (roupa de cama e mesa) ou em artigos para aplicações técnicas (geotêxteis, airbags, cintos de segurança, etc.). As indústrias têxteis tem seu processo produtivo muito diversificado, ou seja, algumas podem possuir todas as etapas do processo têxtil (fiação, tecelagem e beneficiamento) outras podem ter apenas um dos processos (somente fiação, somente tecelagem, somente beneficiamento ou somente fiação e tecelagem, etc).

A manufatura dos tecidos é uma das mais velhas tecnologias do homem. Os tecidos conhecidos mais antigos datam aproximadamente do ano de 5.000 aC. As primeiras fibras a serem transformadas em fios e tecidos foram o linho e o algodão. A automação da indústria têxtil coincidiu com a Revolução Industrial, quando as máquinas, até então acionadas por força humana ou animal, passaram a ser acionadas por máquinas a vapor e, mais tarde, motores elétricos.

É um tipo indústria que consome grandes quantidades de matérias-primas naturais e insumos, sendo o principal recurso natural as fibras e a água, este último utilizada principalmente no processo de beneficiamento de tecidos.

Existem diferentes sistemas de produção têxtil. Essa diversidade de sistemas decorre do tipo de produto final que se deseja fabricar. Apesar dessa diversificação, é possível caracterizar o processo têxtil como um conjunto de operações, o qual pode ser dividido em cinco etapas distintas: beneficiamento (produção das fibras), fiação

(produção do fio), tecelagem e malharia (produção do tecido), acabamento (tingimento, amaciamento, estamparia) e a confecção (produção da roupa) (HASSEMER, 2006).

2.5.1 – Beneficiamento (produção da fibras)

As fibras usadas na manufatura são classificadas conforme a sua origem, que pode ser natural, artificial ou sintética. Fibras naturais são as fibras retiradas prontas da natureza, sendo as mais comuns o algodão, a lã, a seda, o linho e o rami. As fibras artificiais são produzidas pelo homem, porém utilizando como matéria-prima produtos da natureza, como a celulose. As mais comumente usada são a viscose, o acetato, o Lyocel e o Modal.

Fibras sintéticas são fibras produzidas pelo homem usando como matéria-prima produtos químicos, da indústria petroquímica. As mais conhecidas são o poliéster, a poliamida, o acrílico, o polipropileno e o poliuretano (Elastano), além das Aramidas (Kevlar e Nomex), que são formadas por longas cadeias de polímeros.

2.5.2 – Fiação (produção do fio)

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 etapas ocorrem a seco (BRAILE e CAVALCANTI, 1993).

A fiação pode ser definida como uma seção de operações que transforma uma massa de fibras têxteis inicialmente desordenadas (flocos) em um conjunto de grande comprimento, a qual sua seção possui algumas dezenas de fibras mais ou menos orientadas e presas a si mediante uma torção. As fibras têxteis podem ser de origem natural, química ou mineral.

É possível distinguir dois tipos de fiação quanto ao tipo de fibra: a fiação de fibra descontínua (lã, algodão, viscose, poliéster, linho etc.) e a produção de fios contínuos por extrusão (poliéster, viscose, poliamida, elastano, polipropileno etc.).

Os fatores da fibra decisivos para a qualidade do fio são: comprimento/espessura das fibras e o estado de limpeza das mesmas. Para o algodão é necessário retirar restos de folhas e matéria vegetal. Para a lã é necessário proceder à sua lavagem. Para as fibras sintéticas não é preciso geralmente qualquer tipo de operação.

Os fios podem ser classificados em função dos processos utilizados para a produção dos mesmos: filatórios circulares convencionais, *open-end*, compactado e fios zero-torção (*zero twist yarn*).

2.5.3 – Tecelagem e malharia (produção do tecido)

Tecelagem é o ato de tecer, entrelaçar fios de trama (transversal) e urdume (longitudinal) formando tecidos.

Tecidos produzidos no processo de tecelagem também são conhecidos como tecidos planos, não podem ser confundidos com tecidos de malha. Nos tecidos plano há somente duas posições possíveis para o fio de trama, ou ele passa por baixo dos fios de urdume ou ele passa por cima.

As construções básicas dos tecidos são a tela (tafetá), a sarja e o cetim. Tecidos jacquard são tecidos entrelaçados fio a fio, um processo trabalhado onde é possível fazer desenhos no mesmo. O que determina os tipos de entrelaçamento do fio é chamado de padronagem, e é realizada pela seleção dos fios de urdume que sobem ou que descem para a formação da cala.

A Tecelagem pode ser artesanal através de tecelagem manual, utilizando-se de teares manuais ou em processo industrial com teares automáticos.

Na etapa de tecelagem, os fios tingidos ou crus são transformados em tecidos nos teares. Essa 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).

Malharia é a produção de tecidos de malha. Os tecidos de malha são caracterizados pelo entrelaçar dos fios têxteis, sendo esses sempre no mesmo sentido,

ou todos na trama (horizontal) ou todos no urdume. Processo realizado com a ajuda de agulhas.

2.5.4 – Acabamento (tingimento, amaciamento e/ou estamparia)

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

- Tratamento prévio ou Preparação: nesta etapa elimina-se a impureza 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 as operações que conferem as características essenciais de aspecto, brilho, toque, caimento, amarrotamento, resistência, etc.

Diversos processos constituem o ramo do acabamento de produtos têxteis – Alvejamento, Tinturaria, Estamparia, etc. Conferindo a esses produtos a cor desejada, determinado aspecto, um toque específico e outras características que estejam de acordo com a necessidade do mercado a que se destinam.

O processo de tingimento é um dos fatores fundamentais no sucesso comercial dos produtos têxteis. Além da padronagem e beleza da cor, o consumidor normalmente exige algumas características básicas do produto, como o elevado grau de fixação em relação à luz, lavagem e transpiração, tanto inicialmente quanto após uso prolongado. Para garantir essas propriedades, as substâncias que conferem coloração à fibra devem apresentar alta afinidade, uniformidade na coloração, resistência aos agentes desencadeadores do desbotamento e ainda apresentar-se viável economicamente (GUARATINI E ZANONI, 2000). Entretanto, todo processo de tingimento envolve como operação final uma etapa de lavagem em banhos correntes para retirada do excesso de corante original ou corante hidrolisado não fixado à fibra nas etapas precedentes.

Na etapa de tingimento é conferida cor aos fios ou tecidos com o objetivo de aumentar o valor do produto, sendo utilizada ampla gama de corantes, técnicas e equipamentos. Os corantes usados pela indústria têxtil são na sua maioria sintéticos, geralmente derivados do petróleo. O tingimento pode ocorrer em processos contínuos ou em batelada. No processo em batelada, determinada quantidade de substrato têxtil, que normalmente varia em torno de 100 a 1000 kg, para ser carregada em uma máquina de tingimento onde o substrato atinge o equilíbrio, ou chega próximo dele, com a solução do banho contendo o corante. Para se obter melhores condições de tingimento são controlados os auxiliares químicos (grupo do qual a uréia, agentes tensoativos, sequestrantes, sais, entre outros fazem parte) e as condições do banho (principalmente temperatura). A fixação do corante na fibra ocorre com aplicação de calor e/ou produtos químicos. No momento da lavagem são removidos do substrato tinto os corantes não fixados e os produtos químicos remanescentes.

No processo contínuo, o material têxtil é alimentado ininterruptamente em um equipamento denominado *fullard* que contém uma solução de corante que é impregnada no tecido, com velocidade que em geral varia entre 50 e 250 m/min. O processo contínuo consiste tipicamente na aplicação do corante, fixação do corante com produtos químicos ou calor, e lavagem. A fixação do corante nas fibras ocorre mais rapidamente no processo de tingimento contínuo do que no processo em batelada. A adsorção e retenção do corante na fibra pode ocorrer por processo químico, físico ou ambos, dependendo da fibra e do corante. O grau de adsorção é função de vários fatores, como por exemplo temperatura, pH, auxiliares químicos e do tempo.

Na estamparia utiliza-se grande variedade de técnicas e tipos de equipamentos que irão conferir ao tecido cores e estampas. Este processo poderá ser o toque final para o produto já confeccionado, que receberá estampa em algum ponto de sua extensão física. Para a aplicação de estampas em toda a extensão os tecidos, são utilizados rolos gravados que alcançam toda a peça. Salienta-se que esta última é a mais comum de todas as técnicas utilizadas para estampar. Em cerca de 75 a 85% do total das operações de estampagem são utilizados pigmentos e as etapas de lavagem são desnecessárias. Comparados com os corantes, os pigmentos são tipicamente insolúveis e não tem afinidade pelas fibras. Na adesão dos pigmentos aos substratos

são utilizadas resinas ligantes. Como veículos para transportar a mistura pigmento-resina para o material têxtil utilizam-se solventes. Assim que os solventes evaporam, permanece a camada fixa de resina e pigmento.

O amaciamento é aplicado em substratos que deverão possuir maciez, promovendo conforto ao uso como no caso de vestuário, cama, mesa e banho. Em linhas gerais este beneficiamento visa amaciar o substrato conferindo-lhe toque mais macio e agradável. São empregados agentes amaciantes cuja qualidade e quantidade dependem do toque final desejado. Os amaciantes devem possuir afinidade para com a fibra, sendo que os que não apresentam, não possuem solidez ao enxaguamento pois se aderem somente à superfície do substrato.

2.5.5 – Confeção (produção da roupa)

O ramo de confecções é definido como o conjunto de empresas que transformam tecido, fabricado a partir de fibras naturais, artificiais ou sintéticas, em peças do vestuário pessoal (feminino, masculino e infantil); doméstico (cama mesa e banho); decorativos (cortinas e toldos) ou de embalagens.

2.6 – TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE ÁGUA

Os governantes criaram leis limitando emissões e descartes de forma a minimizar a poluição e proteger o meio ambiente. Assim, torna-se necessário o desenvolvimento de metodologias para minimização do impacto ambiental dos processos.

Os problemas de prevenção e controle da poluição podem ser, de um modo eficaz, avaliados por otimização matemática. A otimização matemática apresenta-se como um método rápido, claro e econômico na obtenção da melhor solução de problemas ambientais.

O reaproveitamento da água nos processos industriais atualmente está sendo feito por inspeção, sem nenhum procedimento sistemático, o que não garante a máxima reutilização da água, pois nem todas as alternativas de reúso são identificadas.

O reúso de efluentes tem sido cada vez mais aceito, devido a sua viabilidade econômica (redução de custos). Com o reúso o volume de efluentes lançados para a estação de tratamento diminui, reduzindo assim os custos com o tratamento final. A primeira etapa a ser definida é a especificação da qualidade da água requerida, e esta deve ser compatibilizada a vazão a ser reutilizada com a vazão do efluente disponível.

Nem sempre é possível fazer o reúso de uma corrente devido o seu grau de contaminação, sendo necessário um tratamento deste efluente. Os casos de poluição térmica são os mais conhecidos casos de reúso, pois é necessário somente realizar o resfriamento da água para o fechamento do circuito. Há casos nos quais uma simples filtração é suficiente, retornando a água para alguma etapa do processo.

As indústrias têxteis apresentam uma elevada relação de volume de água consumido por volume de material têxtil processado, conseqüentemente, a geração de efluentes líquidos e a carga poluente são elevadas. Contudo, tem-se buscado alternativas para um menor consumo de água e técnicas de reúso e reciclagem em seus processos de forma a não comprometer a qualidade do produto.

Um dos primeiros métodos para resolver o problema da alocação ótima da água foi apresentado por TAKAMA *et al.* (1980), que utilizaram como base a alocação ótima de água em refinarias de petróleo. Todos os sistemas alternativos foram combinados em um sistema integrado através da utilização de superestruturas variáveis no ponto onde uma corrente de água é dividida em mais que duas correntes e no ponto onde as correntes se juntam para abastecer uma unidade. Os valores correspondentes a estas estruturas variáveis foram determinados pelas condições estabelecidas nos processos, como minimizar o custo total, critérios impostos pelo balanço material e relações entre as unidades que usam água e as unidades de tratamento de efluentes. O problema não linear foi tratado como um problema linear sem restrições de desigualdades (que são não lineares) através da introdução de funções penalidades, e então o problema foi resolvido iterativamente utilizando o método Complex.

A simulação é uma ferramenta versátil, que permite às Companhias responder questões tipo “what if” (o que aconteceria se) sobre mudanças em seus sistemas sem ser necessário efetuar as mudanças na prática.

Com o avanço da informática, disponibilizando processadores mais velozes e “software” robustos, os modelos que utilizam os conceitos de simulação e otimização simultaneamente tem-se tornado cada vez mais freqüentes, associando-se os objetivos da otimização às vantagens da simulação.

Medidas de controle da poluição industrial estão focadas nos processos de produção. As empresas têm adotado políticas e práticas preventivas com o desenvolvimento de tecnologias limpas visando à minimização de resíduos em todas as etapas do processo produtivo.

A mudança em questão, portanto, ocorre com a substituição de tecnologias de tratamento e de disposição de efluentes por procedimento que visem a sua minimização. Esta abordagem está recebendo apoio crescente não apenas dos legisladores e da comunidade, mas também do segmento empresarial. A existência de um crescente número de incentivos, implicando na diminuição de custos operacionais e de impostos, contribui para esta aceitação (QUEIROZ E PESSOA, 2003)

A adoção de tecnologias limpas mostra-se um componente fundamental do desenvolvimento sustentável, já que minimizando os resíduos industriais, reduz a poluição e ao mesmo tempo aumenta a eficiência e reduz o custo operacional dos processos industriais.

Existem três formas para reduzir a geração de efluentes líquidos:

- Reúso: o efluente é utilizado em outra operação sem nenhum tratamento prévio, desde que o nível de contaminantes não prejudique o processo nessa operação. Desta forma, consegue-se reduzir o consumo de água primária. Normalmente, a carga de contaminantes na corrente permanece inalterada (Figura 2.2 a).

- Regeneração com reúso: o efluente de uma ou mais operações passa por um tratamento para remoção parcial de contaminantes, visando possibilitar a sua utilização em outra operação. Com esta opção ocorre uma diminuição no volume consumido de água primária, no volume de efluente gerado e na carga de contaminantes em função da regeneração (Figura 2.2 b).

- Regeneração com reciclo: o efluente sofre tratamento parcial para remoção de contaminantes e, neste caso, pode ser reutilizado no mesmo processo que o gerou. Novamente há uma diminuição no volume consumido de água primária, no volume de efluente gerado e na sua carga de contaminantes (Figura 2.2 c).

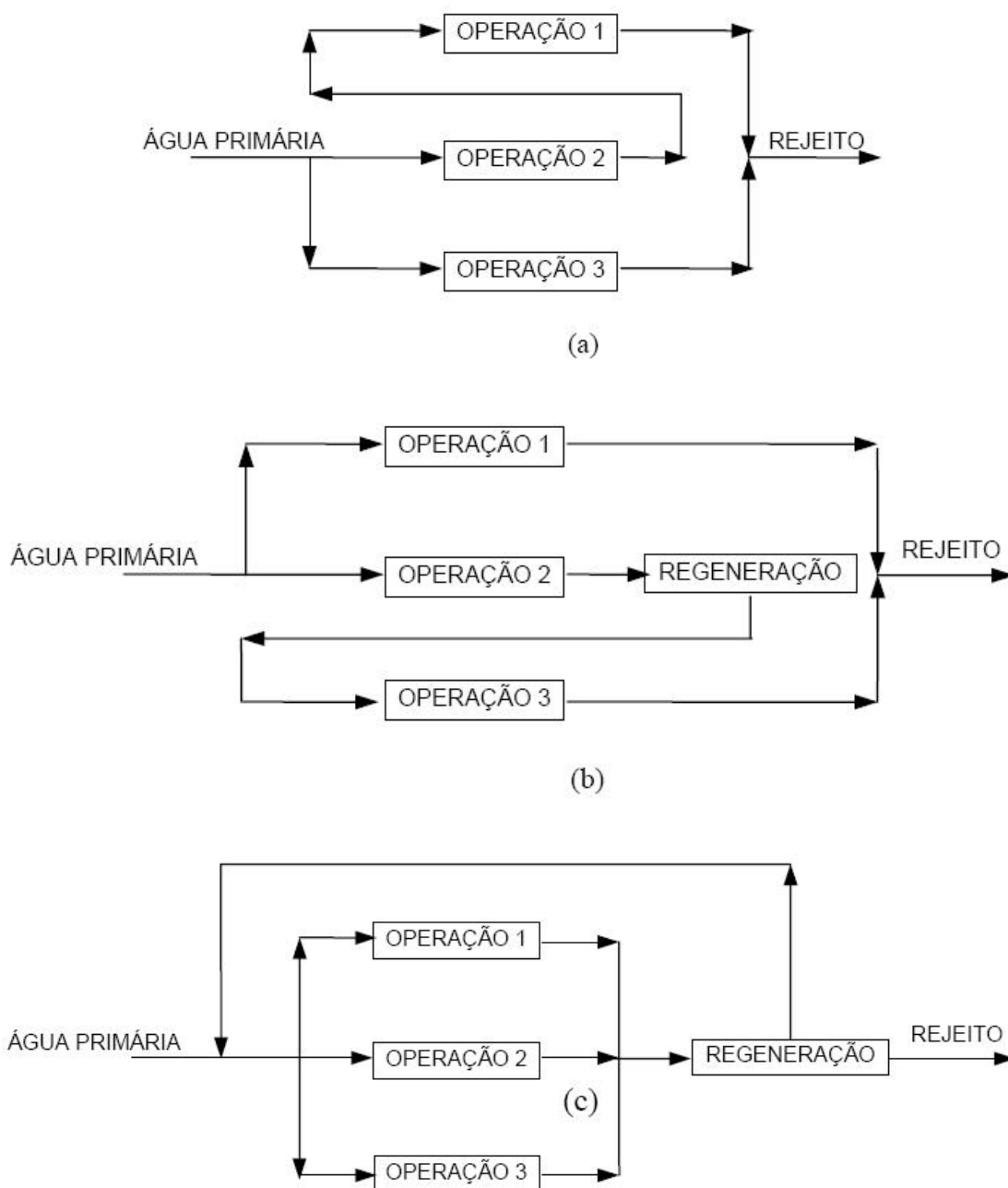


Figura 2.2 – Minimização do consumo de água primária via (a) reúso; (b) regeneração com reúso; (c) regeneração com reciclo.

É importante diferenciar a regeneração com reúso da regeneração com reciclo, já que o reciclo pode causar o acúmulo de contaminantes indesejáveis não removidos na regeneração.

Na integração de processos existem vários métodos sistemáticos de síntese que vêm sendo utilizados com sucesso em aplicações de prevenção de poluição. Eles podem ser classificados em três linhas, em função da ferramenta utilizada: Sistemas Especialistas, Procedimento Algoritmo e Programação Matemática (QUEIROZ e PESSOA, 2003).

- Sistemas Especialistas – Este termo é utilizado para descrever os métodos de síntese de processos e de integração de processos construídos com base no conhecimento acumulado de idéias já provadas. Nesse conjunto estão incluídos os métodos heurísticos, onde a seqüência lógica da evolução do diagrama segue regras geradas com base em experiências prévias. Muitas vezes essas regras permitem a identificação e avaliação de opções de minimização de rejeitos.

- Procedimentos Algoritmos – Nesta linha pode-se incluir a Tecnologia *Pinch*, que é uma técnica de análise sistemática do comportamento de correntes de processos industriais baseada em fundamentos da termodinâmica. É amplamente utilizada para definir possíveis mudanças no processo para a redução do consumo de energia. Também é aplicada para indicar opções para a redução do consumo de água de processo em plantas industriais através do seu reúso e/ou reciclo.

- Programação Matemática – Existe uma grande variedade de abordagens de otimização numérica, que vai desde a simulação de processos com modelos matemáticos simples até sofisticados métodos de programação matemática. O propósito do procedimento (por exemplo, minimizar a emissão de efluentes ou maximizar o potencial econômico do processo) é representado pela chamada função objetivo. O seu valor é maximizado ou minimizado através de um processo de otimização que deve satisfazer restrições de igualdade, representadas, por exemplo, por equações de balanço material e de energia, equações impostas para o processo e restrições termodinâmicas. Há também restrições de desigualdade que podem ser de natureza ambiental (concentração de alguns poluentes deve ser menor que um certo nível), técnica (temperatura, pressão e/ou vazão não devem ultrapassar um determinado valor)

e termodinâmica (valores positivos da força motriz em processos de transporte de massa e energia). A grande maioria dos métodos nesse conjunto tem sua aplicação restrita a problemas com um único contaminante.

O grupo dos Procedimentos Algorítmicos tem a sua maioria baseada na Tecnologia do Ponto de Estrangulamento, isto é, na Tecnologia *Pinch*. Há ainda alguns algoritmos que utilizam alguns conceitos da Tecnologia *Pinch* e se utilizam de algumas regras heurísticas. Cabe aqui ressaltar que a Tecnologia *Pinch* ao ser aplicada em problemas com múltiplos contaminantes está baseada em um procedimento gráfico de difícil utilização (QUEIROZ & PESSOA, 2003).

2.7 – INTERFACE GRÁFICA DE USUÁRIO

Uma interface gráfica de usuário (*GUI – GRAPHICAL USER INTERFACE*) é uma interface pictórica com um programa. Uma boa GUI pode tornar os programas mais fáceis de usar, ao fornecer para eles uma aparência consistente e com controles intuitivos como botões, caixas de listagem, réguas, menus, e assim por diante. A GUI deve se comportar de maneira compreensível e previsível, para que o usuário saiba o que esperar ao executar uma ação. Por exemplo, ao pressionar o botão do mouse sobre um botão da interface, a GUI deve iniciar a ação descrita no rótulo do botão.

Uma GUI proporciona ao usuário um ambiente familiar para trabalhar. Esse ambiente contém botões, chaves, listas, menus, caixas de texto e outros, já familiares para o usuário, assim ele pode se concentrar em utilizar a aplicação em vez de cuidar da mecânica envolvida em fazer as coisas. Entretanto, as GUIs são mais difíceis para o programador, pois um programa baseado em GUI precisa ser preparado para os botões do mouse (ou possivelmente entrada pelo teclado) para qualquer elemento da GUI a qualquer momento.

As GUIs do MATLAB são criadas utilizando uma ferramenta denominada *guide*, o Ambiente de Desenvolvimento de GUI. Essa ferramenta permite que um programador projete a GUI, selecione e alinhe os componentes colocados nela. Quando os componentes estão dispostos em seus lugares, o programador pode editar suas

propriedades: nome, cor, tamanho, fonte, texto exibido, e assim por diante. Quando a guide faz uma chamada ao sistema operacional solicitando que a GUI seja gravada em algum tipo de dispositivo (fixo ou móvel), ele cria um programa funcional que inclui funções de esqueleto que o programador pode modificar para implementar o comportamento da GUI. A ferramenta MATLAB denominada guide é utilizada para desenhar os componentes em uma figura. Quando a figura é gravada, dois arquivos são criados no disco com o mesmo nome, mas extensões diferentes. O arquivo fig contém a GUI criada, e o arquivo M contém o código para carregar a figura e os esqueletos de chamadas de retorno para cada elemento de GUI. As caixas de diálogo podem ser modais ou não modais. Enquanto não é fechada, uma caixa de diálogo modal não permite que outra janela na aplicação seja acessada; uma caixa de diálogo não modal não bloqueia o acesso a outras janelas. Caixas de diálogo modais são tipicamente utilizadas para mensagens de aviso e de erro, que precisam de atenção urgente e não podem ser ignoradas.

2.8 – O MÉTODO DO DIAGRAMA DE FONTES DE ÁGUA

Na maioria dos processos industriais efluentes líquidos podem ser gerados em diversas operações. Sua caracterização é feita através da especificação do volume ou da vazão do efluente gerado, do tipo dos contaminantes e das respectivas cargas (concentrações).

Desconsiderando a possibilidade de fazer grandes modificações na estrutura do processo para reduzir a demanda inerente de água, existem três formas para reduzir a geração de efluentes líquidos, já citadas no item 2.6, que seriam: reúso, regeneração com reúso e regeneração com reciclo.

O Método do Diagrama de Fontes de Água, apresentado por Gomes (2002) e baseado nos trabalhos de Castro *et al.* (1999) e de Wang e Smith (1994b), visa auxiliar engenheiros de processo a desenvolver de forma mais prática e eficiente os projetos para minimização de água e efluentes aquosos. O algoritmo efetua simultaneamente a especificação de metas de consumo e a síntese da rede e pode ser aplicado na solução

de problemas com um contaminante e com múltiplos contaminantes para os casos de reúso, regeneração com reúso e regeneração com reciclo em processos com restrição de vazão, com múltiplas fontes de água, e com perdas inerentes ao processo (QUEIROZ e PESSOA, 2003).

Visando mostrar a sistemática desde método, será apresentado um problema exemplo analisando o caso de máximo reúso, múltiplas fontes, restrição de vazão e regeneração com reúso.

O processo exemplo utilizado é o apresentado em Yang *et al.* (2000), cujos dados limites para as correntes de água de processo encontram-se na Tabela 2.3. Na tabela são apresentadas as vazões limites (f_k) e as respectivas concentrações máximas na entrada e na saída ($C_{ik,max}$, e $C_{fk,max}$) de cada operação, bem como as cargas de contaminante (m_k) correspondentes. O índice k identifica a operação. Esta concentração máxima de saída pode ser especificada considerando-se vários fatores, dependendo do processo em estudo, como: solubilidade máxima do contaminante, limite de corrosão, limite de deposição, mínima força motriz de transferência de massa no equipamento e máxima concentração de entrada para os processos de tratamento.

Tabela 2.3 – Dados do problema exemplo (Yang *et al.*, 2000).

Operação (k)	f_k (t/h)	$C_{ik,max}$ (ppm)	$C_{fk,max}$ (ppm)	m_k (g/h)
1	35	0	200	7000
2	56	100	500	22.400
3	139	200	650	62.550
4	10	0	200	2000

2.8.1 – Reúso Máximo

Considere um conjunto de correntes no processo no qual há necessidade de reduzir a carga de algum contaminante através de um agente extrator, neste caso a água. Esta operação será realizada em equipamentos que serão chamados de equipamentos de transferência de massa. Cada corrente de processo tem uma vazão

G_k e deve ser levada de uma concentração inicial $C_{PROC,Ik}$ até uma composição desejada final $C_{PROC,Fk}$ da espécie contaminante. Cada corrente do agente extrator tem uma vazão f_k , com uma concentração inicial do contaminante C_{ik} e uma concentração final C_{fk} . A taxa de massa de contaminante a ser transferida entre as correntes (m_k) pode ser determinada através do balanço de massa em relação ao contaminante:

$$\Delta m_k = G_k \times (C_{PROC,Ik} - C_{PROC,Fk}) = f_k \times (C_{fk} - C_{ik}) \quad (1)$$

onde, com C em ppm, e G e F em t/h, m encontra-se em g/h.

Como o objetivo é minimizar a utilização de água primária ($C_{ik} = 0$) deve-se maximizar a composição de saída da corrente de água (C_{fk}) de modo a se necessitar de sua menor vazão.

Analisando a Equação 1, é possível dizer que somente o uso de água primária na operação minimiza o uso de água, conseqüentemente a geração de efluentes. Mas quando se tem mais de uma operação envolvida, o uso de água primária em todas as operações não garante o seu mínimo consumo global, já que pode haver a possibilidade de utilização de parte do efluente de uma operação como fonte (alimentação) em outra operação. A possibilidade de reutilização de efluentes é determinada pela máxima concentração de entrada da corrente de água ($C_{ikmáx}$) nas diversas operações. Esse reuso contribui para a diminuição do consumo de água primária, e quando ele for máximo o consumo de água industrial (fonte externa) será mínimo e o objetivo será alcançado.

Para minimizar a vazão de água global, deve ser feita uma análise envolvendo todas as operações que utilizam água. As concentrações de entrada e de saída das correntes aquosas em cada operação definem um intervalo de concentração. O procedimento proposto é apresentado a seguir de forma seqüencial.

- 1º Etapa:

O problema é dividido em intervalos de concentração, limitados pela fonte de água primária, definida como fonte externa ($f_{p,k,i}^e$), e as fontes de água com concentrações iguais às de entrada e de saída das operações, definidas como fontes internas ($f_{p,k,i}^i$). As fontes são colocadas em ordem crescente de concentração, definindo os intervalos de concentração, e por conseqüência, o diagrama de fontes de água conforme apresentado na Figura 2.3. Para o problema exemplo, temos somente uma

fonte externa, com concentração nula, então $C'_{fe} = \{0\}$. A partir das fontes internas temos, $C'_{fi} = \{100, 200, 500, 650\}$. Os valores de concentração que definirão os limites dos intervalos são os valores de concentração de todas as fontes disponíveis de água. Para o problema exemplo, $C' = \{0, 100, 200, 500, 650\}$.

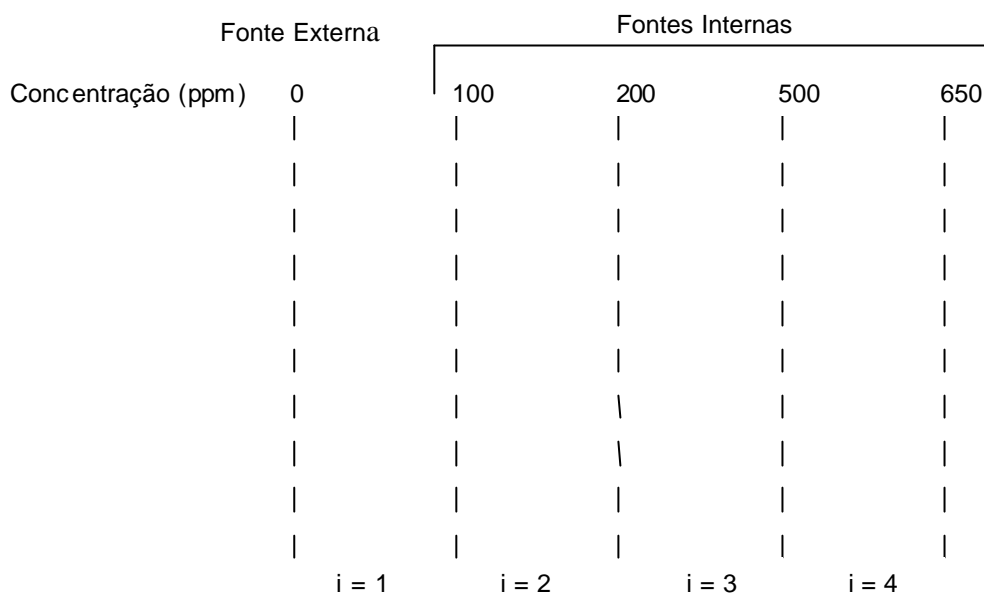


Figura 2.3 – Representação do Diagrama de Fontes de Água (1º etapa).

- 2º Etapa:

As operações de transferência de massa são representadas por setas, cuja origem é uma caixa de identificação da operação, posicionada na respectiva concentração máxima de entrada; e a ponta, corresponde à concentração máxima de saída. As vazões limites das operações, f_k , são escritas no lado esquerdo do diagrama, conforme representado na Figura 2.4. Para facilitar a visualização, recomenda-se ainda que as operações sejam colocadas no diagrama, de cima para baixo, em função da ordem crescente das concentrações de entrada.

- 3º Etapa:

O cálculo da quantidade de massa transferida em cada processo k e em cada intervalo i (Δm_{ki}) é calculada pela Equação 2.

$$\Delta m_{ki} = f_k \times (C_{fi} - C_{ii}) \tag{2}$$

Onde C_{fi} é a concentração final do intervalo i , C_{fi} é a concentração inicial do intervalo i , f_k é a vazão mássica limite da corrente da operação k . Os resultados obtidos para o problema exemplo podem ser observados na Figura 2.5 entre parênteses sobre as setas, sendo expressos em g/h.

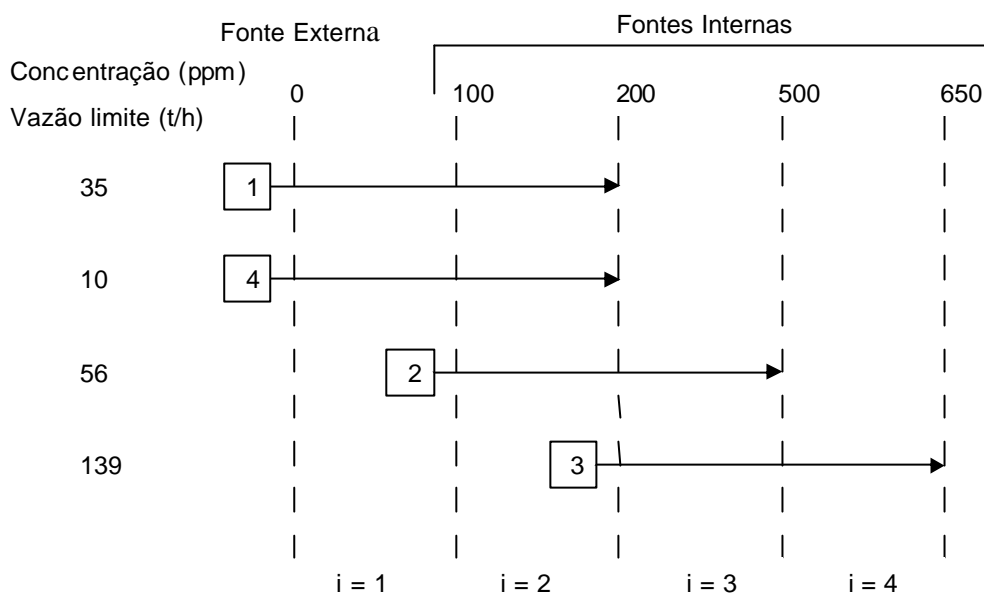


Figura 2.4 – Representação das operações do Diagrama de Fontes de Água (2ª etapa).

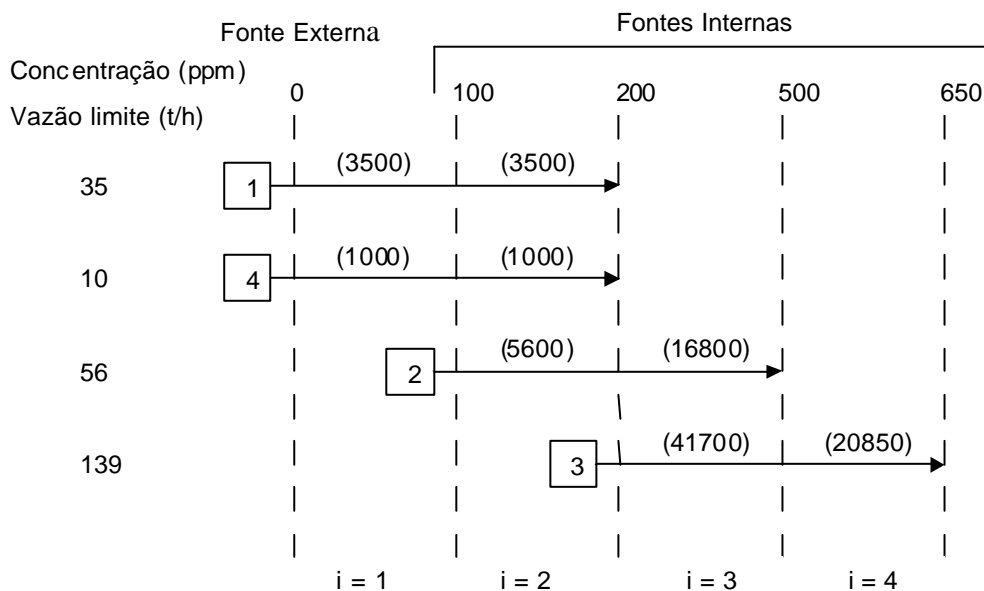


Figura 2.5 – Representação no Diagrama de Fontes de Água da quantidade de massa transferida em cada processo (3ª etapa).

- 4º Etapa:

Para assegurar que a mínima vazão de água primária será utilizada, o procedimento para a construção da rede de transferência de massa inicia-se no intervalo de menor concentração e duas regras devem ser satisfeitas:

Regra 1: Utilizar fontes externas somente quando não houver fonte interna disponível, tanto em quantidade quanto em qualidade. Na disponibilidade de fonte interna, usar preferencialmente a oriunda da mesma operação.

Regra 2: Para uma determinada operação, a fonte de água utilizada em um certo intervalo de concentração deve absorver a quantidade de massa a ser transferida no respectivo intervalo (isto assegura que as concentrações máximas de entrada e de saída não sejam violadas).

Parte-se então para o cálculo da vazão necessária de água em cada operação por cada intervalo de concentração. Para o problema exemplo, no primeiro intervalo ($i = 1$) tem-se disponível somente vazão da fonte externa. Sendo necessária 35 t/h na operação 1 e 10 t/h na operação 4, para remover a carga contaminante de cada operação. Estes valores de vazão são obtidos usando a Equação 2.

No segundo intervalo de concentração, estão disponíveis 35 t/h (100 ppm) vindos da operação 1 no intervalo 1, 10 t/h (100 ppm) vindos da operação 4 no intervalo 1 e água primária. Para que as operações 1 e 4 não sejam divididas, deve-se utilizar a vazão consumida em cada operação no intervalo de concentração anterior respectivo (Regra 1), vazões estas que satisfazem completamente a exigência de cada operação neste intervalo (de acordo com a Equação 18). Devido a falta de fonte interna, na operação 2 é utilizada a água primária disponível. A vazão da fonte externa é 28 t/h, valor este obtido pela Equação 2.

Deve-se lembrar que a prioridade de utilização é das fontes internas sempre da fonte de maior concentração para a de menor concentração.

No terceiro intervalo de concentração estão disponíveis 35 t/h (200 ppm) da operação 1, 10 t/h (200 ppm) da operação 4, 28 t/h (200 ppm) da operação 3 e água primária. No intervalo 3 existem as operações 2 e 3, seguindo a ordem do Diagrama de Fontes de Água será analisada primeiro a operação 2. Como prioridade será usada a fonte de água interna da própria operação, oriunda do intervalo anterior ($i = 2$). De

acordo com a Equação 2, foi removido 8400 g/h, sendo assim, falta ser removido 8400 g/h. De acordo com a Equação 18, necessita de 28 t/h (200 ppm) para serem removidos os 8400 g/h de carga de contaminantes que faltavam, as quais podem ser completamente fornecidas pela fonte interna originada da operação 1 no intervalo 2. Esta vazão poderia ser fornecida também, em parte, pela fonte interna disponível na operação 4, do intervalo 2. A escolha entre as duas opções, operação 1 ou o uso da operação 4 e 1, originará diferentes redes com diferentes custos. A seta tracejada (linha traço-ponto) na Figura 2.6 representa a vazão requerida pela operação 2, que é fornecida pela operação 1 (ver os dois círculos indicados na Figura 2.6). Para a operação 3, de acordo com a Equação 18, necessita de 139 t/h (200 ppm). Mas tem somente disponível 7 t/h (200 ppm) da operação 1, e 10 t/h (200 ppm) da operação 4, os quais são utilizadas (ver os dois círculos e os dois triângulo indicados na Figura 2.6), conseguindo desta forma remover 5100 g/h de carga de contaminante. Faltando remover 36600 g/h de carga de contaminante, e não tendo mais nenhuma fonte interna, a opção é usar a fonte externa. De acordo com a Equação 2, necessita de 73,2 t/h da fonte externa.

No quarto intervalo estão disponíveis três fontes, a fonte externa de água primária e duas fontes internas: 56 t/h (500 ppm) disponíveis na operação 2 e 90,2 t/h (500 ppm) na operação 3. Existe somente a operação 3 neste intervalo. Inicialmente são utilizados 90,2 t/h, que é a vazão vinda da própria operação no intervalo 3. Com isso foram removidos 13530 g/h de carga de contaminante, faltando assim serem removidos 7320 g/h. Como ainda tem fonte interna possível para utilização, é utilizado 48,8 t/h da operação 2, oriunda do intervalo 3 (ver os dois quadrados indicados na Figura 2.6), não sendo assim necessário o uso de vazão da corrente externa.

Os resultados anteriores indicam que a mistura de correntes de água pode criar uma corrente capaz de remover a mesma massa de contaminante, com uma concentração menor ou igual que a máxima concentração de entrada da operação (Wang e Smith, 1994b; Castro *et al.*, 1999). Logo, uma corrente da fonte interna de água pode ser aproveitada através de sua mistura com uma fonte externa ou outra fonte interna de água com concentrações menores.

Através da Figura 2.6 pode-se notar que no exemplo em questão a mínima vazão de água primária (0 ppm) pode ser obtida pela soma das vazões do intervalo 1, o que resulta em 146,2 t/h. Já o ponto de pinch, localizado na concentração de 500 ppm, pode ser percebido quando o somatório das vazões em cada intervalo muda de 146,2 t/h, que é a concentração do ponto pinch, para 139 t/h.

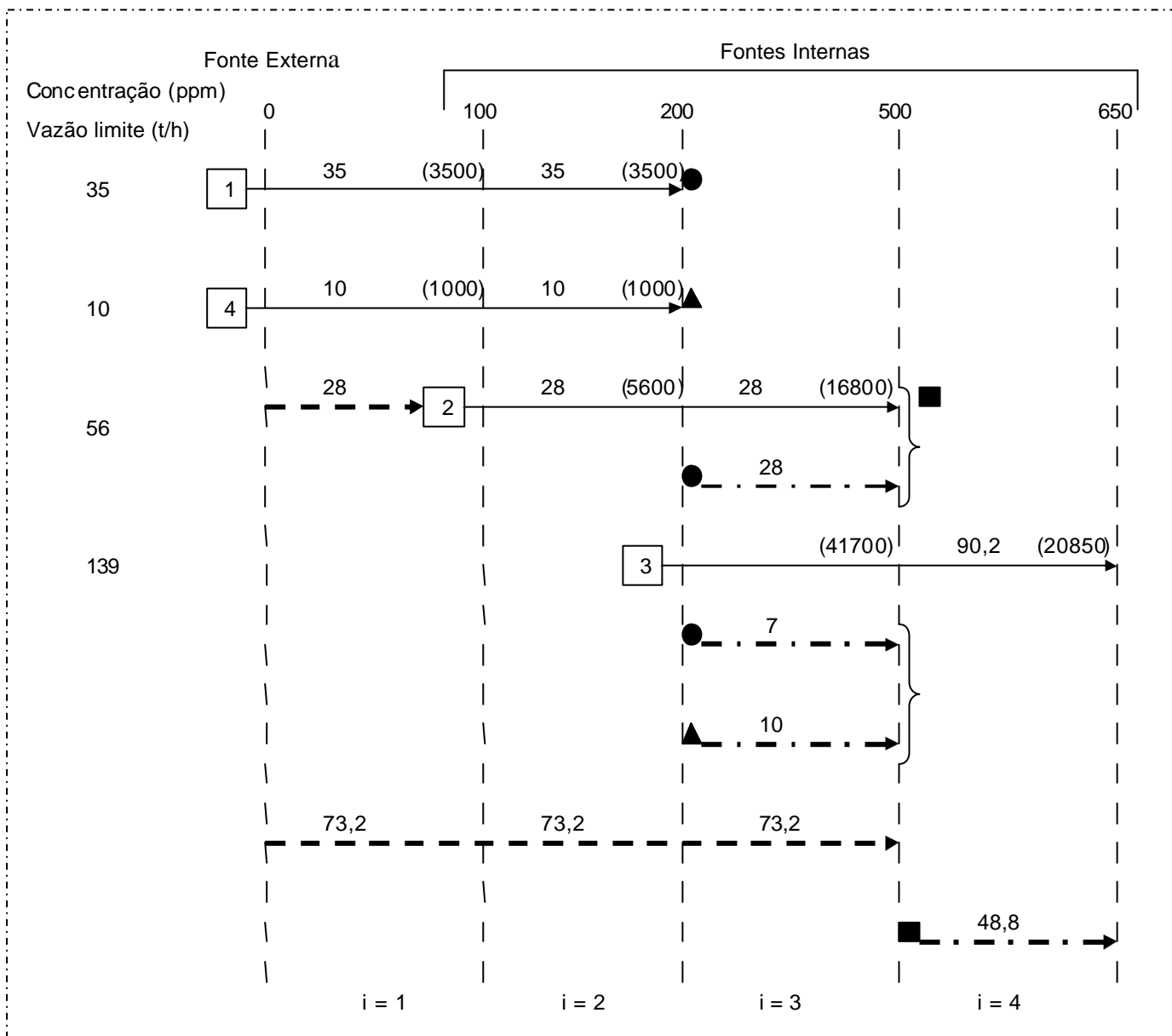


Figura 2.6 – Representação do Diagrama de Fontes de Água das vazões consumidas (4ª etapa).

A partir dos resultados obtidos e representados na Figura 2.6, a Rede de Transferência de Massa (RTM) para o mínimo consumo de água primária é montada, conforme mostrado na Figura 2.7.

Cabe ressaltar que o resultado aqui encontrado é igual ao obtido por Yang *et al.* (2000) para o mesmo processo. Somente a rede de transferência de massa teve algumas alterações, mas a vazão da água fresca utilizada foi a mesma (146,2 t/h). Isto serve para comprovar a eficácia do algoritmo aqui proposto.

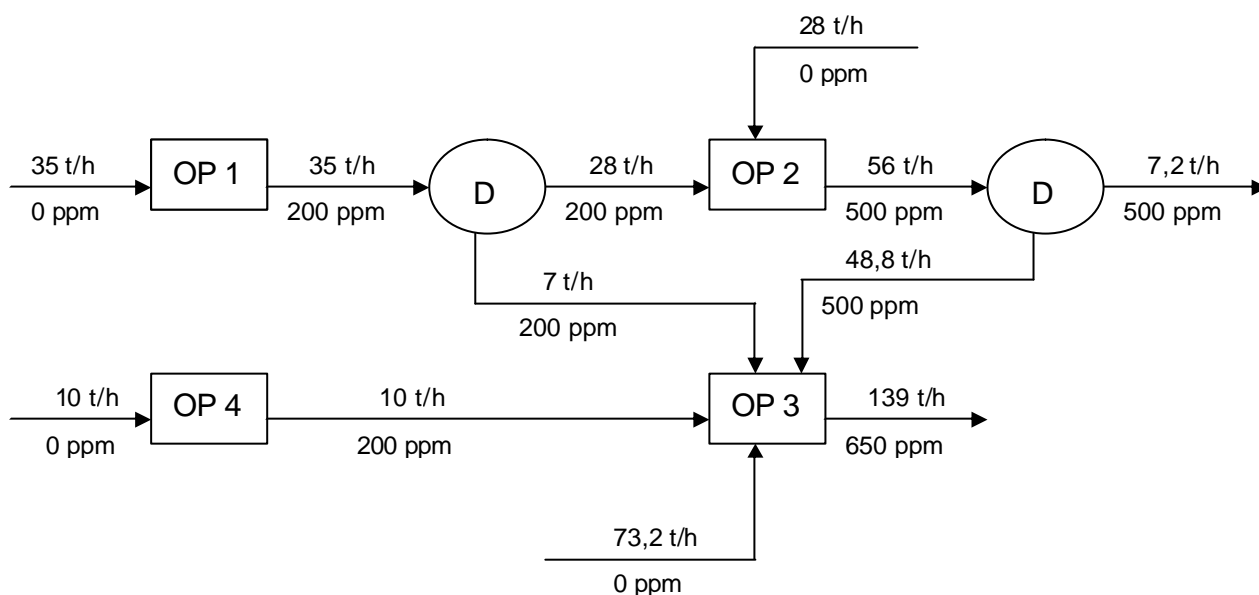


Figura 2.7 – Rede de transferência de massa para o máximo reúso correspondente ao diagrama da Figura 4.4.

A partir dos resultados é possível montar uma tabela comparativa, analisando a vazão de água fresca sem o reúso e com o reúso (Tabela 2.4). Os valores de fluxo de água, sem reúso, para cada operação são obtidos dividindo-se a carga de contaminante pela concentração máxima de saída (supondo assim que a concentração da corrente de entrada é zero, sendo usada somente água de fonte externa em cada operação).

A partir da Tabela 2.4 é possível concluir que houve uma redução de 21,4% no consumo de água fresca depois da aplicação do Diagrama de Fontes de Água no processo.

Tabela 2.4 – Comparação do consumo de água fresca no processo com e sem reúso de água.

Processos	Fluxo de água tratada (t/h)	
	Sem reúso de água	Processo otimizado
OP 1	35,0	35,0
OP 2	44,8	28,0
OP 3	96,2	73,2
OP 4	10,0	10,0
Σ	186,0	146,2

2.8.2 – Restrição de vazão

Existem operações, como limpeza de vasos e transporte hidráulico, que necessitam de uma vazão fixa de água, independente de sua concentração de entrada. Nesses casos, quando o reciclo local é aceitável, sua utilização permite satisfazer as restrições de valores da vazão sem que ocorra alteração na meta de vazão mínima especificada pelo procedimento anterior sem considerar as restrições de vazão.

O procedimento de síntese é análogo ao apresentado no item anterior, no caso de Reúso Máximo (com reúso sem restrição de vazão). Há apenas a inclusão de uma etapa, no final do algoritmo, para satisfazer as restrições de vazão. A etapa consiste em definir uma corrente de reciclo originada em uma fonte de água interna com concentração igual à concentração de saída da operação em questão, para completar o valor requerido de vazão. Como exemplo, considera-se que no problema exemplo todas as operações têm seus valores de vazão fixados e iguais aos limites de vazão citados na Tabela 2.3. As etapas de 1 a 4 são similares ao procedimento empregado no caso de Reúso Máximo, sendo incluída uma quinta etapa.

- 5° Etapa:

Verifique se todas as vazões satisfazem as restrições apresentadas. Caso alguma restrição não esteja satisfeita, deve-se completá-la reciclando a vazão do intervalo que corresponde à máxima concentração de saída da operação.

2.8.3 – Múltiplas Fontes de Água

Na maioria das indústrias existem fontes de água primária com diferentes qualidades. Tendo como objetivo minimizar o custo operacional, deve-se utilizar preferencialmente a fonte de água mais contaminada. Pois esta geralmente tem um custo maior, sendo o custo da água proporcional à sua qualidade.

O algoritmo é similar ao apresentado para o Reúso Máximo. Porém, as concentrações de todas as fontes externas devem ser consideradas (inseridas) no diagrama de fontes de água, podendo gerar novos intervalos de concentração. A prioridade de utilização continua sendo das fontes internas, mas deve ser considerada uma escala de preferência para o uso das fontes externas, de acordo com o custo desta água.

2.8.4 – Regeneração com Reúso

A regeneração pode ser utilizada em conjunto com a opção de reúso para remover contaminantes em uma etapa intermediária, através de processos como filtração e permeação através de membranas. Estes processos de tratamento podem ser utilizados sozinhos ou combinados (GOMES, 2002).

O desempenho de processos de regeneração pode ser especificado pelo parâmetro razão de remoção do contaminante (RR), definido por:

$$RR = \frac{(f_i x C_i) - (f_f x C_f)}{f_i x C_i} \quad (3)$$

onde C_f é a concentração final do intervalo i , C_i é a concentração inicial do intervalo i , f_f é a vazão mássica limite da corrente do intervalo f e, f_i é a vazão mássica limite da corrente do intervalo i .

Considere que o problema exemplo tem um processo de regeneração com uma concentração de saída C_{reg} igual a 150 ppm. O procedimento a ser seguido é similar ao de Reúso Máximo, porém com o acréscimo de um limite de intervalo no diagrama de fontes de água na concentração de 150 ppm que irá ser considerado como uma nova fonte externa de água.

CAPÍTULO 3 - DESENVOLVIMENTO DOS ALGORITMOS COMPUTACIONAIS

Neste capítulo será feita uma descrição da estrutura principal do programa desenvolvido no presente trabalho, detalhando a estrutura referente aos cálculos do lavador contínuo da indústria têxtil original (sem modificações), que teve como base o software desenvolvido no projeto AGUATEX/FINEP, e a partir desta uma descrição detalhada das principais etapas.

3.1 – ESTRUTURAÇÃO DO PROGRAMA PRINCIPAL

A estrutura principal do programa computacional contém as seguintes etapas: entrada de dados através de uma interface com o usuário, construída no Matlab, cálculo do balanço de massa do processo industrial, suposição de um novo cenário para o processo do lavador contínuo da indústria têxtil, opção de escolha do caso de DFA Modificado para os futuros cálculos, cálculo da racionalização da água conforme o caso selecionado, avaliação econômica e apresentação dos resultados através de matrizes.

O diagrama referente à estrutura principal é apresentado na Figura 3.1.

A estrutura do programa computacional referente aos cálculos do lavador contínuo da indústria têxtil original contém as seguintes etapas: 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 reciclós; 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 diagrama referente a esses cálculos, que tem por referência o trabalho proposto por ULSON de SOUZA (1985), é apresentado na Figura 3.2, sendo a seguir, descritas cada uma destas etapas.

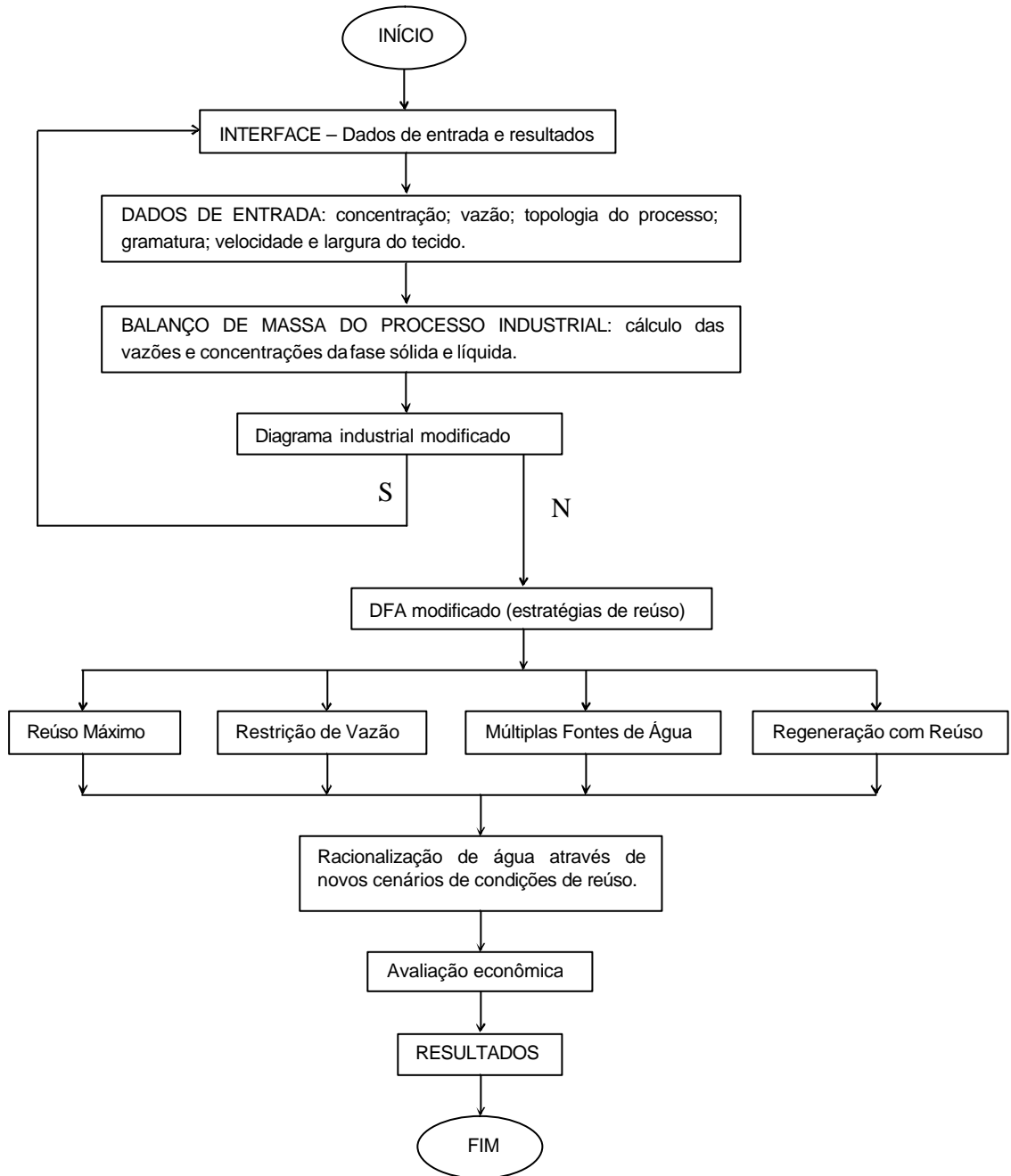


Figura 3.1 – Diagrama da Estrutura Principal.

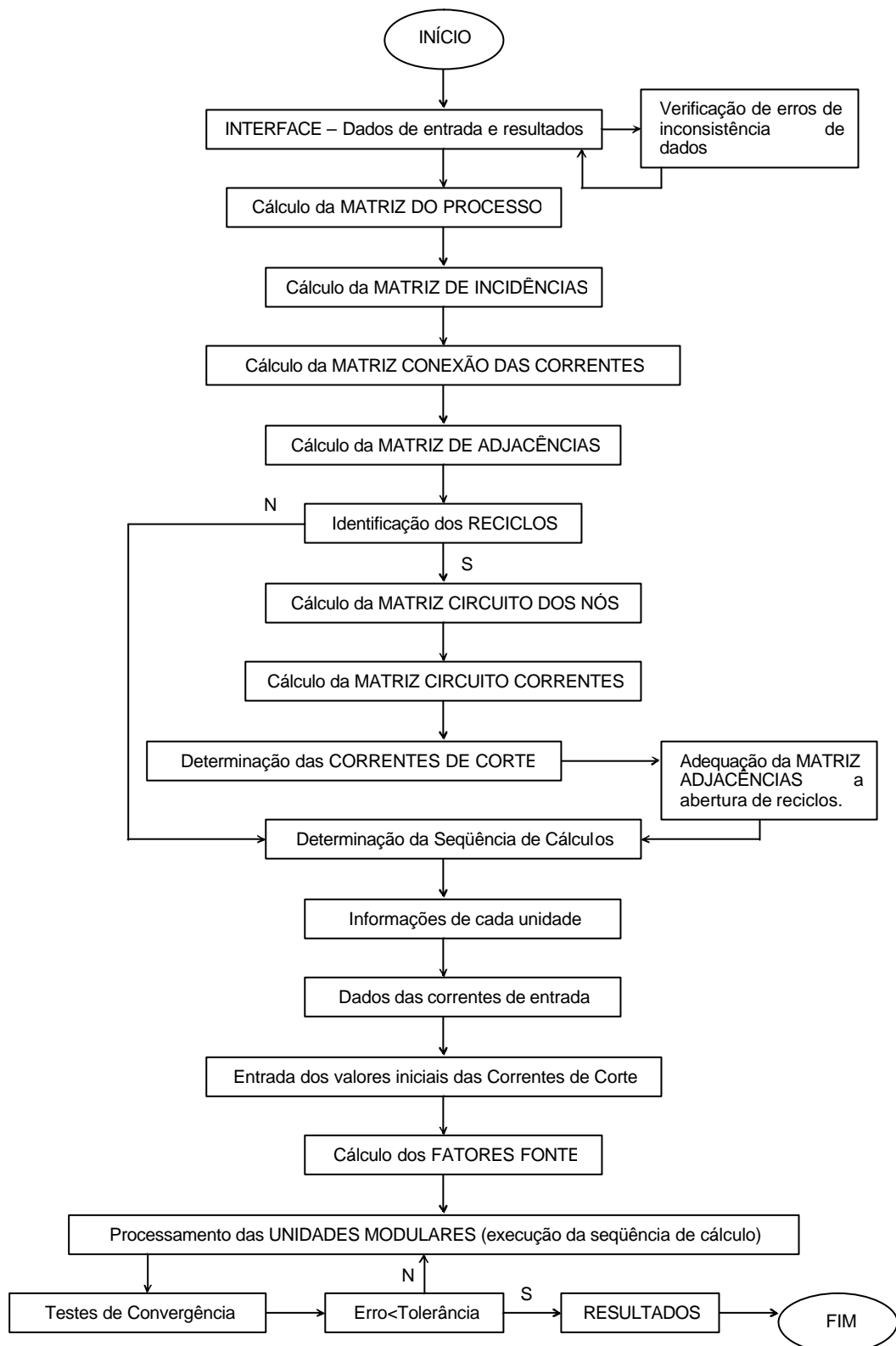


Figura 3.2 – Diagrama referente aos cálculos do lavador contínuo da indústria têxtil original.

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 como menus, caixas de texto, botões, entre outros elementos (CASTRO *et al.*, 2000).

O Matlab é um software interativo de alto desempenho voltado para o cálculo numérico. Ele integra análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos em ambiente fácil de usar. É um sistema interativo cujo elemento básico de informação é uma matriz que não requer dimensionamento.

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.

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 o passo para a integração no tempo para a construção dos gráficos. E também através dela é possível verificar os resultados obtidos. Esta interface é apresentada na Figura 3.3.

SIMULAÇÃO

PROBLEMA ORIGINAL

Número de unidades:

Número de correntes:

Matriz do Processo (MP)

Informações de cada unidade

Gramatura [g/m²]:

Velocidade do tecido [m/min]:

Largura do tecido [m]:

DQO no tecido [gDQO/Kg tecido]:

Correntes de Entrada (CE)

Intervalo de tempo para os gráficos

CÁLCULO DO PROBLEMA ORIGINAL

RESULTADOS

FECHAR

CÁLCULO DO DFA modificado

REUSO MÁXIMO

CÁLCULO

RESULTADOS

MÚLTIPLAS FONTES DE ÁGUA

CÁLCULO

RESULTADOS

RESTRIÇÃO DE VAZÃO

CÁLCULO

RESULTADOS

REGENERAÇÃO COM REUSO

CÁLCULO

RESULTADOS

AVALIAÇÃO ECONÔMICA

CÁLCULO

RESULTADOS

PROPOSTA DE OTIMIZAÇÃO

Número de unidades:

Número de correntes:

Matriz do Processo (MP)

Informações de cada unidade

Gramatura [g/m²]:

Velocidade do tecido [m/min]:

Largura do tecido [m]:

DQO no tecido [gDQO/Kg tecido]:

Correntes de Entrada (CE)

Intervalo de tempo para os gráficos

CÁLCULO DA PROPOSTA DE OTIMIZAÇÃO

RESULTADOS

Figura 3.3– 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: PROBLEMA ORIGINAL). Na mesma ordem em que eles aparecem na interface. 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.

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 3.4 mostra a interface referente à entrada dos dados de topologia do processo.

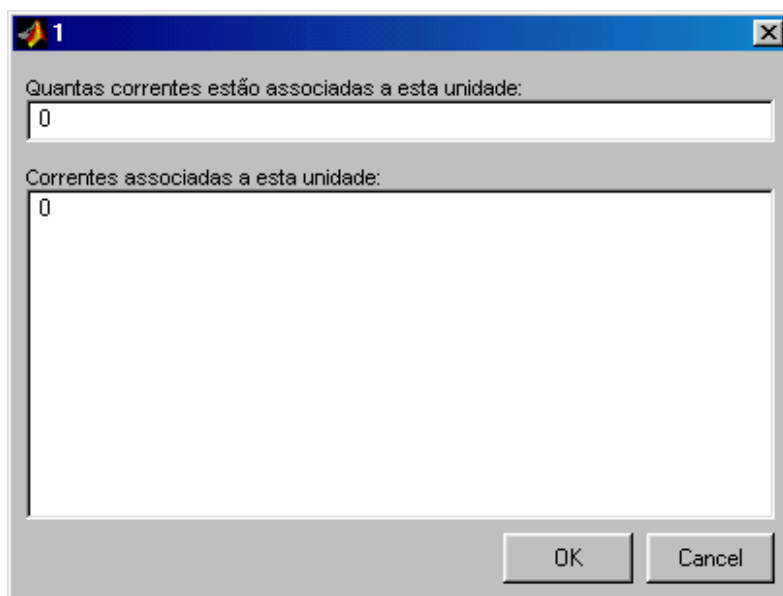


Figura 3.4 – Interface referente à entrada dos dados de topologia do processo.

A Figura 3.5 representa a interface após o acionamento da tecla “Informações de cada unidade”. As “Informações de cada unidade” se referem aos 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. A partir da Matriz do Processo é possível saber se a corrente de *pick up* é de entrada ou saída da caixa em estudo, por isso é possível preencher neste campo todas as correntes com valores positivos, sem se preocupar se ela está entrando ou saindo da unidade caixa. Sendo o seu valor um percentual. O mesmo ocorre no fornecimento dos dados de uma unidade que seja um divisor de correntes, todas as correntes de saída têm valores positivos e seus fatores de divisão correspondentes estão compreendidos no intervalo $0 < f < 1$ (valores percentuais). A partir desta tecla é possível selecionar o tipo de unidade e então fornecer os parâmetros desejados. Para o caso de uma caixa do lavador contínuo, a tela padrão é apresentada na Figura 3.6. Para o acesso de uma nova unidade, por exemplo, um misturador, deve-se retornar à interface da Figura 3.5, e fazer a escolha adequada. A representação para um divisor de correntes é ilustrada na Figura 3.7. Este procedimento se repete até a entrada dos parâmetros de todas as unidades do processo.



Figura 3.5 - Interface após o acionamento da tecla "Informações de cada unidade".

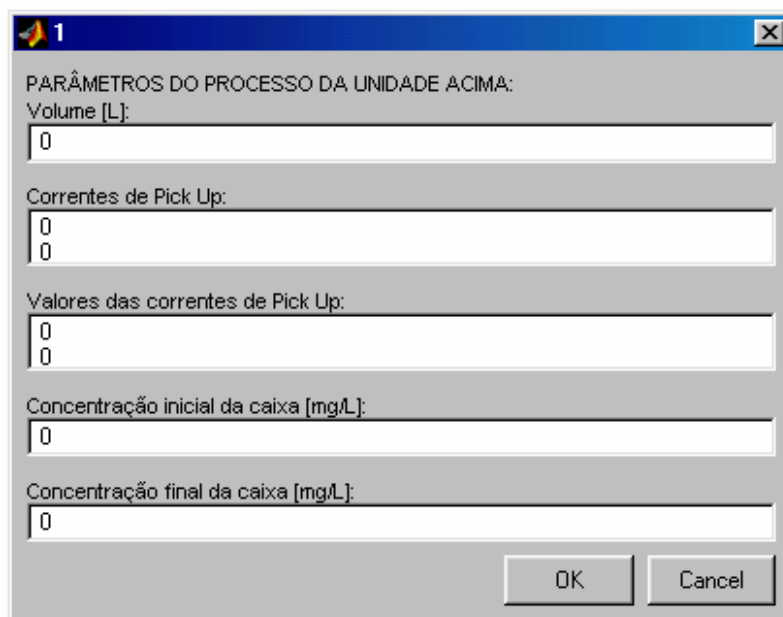


Figura 3.6 – Interface da unidade caixa do lavador contínuo.

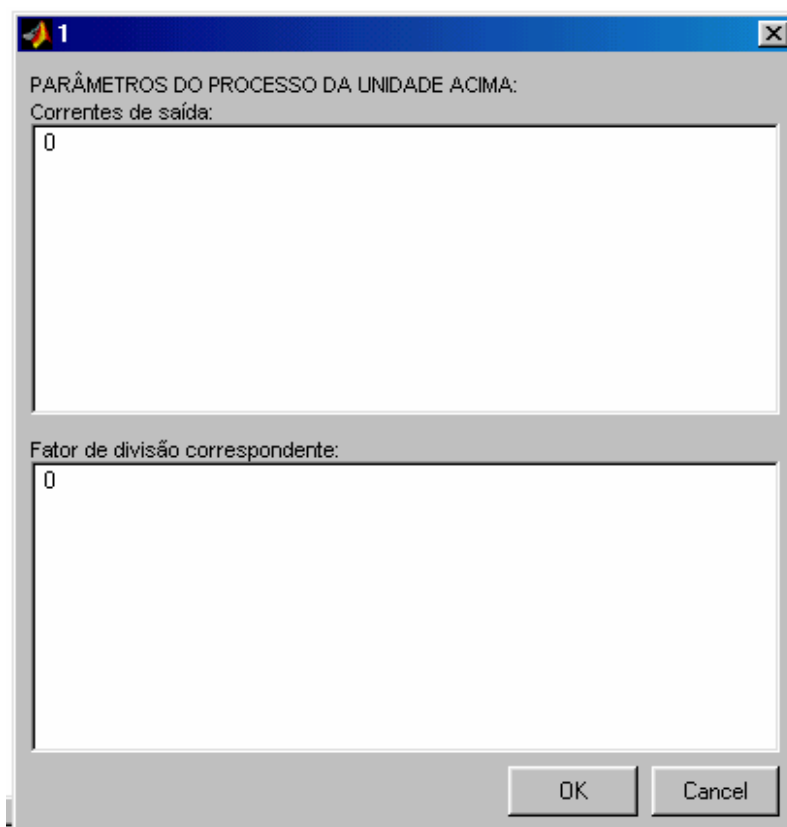


Figura 3.7 – Interface da unidade divisor de correntes.

Através do acionamento do botão “Valor de DQO no tecido [g DQO/Kg tecido]” é possível fornecer o valor da valor de DQO no tecido antes de entrar na lavanderia.

O botão “Correntes de Entrada (CE)” permite que o usuário possa informar todos os parâmetros de cada corrente de entrada do processo (correntes de água pura e de insumos), sendo estes a vazão (em m³/h) e a valor de DQO (em mg/L), já que estes são conhecidos. A Figura 3.8 apresenta a interface após o acionamento deste botão.

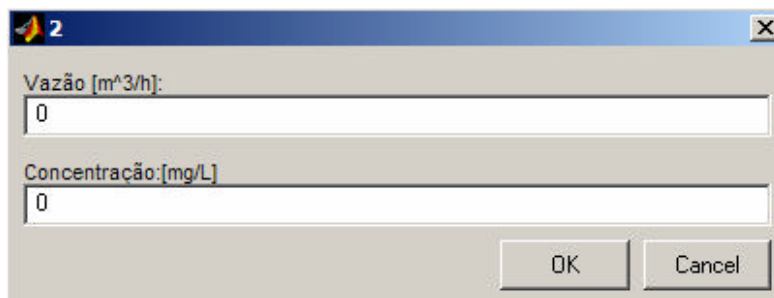


Figura 3.8 – Interface após o acionamento do botão “Correntes de Entrada (CE)”.

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 3.9 representa a interface em questão.

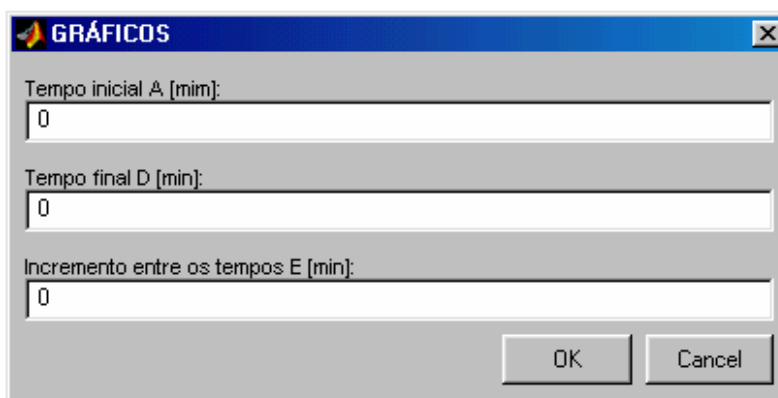


Figura 3.9 – Interface pelo acionamento do botão “Intervalo de tempo para os gráficos”.

Depois de especificados todos os dados é possível realizar os cálculos através do acionamento do botão “CÁLCULO DO PROBLEMA ORIGINAL”. Todos estes dados podem ser visualizados no vídeo através da interface, utilizando o botão “RESULTADOS” (logo abaixo do botão acionado para a realização dos cálculos). É

nesta etapa que os erros de inconsistência associados à gramatura, velocidade e largura do tecido são detectados.

O botão “CÁLCULO DA PROPOSTA DE OTIMIZAÇÃO” será usado quando se pretende oferecer um novo layout da lavanderia têxtil e para calcular as condições finais (concentrações de cada corrente e cada caixa, assim como a remoção de DQO), visando avaliar se o novo layout é mais eficiente que o original ou não. E a coluna do meio é referente aos cálculos utilizando a ferramenta do DFA Modificado, que será descrita no Capítulo 4.

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 3.4 na seção 3.2), onde devem ser fornecidas pelo usuário as correntes associadas a cada unidade.

A fim de exemplificar a construção de cada uma das matrizes citadas, será usada a Figura 3.10, que representa um diagrama 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.

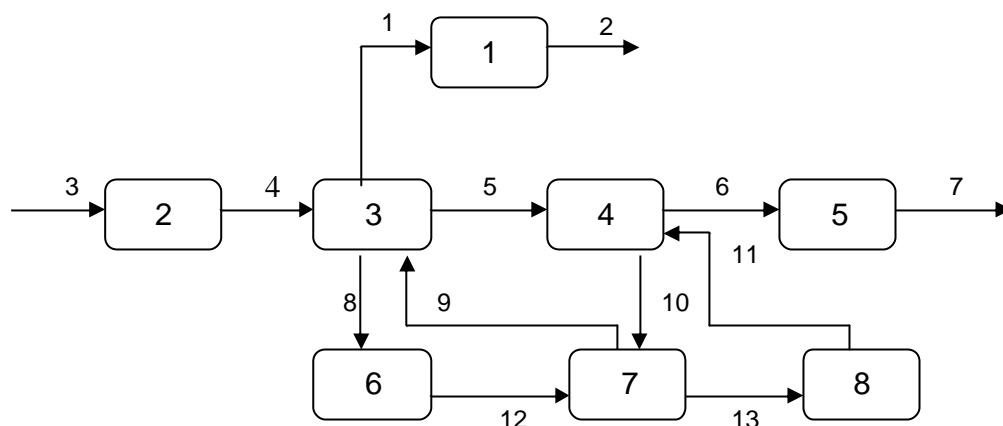


Figura 3.10 – Diagrama de informação de um processo químico qualquer.

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 diagrama 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.

Tabela 3.1 - Matriz do Processo referente ao diagrama de informações da Figura 3.10.

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

3.3.2 – Matriz de Incidências

A Matriz de Incidências é um outro método numérico de fornecer o diagrama 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 que pode ser obtida desta matriz, a partir da soma de cada coluna (não contando a primeira linha, que se refere as correntes), é a seleção das correntes de entrada e saída das unidades modulares. Se a soma resultar em zero indicará que a corrente faz a conexão entre duas unidades e se a soma for igual a 1 ou -1 indicará que a corrente é de alimentação ou de saída, respectivamente.

Tabela 3.2 – Matriz de Incidências referente ao diagrama de informação da Figura 3.10.

Unidades	Corrente número												
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
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 contém 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.

Tabela 3.3 – Matriz Conexão das Correntes referente ao diagrama de informações da Figura 3.10.

Corrente	da unidade	para a
Número	número	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 diagrama do processo. Mesmo assim é de grande utilidade, pois é usada no reconhecimento de ciclos.

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, 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 diagrama de informações da Figura 3.10.

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

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

Três matrizes são utilizadas pelo algoritmo de Tiernan (Figura 3.10), 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 conveniência para os passos seguintes, foi 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:

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

$G\{P(K), j\} \notin P$
 $G\{P(K), j\} \notin H\{P(K), m\} \quad m=1,2,\dots,N$
 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 3.11 – Algoritmo de Tiernan para identificação de recícos.

3.5 – DETERMINAÇÃO DAS CORRENTES DE CORTE

Se no processo estudado existem recícos, 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 recícos. 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).

Depois de identificadas, os valores iniciais das correntes de corte são fornecidos automaticamente pelo programa, sem necessitar a intervenção do usuário.

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 reciclos aberta.

3.6 – DETERMINAÇÃO DA SEQÜÊNCIA DE CÁLCULOS

Após a Matriz de Adjacências ser modificada para representar o processo com a malha de reciclos 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 sucessivamente. Após a n-ésima execução deste algoritmo, a Matriz de Adjacências deve resultar em uma matriz nula.

3.7 – 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 α .

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:

$$C = \frac{C_{impreg}}{PU} \quad (4)$$

Onde:

- C_{impreg} = concentração em gDQO/Kg de tecido seco que sai do banho de tingimento, medida através de ensaios feitos no laboratório do SENAI de Blumenau;
- PU = valor do *pick up* (em Kg de água/Kg de tecido seco) referente à corrente de entrada;
- C = concentração (em gDQO/Kg de água). Deve ser fornecida como dado de concentração de entrada do 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. A partir deste procedimento, é possível determinar toda a DQO contida no mesmo, até aquela relativa ao corante e auxiliares químicos que estão adsorvidos. Um aspecto importante a ser observado é que o valor de DQO, determinado por este método, é a melhor estimativa do desempenho do processo de lavação contínuo na indústria. Este resultado somente será obtido após a passagem do tecido por todas as etapas do processo, compreendendo as diversas caixas com a atrição dos rolos e condições de lavação em cada uma delas. Devido à estratégia de fornecer este valor global na solução de *pick up* do tecido que é alimentado na primeira caixa, faz-se necessário compatibilizar o modelo com a situação real do processo, incorporando um parâmetro denominado parâmetro α , atuando como um termo fonte. Na primeira caixa este fator é negativo, já que nem toda a DQO de entrada está disponível na fase líquida, ajustando, assim, o excedente de valor de DQO, estimada a partir das lavagens sucessivas no teste de laboratório, entre o banho da primeira caixa e o tecido.

Quando o termo fonte for um valor positivo, é um indicativo que, na solução do banho da respectiva unidade caixa, ocorreu um aumento do valor de valor de DQO, resultante da ação da atrição dos rolos e remoção do corante do tecido.

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

$$a_i = \frac{C_{Ti}}{C^{\circ}_{Ti}} - 1 \quad (5)$$

Onde:

- α_i = termo fonte da caixa i;
- C_{Ti} = Concentração real de processo da caixa i (em mg/L), no estado estacionário (obtida através de amostras coletadas de cada caixa na empresa);
- C°_{Ti} = Concentração teórica da caixa i (em mg/L), no estado estacionário, calculada pelo programa.

O C°_{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.

3.8 – 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.

3.8.1 – Ponto de Mistura

A unidade modular Misturador de Correntes foi desenvolvida com o intuito de modelar um misturador de correntes de fluidos. A representação esquemática da unidade modular misturador é representada pela Figura 3.12.

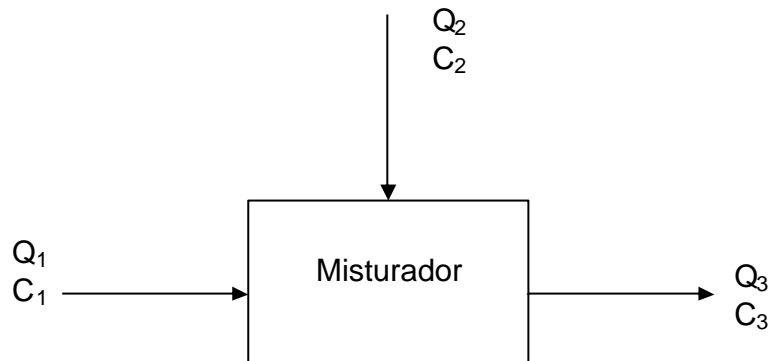


Figura 3.12 – Ponto de Mistura de Correntes

Onde: Q_i – vazão volumétrica da corrente i (em m^3/h);

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

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:

$$Q_f = \sum_{i=1}^n Q_i \tag{6}$$

$$C_f = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i \cdot C_i}{Q_f} \tag{7}$$

Onde Q_f e C_f são respectivamente a vazão e a concentração da corrente de saída do misturador. E Q_i e C_i são os valores da vazão e concentração das correntes de entrada respectivamente. E “n” o número de correntes de entrada da unidade.

3.8.2 – 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 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 3.13.

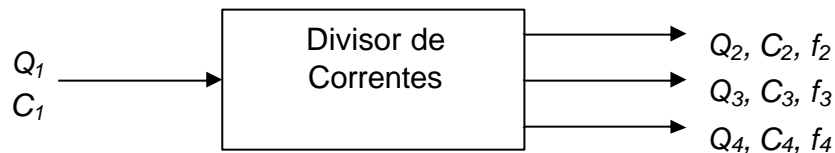


Figura 3.13 – Representação esquemática da Unidade Modular Divisor de Correntes.

Onde: f_i – fator de divisão da corrente i .

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

$$Q_f = f_i \cdot Q_i \quad (8)$$

$$C_f = \frac{f_i \cdot Q_i \cdot C_i}{Q_f} \quad (9)$$

Onde Q_i e C_i são respectivamente a vazão e concentração das correntes de entrada do divisor de correntes. E Q_f e C_f são o valor da vazão e concentração da corrente de saída respectivamente.

3.8.3 – 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 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 3.14.

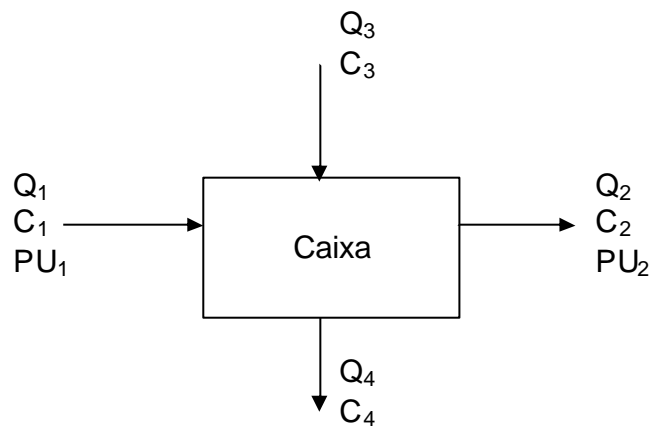


Figura 3.14 – Representação esquemática de uma Caixa.

Onde: 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:

$$Q_i = G \cdot v \cdot lar \cdot PU_i \tag{10}$$

$$\sum_{i=1}^{ni} Q_i = \sum_{f=1}^{nf} Q_f \tag{11}$$

$$C_f = C_T \tag{12}$$

$$C_T = \frac{t \cdot \sum_{f=1}^{nf} (Q_i \cdot C_i) + C_{T0} \cdot V \cdot r}{V \cdot r + t \cdot \sum_{i=1}^{ni} (Q_f)} \quad (13)$$

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. Sendo o “G”, “v” e “lar” a gramatura, velocidade e largura do tecido respectivamente. O “t” é o tempo (usado um valor grande para garantir que o sistema tenha atingido o regime estacionário), “V” o volume de cada unidade caixa, “r” a massa específica da água.

A equação (10) é usada somente nas correntes referentes ao tecido. Onde é fornecido o *pick up* de cada corrente. O *pick up* determina o efeito espremedor do foulard ou retenção da solução pelo tecido, em um processo contínuo.

3.9 – TESTE DE CONVERGÊNCIA DOS RESULTADOS

Na grande maioria dos processos químicos existem ciclos, 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:

$$Dr = \left| \frac{VI(i) - VC(i)}{VI(i)} \cdot 100 \right| \quad (14)$$

Onde: Dr = Desvio relativo;

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

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

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.

3.10 – EQUAÇÃO PARA O CÁLCULO DE REMOÇÃO DE DQO DO TECIDO

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

$$\frac{d(MC)}{dq} + \sum Q_f C - \sum Q_i C_i = 0 \quad (15)$$

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:

$$t = \frac{V}{\sum Q_i} \quad (16)$$

Onde:

- τ : é o tempo de residência do tecido dentro da unidade caixa [h];
- V : volume da caixa [m³];
- $\sum Q_i$: é o somatório de todas as correntes que estão entrando na unidade caixa em questão.

Rearranjando a equação (15), considerando-se a hipótese de solução diluída, e utilizando a equação global da massa para regime permanente, obtêm-se:

$$\frac{\sum Q_i C_i}{\sum Q_i} - C = rt \frac{dC}{dq} \quad (17)$$

Integrando a equação (17) no intervalo de tempo $0 < \theta < \tau$ obtêm-se a remoção de DQO do tecido, ΔC , dada pela equação:

$$C - \frac{\sum Q_i C_i}{\sum Q_i} = \Delta C \quad (18)$$

Sendo “C” a valor de DQO das correntes de saída da unidade caixa em questão no estado estacionário.

O sinal da equação (18) foi invertido para atender à condição de $\Delta C > 0$ para a remoção de DQO do tecido (termo fonte).

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

$$DQO_f = DQO_{remoção} \frac{\dot{V}_{\text{Água}_{\text{alimentação}}}}{\dot{V}_{\text{Vazão}_{\text{tecido seco}}}} \quad (19)$$

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;

- $\dot{V}_{\text{Água}_{\text{alimentação}}}$ [m³/h]: (água pick up + água industrial + insumo químico + água de reúso);

- 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 reúso: 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 racionalização sugeridas tem como critério o reúso de correntes com valor de DQO menor que a de saída da unidade caixa a qual ela está sendo destinada.

CAPÍTULO 4 – DFA MODIFICADO

Neste capítulo será apresentado o procedimento algorítmico proposto (o método do Diagrama de Fontes de Água Modificado) para o reúso de água na lavanderia têxtil, utilizado no presente trabalho.

Quando se elabora um planejamento e/ou uma programação, várias são as premissas adotadas pelo responsável, tornando as respostas consequência direta da ocorrência dessas premissas. Em muitos casos, algumas premissas são tão relevantes, que a sua não ocorrência invalida todo o processo, tornando a direção indicada pelo modelo inconsistente.

O Método do Diagrama de Fontes de Água, apresentado na seção 2.8, é usado como base para o trabalho desta tese. Visando mostrar a nova concepção adotada, neste capítulo serão apresentadas todas as modificações realizadas, destacando as inovações.

4.2 – MODELO MATEMÁTICO

O sistema de estudo (lavador contínuo da indústria têxtil) por ser bifásico demanda uma estratégia modificada para o emprego do Método do DFA, para a racionalização de água.

No Método do Diagrama de Fontes de Água - DFA tradicional (Gomes, 2007) a quantidade de massa transferida em cada processo, [massa do contaminante/tempo], é mantida constante. Sendo a Equação 2 a base desta metodologia, onde C tem a

dimensão [massa do contaminante/volume de água] e f é a vazão de água [volume/tempo].

No caso da lavanderia têxtil, não é possível aplicar este conceito, pois se for reduzida a vazão de água vinda da fonte externa, a valor de DQO na solução de banho da unidade caixa aumenta, admitindo-se a taxa de remoção de DQO do tecido constante, levando a uma inconsistência do método, pois haveria a imposição da transferência de massa contrariamente à força motriz dada pelo gradiente de concentração.

No presente trabalho uma modificação do método DFA será utilizada, mantendo-se uma analogia ao procedimento tradicional, aplicado às vazões (f) de entrada e saída de cada processo, no caso as unidades caixa do lavador contínuo, e suas respectivas concentrações (C) em termos da DQO. Como o sistema em estudo é bifásico sólido/líquido, formado pelo tecido e a solução aquosa do banho de lavagem nas unidades caixa, será aplicada a metodologia considerando-se como referência o tecido que entra e sai da unidade caixa e as respectivas concentrações modificadas, pseudo-concentrações, em termos de DQO/massa de tecido seco.

Fazendo-se uma analogia do método DFA tradicional com o procedimento proposto, a variação da valor de DQO (ΔC) deve ser calculada em termos de [massa de DQO/massa do tecido seco]. Neste caso a Equação 20 será usada como base do novo procedimento.

$$\Delta m_k \times Rb_k = \text{constante} \quad (20)$$

Onde o termo Rb_k significa “Relação de banho” da unidade caixa “k”, o qual é obtido dividindo-se o somatório da vazão de água que entra na operação “k” pela vazão de tecido seco da lavanderia.

A concentração modificada, denominada de pseudo concentração, para cada unidade caixa do lavador contínuo, é calculada pela Equação 19, sendo a equação base da metodologia do DFA modificado dada pela Equação 21.

$$\Delta ct_k = f_{Lk} \times \Delta C_k \times Rb = DQO_k \times f_{Lk} \quad (21)$$

Onde:

- O índice “k” identifica a operação;

- ΔC_k = variação de uma “pseudo concentração” no tecido, que deve ser mantida constante durante o desenvolvimento do DFA Modificado (para cada cenário, e cada unidade caixa), cuja unidade é [(gDQO x m³)/(h x Kg tecido)];

- f_{L_k} = é a vazão volumétrica limite (somatório das vazões de entrada na operação que podem ser reutilizadas), sendo a sua unidade [m³/h];

- ΔC_k = variação da concentração na operação (em mgDQO/L);

- Rb_k = “Relação de banho” da unidade caixa, no qual é obtido dividindo-se o somatório da vazão de água que entra na operação pela vazão de tecido seco da lavanderia, cuja unidade é [m³/Kg tecido].

A variação da concentração na operação (ΔC_k) deve ser calculada a partir da seguinte equação:

$$\Delta C_k = C_{T_k} - \left(\frac{\sum (Q_e \cdot C_e)}{\sum Q_e} \right)_k \quad (22)$$

Onde:

- C_{T_k} = concentração de saída da unidade caixa (em mg/L), calculada pela Equação 13;

- Q_e = vazão volumétrica de entrada de cada corrente (em m³/h);

- C_e = concentração de entrada de cada corrente (em mg/L).

Para o cálculo da relação de banho (Rb), é usada a seguinte equação:

$$Rb_k = \frac{(\sum Q_e)_k}{VT} \quad (23)$$

Onde:

- VT = vazão de tecido seco na lavanderia (em Kg tecido/h).

Sendo que a vazão de tecido seco é calculada usando a equação:

$$VT = G \cdot v \cdot lar \quad (24)$$

Onde:

- G = gramatura do tecido (em Kg tecido/m²);

- v = velocidade do tecido (em m/h);

- lar = largura do tecido (em m).

O Método do Diagrama de Fontes de Água Modificado, busca auxiliar engenheiros de processo a desenvolver de forma mais prática e eficiente os projetos para minimização de água e efluentes aquosos em lavadores contínuos da indústria têxtil. O algoritmo efetua simultaneamente a especificação de metas de consumo e a síntese da rede e pode ser aplicado na solução de problemas com um contaminante (valor de DQO) para os casos de reúso máximo, regeneração com reúso e em processos com restrição de vazão e com múltiplas fontes de água. Em cada um desses casos é feita a avaliação econômica.

4.3 – REÚSO MÁXIMO

No caso de Reúso Máximo, a prioridade de uso de cada corrente aquosa segue a seguinte regra: usar a corrente que é prioritária, caso não tiver, usar aquela que tem a maior valor de DQO (sendo esta menor do que a concentração de saída do intervalo em estudo). Esta regra é válida para todos os casos estudados no presente trabalho.

O diagrama referente a este tipo de caso está sendo representado na Figura 4.1 .

A estrutura do programa computacional referente aos cálculos do lavador contínuo da indústria têxtil, utilizando o DFA Modificado para o caso do Reúso Máximo, contém as seguintes etapas: cálculo das vazões limites, das concentrações de entrada e saída e o valor da carga contaminante removida de cada operação, identificação das operações que tem valor de carga contaminante removida negativa e dos intervalos de concentração do DFA modificado, determinação da ordem de cálculo das operações, cálculo do valor da carga contaminante removida em cada intervalo de cada operação, o processamento para o caso em questão e a apresentação dos resultados com matrizes.

Para iniciar o cálculo, basta acionar o botão “CALCULAR” na coluna do meio na interface, na sessão referente ao caso de Reúso Máximo. Não é necessário adicionar nenhuma outra informação, pois todos os dados necessários já foram informados (na primeira coluna da interface) quando foram feitos os cálculos referente ao processo original (sem nenhuma modificação). Este procedimento é feito para iniciar o cálculo de

qualquer um dos tipos de casos de DFA Modificado, sendo acionado o respectivo botão para o caso de interesse.

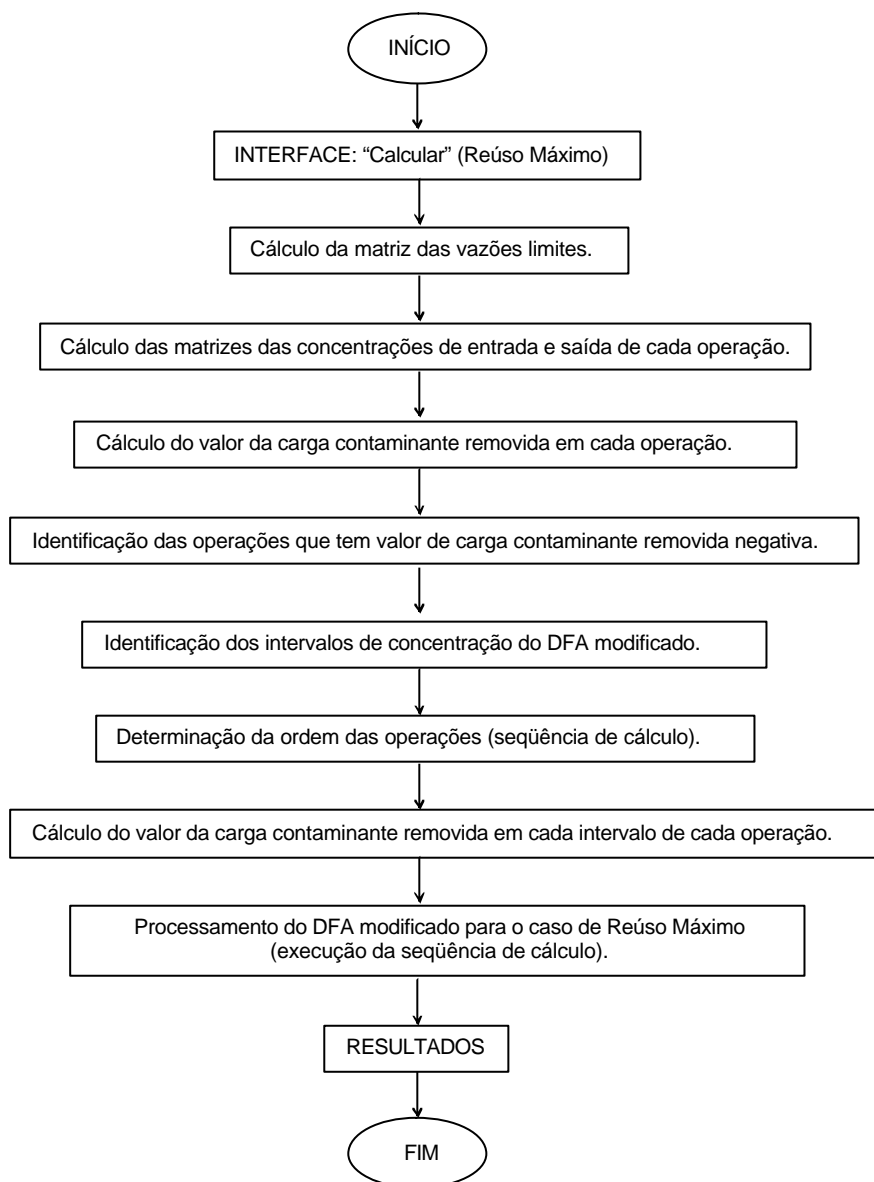


Figura 4.1 – Diagrama referente ao caso de Reúso Máximo no DFA Modificado.

O procedimento proposto é apresentado a seguir de forma seqüencial.

- Etapa 1: construir uma matriz com os valores de vazões limites. Para cada unidade caixa, que são chamadas agora de operação, é feito o somatório das vazões

que estão saindo (não incluindo a vazão referente ao pick up, já que esta é uma corrente fixa, que não pode ser alterada), e esta é considerada a vazão limite.

- Etapa 2: construir duas matrizes com os valores de valor de DQO (em gDQO/Kg tecido), uma delas com as concentrações de entrada e a outra de saída de cada operação. Esses valores são calculados respectivamente pelas Equações 25 e 26. É necessário este cálculo, pois estes serão os valores de concentração que definirão os limites dos intervalos. Neste caso de Reúso Máximo estes serão os valores de concentração de todas as fontes disponíveis de água, tendo a mais somente a vazão de água tratada, que tem um valor de DQO zero.

$$DQO_{entrada} = C_{entrada} \frac{\text{Água}_{alimentação}}{Vazão_{tecidoseco}} \quad (25)$$

$$DQO_{saída} = C_{saída} \frac{\text{Água}_{alimentação}}{Vazão_{tecidoseco}} \quad (26)$$

Onde:

- $DQO_{entrada}$ e $DQO_{saída}$ [gDQO/Kg tecido]: valor da concentração de entrada e de saída de DQO por quilo de tecido lavado em cada operação;

- $C_{entrada}$ e $C_{saída}$ [mg/L]: valor da concentração de entrada e saída de DQO por litro de água utilizado em cada operação;

- $\text{Água}_{alimentação}$ [m^3/h]: (água pick up + água industrial + insumo químico + água de reúso);

- 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 reúso: vazão de água que vem de outra unidade.

As concentrações de entrada e saída em cada operação são calculadas pelas Equações 27 e 28.

$$C_{entrada} = \frac{\sum(Q_e \cdot C_e)}{\sum(Q_e)} \quad (27)$$

$$C_{saída} = \frac{\sum(Q_f \cdot C_f)}{\sum(Q_f)} \quad (28)$$

Sendo que “Q” é a vazão volumétrica (dada em m³/h) e “C” a valor de DQO (dada em mg/L) de cada corrente. Com os sub-índices “e” e “f” representando a corrente de entrada e saída respectivamente.

E a vazão de tecido seco é calculada pela Equação 24.

- Etapa 3: calcular o valor da carga contaminante removida em cada operação através da Equação 21.

- Etapa 4: identificar as operações que tem valor de carga contaminante removida negativa. Sendo estas tratadas de forma diferenciada. São as primeiras a serem analisadas durante a execução do DFA Modificado, sendo que estas operações terão sempre prioridade quando houver disponibilidade de fonte interna.

- Etapa 5: identificar os intervalos de concentração para a construção do DFA Modificado. São usados os valores encontrados na etapa 2, tanto de concentração de saída como de entrada. Estes serão ordenados de forma crescente em relação aos seus valores, sendo o primeiro deles o valor zero, referente a única fonte externa neste tipo de caso, que é a da água tratada com disponibilidade infinita.

- Etapa 6: determinar a ordem das operações (seqüência de cálculo). Primeiro são analisadas as operações que tem remoção de carga contaminante negativa. Elas são colocadas em ordem decrescente de valor de concentração de entrada de DQO (em gDQO/Kg tecido) em cada operação. Se duas ou mais operações tem o mesmo valor de concentração, então é verificado o valor de concentração de saída das operações, seguindo o mesmo raciocínio usado para ordenar segundo a concentração de entrada. Posteriormente são ordenadas as operações com remoção de carga contaminante positiva, sendo colocadas em ordem crescente de concentração de entrada nas operações, se esta tiver valores iguais é verificada a concentração de saída das operações, seguindo o mesmo raciocínio.

- Etapa 7: com o DFA Modificado estabelecido, é feito o cálculo do valor da carga contaminante removida em cada intervalo de cada operação. Para este cálculo é utilizada a Equação 21.

- Etapa 8: processamento para o DFA Modificado para o caso de Reúso Máximo, executando a seqüência de cálculo encontrada na etapa 6. Todo o procedimento utilizado está explicado na seção 2.8.

- Etapa 9: concluídas todas as etapas anteriores os resultados podem ser visualizados a partir do acionamento do botão “RESULTADOS” na interface do programa. Todas as matrizes construídas durante este processamento são apresentadas.

4.4 – RESTRIÇÃO DE VAZÃO

O diagrama referente ao caso de Restrição de Vazão do DFA Modificado está sendo representado na Figura 4.2. Neste tipo de caso as etapas de 1 à 8 são iguais ao caso de Reúso Máximo, sendo acrescentada somente uma etapa no final de todo esse processo, antes da apresentação dos resultados. Sendo esta etapa classificada como etapa de número 9.

- Etapa 9: verificar a necessidade do uso de uma corrente de reciclo em cada operação. Para isso é realizado o cálculo do somatório de todas as correntes entrando em cada operação depois do programa processado. Cada valor é comparado com o seu respectivo valor de vazão limite. Sendo este menor, será necessária uma corrente de reciclo de valor necessário para completar o valor requerido de vazão (que é o de vazão limite correspondente a cada operação).

4.5 – MÚLTIPLAS FONTES DE ÁGUA

A Figura 4.3 representa o diagrama referente ao caso de Múltiplas Fontes de Água do DFA Modificado.

O procedimento proposto é apresentado a seguir de forma seqüencial.

- Etapa 1: especificar os dados de entrada necessários para o cálculo deste tipo de caso. Fornecendo a quantidade de fontes externas existentes, juntamente com os

seus valores de valor de DQO (em gDQO/Kg tecido) e a vazão (em m³/h) para cada corrente. Podendo existir casos com uma ou mais fontes externas, de vazão limitada ou não.

Neste tipo de caso as etapas seguintes são iguais as etapas de 1 à 7 do caso de Reúso Máximo. Tendo como etapas finais o processamento do DFA Modificado seguindo os princípios do caso de Múltiplas Fontes de Água, e por a apresentação dos resultados na forma de matrizes.

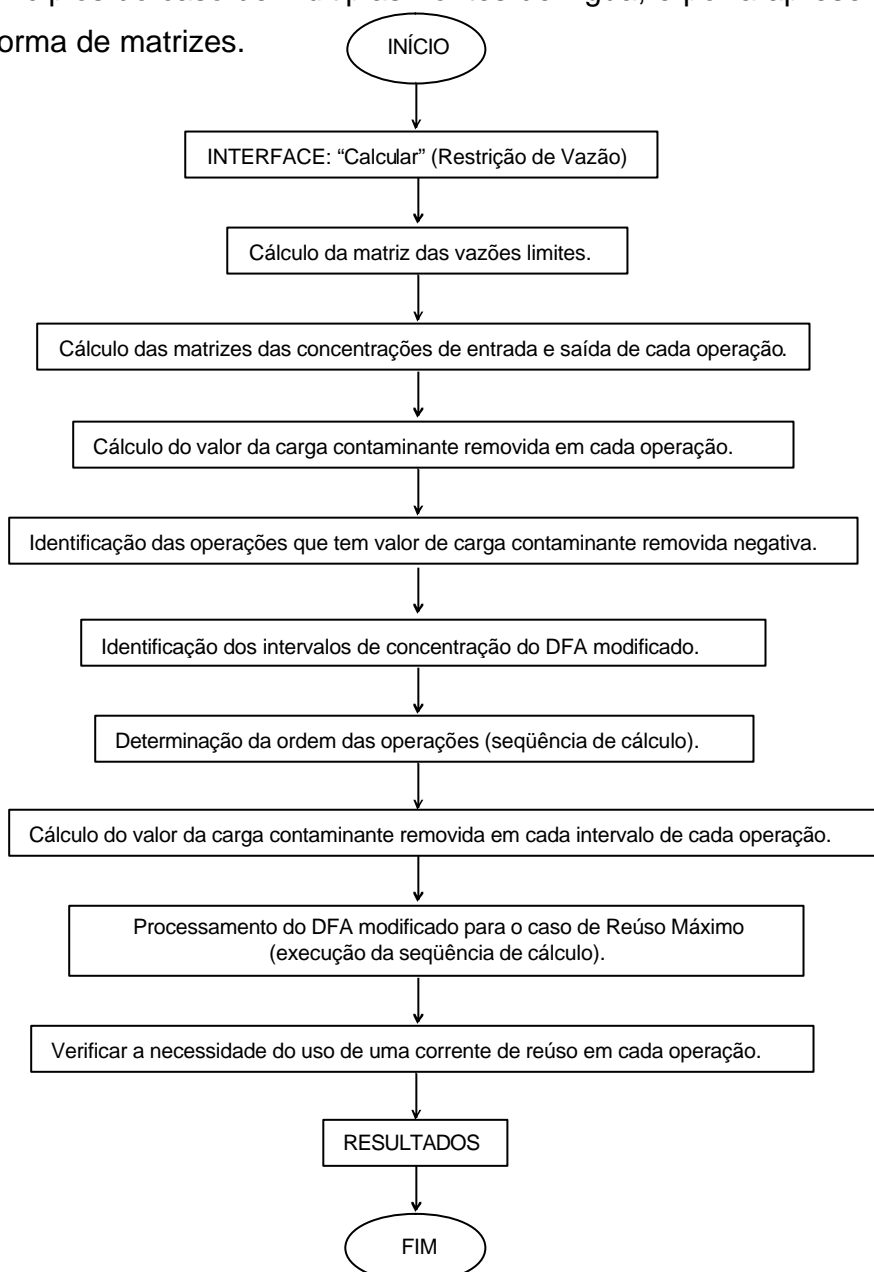


Figura 4.2 – Diagrama referente ao caso de Restrição de Vazão no DFA Modificado.

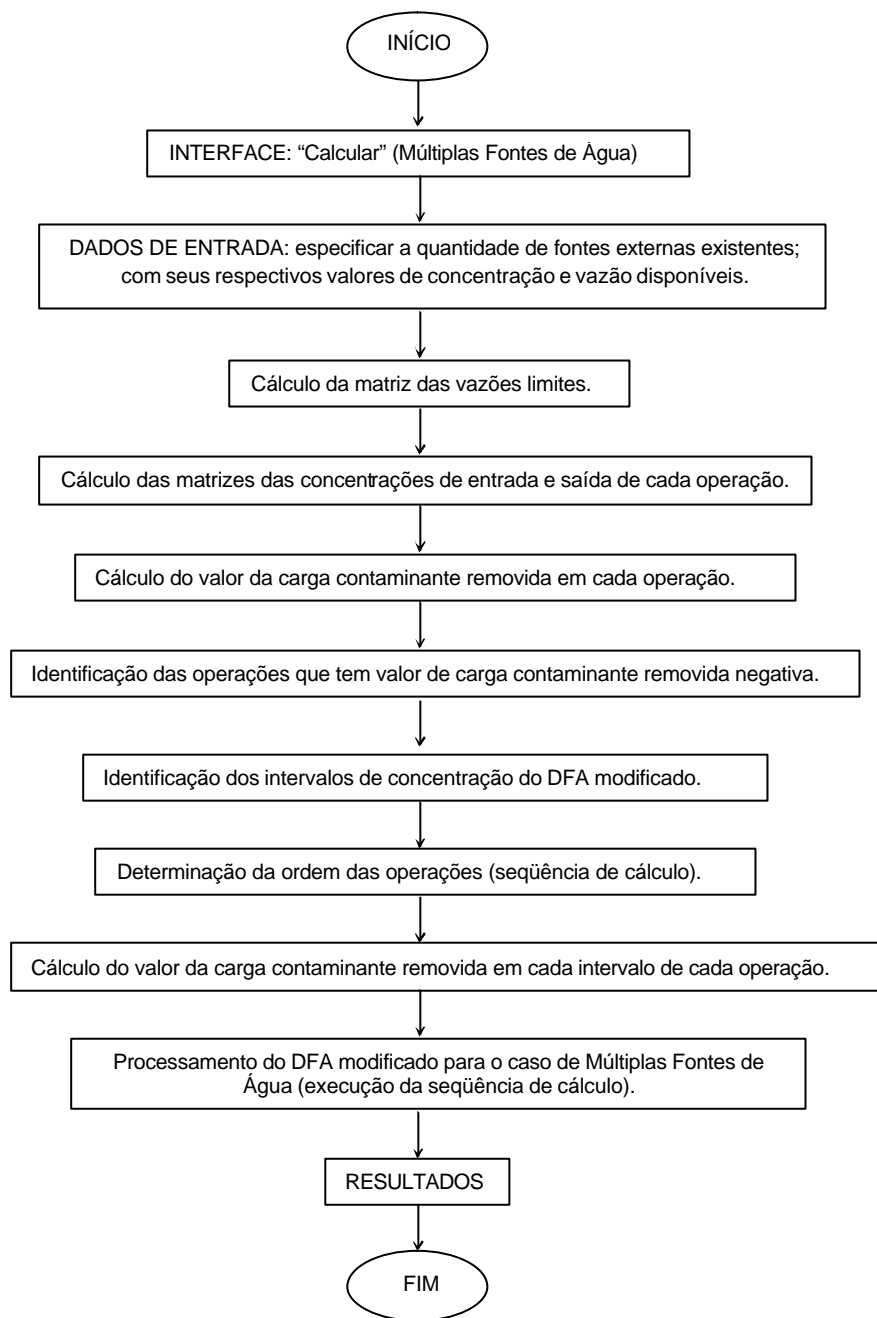


Figura 4.3 – Diagrama referente ao caso de Múltiplas Fontes de Água no DFA Modificado.

4.6 – REGENERAÇÃO COM REÚSO

A Figura 4.4 representa o diagrama referente ao caso de Regeneração com Reúso do DFA Modificado.

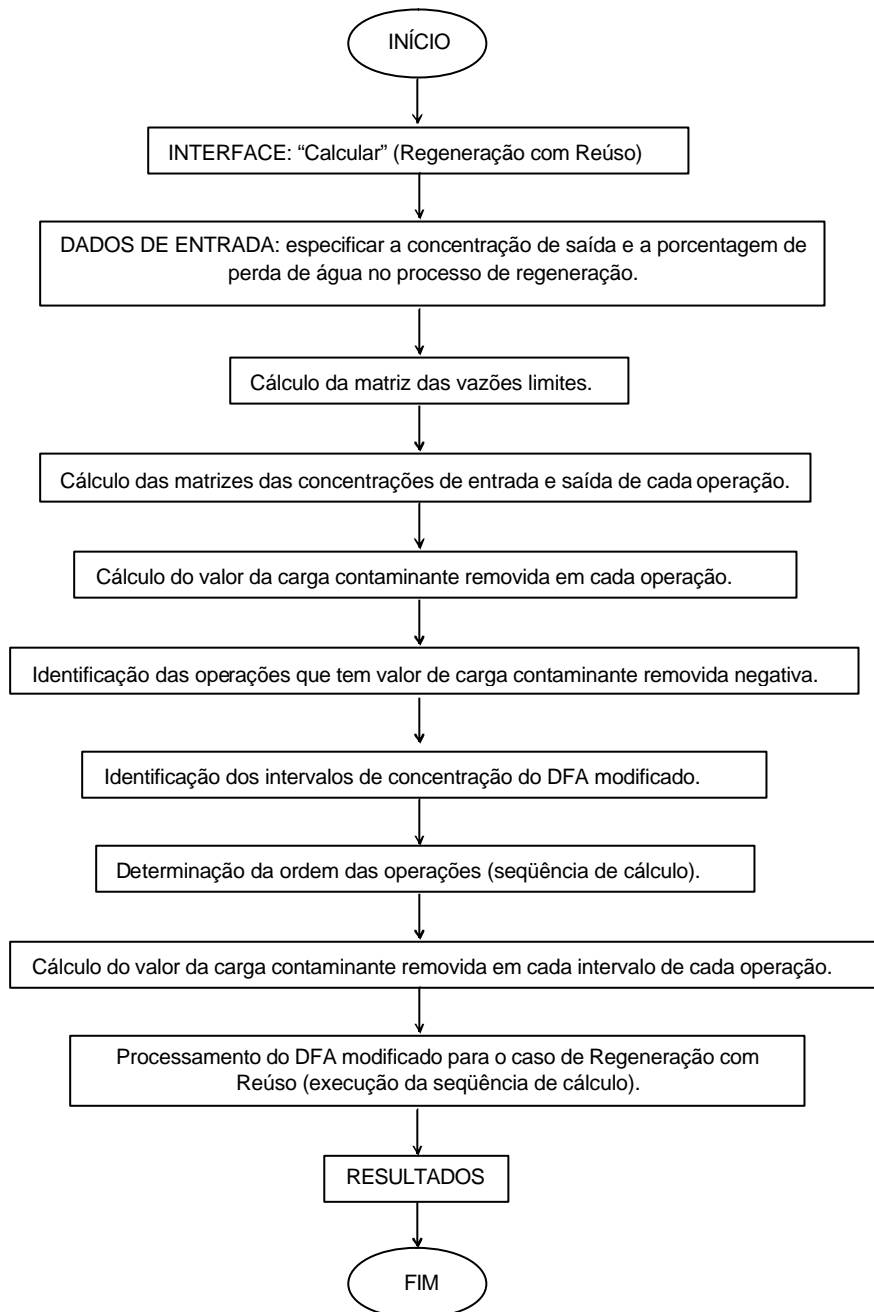


Figura 4.4 – Diagrama referente ao caso de Regeneração com Reúso no DFA Modificado.

O procedimento proposto é muito semelhante ao caso de Reúso Máximo, tendo como modificação uma etapa inicial, na qual deve ser fornecida alguns dados de entrada. Como neste caso existe o uso de um processo de regeneração é necessário fornecer a concentração de saída e a porcentagem de perda de água no processo. Isto dependerá do tipo de regenerador utilizado.

Todas as correntes que não tem prioridade são enviadas para o regenerador utilizado. Sendo antes verificada a possibilidade de seu uso em alguma operação de remoção de carga contaminante negativa.

Considero a existência de somente um regenerador por lavador contínuo da indústria têxtil.

4.7 – AVALIAÇÃO ECONÔMICA

A Figura 4.5 representa o diagrama referente ao procedimento realizado para o cálculo da avaliação econômica de todos os tipos de casos estudados de DFA Modificado.

Sendo fornecidos os dados de entrada através da interface do programa, é necessário fornecer alguns dados econômicos como: equação para os custos de investimentos e operacional; custo com água tratada e suja; operação e depreciação anual. Esses dados não foram fixados no programa para ser possível o uso de diferentes valores de custos e a possibilidade de usos diferenciados de artigos na literatura.

Os dados econômicos utilizados são os apresentados no trabalho de WANG e SMITH (1994b). Esses dados podem ser vistos na Tabela 4.1. Incluem o valor do custo para a água suja, apresentado no trabalho de GOMES (2002).

Em seguida é escolhido o tipo de caso no qual se deseja efetuar os cálculos de custos, seja no programa original (da lavanderia sem modificações), ou dos diferentes casos de DFA Modificado implementados. Posteriormente é possível verificar todos os resultados na forma de matrizes.

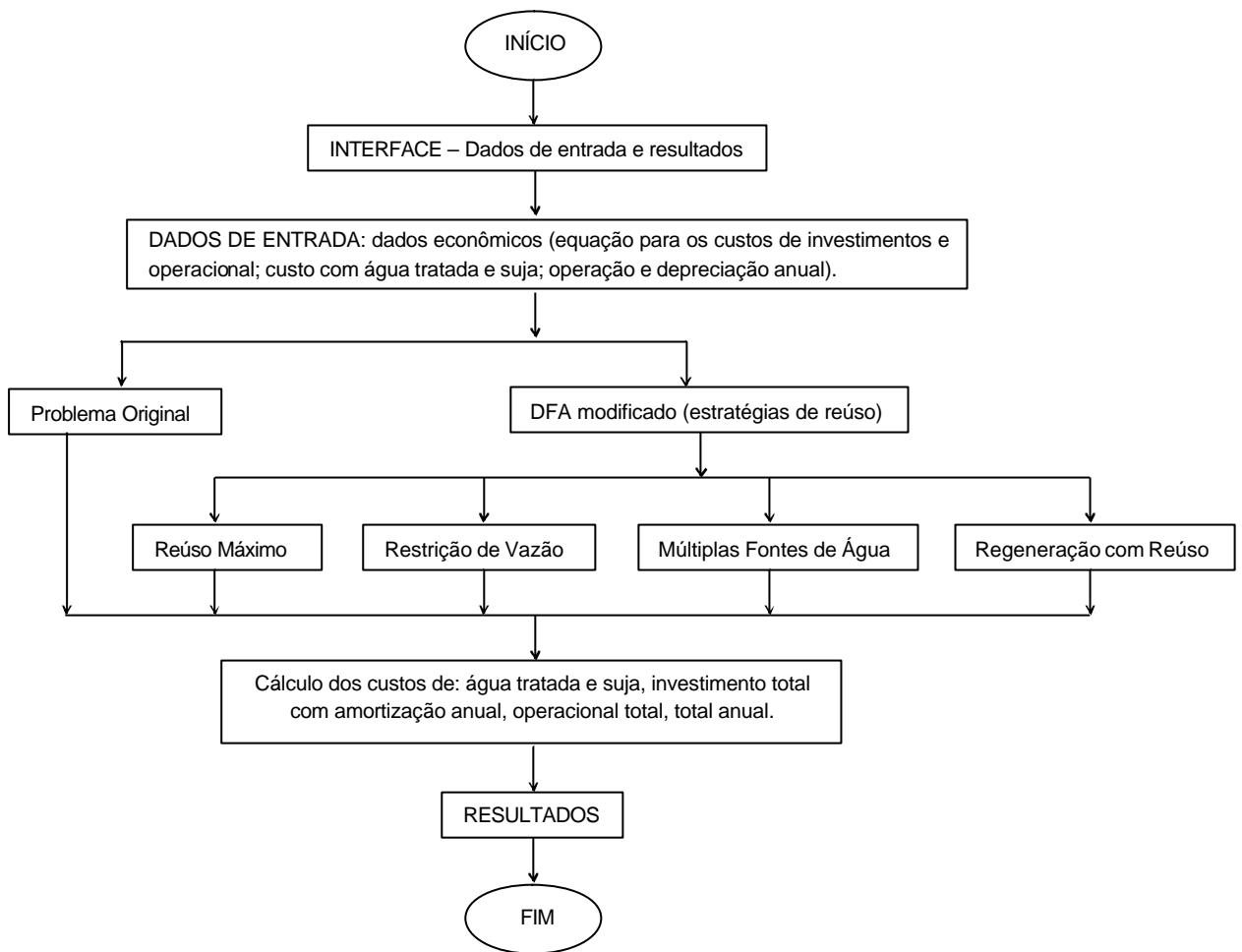


Figura 4.5 – Diagrama referente ao processo de avaliação econômica no DFA Modificado.

Tabela 4.1 – Dados para a avaliação econômica (Wang e Smith, 1994b; Gomes, 2002).

	Custo de Investimentos (US\$)	Custo Operacional (US\$/h)
Tratamento Final de Linha	34200 $f^{0,7}$	1,0067 f
Stripper para regeneração de água	16800 $fr^{0,7}$	1,0 fr

Onde f é a vazão de água consumida diferente da água regenerada em t/h e fr é a vazão de água regenerada em t/h.

Dados adicionais:	
Custo de água tratada	0,3 US\$/ton
Custo de água suja	0,03 US\$/ton
Operação anual	8600h/ano
Depreciação anual do custo de capital	0,1

A água tratada é aquela que tem valor de DQO de 0 ppm, e a água suja tem qualquer valor de DQO diferente de zero, ou seja, neste caso não existe diferença de valor com as diferentes concentrações de DQO, mas mesmo assim foi usado o critério de prioridade de uso das correntes com valores de DQO maior.

Cabe também ressaltar que os custos fixos (equipamentos) somente contemplam os equipamentos para tratamento/regeneração da água. Os equipamentos nos quais as correntes são utilizadas não estão incluídos na presente análise. Os custos ligados ao tratamento de final de linha são considerados independentes da concentração da corrente.

O custo de investimento corresponde ao total de recursos empatados e arriscados no empreendimento. É constituído do investimento fixo, do capital de giro e do investimento para a partida da planta.

O custo operacional inclui os custos diretos (são os custos diretamente proporcionais à produção, incluindo matéria-prima, utilidades, manutenção, suprimentos operacionais, mão-de-obra operacional e de supervisão, administração, utilização de laboratórios e patentes).

O custo total anual é a soma do custo operacional (US\$/ano) com custo de investimento em base anual (US\$/ano). O custo operacional anual de operação é a soma dos custos operacionais dos processos de tratamento, dos custos de consumo de água tratada e de água suja. O custo de investimento em base anual é a soma dos custos de investimento nos processos pertinentes multiplicados pelo fator de depreciação anual.

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 – RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através da simulação de algumas unidades de lavação contínua de indústrias do Vale do Rio Itajaí. Serão apresentados os valores de vazão e concentração de todas as correntes. Serão feitos os balanços globais, análises dos termos fonte, o cálculo da eficiência de remoção para cada unidade caixa, utilizando o software desenvolvido. Será encontrada e proposta uma nova rota para as correntes do processo, através do uso de um procedimento algorítmico (o Diagrama de Fontes de Água Modificado), além da análise econômica de todos os casos apresentados.

5.2 – 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 azul intenso, cuja gramatura é de 400g/m^2 , a largura é de 2,21m, a velocidade do tecido de 50m/min, e são lavadas 2,65 toneladas de tecido por hora.

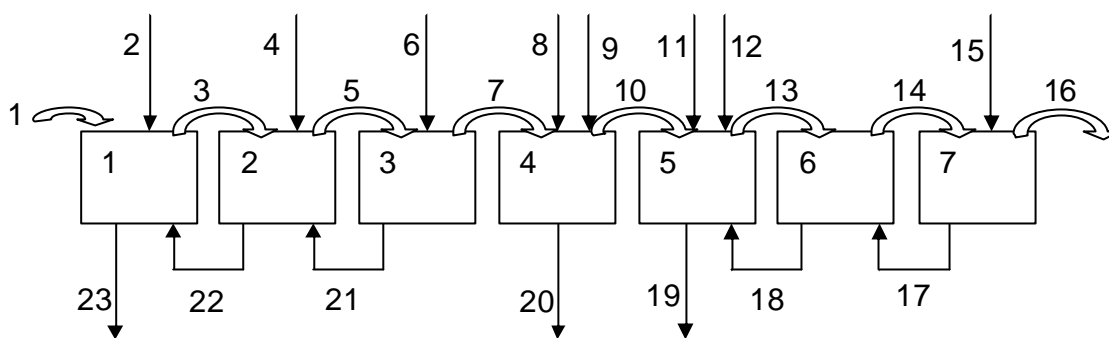


Figura 5.1 – Diagrama da Lavanderia 1.

Foram retiradas amostras do tecido que saiu do banho de tingimento e está entrando na lavanderia. Foram realizados ensaios laboratoriais destas amostras envolvendo sucessivas lavagens no laboratório do SENAI (de Blumenau), determinando-se o seguinte valor de DQO do tecido impregnado, vindo do banho de tingimento, 10,33g/Kg de tecido.

Neste processo nas correntes de número oito e onze 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 (do processo industrial), medidos em laboratório.

Tabela 5.1 – Informações sobre cada caixa da Lavanderia 1.

Caixas	Volume [L]	DQO de saída [mg/L]
1	1500	1352,00
2	1000	1022,00
3	1000	1380,00
4	1000	849,00
5	3000	682,00
6	1000	257,00
7	1000	158,00

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 ³ /h]	Valor de DQO [mg/L]
2	7,25	0,00
4	3,63	0,00
6	2,42	0,00
8	0,12	1500,00
9	2,42	0,00
11	0,12	2739,00
12	3,63	0,00
15	2,42	0,00

Os valores de *pick up* de cada corrente aquosa transportada pelo tecido, obtidos do processo industrial, estão descritos na Tabela 5.3.

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

Correntes de <i>pick up</i>	Valor do <i>pick up</i>
1	0,55
3	0,55
5	0,55
7	0,55
10	0,55
13	0,55
14	0,55
16	0,55

Com estas informações é possível simular o processo e obter os valores de vazão e concentração de cada corrente e cada unidade caixa, utilizando-se o programa computacional desenvolvido.

Os valores dos Termos Fonte calculados para cada unidade caixa, assim como os valores da concentração, estão representados na Tabela 5.4. Comparando as Tabelas 5.1 e 5.4, é possível observar a validação do programa computacional, já que os valores de concentração são muito próximos (tanto do processo industrial, como o calculado pelo programa). E isto pode ser verificado nos outros casos de lavanderias apresentados neste trabalho.

Tabela 5.4 – Resultados das unidades caixas da Lavanderia 1.

Caixas	Termo fonte	Concentração [mg/L]
1	-0,40	1351,51
2	0,44	1020,65
3	2,59	1377,75
4	0,55	847,48
5	1,38	680,44
6	-0,28	256,27
7	0,63	157,50

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 4. Esta estimativa pressupõe que toda a DQO removida no processo de lavagem industrial está disponível na fase líquida na corrente de pick up, corrente 1. Este valor de entrada de DQO precisa ser ajustado à realidade do processo, pois somente ao final do processo, após a ação de todas as unidades caixa é que esta quantidade de DQO poderia ser removida, e não apenas pela ação da unidade caixa 1. Para compatibilizar o modelo com a situação real do processo, foi incorporado um parâmetro α denominado “Fator Fonte”. Este parâmetro pode atuar ajustando o excedente de valor de DQO estimada (atuando como fonte negativo) ou aportar acréscimos ao valor de valor 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.

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, obtida a partir de uma amostra de tecido proveniente 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 a 5, e unidade caixa 7, o parâmetro α 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 6 o parâmetro α é negativo porque não existe a entrada de uma corrente de água tratada; fazendo com que parte da DQO da corrente de insumo seja adsorvida pela fibra.

Os valores de vazão e concentração (no regime estacionário) de cada corrente são apresentados da Tabela 5.5.

O cálculo da remoção de DQO de cada unidade caixa foi realizado usando-se as Equações (18) e (19), e os resultados apresentados na Tabela 5.6.

Na caixa 6 a remoção é negativa, pois existe um aumento de DQO no tecido, já que o termo fonte desta unidade caixa é negativo.

A relação de volume de água de fonte externa (ETA) por massa de tecido processado é de 8,21L/Kg.

Tabela 5.5 – Valores de vazão e concentração (no regime estacionário) para Lavanderia 1.

Correntes	Vazão [m ³ /h]	Concentração [mg/L]
1	1,46	18781,72
2	7,25	0,00
3	1,46	1351,51
4	3,63	0,00
5	1,46	1020,65
6	2,42	0,00
7	1,46	1377,75
8	0,12	1500,00
9	2,42	0,00
10	1,46	847,48
11	0,12	2739,00
12	3,63	0,00
13	1,46	680,44
14	1,46	256,27
15	2,42	0,00
16	1,46	157,50
17	2,42	157,50
18	2,42	256,27
19	6,17	680,44
20	2,54	847,48
21	2,42	1377,75
22	6,05	1020,65
23	13,30	1351,51

Tabela 5.6 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 1, remoção de DQO em mg/L e gDQO/Kg tecido.

Unidades Caixa	ΔC (remoção de DQO do tecido [mg/L])	DQOr (remoção de DQO do tecido [gDQO/Kg tecido])
1	933,11	5,19
2	314,07	0,89
3	993,92	1,45
4	299,89	0,45
5	394,02	1,13
6	-97,89	-0,14
7	61,13	0,09
	$\Sigma = 2898,25$	$\Sigma = 9,07$

5.2.1 – DFA Modificado utilizando o caso de Reúso Máximo

Na procura de um modelo que racionalize o uso de água nesta lavanderia é utilizado o caso de Reúso Máximo do Diagrama de Fontes de Água Modificado. Sendo o primeiro passo a análise de cada unidade caixa (considerando-a como uma operação).

O segundo passo é a construção da Tabela 5.7, com a apresentação dos valores da variação da “pseudo concentração” no tecido, a vazão limitante por operação, a DQO removida em cada caixa e o valor da relação de banho.

A variação da “pseudo concentração” é calculada através da Equação 21.

A vazão limitante (f_L) é encontrada somando-se todas as vazões das correntes efluentes de cada operação, não considerando a vazão referente a corrente de pick up, pois esta é considerada uma corrente fixa, já que não pode ser reusada.

A DQO removida em cada caixa foi calculada pela Equação 18 e a relação de banho através da Equação 23.

Tabela 5.7 – Informações de cada operação da Lavanderia 1, para o caso de Reúso Máximo do DFA Modificado.

Operações	ρ_{ct} [(g DQO. m ³)/(Kg tecido.h)]	f_L [m ³ /h]	ρ_C [mg/L]	Rb [m ³ /Kg tecido seco]
1	69,0647	13,30	933,11	0,005565
2	5,3798	6,05	314,07	0,002831
3	3,5178	2,42	993,92	0,001462
4	1,1485	2,54	299,89	0,001508
5	6,9931	6,17	394,02	0,002876
6	-0,34646	2,42	-97,89	0,001462
7	0,21635	2,42	61,13	0,001462

O terceiro passo é a construção do Diagrama de Fontes de Água Modificado, representando as operações no diagrama na ordem crescente de valores de valor de DQO de entrada. Sendo que a operação que tiver o valor da “pseudo concentração” de DQO no tecido removida negativa deve ser posicionada no final do DFA. Os valores de concentração utilizados são em [gDQO/Kg tecido], já que a análise tem que ser feita em cima da remoção ou não de DQO do tecido (considerando a valor de DQO no tecido e não na água). Os valores utilizados para a construção dos intervalos estão apresentados na Tabela 5.8 , encontrados através do uso das Equações 25 e 26.

Tabela 5.8 – Informações de cada operação da Lavanderia 1, para a construção dos intervalos do DFA Modificado para o caso de Reúso Máximo.

Operações	DQO _{r_{in}} [g DQO/Kg tecido]	DQO _{r_{out}} [g DQO/Kg tecido]
1	2,3284	7,5212
2	2,0006	2,8898
3	0,5614	2,0150
4	0,8256	1,2778
5	0,8239	1,9573
6	0,5180	0,3748
7	0,1409	0,2304

Seguindo as etapas descritas na seção 4.3, é obtido o DFA Modificado representado pela Figura 5.2, sendo que a prioridade do uso das fontes internas e externas é nas operações que possuem o τ com valor negativo. No Apêndice 1, é colocada uma memória de cálculo, na qual explica todos os passos para a obtenção do DFA Modificado da Figura 5.2.

A partir do DFA Modificado para o Reúso Máximo representada na Figura 5.2 é possível montar o novo diagrama da Lavanderia, o qual é chamado de Lavanderia 1A. A topologia do novo cenário deste lavador contínuo é apresentado na Tabela 5.9 (Matriz do Processo). Sendo assim possível montar um novo diagrama, para a Lavanderia 1ª, representado na Figura 5.3.

Conforme é possível verificar, na Lavanderia 1A foram acrescentados três divisores de correntes (8, 9 e 10). A Tabela 5.10 apresenta os valores de divisão de cada corrente de saída relativo à cada unidade divisor de correntes.

As informações das correntes de entrada da Lavanderia 1A são apresentadas na Tabela 5.11. Sendo que estas são retiradas do Diagrama de Fontes de Água Modificado para o caso de Reúso Máximo representado pela Figura 5.2.

Os resultados da simulação obtidos para este novo caso (Lavanderia 1A), com os valores de vazão e concentração estão na Tabela 5.12.

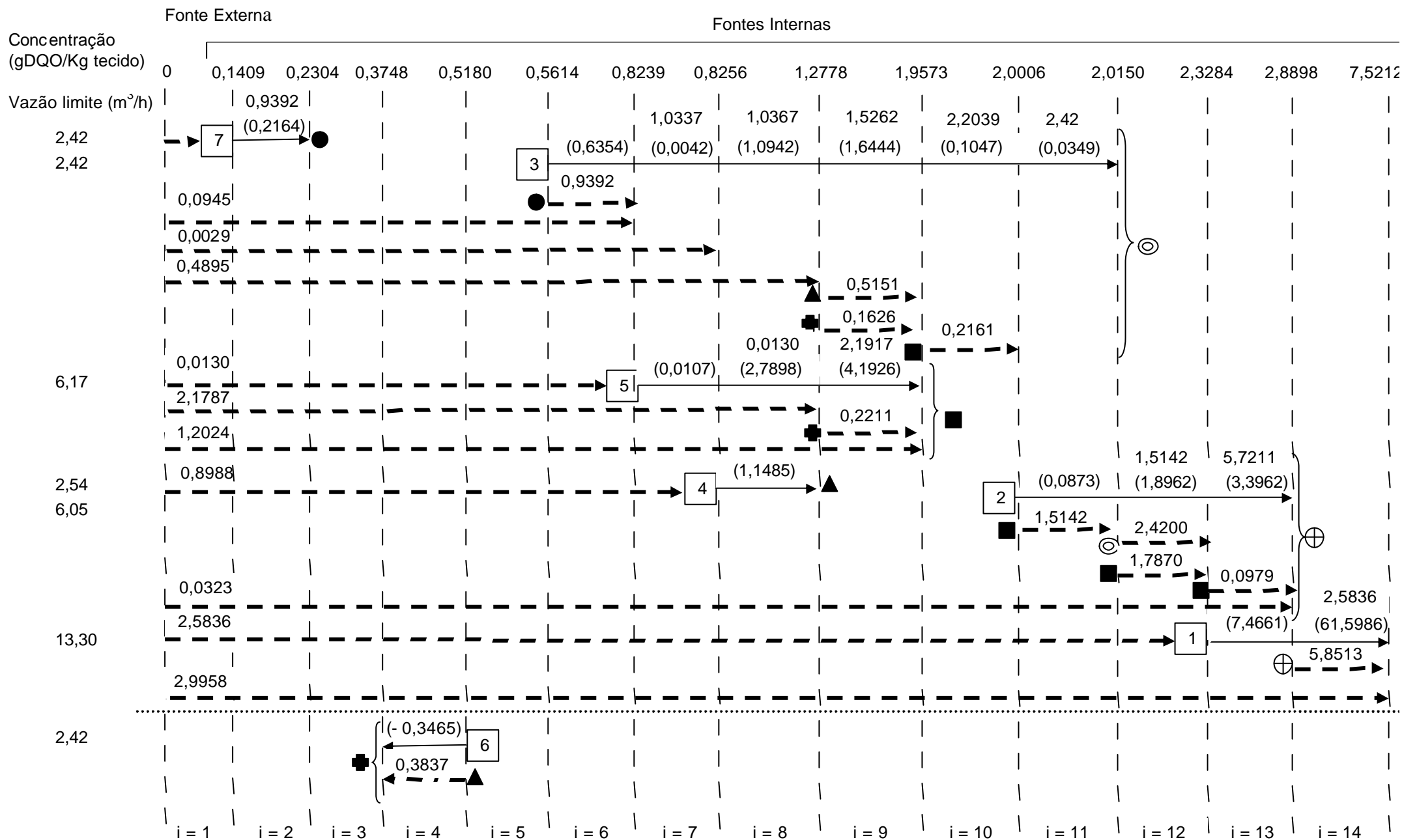


Figura 5.2 – Diagrama de Fontes de Água para a Lavanderia 1 (Reúso Máximo).

Tabela 5.9 – Matriz do Processo referente à Lavanderia 1A.

Unidades	Correntes associadas							
1	1	-2	-11	12	13	0	0	0
2	2	-3	-12	14	15	16	0	0
3	3	-4	-14	17	18	19	20	21
4	4	-5	9	22	-29	0	0	0
5	5	-6	10	23	24	-30	0	0
6	6	-7	25	-31	0	0	0	0
7	7	-8	-17	26	0	0	0	0
8	-18	-25	-27	29	0	0	0	0
9	-16	-20	-28	30	0	0	0	0
10	-19	-23	31	0	0	0	0	0

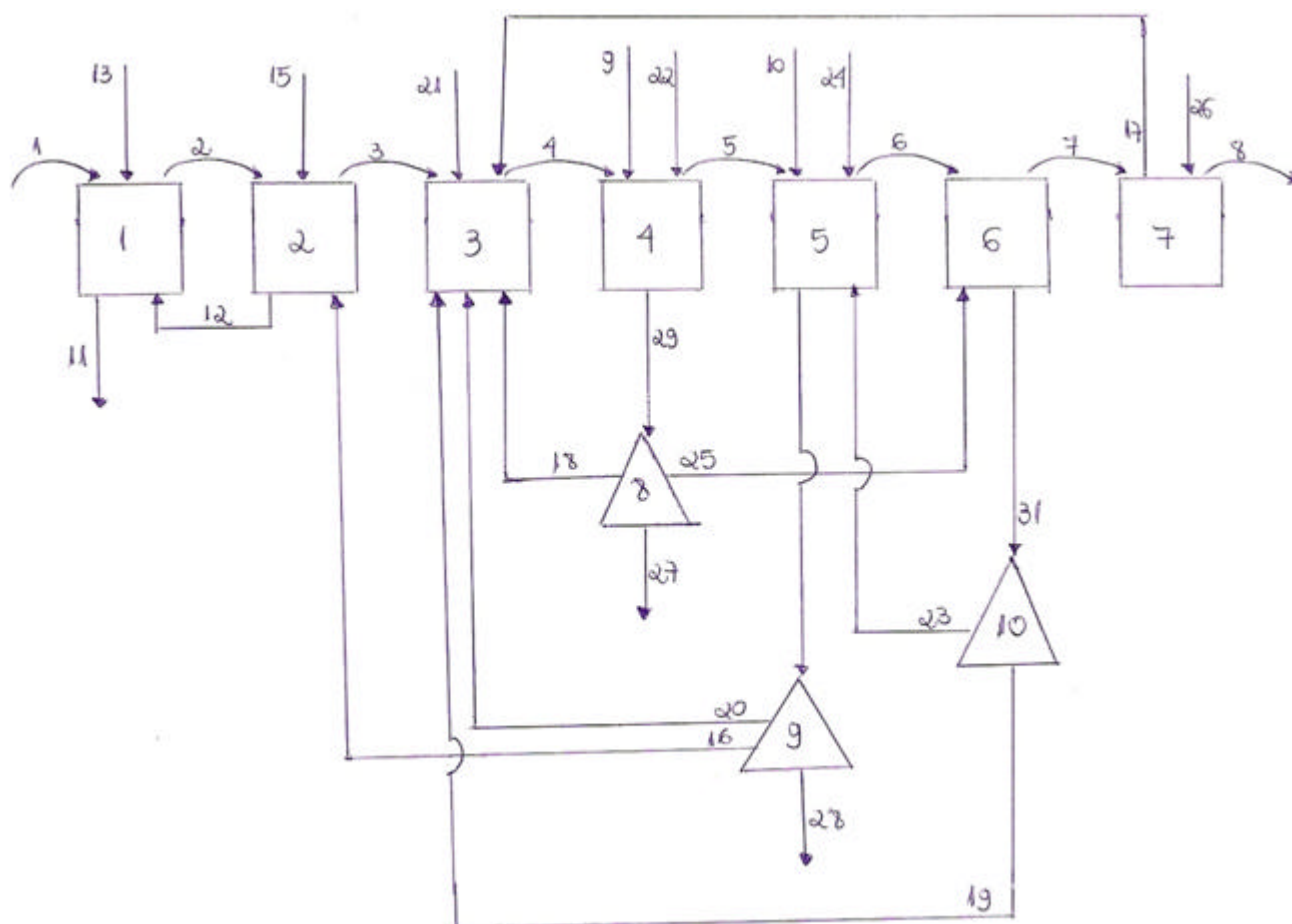


Figura 5.3 – Diagrama da Lavanderia 1A.

Tabela 5.10 – Informações sobre os fatores de divisão do divisor de correntes da Lavanderia 1A.

Número da unidade de divisor de correntes	Corrente de saída	Fator de divisão
8	18	0,50562
8	25	0,37659
8	27	0,11779
9	16	0,91002
9	20	0,057853
9	28	0,032127
10	19	0,40382
10	23	0,59618

Tabela 5.11 – Informações das correntes de entrada da Lavanderia 1A.

Número da corrente	Vazão [m ³ /h]	Concentração [mg/L]
9	0,1200	1500,00
10	0,1200	2739,00
13	5,5794	0,00
15	0,0323	0,00
21	0,5869	0,00
22	0,8988	0,00
24	3,3941	0,00
26	0,9392	0,00

Tabela 5.12 – Valores de concentração (no regime estacionário) das unidades caixas da Lavanderia 1A.

Caixas	Concentração [mg/L]
1	2010,91
2	2076,09
3	2347,71
4	1938,93
5	1236,63
6	1176,80
7	814,73

A eficiência de remoção de DQO (em g DQO/Kg tecido) de cada caixa deste modelo proposto de racionalização (Lavanderia 1A) é o mesmo que da Lavanderia 1 (a original). Isto é garantido através do Diagrama de Fontes de Água Modificado, no qual é calculado através da garantia de remoção da mesma pseudo concentração de contaminante em cada operação, pela Equação 21. Os valores da remoção de DQO em mg/L são diferentes, pois o valor de água da fonte externa (ETA) e água com um certo valor de DQO que estão entrando em cada operação são diferentes quando comparados as da lavanderia original.

A relação de volume de água da ETA por massa de tecido processado da Lavanderia 1A é de 4,31L/Kg.

A partir dos resultados é possível montar uma tabela comparativa, analisando a vazão de fonte externa da Lavanderia 1 e a vazão de água de fonte externa de cada operação da Lavanderia 1A (Tabela 5.13).

Tabela 5.13 – Comparação do consumo de água tratada no processo da Lavanderia 1 e da Lavanderia 1A.

Processos	Fluxo de água tratada (m ³ /h)	
	Lavanderia 1	Lavanderia 1A
OP 1	7,25	5,58
OP 2	3,63	0,03
OP 3	2,42	0,59
OP 4	2,42	0,90
OP 5	3,63	3,39
OP 6	0,00	0,00
OP 7	2,42	0,94
Σ	21,77	11,43

A partir da Tabela 5.13 é possível concluir que houve uma redução de 47,49% no consumo de água tratada depois da aplicação do caso de Reúso Máximo do Diagrama de Fontes de Água Modificado no processo.

Os resultados apresentados na Tabela 5.13 comprovam que o modelo proposto (Lavanderia 1A) constitui uma importante ferramenta para a racionalização de água do processo, e que o modelo proposto poderia ser utilizado (se somente a remoção de DQO fosse o fator relevante na eficiência de uma lavanderia têxtil), porque utiliza um menor

volume de água no processo e remove a mesma quantidade de DQO que o atual (Lavanderia 1).

Os resultados para avaliação econômica para a Lavanderia 1 e Lavanderia 1A podem ser vistos na Tabela 5.14.

Com base nos dados apresentados a melhor alternativa tanto do ponto de vista econômico como em termos de quantidade de água tratada usada é o caso onde é aplicado o Reúso Máximo.

Tabela 5.14 – Resultados da avaliação econômica da Lavanderia 1.

	Lavanderia 1	Reúso Máximo (Lavanderia 1A)
Vazão (m ³ /h)	21,77	11,43
Concentração (gDQO/Kg tecido)	0,00	0,00
Custo	Custo (US\$/ano)	Custo (US\$/ano)
Custo da água tratada	56166,60	29491,46
Custo da água suja	0,00	0,00
Custo total de investimento com amortização anual	29547,93	18822,61
Custo total operacional	244642,99	128454,99
Custo total anual	274190,92	147277,60

5.2.2 – DFA Modificado utilizando o caso de Restrição de Vazão

No item anterior foi apresentado um procedimento para especificação do consumo mínimo de água em função das concentrações máximas de entrada e de saída nas operações, onde diferentes combinações entre vazão e concentração de entrada satisfazem o problema da Lavanderia 1.

Será apresentado agora um procedimento no qual é considerado que o processo da Lavanderia 1 necessita de uma vazão fixa de água. Este é o caso de Restrição de Vazão. Sendo o reciclo local aceitável, sua utilização permite satisfazer as restrições de valores da

vazão sem que ocorra alteração na meta de vazão mínima especificada pelo procedimento anterior sem considerar as restrições de vazão.

Como exemplo, considera-se que no problema exemplo (Lavanderia 1) todas as operações têm seus valores de vazão fixados e iguais aos limites de vazão citados na Tabela 5.7. Sendo a concentração limite de entrada de cada processo a sua concentração máxima de saída, especificada na Tabela 5.8. Ou seja, este tipo de caso consiste em definir uma corrente de reciclo para completar o valor requerido de vazão.

A Tabela 5.15 apresenta os valores de vazão fixa de água (f_L), o somatório de todas as correntes que entram em cada operação ($\sum Q_e$) e a corrente de reciclo necessária para garantir a restrição de vazão.

Tabela 5.15 – Informações de cada operação da Lavanderia 1A, para o caso de Restrição de Vazão do DFA Modificado.

Operações	f_L [m ³ /h]	$\sum Q_e$ [m ³ /h]	Reciclo [m ³ /h]
1	13,30	11,4307	1,8693
2	6,05	5,8513	0,1987
3	2,42	2,42	0,0000
4	2,54	0,8988	1,6412
5	6,17	3,3941	2,7759
6	2,42	0,3837	2,0363
7	2,42	0,9392	1,4808

Todos os valores de concentração e remoção de DQO de cada operação do novo cenário da lavanderia têxtil (Lavanderia 1B) não se alteram quando comparados ao caso do Reúso Máximo (Lavanderia 1A), sendo assim as Tabelas 5.12 e 5.13 permanecem inalteradas. A Matriz do Processo se altera, já que para cada reciclo gerado é necessário um divisor de correntes. Assim são apresentadas as Tabelas 5.16, 5.17 e 5.18, a nova Matriz do Processo, as especificações das correntes de entrada, e os divisores de correntes e seus valores. A quantidade e os valores de vazão de cada corrente de entrada não se alteram, somente o número das correntes sofre alteração, já que são adicionados novos divisores de correntes, e conseqüentemente novas correntes no processo. Sendo assim a vazão total é a mesma que no caso de Reúso Máximo, logo a avaliação econômica também

será igual (Tabela 5.14). A Figura 5.4 representa o novo diagrama, representando a Lavanderia 1B.

Tabela 5.16 – Matriz do Processo referente à Lavanderia 1B.

Unidades	Correntes associadas							
1	1	-2	17	18	32	-38	0	0
2	2	-3	19	20	21	33	-39	0
3	3	-4	-19	22	23	24	25	26
4	4	-5	9	27	34	-40	0	0
5	5	-6	10	28	29	35	-41	0
6	6	-7	30	36	-42	0	0	0
7	7	-8	31	37	-43	0	0	0
8	-11	-32	38	0	0	0	0	0
9	-12	-17	-33	39	0	0	0	0
10	-13	-23	-30	-34	40	0	0	0
11	-14	-21	-25	-35	41	0	0	0
12	-15	-24	-28	-36	42	0	0	0
13	-16	-22	-37	43	0	0	0	0

Tabela 5.17 – Informações das correntes de entrada da Lavanderia 1B.

Número da corrente	Vazão [m ³ /h]	Concentração [mg/L]
9	0,1200	1500,00
10	0,1200	2739,00
18	5,5794	0,00
20	0,0323	0,00
26	0,5869	0,00
27	0,8988	0,00
29	3,3941	0,00
31	0,9392	0,00

Tabela 5.18 – Informações sobre os fatores de divisão do divisor de correntes da Lavanderia 1B.

Número da unidade do divisor de correntes	Corrente de saída	Fator de divisão
8	11	0,876780
8	32	0,123220
9	12	0,031791
9	17	0,936420
9	33	0,031791
10	13	0,409470
10	23	0,119760
10	30	0,089202
10	34	0,381570
11	14	0,302420
11	21	0,384300
11	25	0,024431
11	35	0,288850
12	15	0,456950
12	24	0,036490
12	28	0,049607
12	36	0,456950
13	16	0,379610
13	22	0,240780
13	37	0,379610

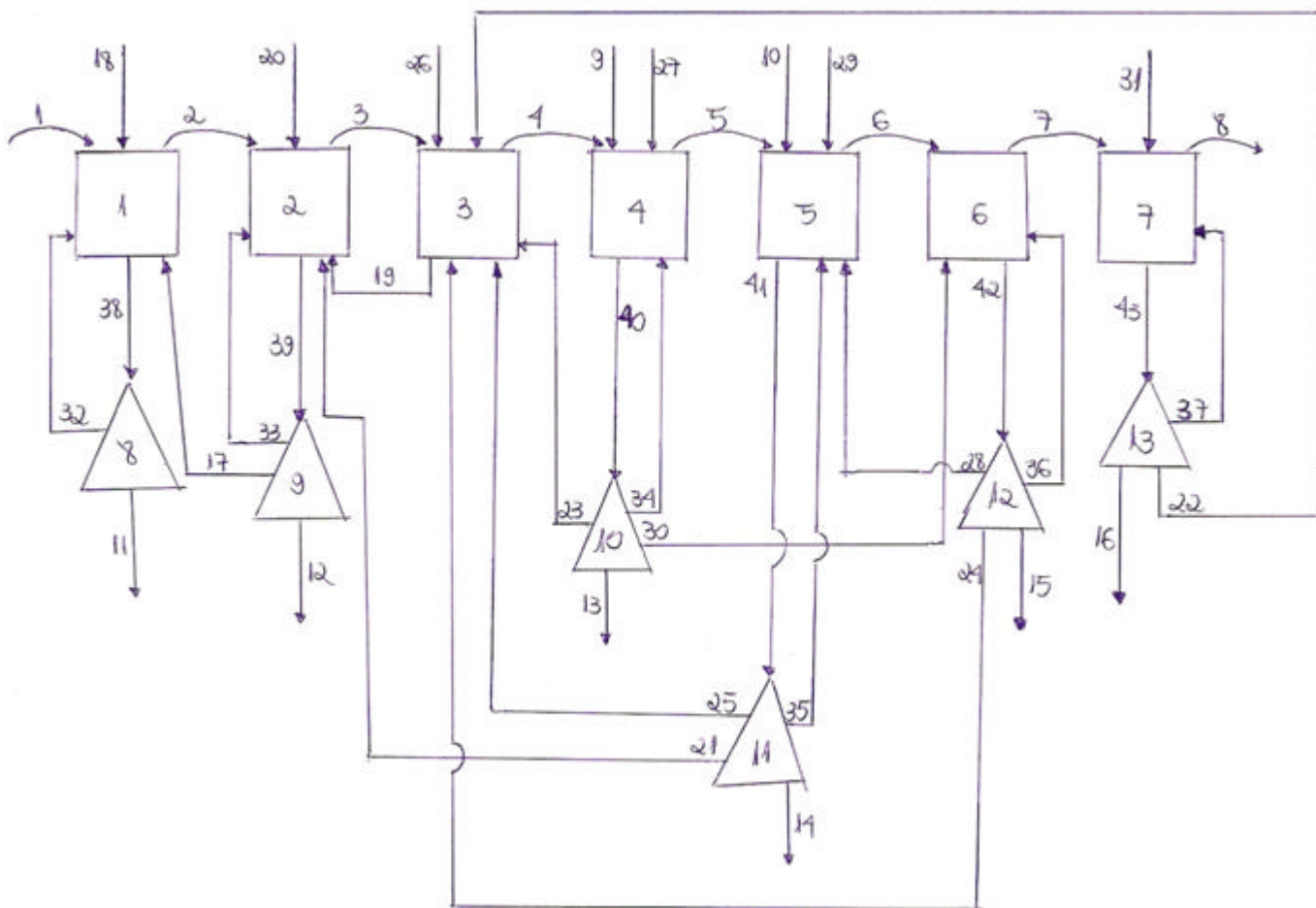


Figura 5.4 – Diagrama da Lavanderia 1B.

5.3 – LAVANDERIA 2

A Figura 5.5 representa o processo da Lavanderia 2, onde as unidades e as correntes foram numeradas.

Neste processo está sendo lavado um tecido escuro, de verde intenso, cuja gramatura é de 600g/m^2 , a largura é de $1,50\text{m}$ e a velocidade do tecido de 60m/min , sendo lavadas $3,24$ toneladas de tecido por hora. O valor de DQO do tecido impregnado, vindo do banho de tingimento, $15,98\text{g/Kg}$ de tecido.

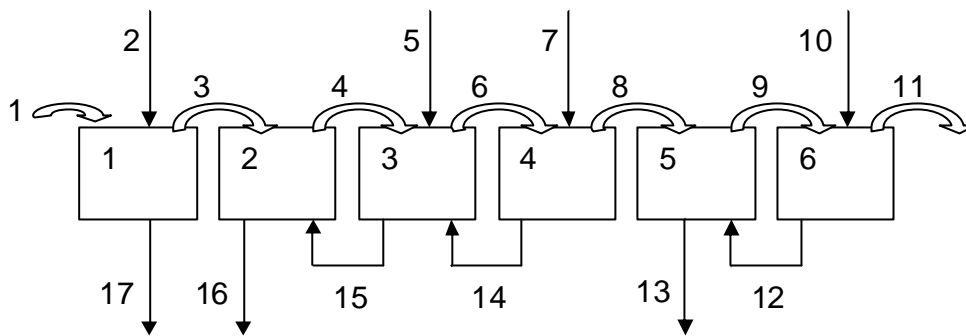


Figura 5.5 – Diagramada Lavanderia 2

Neste processo na corrente de número dez 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.

Na Tabela 5.19 estão os volumes de cada tanque assim como os valores de DQO de saída (do processo industrial), medidos em laboratório.

Tabela 5.19 – Informações sobre cada caixa da Lavanderia 2.

Caixas	Volume [L]	DQO de saída [mg/L]
1	650	1946,00
2	800	809,00
3	1100	346,00
4	1000	220,00
5	1300	1207,00
6	1100	2404,00

Os valores das correntes de entrada também são todos conhecidos, e estão representados na Tabela 5.20.

Os valores de *pick up* de cada corrente aquosa transportada pelo tecido, obtidos do processo industrial, estão descritos na Tabela 5.21.

Com estas informações é possível simular o processo e obter os valores de vazão e concentração de cada corrente e cada unidade caixa, utilizando-se o programa computacional desenvolvido.

Tabela 5.20 – Informações sobre cada corrente de entrada da Lavanderia 2.

Correntes	Vazão [m ³ /h]	Valor de DQO [mg/L]
2	9,00	0,00
5	9,00	0,00
7	7,50	0,00
10	0,90	7898,00

Tabela 5.21 – Informações sobre o valor de cada pick up da Lavanderia 2.

Correntes de <i>pick up</i>	Valor do <i>pick up</i>
1	0,85
3	1,00
4	1,00
6	1,00
8	1,00
9	1,00
11	0,61

Os valores dos Termos Fonte calculados para cada unidade caixa, assim como os valores da concentração, e estão representados na Tabela 5.22.

Tabela 5.22 – Resultados das unidades caixas da Lavanderia 2.

Caixas	Termo fonte	Concentração [mg/L]
1	-0,56	1946,51
2	0,33	809,01
3	0,60	345,94
4	1,11	219,96
5	0,10	1205,94
6	-0,10	2402,49

Analisando os valores da segunda coluna da Tabela 5.22, 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, obtida a partir de uma amostra de tecido proveniente 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 a 5 o parâmetro α 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 6 o parâmetro α é negativo porque existe a entrada de uma corrente (10) que trás consigo um insumo; fazendo com que parte da DQO da corrente de insumo seja adsorvida pela fibra.

Os valores de vazão e concentração (no regime estacionário) de cada corrente são apresentados da Tabela 5.23.

Tabela 5.23 – Valores de vazão e concentração (no regime estacionário) para Lavanderia 2.

Correntes	Vazão [m ³ /h]	Concentração [mg/L]
1	2,75	18800,00
2	9,00	0,00
3	3,24	1946,52
4	3,24	809,01
5	9,00	0,00
6	3,24	345,94
7	7,50	0,00
8	3,24	219,94
9	3,24	1205,94
10	0,90	7898,00
11	1,98	2402,49
12	2,16	2402,49
13	2,16	1205,94
14	7,50	219,94
15	16,50	345,94
16	16,50	809,01
17	8,51	1946,52

O cálculo da remoção de DQO de cada unidade caixa foi realizado, e os resultados apresentados na Tabela 5.24.

Na caixa 6 a remoção é negativa, pois existe um aumento de DQO no tecido, já que o termo fonte desta unidade caixa é negativo.

A relação de volume de água de fonte externa (ETA) por massa de tecido processado é de 7,87L/Kg.

Tabela 5.24 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 2, remoção de DQO em mg/L e gDQO/Kg tecido.

Unidades Caixa	ΔC (remoção de DQO do tecido [mg/L])	DQOr (remoção de DQO do tecido [gDQO/Kg tecido])
1	1946,52	7,06
2	200,36	1,22
3	129,59	0,79
4	115,58	0,38
5	112,11	0,19
6	-258,25	-0,33
	$\Sigma = 2245,90$	$\Sigma = 9,31$

5.3.1 – DFA Modificado utilizando o caso de Múltiplas Fontes de Água

Na procura de um modelo que racionalize o uso de água nesta lavanderia é utilizado o caso de Múltiplas Fontes de Água no Diagrama de Fontes de Água Modificado. Sendo o primeiro passo a análise de cada unidade caixa (considerando-a como uma operação).

Nesta análise é verificado que operação 1 (unidade caixa 1) deve ser considerada uma fonte, já que sua corrente de saída não é reusada na lavanderia original. Esta então será uma fonte com vazão limitada, de 8,51 m³/h (a vazão da corrente 17) e concentração de 7,06 g/Kg (concentração da caixa 1).

O segundo passo é a construção da Tabela 5.25, com a apresentação dos valores de cada fonte externa de água, com seus respectivos valores de vazão e concentração.

Tabela 5.25 – Valores de vazão e concentração da fontes de água.

Fontes externas	Vazão [m ³ /h]	Concentração [gDQO/Kg tecido]
1	8	0,2500
2	3,00	0,9000
3	20,00	4,5000

Neste caso existem 3 fontes de água externas além daquela citada anteriormente (gerada na operação 1). Uma delas não tem limite de vazão, que é a fonte 1, as outras duas tem uma limitação (descriminada na Tabela 5.25).

O passo seguinte é a construção da Tabela 5.26, com a apresentação dos valores da variação da “pseudo concentração” no tecido, a vazão limitante por operação, a DQO removida em cada caixa e o valor da relação de banho.

Tabela 5.26 – Informações de cada operação da Lavanderia 2, para o caso de Reúso Máximo do DFA Modificado.

Operações	ρ_{ct} [(g DQO. m ³)/(Kg tecido.h)]	f_L [m ³ /h]	ρ_C [mg/L]	Rb [m ³ /Kg tecido seco]
2	20,1416	16,50	200,36	0,006093
3	13,0277	16,50	129,59	0,006093
4	2,8733	7,50	115,58	0,003315
5	0,4045	2,16	112,11	0,001670
6	-0,7140	2,16	-258,25	0,001280

Com todos estes valores é possível a construção do Diagrama de Fontes de Água Modificado, representando as operações no diagrama na ordem crescente de valores de valor de DQO de entrada. Sendo que a operação que tiver o valor da “pseudo concentração” de DQO no tecido removida negativa deve ser posicionada no final do DFA. Os valores utilizados para a construção dos intervalos estão apresentados na Tabela 5.27. Sendo incluídos os valores de concentração de cada fonte externa também, apresentados na Tabela 5.25, e o valor de concentração da operação 1 (que está sendo considerada uma fonte também).

Tabela 5.27 – Informações de cada operação da Lavanderia 2, para a construção dos intervalos do DFA Modificado para o caso de Múltiplas Fontes de Água.

Operações	DQOr _{in} [g DQO/Kg tecido]	DQOr _{out} [g DQO/Kg tecido]
2	3,7083	4,9290
3	1,3181	2,1077
4	0,3459	0,7291
5	1,8243	2,0112
6	3,3998	3,0698

Seguindo as etapas descritas na seção 4.5, é obtido o DFA Modificado representado pela Figura 5.4. Sendo que a prioridade do uso das fontes internas e externas é nas operações que possuem o τ_{ct} com valor negativo. E as fontes externas que têm maior valor de concentração têm prioridade no seu uso.

A partir do DFA Modificado para o Reúso Máximo representada na Figura 5.6 é possível montar o novo diagrama da Lavanderia, o qual é chamado de Lavanderia 2A. A topologia do novo cenário deste lavador contínuo está sendo apresentada na Tabela 5.28 (Matriz do Processo). E a partir desta tabela é possível montar o novo diagrama, que está sendo representado pela Figura 5.7.

Tabela 5.28 – Matriz do Processo referente à Lavanderia 2A.

Unidades	Correntes associadas					
1	1	-2	8	-19	0	0
2	2	-3	-11	14	15	22
3	3	-4	16	17	-20	23
4	4	-5	-17	24	0	0
5	5	-6	-16	25	0	0
6	6	-7	9	18	-21	0
7	-10	-18	19	0	0	0
8	-12	-15	20	0	0	0
9	-13	-14	21	0	0	0

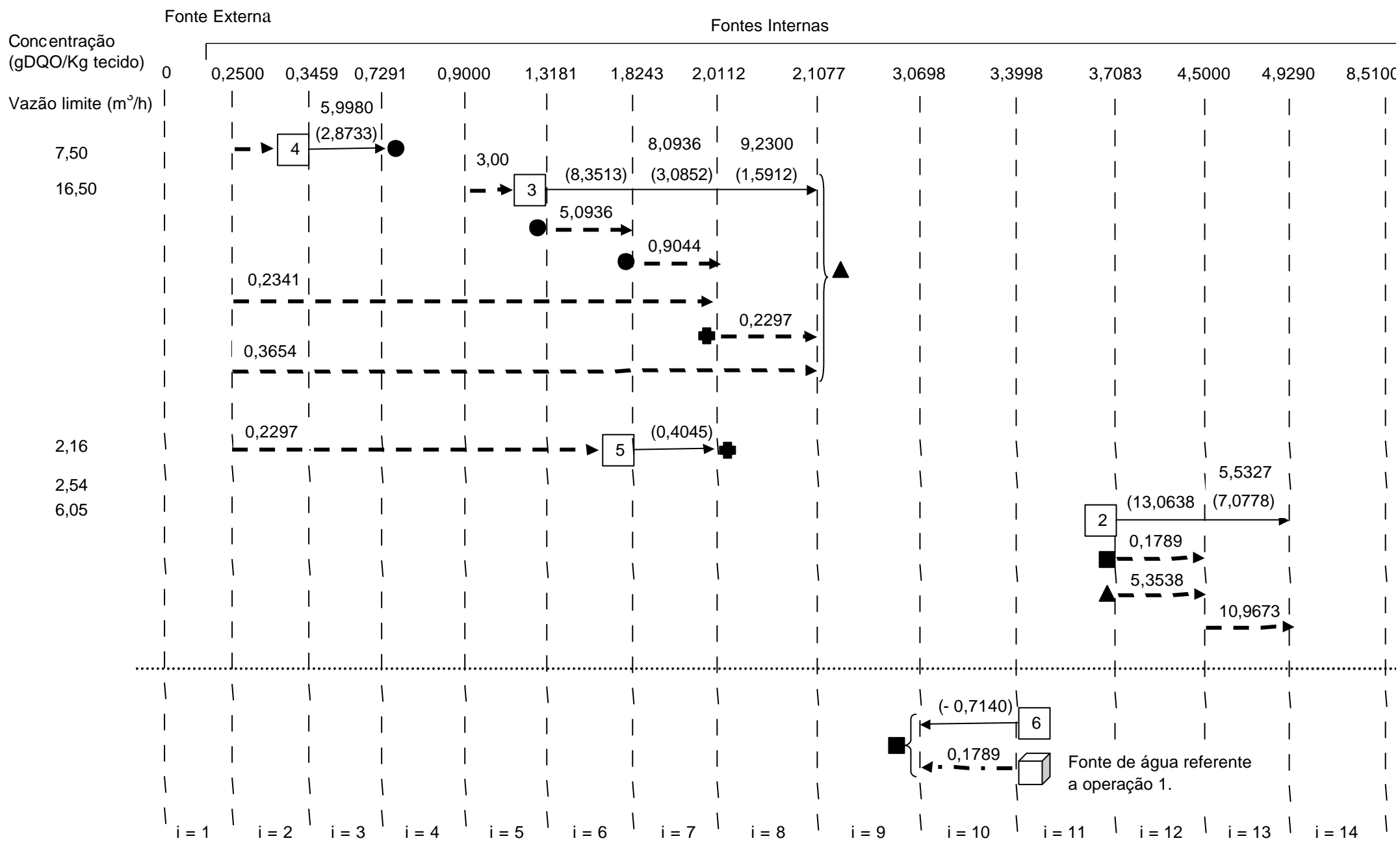


Figura 5.6 – Diagrama de Fontes de Água para a Lavanderia 2 (Múltiplas Fontes de Água).

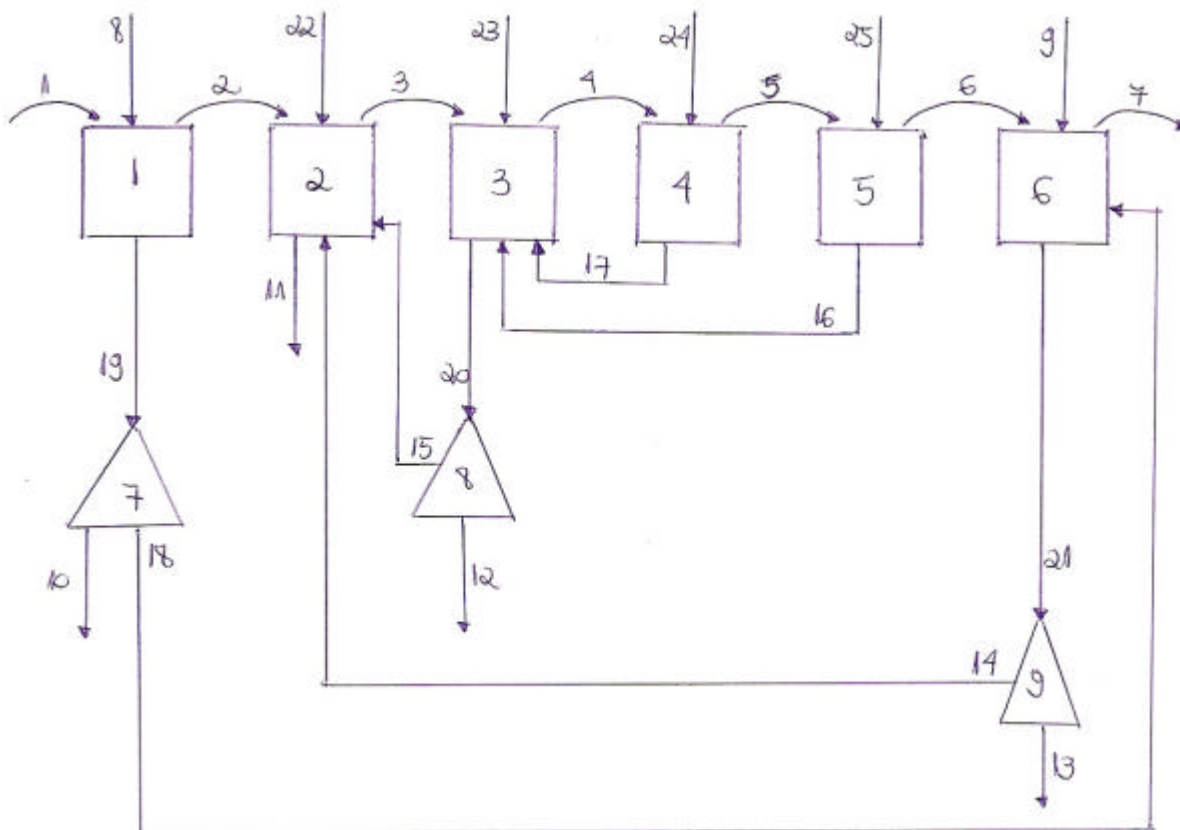


Figura 5.7 – Diagrama da Lavanderia 2A.

Conforme é possível verificar, na Lavanderia 2A foram acrescentados três divisores de correntes (7, 8 e 9). A Tabela 5.29 apresenta os valores de divisão de cada corrente de saída relativo à cada unidade divisor de correntes.

Tabela 5.29 – Informações sobre os fatores de divisão do divisor de correntes da Lavanderia 2A.

Número da unidade de divisor de correntes	Corrente de saída	Fator de divisão
7	10	0,97899
7	18	0,02101
8	12	0,4552
8	15	0,5448
9	13	0,98427
9	14	0,01573

As informações das correntes de entrada da Lavanderia 2A são apresentadas na Tabela 5.30. Sendo que estas são retiradas do Diagrama de Fontes de Água Modificado para o caso de Múltiplas Fontes de Água representado pela Figura 5.6. A corrente 8 é de água tratada, a 9 é uma corrente de insumo, e as demais correntes são referentes as fontes externas (excluindo a operação 1). É verificado que a fonte externa 2, é totalmente utilizada, e a fonte externa 3 não, sobrando 9,0327m³/h.

Tabela 5.30 – Informações das correntes de entrada da Lavanderia 2A.

Número da corrente	Vazão [m ³ /h]
8	9,0000
9	0,9000
22	10,9673
23	3,5994
24	5,9980
25	0,2297

Os resultados da simulação obtidos para este novo caso (Lavanderia 2A), com os valores de vazão e concentração estão na Tabela 5.31.

Tabela 5.31 – Valores de concentração (no regime estacionário) das unidades caixas da Lavanderia 2A.

Caixas	Concentração [mg/L]
1	1946,52
2	667,45
3	513,91
4	314,61
5	468,38
6	1830,29

A eficiência de remoção de DQO (em g DQO/Kg tecido) de cada caixa deste modelo proposto de racionalização (Lavanderia 2A) é o mesmo que da Lavanderia 2 (a original). Isto é garantido através do Diagrama de Fontes de Água Modificado.

A relação de volume de água da ETA por massa de tecido processado da Lavanderia 2A é de 2,78L/Kg.

A partir dos resultados é possível montar uma tabela comparativa, analisando a vazão de fonte externa de água tratada da Lavanderia 2 e a vazão de água de fonte externa tratada de cada operação da Lavanderia 2A (Tabela 5.32). As vazões referentes as fontes externas que não tem um valor zero de DQO não entram neste somatório.

Tabela 5.32 – Comparação do consumo de água tratada no processo da Lavanderia 2 e da Lavanderia 2A.

Processos	Fluxo de água tratada (m ³ /h)	
	Lavanderia 2	Lavanderia 2A
OP 1	9,00	9,00
OP 2	0,00	0,00
OP 3	9,00	0,00
OP 4	7,50	0,00
OP 5	0,00	0,00
OP 6	0,00	0,00
Σ	25,50	9,00

A partir da Tabela 5.32 é possível concluir que houve uma redução de 64,71% no consumo de água tratada depois da aplicação do caso de Múltiplas Fontes de Água do Diagrama de Fontes de Água Modificado no processo.

Os resultados apresentados na Tabela 5.32 comprovam que o modelo proposto (Lavanderia 2A) utiliza um menor volume de água no processo e remove a mesma quantidade de DQO que o atual (Lavanderia 2).

Os resultados para avaliação econômica para a Lavanderia 2 e Lavanderia 2A podem ser vistos na Tabela 5.33.

Com base nos dados apresentados a melhor alternativa do ponto de vista econômico para o problema exemplo é o caso do problema original.

Analisando em termos de quantidade de água tratada usada, a melhor alternativa seria o caso onde existe o uso de Múltiplas Fontes de Água.

Tabela 5.33 – Resultados da avaliação econômica da Lavanderia 2.

	Lavanderia 2	Múltiplas Fontes de Água (Lavanderia 2A)
Vazão (m ³ /h)	25,50	9,00 20,79
Concentração (gDQO/Kg tecido)	0,00	0,00 Diferente de zero
Custo	Custo	Custo
	(US\$/ano)	(US\$/ano)
Custo da água tratada	65790,00	23220,00
Custo da água suja	0,00	5364,95
Custo total de investimento com amortização anual	33006,86	36806,14
Custo total operacional	286559,31	286533,46
Custo total anual	319566,17	323339,60

5.4 – LAVANDERIA 3

A Figura 5.8 representa o processo da Lavanderia 3, onde as unidades e as correntes foram numeradas.

Neste processo está sendo lavado um tecido escuro, cuja gramatura é de 300g/m², a largura é de 1,36m e a velocidade do tecido de 80m/min, sendo lavadas 1,96 toneladas de tecido por hora. O valor de DQO do tecido impregnado, vindo do banho de tingimento, 16,44g/Kg de tecido. Neste processo na corrente de número nove é injetado um insumo, ácido acético.

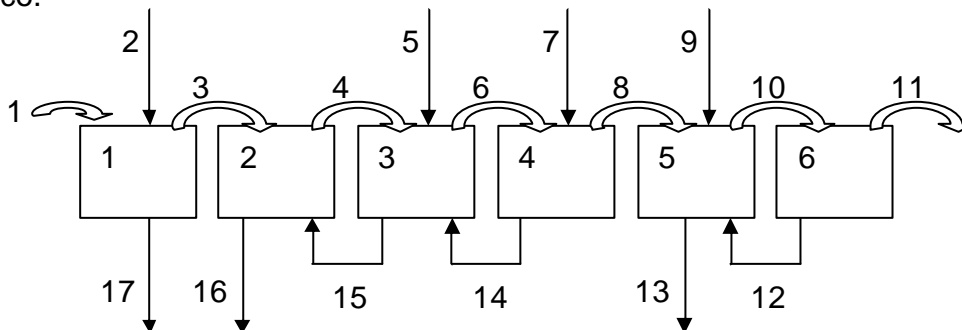


Figura 5.8 – Diagrama da Lavanderia 3.

Na Tabela 5.34 estão os volumes de cada tanque assim como os valores de DQO de saída (do processo industrial), medidos em laboratório.

Tabela 5.34 – Informações sobre cada caixa da Lavanderia 3.

Caixas	Volume [L]	DQO de saída [mg/L]
1	650	452,00
2	800	1179,00
3	1100	213,00
4	1000	142,00
5	1300	2052,00
6	1100	1928,00

Os valores das correntes de entrada também são todos conhecidos, e estão representados na Tabela 5.35.

Tabela 5.35 – Informações sobre cada corrente de entrada da Lavanderia 3.

Correntes	Vazão [m ³ /h]	Valor de DQO [mg/L]
2	9,00	0,00
5	9,00	0,00
7	7,50	0,00
9	0,90	7714,00

Os valores de *pick up* de cada corrente aquosa transportada pelo tecido, obtidos do processo industrial, estão descritos na Tabela 5.36.

Com estas informações é possível simular o processo e obter os valores de vazão e concentração de cada corrente e cada unidade caixa, utilizando-se o programa computacional desenvolvido.

Os valores dos Termos Fonte calculados para cada unidade caixa, assim como os valores da concentração, estão representados na Tabela 5.37.

Tabela 5.36 – Informações sobre o valor de cada pick up da Lavanderia 3.

Correntes de <i>pick up</i>	Valor do <i>pick up</i>
1	0,85
3	1,00
4	1,00
6	1,00
8	1,00
10	1,00
11	0,65

Tabela 5.37 – Resultados das unidades caixas da Lavanderia 3.

Caixas	Termo fonte	Concentração [mg/L]
1	-0,85	452,13
2	3,95	1178,28
3	0,16	212,83
4	2,22	141,87
5	-0,15	2050,61
6	-0,06	1925,39

Analisando os valores da segunda coluna da Tabela 5.37, 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, obtida a partir de uma amostra de tecido proveniente 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 a 4 o parâmetro α 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.

- Nas caixas 5 e 6 o parâmetro α é negativo. Isto é justificado pelo fato de que na unidade caixa 5 tem a entrada de uma corrente (9) que trás consigo um insumo; fazendo

com que parte da DQO da corrente de insumo seja adsorvida pela fibra. E a caixa 6 é devido a não entrada de água tratada na unidade.

Os valores de vazão e concentração (no regime estacionário) de cada corrente são apresentados da Tabela 5.38.

O cálculo da remoção de DQO de cada unidade caixa foi realizado, e os resultados apresentados na Tabela 5.39.

Nas caixas 5 e 6 a remoção é negativa, pois existe um aumento de DQO no tecido, já que o termo fonte destas unidades caixa é negativo.

A relação de volume de água de fonte externa (ETA) por massa de tecido processado é de 13,02L/Kg.

Tabela 5.38 – Valores de vazão e concentração (no regime estacionário) para Lavanderia 3.

Correntes	Vazão [m ³ /h]	Concentração [mg/L]
1	1,66	19341,18
2	9,00	0,00
3	1,96	452,13
4	1,96	1178,28
5	9,00	0,00
6	1,96	212,83
7	7,50	0,00
8	1,96	141,87
9	0,90	7714,00
10	1,96	2050,58
11	1,19	1925,37
12	0,76	1925,37
13	1,66	2050,58
14	7,50	141,87
15	16,50	212,83
16	16,50	1178,28
17	8,71	452,13

Tabela 5.39 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 3, remoção de DQO em mg/L e gDQO/Kg tecido.

Unidades Caixa	ΔC (remoção de DQO do tecido [mg/L])	DQOr (remoção de DQO do tecido [gDQO/Kg tecido])
1	452,13	2,46
2	940,05	8,86
3	30,18	0,28
4	97,80	0,47
5	-359,26	-0,65
6	-125,21	-0,12
	$\Sigma = 1035,69$	$\Sigma = 11,30$

5.4.1 – DFA Modificado utilizando o caso de Regeneração com Reúso

É utilizado o caso de Regeneração com Reúso no Diagrama de Fontes de Água para encontrar um novo modelo que racionalize o uso de água nesta lavanderia. Sendo o primeiro passo a análise de cada unidade caixa (considerando-a como uma operação).

Nesta análise é verificado que operação 1 (unidade caixa 1) deve ser considerada uma fonte, já que sua corrente de saída não é reusada na lavanderia original. Esta então será uma fonte com vazão limitada, de 8,71 m³/h (a vazão da corrente 17) e concentração de 2,4621 g/Kg (concentração da caixa 1).

Está sendo considerado o uso de um regenerador que tem uma perda de água de 50%, e a água de saída deste processo tem um valor de valor de DQO zero.

O passo seguinte é a construção da Tabela 5.40, com a apresentação dos valores da variação da “pseudo concentração” no tecido, a vazão limitante por operação, a DQO removida em cada caixa e o valor da relação de banho.

Com todos estes valores é possível a construção do Diagrama de Fontes de Água Modificado, representando as operações no diagrama na ordem crescente de valores de valor de DQO de entrada. Sendo que as operações 5 e 6, que têm o valor da “pseudo concentração” de DQO no tecido removida negativa foram posicionadas no final do DFA.

Os valores utilizados para a construção dos intervalos estão apresentados na Tabela 5.41. Sendo incluídos os valores de concentração da água tratada (zero), e o valor de concentração da operação 1 (que está sendo considerada uma fonte).

Tabela 5.40 – Informações de cada operação da Lavanderia 3, para o caso de Regeneração com Reúso do DFA Modificado.

Operações	τ_{ct} [(g DQO. m ³)/(Kg tecido.h)]	f_L [m ³ /h]	τ_C [mg/L]	Rb [m ³ /Kg tecido seco]
2	146,1940	16,50	940,05	0,009425
3	4,6930	16,50	30,18	0,009424
4	3,5427	7,50	97,80	0,004830
5	-1,0307	1,58	-359,26	0,001816
6	-0,0858	0,68	-125,21	0,001008

Tabela 5.41 – Informações de cada operação da Lavanderia 2, para a construção dos intervalos do DFA Modificado para o caso de Múltiplas Fontes de Água.

Operações	DQOr _{in} [g DQO/Kg tecido]	DQOr _{out} [g DQO/Kg tecido]
2	2,2453	11,1056
3	1,7216	2,0060
4	0,2128	0,6852
5	4,3608	3,7107
6	2,0506	1,9254

Seguindo as etapas descritas na seção 4.6, é obtido o DFA Modificado representado pela Figura 5.9. Sendo que a prioridade do uso das fontes internas e externas é nas operações que possuem o τ_{ct} com valor negativo.

A partir do DFA Modificado para o Reúso Máximo representada na Figura 5.9 (onde “R” significa uma corrente que vem do regenerador usado) é possível montar o novo diagrama da Lavanderia, o qual é chamado de Lavanderia 3A. A topologia do novo cenário deste lavador contínuo está sendo apresentada na Tabela 5.42 (Matriz do Processo). Sendo possível fazer o diagrama para o caso da Lavanderia 3A, conforme a Matriz do Processo, representado pela Figura 5.10.

Tabela 5.42– Matriz do Processo referente à Lavanderia 3A.

Unidades	Correntes associadas						
1	1	-2	8	-26	0	0	0
2	2	-3	11	12	-27	0	0
3	3	-4	13	-21	0	0	0
4	4	-5	14	15	-20	0	0
5	5	-6	9	16	-28	0	0
6	6	-7	17	-29	0	0	0
7	-17	-18	26	0	0	0	0
8	-16	-22	27	0	0	0	0
9	-23	-24	28	0	0	0	0
10	-19	-25	29	0	0	0	0
11	-10	-11	-13	-14	30	0	0
12	18	19	20	21	22	23	-30

Conforme é possível verificar, na Lavanderia 3A foram acrescentados cinco divisores de correntes (7, 8, 9, 10 e 11), sendo o divisor de número 11 aquele que distribuí as correntes referentes ao regenerador até as operações. E a unidade de número 12 representa o regenerador.

Cada corrente interna que não tiver mais prioridade de uso deve ser enviada para o regenerador, mas antes deve ser verificada a possibilidade de seu uso em uma operação de remoção de carga contaminante negativa. Sendo que neste exemplo apresentado parte da corrente que sai da operação dois é encaminhada à operação cinco, antes de ser enviada ao regenerador.

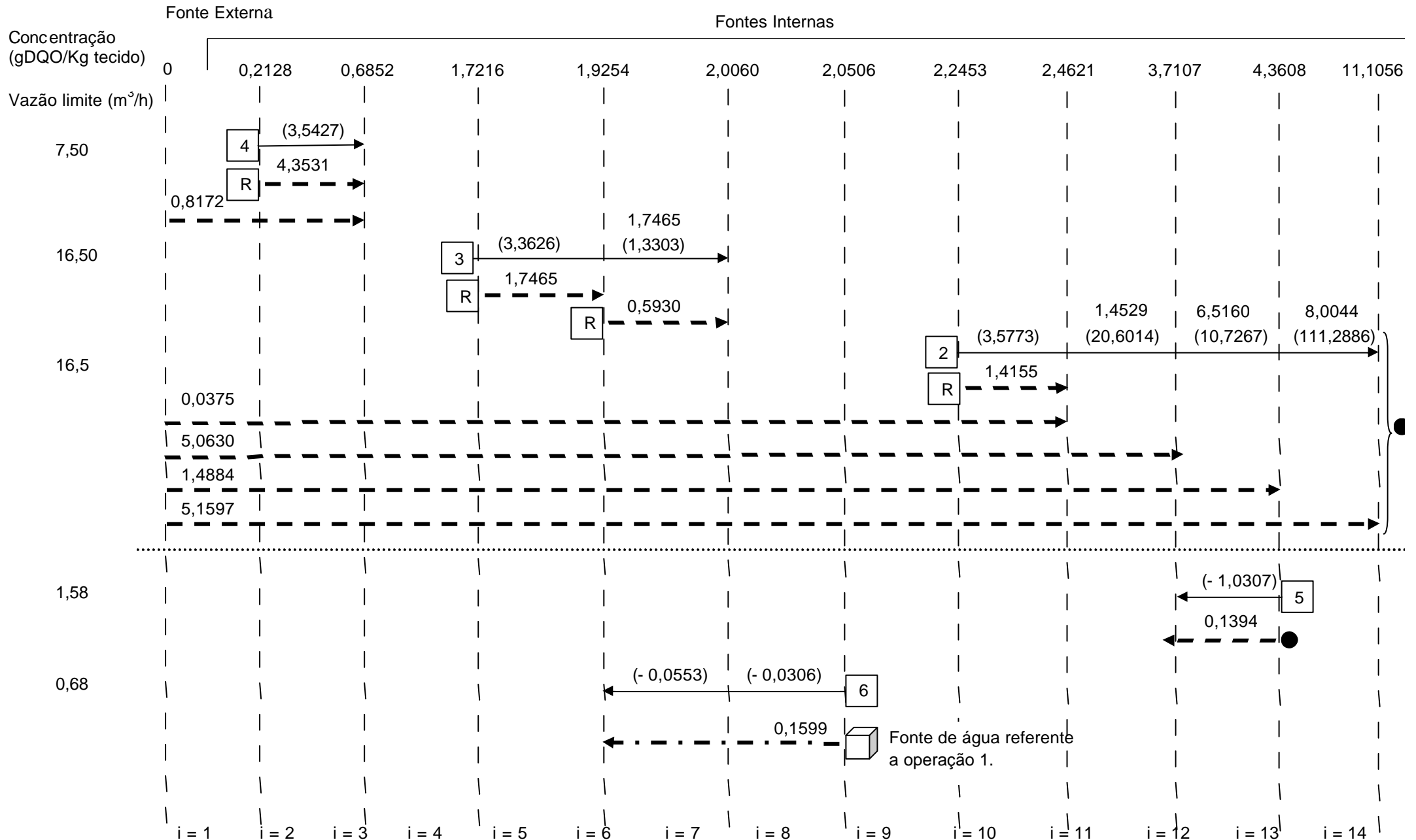


Figura 5.9 – Diagrama de Fontes de Água para a Lavanderia 3 (Regeneração com Reuso).

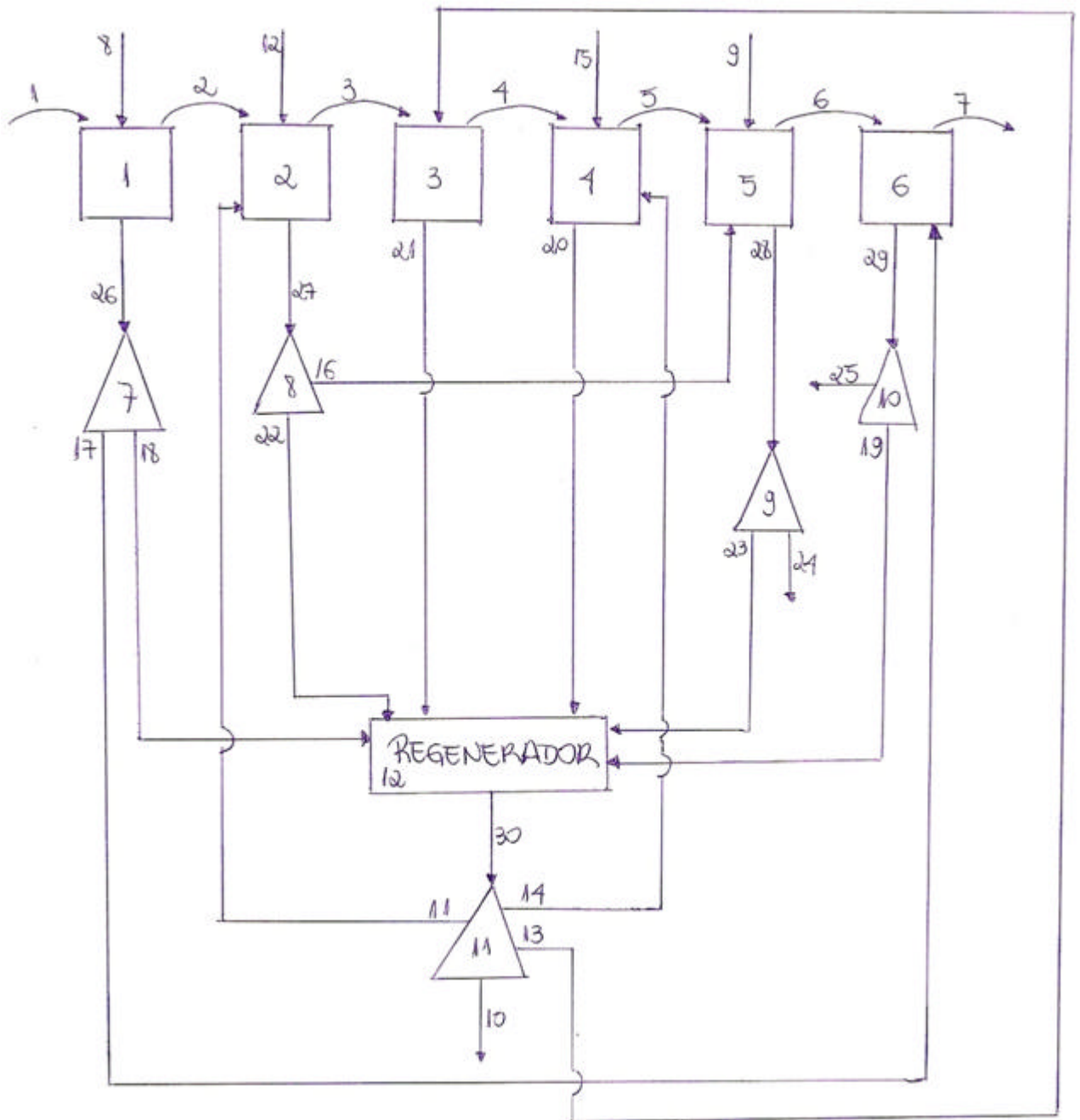


Figura 5.10 – Diagrama da Lavanderia 3A.

A Tabela 5.43 apresenta os valores de divisão de cada corrente de saída relativo à cada unidade divisor de correntes.

Tabela 5.43 – Informações sobre os fatores de divisão do divisor de correntes da Lavanderia 3A.

Número da unidade de divisor de correntes	Corrente de saída	Fator de divisão
7	17	0,018367
7	18	0,981630
8	16	0,010588
8	22	0,989410
9	23	0,134100
9	24	0,865900
10	19	0,189160
10	25	0,810840
11	10	0,724030
11	11	0,048177
11	13	0,079627
11	14	0,148170

As informações das correntes de entrada da Lavanderia 3A são apresentadas na Tabela 5.44. Sendo que estas são retiradas do Diagrama de Fontes de Água Modificado para o caso de Regeneração com Reúso representado pela Figura 5.9.

Tabela 5.44 – Informações das correntes de entrada da Lavanderia 3A.

Número da corrente	Vazão [m ³ /h]	Concentração [mg/L]
8	9,0000	0,00
9	0,9000	7714,00
12	11,7486	0,00
15	0,8172	0,00

Os resultados da simulação obtidos para este novo caso (Lavanderia 3A), com os valores de vazão e concentração estão na Tabela 5.45.

A eficiência de remoção de DQO (em g DQO/Kg tecido) de cada caixa deste modelo proposto de racionalização (Lavanderia 3A) é o mesmo que da Lavanderia 3 (a original). Isto é garantido através do Diagrama de Fontes de Água Modificado.

Tabela 5.45 – Valores de concentração (no regime estacionário) das unidades caixas da Lavanderia 3A.

Caixas	Concentração [mg/L]
1	452,13
2	1205,98
3	679,13
4	316,34
5	2153,94
6	1909,71

A relação de volume de água da ETA por massa de tecido processado da Lavanderia 3A é de 11,01L/Kg.

A Tabela 5.46 é uma tabela comparativa, analisando a vazão de fonte externa de água tratada da Lavanderia 3 e a vazão de água de fonte externa tratada de cada operação da Lavanderia 3A.

A partir da Tabela 5.46 é possível concluir que houve uma redução de 15,43% no consumo de água tratada depois da aplicação do caso de Regeneração com Reúso do Diagrama de Fontes de Água Modificado no processo.

Os resultados apresentados na Tabela 5.46 comprovam que o modelo proposto (Lavanderia 3A) utiliza um menor volume de água no processo e remove a mesma quantidade de DQO que o atual (Lavanderia 3).

Tabela 5.46 – Comparação do consumo de água tratada no processo da Lavanderia 3 e da Lavanderia 3A.

Processos	Fluxo de água tratada (m ³ /h)	
	Lavanderia 3	Lavanderia 3A
OP 1	9,00	9,00
OP 2	0,00	11,75
OP 3	9,00	0,00
OP 4	7,50	0,82
OP 5	0,00	0,00
OP 6	0,00	0,00
Σ	25,50	21,57

Os resultados para avaliação econômica para a Lavanderia 3 e Lavanderia 3A podem ser vistos na Tabela 5.47.

Com base nos dados apresentados a melhor alternativa do ponto de vista econômico para o problema exemplo é o caso do problema original.

Analisando em termos de quantidade de água tratada usada, a melhor alternativa seria o caso onde existe o uso de um Regenerador, aplicando o Reúso.

Tabela 5.47 – Resultados da avaliação econômica da Lavanderia 3.

	Lavanderia 3	Regeneração com Reúso (Lavanderia 3A)	
Vazão (m ³ /h)	25,50	21,57	8,11
Concentração (gDQO/Kg tecido)	0,00	0,00	Água regenerada
Custo	Custo	Custo	
	(US\$/ano)	(US\$/ano)	
Custo da água tratada	65790,00	55639,76	
Custo da água suja	0,00	0,00	
Custo total de investimento com amortização anual	33006,86	36623,94	
Custo total operacional	286559,31	312077,75	
Custo total anual	319566,17	348701,69	

5.5 – LAVANDERIA 4

Neste item serão apresentados cálculos de custos para um caso escolhido de lavador contínuo da indústria têxtil. Os dados econômicos utilizados são apresentados no trabalho de WANG e SMITH (1994b) e de GOMES (2002). Esses dados podem ser vistos na Tabela 4.1, da seção 4.7. Para a Lavanderia 4 apresentada, serão realizados cálculos usando todos os quatro casos de DFA Modificado, realizando a análise econômica comparativa entre eles.

A Figura 5.11 representa o processo da Lavanderia 4, onde as unidades e as correntes foram numeradas.

Neste processo está sendo lavado um tecido cuja gramatura é de 410g/m², a largura é de 1,52m e a velocidade do tecido de 61m/min, sendo lavadas 2,28 toneladas de tecido por hora. O valor de DQO do tecido impregnado, vindo do banho de tingimento, 10,57g/Kg de tecido. Neste processo na corrente de número nove é injetado um insumo, ácido acético.

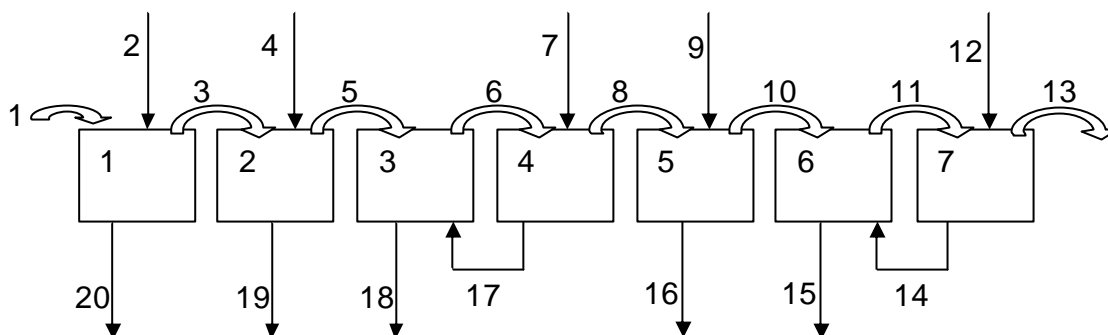


Figura 5.11 – Diagrama da Lavanderia 4.

Na Tabela 5.48 estão os volumes de cada tanque assim como os valores de DQO de saída (do processo industrial), medidos em laboratório.

Tabela 5.48 – Informações sobre cada caixa da Lavanderia 4.

Caixas	Volume [L]	DQO de saída [mg/L]
1	900,00	1720,00
2	1230,00	1150,00
3	900,00	658,00
4	1230,00	372,00
5	1230,00	1396,00
6	900,00	456,00
7	900,00	144,00

Os valores das correntes de entrada também são todos conhecidos, e estão representados na Tabela 5.49.

Tabela 5.49 – Informações sobre cada corrente de entrada da Lavanderia 4.

Correntes	Vazão [m ³ /h]	Valor de DQO [mg/L]
2	2,00	0,00
4	3,00	0,00
7	2,00	0,00
9	0,035	118800,00
12	2,00	0,00

Os valores de *pick up* de cada corrente aquosa transportada pelo tecido, obtidos do processo industrial, estão descritos na Tabela 5.50.

Com estas informações é possível simular o processo e obter os valores de vazão e concentração de cada corrente e cada unidade caixa, utilizando-se o programa computacional desenvolvido.

Os valores dos Termos Fonte calculados para cada unidade caixa, assim como os valores da concentração, estão representados na Tabela 5.51.

Os valores de vazão e concentração (no regime estacionário) de cada corrente são apresentados da Tabela 5.52.

O cálculo da remoção de DQO de cada unidade caixa foi realizado, e os resultados apresentados na Tabela 5.53.

A relação de volume de água de fonte externa (ETA) por massa de tecido processado é de 3,94L/Kg.

Tabela 5.50 – Informações sobre o valor de cada *pick up* da Lavanderia 4.

Correntes de <i>pick up</i>	Valor do <i>pick up</i>
1	0,85
3	1,00
5	1,00
6	1,00
8	1,00
10	1,00
11	1,00
13	0,61

Tabela 5.51 – Resultados das unidades caixas da Lavanderia 4.

Caixas	Termo fonte	Concentração [mg/L]
1	-0,72	1721,89
2	0,55	1150,94
3	-0,16	658,26
4	0,06	372,02
5	-0,35	1395,12
6	-0,34	455,59
7	-0,41	143,83

Tabela 5.52 – Valores de vazão e concentração (no regime estacionário) para Lavanderia 4.

Correntes	Vazão [m ³ /h]	Concentração [mg/L]
1	1,94	12435,29
2	2,00	0,00
3	2,28	0,00
4	3,00	0,00
5	2,28	1150,94
6	2,28	658,26
7	2,00	0,00
8	2,28	372,02
9	0,035	118800,00
10	2,28	1395,12
11	2,28	455,59
12	2,00	0,00
13	1,39	143,83
14	2,89	143,83
15	2,89	455,59
16	0,035	1395,12
17	2,00	372,02
18	2,00	658,26
19	3,00	1150,94
20	1,66	1721,89

Tabela 5.53 – Informações de descarte das caixas da Lavanderia 4, remoção de DQO em mg/L e gDQO/Kg tecido.

Unidades Caixa	ΔC (remoção de DQO do tecido [mg/L])	DQOr (remoção de DQO do tecido [gDQO/Kg tecido])
1	1721,89	2,97
2	407,23	0,94
3	-128,77	-0,24
4	21,29	0,04
5	-766,68	-0,78
6	-240,24	-0,54
7	-98,91	-0,18
	$\Sigma = 915,80$	$\Sigma = 2,20$

5.5.1 – Caso de Reúso Máximo

Aplicando o método do DFA Modificado para o caso de Reúso Máximo, deve-se considerar a unidade caixa 1 como uma fonte, de vazão $1,66\text{m}^3/\text{h}$ e concentração de $2,97\text{gDQO/Kg}$ tecido.

A Tabela 5.54 apresenta os valores da “pseudo concentração” no tecido (calcula através da Equação 21), a vazão limitante por operação, a DQO removida em cada caixa e o valor da relação de banho.

A DQO removida em cada caixa foi calculada pela Equação 18 e a relação de banho através da Equação 23.

A seguir é construído o DFA Modificado, utilizando os valores de concentração apresentados na Tabela 5.55 para os intervalos, assim como o valor de concentração da água tratada (zero) e da operação 1 (que está sendo considerada uma fonte).

Tabela 5.54 – Informações de cada operação da Lavanderia 4, para o caso de Reúso Máximo do DFA Modificado.

Operações	Δct [(g DQO. m ³)/(Kg tecido.h)]	f_L [m ³ /h]	ΔC [mg/L]	Rb [m ³ /Kg tecido seco]
2	2,8285	3,00	407,23	0,002315
3	-0,4834	2,00	-128,77	0,001877
4	0,0799	2,00	21,29	0,001876
5	-0,0272	0,035	-766,68	0,001014
6	-1,5736	2,89	-240,24	0,002266
7	-0,5364	2,89	-98,91	0,001876

Tabela 5.55 – Informações de cada operação da Lavanderia 4, para a construção dos intervalos do DFA Modificado para o caso de Reúso Máximo.

Operações	DQOr _{in} [g DQO/Kg tecido]	DQOr _{out} [g DQO/Kg tecido]
2	1,7219	2,6647
3	1,4771	1,2354
4	0,6583	0,6982
5	2,1950	1,4165
6	1,5773	1,0328
7	0,4556	0,2700

Seguindo as etapas descritas na seção 4.3, é obtido o DFA Modificado representado pela Figura 5.12. Sendo que a prioridade do uso das fontes internas e externas é nas operações que possuem o Δct com valor negativo.

A partir do DFA Modificado para o Reúso Máximo representada na Figura 5.12 é possível montar o novo diagrama da Lavanderia, o qual é chamado de Lavanderia 4^a, representado na Figura 5.13. A topologia do novo cenário deste lavador contínuo está sendo apresentado na Tabela 5.56 (Matriz do Processo).

Conforme é possível verificar, na Lavanderia 4A foram acrescentados três divisores de correntes (8, 9 e 10). A Tabela 5.57 apresenta os valores de divisão de cada corrente de saída relativo à cada unidade divisor de correntes.

Tabela 5.56– Matriz do Processo referente à Lavanderia 4A.

Unidades		Correntes associadas							
1	1	-2	9	-26	0	0	0	0	0
2	2	-3	-12	13	14	15	16	17	18
3	3	-4	-14	19	0	0	0	0	0
4	4	-5	-18	20	0	0	0	0	0
5	5	-6	10	21	-27	0	0	0	0
6	6	-7	-15	22	0	0	0	0	0
7	7	-8	23	-28	0	0	0	0	0
8	-11	-19	-21	-22	-23	26	0	0	0
9	-13	-24	27	0	0	0	0	0	0
10	-16	-20	-25	28	0	0	0	0	0

Tabela 5.57 – Informações sobre os fatores de divisão do divisor de correntes da Lavanderia 4A.

Número da unidade de divisor de correntes	Corrente de saída	Fator de Divisão
8	11	0,21290
8	19	0,167760
8	21	0,010556
8	22	0,489100
8	23	0,119680
9	13	0,333330
9	24	0,666670
10	16	0,010845
10	20	0,171530
10	25	0,817630

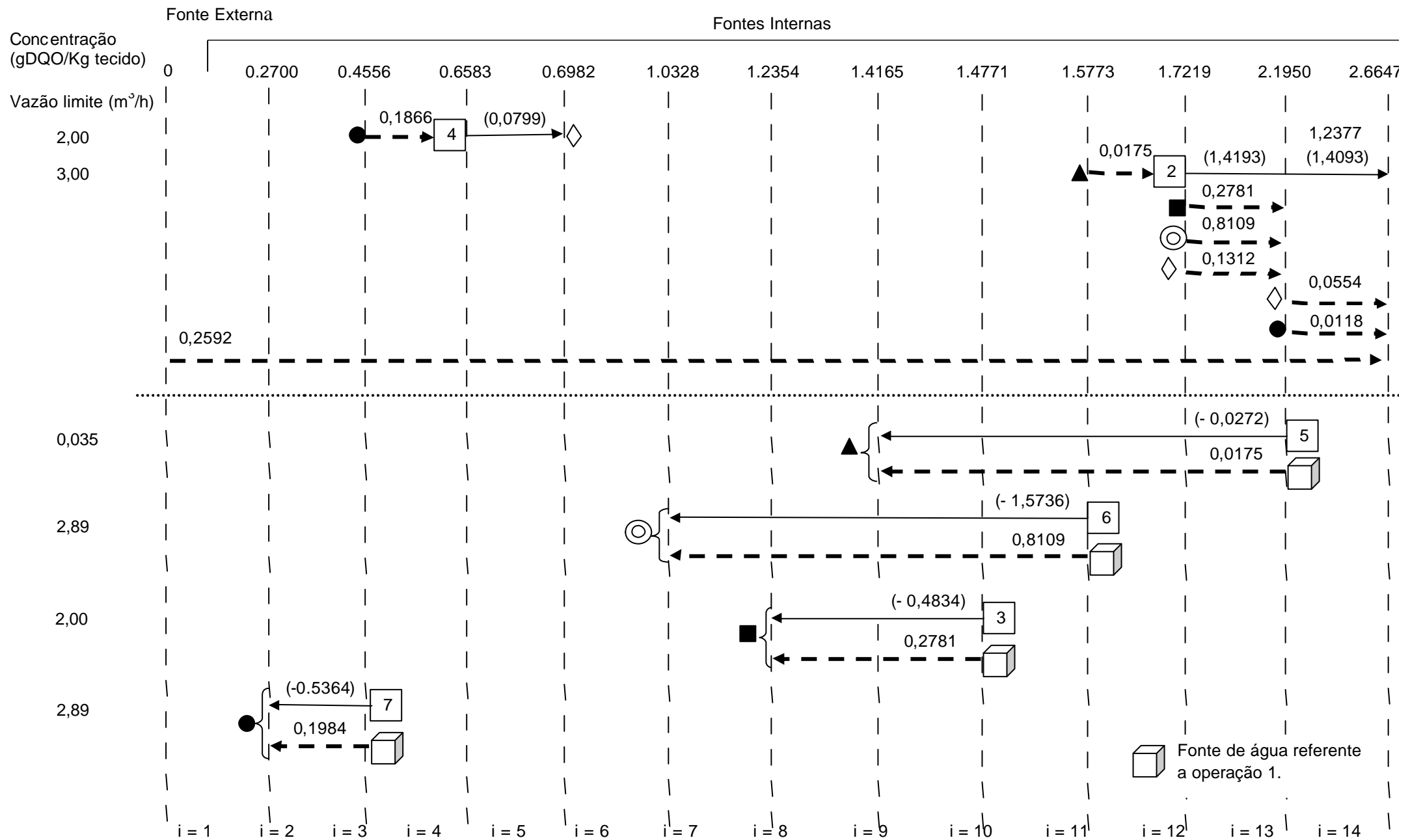


Figura 5.12 – Diagrama de Fontes de Água para a Lavandéria 4 (Reúso Máximo).

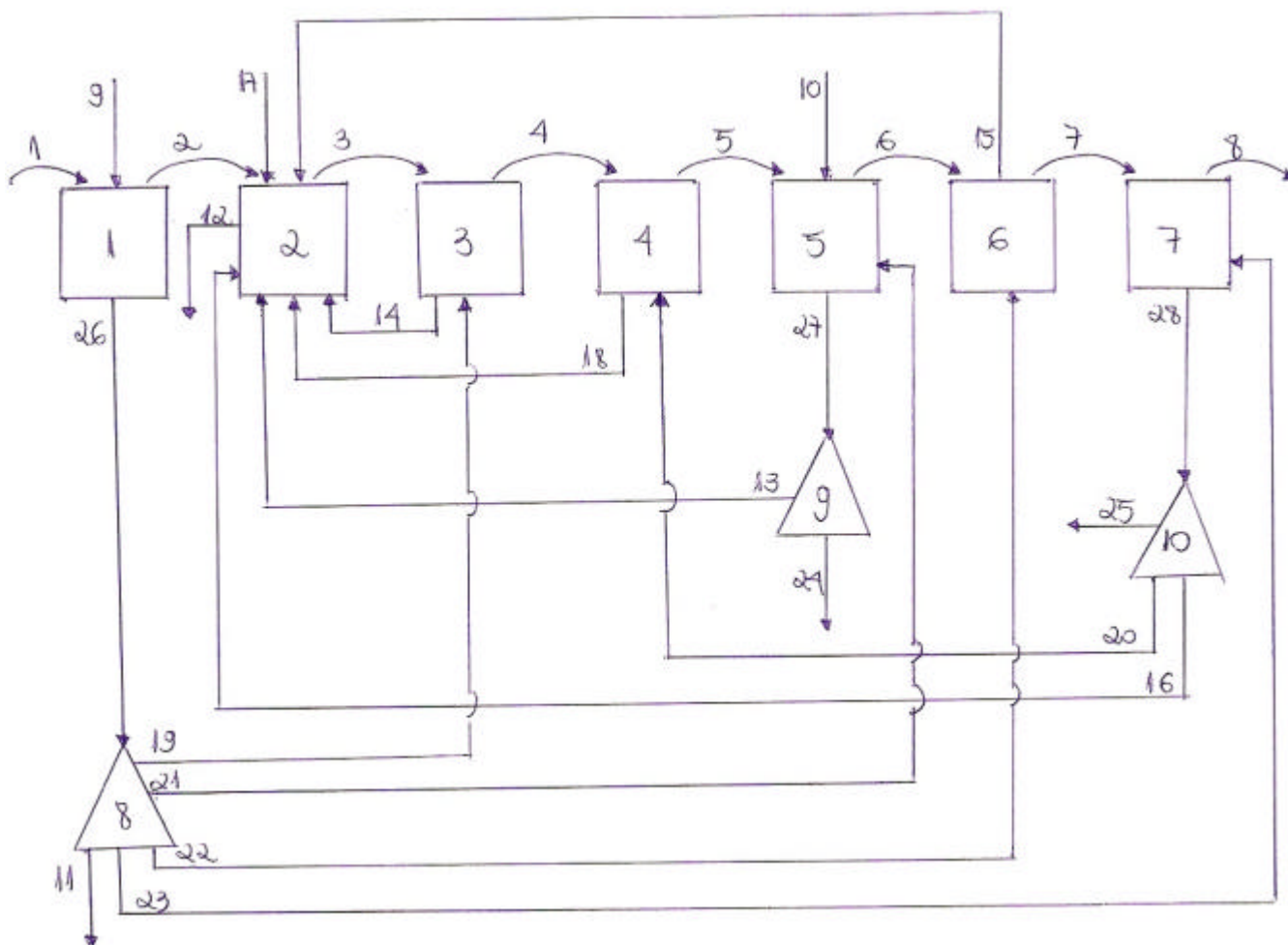


Figura 5.13 – Diagrama da Lavanderia 4A.

As informações das correntes de entrada da Lavanderia 4A são apresentadas na Tabela 5.58. Sendo que estas são retiradas do Diagrama de Fontes de Água Modificado para o caso de Reúso Máximo representado pela Figura 5.12.

Tabela 5.58 – Informações das correntes de entrada da Lavanderia 4A.

Número da corrente	Vazão [m ³ /h]	Concentração [mg/L]
9	2,0000	0,00
10	0,0350	118800,00
17	0,2592	0,00

Os resultados da simulação obtidos para este novo caso (Lavanderia 4A), com os valores de vazão e concentração estão na Tabela 5.59.

Tabela 5.59 – Valores de concentração (no regime estacionário) das unidades caixas da Lavanderia 4A.

Caixas	Concentração [mg/L]
1	1721,89
2	2343,11
3	2060,17
4	2100,75
5	3087,41
6	2327,52
7	2108,27

A eficiência de remoção de DQO (em g DQO/Kg tecido) de cada caixa deste modelo proposto de racionalização (Lavanderia 4A) é o mesmo que da Lavanderia 4 (a original). Isto é garantido através do Diagrama de Fontes de Água Modificado, no qual é calculado através da garantia de remoção da mesma pseudo concentração de contaminante em cada operação.

A relação de volume de água da ETA por massa de tecido processado da Lavanderia 4A é de 0,99L/Kg.

A partir dos resultados é possível montar uma tabela comparativa, analisando a vazão de fonte externa da Lavanderia 4 e a vazão de água de fonte externa de cada operação da Lavanderia 4A (Tabela 5.60).

A partir da Tabela 5.60 é possível concluir que houve uma redução de 74,90% no consumo de água tratada depois da aplicação do caso de Reúso Máximo do Diagrama de Fontes de Água Modificado no processo.

Tabela 5.60 – Comparação do consumo de água tratada no processo da Lavanderia 4 e da Lavanderia 4A.

Processos	Fluxo de água tratada (m ³ /h)	
	Lavanderia 4	Lavanderia 4A
OP 1	2,00	2,00
OP 2	3,00	0,26
OP 3	0,00	0,00
OP 4	2,00	0,00
OP 5	0,00	0,00
OP 6	0,00	0,00
OP 7	2,00	0,00
Σ	9,00	2,26

5.5.2 – Caso de Restrição de Vazão

Será apresentado agora um procedimento no qual é considerado que o processo da Lavanderia 4 necessita de uma vazão fixa de água. Este é o caso de Restrição de Vazão. Sendo o reciclo local aceitável, sua utilização permite satisfazer as restrições de valores da vazão sem que ocorra alteração na meta de vazão mínima especificada pelo procedimento anterior sem considerar as restrições de vazão.

Como exemplo, considera-se que no problema exemplo (Lavanderia 4) todas as operações têm seus valores de vazão fixados e iguais aos limites de vazão citados na Tabela 5.54. Sendo a concentração limite de entrada de cada processo a sua concentração máxima de saída, especificada na Tabela 5.55. Ou seja, este tipo de caso consiste em definir uma corrente de reciclo para completar o valor requerido de vazão.

A Tabela 5.61 apresenta os valores de vazão fixa de água (f_L), o somatório de todas as correntes que entram em cada operação (Q_e) e a corrente de reciclo necessária para garantir a restrição de vazão, baseados na Lavanderia 4A.

Todos os valores de concentração e remoção de DQO de cada operação do novo cenário da lavanderia têxtil (Lavanderia 4B) não se alteram quando comparados ao caso do Reúso Máximo (Lavanderia 4A), sendo assim as Tabelas 5.59 e 5.60 permanecem inalteradas. Mas a Matriz do Processo se altera. Já que para cada reciclo gerado é

necessário um divisor de correntes. Assim são apresentadas as Tabelas 5.62, 5.63 e 5.64, a nova Matriz do Processo, os divisores de correntes e seus valores, e as especificações das correntes de entrada. A quantidade e os valores de vazão de cada corrente de entrada não se alteram, somente o número das correntes sofre alteração, já que são adicionados novos divisores de correntes, e conseqüentemente novas correntes no processo. A partir dos dados da Tabela 5.62 é possível montar o diagrama para a Lavanderia 4B, sendo este representado pela Figura 5.14.

Tabela 5.61 – Informações de cada operação da Lavanderia 4A, para o caso de Restrição de Vazão do DFA Modificado.

Operações	f_L [m ³ /h]	$?Q_e$ [m ³ /h]	Reciclo [m ³ /h]
2	3,00	1,5641	1,4359
3	2,00	0,2781	1,7219
4	2,00	0,1866	1,8134
5	0,035	0,0175	0,0175
6	2,89	0,8109	2,0791
7	2,89	0,1984	2,6916

Tabela 5.62 – Matriz do Processo referente à Lavanderia 4B.

Unidades	Correntes associadas									
1	1	-2	9	-35	0	0	0	0	0	0
2	2	-3	18	19	20	21	22	23	29	-36
3	3	-4	24	30	-37	0	0	0	0	0
4	4	-5	25	31	-38	0	0	0	0	0
5	5	-6	10	26	32	-39	0	0	0	0
6	6	-7	27	33	-40	0	0	0	0	0
7	7	-8	28	34	-41	0	0	0	0	0
8	-11	-24	-26	-27	-28	35	0	0	0	0
9	-12	-29	36	0	0	0	0	0	0	0
10	-13	-19	-30	37	0	0	0	0	0	0
11	-14	-23	-31	38	0	0	0	0	0	0
12	-15	-18	-32	39	0	0	0	0	0	0
13	-16	-20	-33	40	0	0	0	0	0	0
14	-17	-21	-25	-34	41	0	0	0	0	0

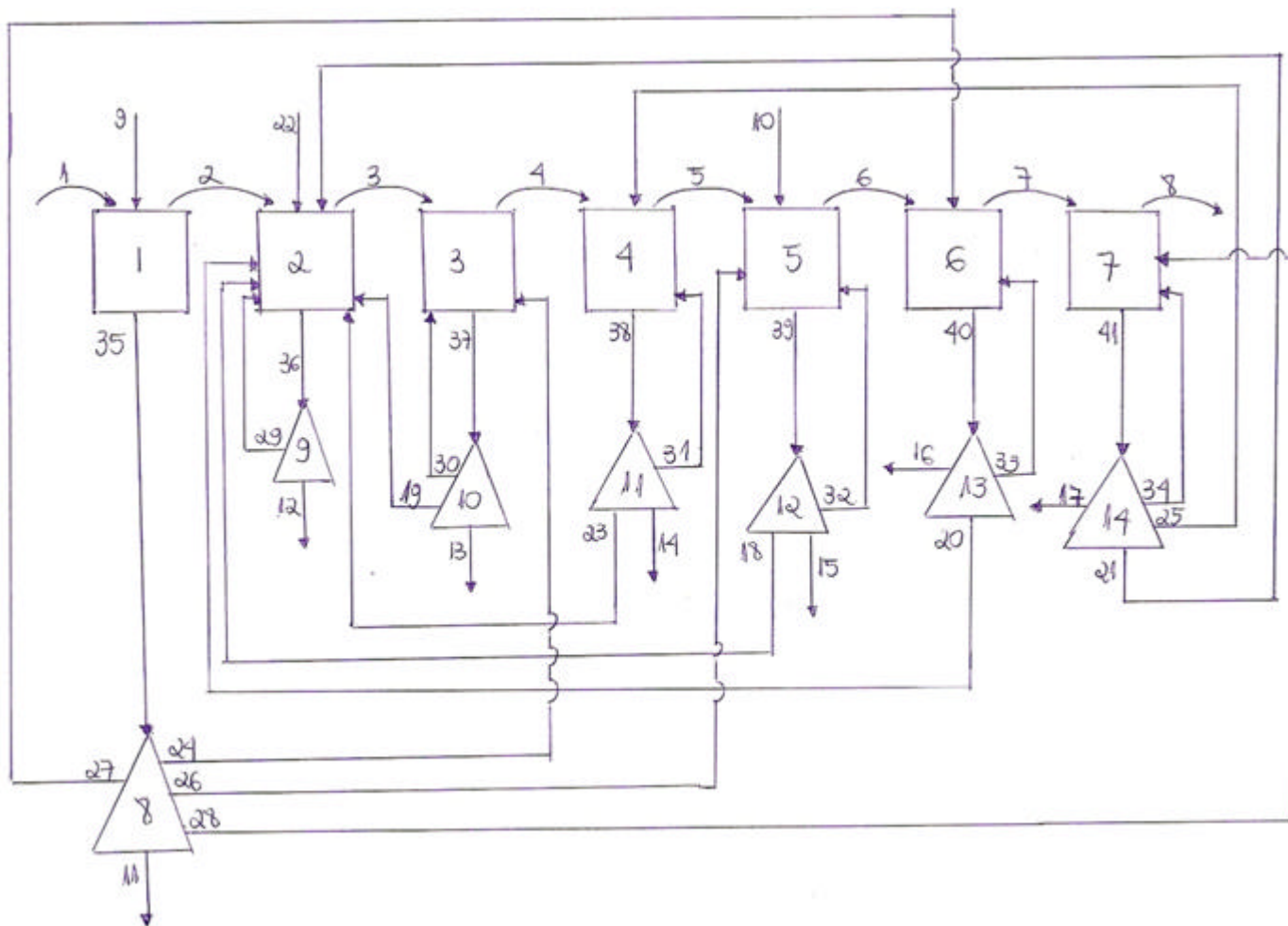


Figura 5.14 – Diagrama da Lavanderia 4B.

Tabela 5.63 – Informações sobre os fatores de divisão do divisor de correntes da Lavanderia 4B.

Número da unidade do divisor de correntes	Corrente de saída	Fator de divisão
8	11	0,2129000
8	24	0,1677600
8	26	0,0105560
8	27	0,4891000
8	28	0,1196800
9	12	0,6763000
9	29	0,3237000
10	13	0,4626400
10	19	0,0747280
10	30	0,4626400
11	14	0,4755300
11	23	0,0489370
11	31	0,4755300
12	15	0,6000000
12	18	0,2000000
12	32	0,2000000
13	16	0,4184000
13	20	0,1632100
13	33	0,4184000
14	17	0,5534100
14	21	0,0018235
14	25	0,0288420
14	34	0,4159300

Tabela 5.64 – Informações das correntes de entrada da Lavanderia 4B.

Número da corrente	Vazão [m ³ /h]	Concentração [mg/L]
9	2,0000	2,00
10	0,0350	118800,00
22	0.2592	0,00

5.5.3 – Caso de Múltiplas Fontes de Água

Nesta seção é apresentada a aplicação do DFA Modificado utilizando o caso de Múltiplas Fonte de Água para o caso exemplo da Lavanderia 4.

Neste caso, além da operação 1 ser uma fonte (de vazão limitada), existirão outras duas fontes de água, na qual uma delas tem vazão limitada e a outra não. Sendo seus valores especificados na Tabela 5.65.

Tabela 5.65 – Valores de vazão e concentração da fontes de água.

Fontes externas	Vazão [m ³ /h]	Concentração [gDQO/Kg tecido]
1	8	0,1000
2	2,00	3,5000

O passo seguinte é a construção da Tabela 5.66, com a apresentação dos valores da variação da “pseudo concentração” no tecido, a vazão limitante por operação, a DQO removida em cada caixa e o valor da relação de banho.

Com todos estes valores, incluindo os dados das Tabelas 5.54 e 5.55 (da seção 5.5.1) é possível a construção do Diagrama de Fontes de Água Modificado.

Seguindo as etapas descritas na seção 4.5, é obtido o DFA Modificado representado pela Figura 5.15. Sendo possível montar o novo diagrama da Lavanderia 4, o qual é chamado de Lavanderia 4C. A topologia do novo cenário deste lavador contínuo está sendo apresentada na Tabela 5.66 (Matriz do Processo), e seu diagrama na Figura 5.16.

Tabela 5.66 – Matriz do Processo referente à Lavanderia 4C.

Unidades	Correntes associadas							
1	1	-2	9	-11	0	0	0	0
2	2	-3	12	13	14	15	16	22
3	3	-4	-14	23	0	0	0	0
4	4	-5	-16	17	24	0	0	0
5	5	-6	10	-20	25	0	0	0
6	6	-7	-15	26	0	0	0	0
7	7	-8	-21	27	0	0	0	0
8	-13	-18	20	0	0	0	0	0
9	-17	-19	21	0	0	0	0	0

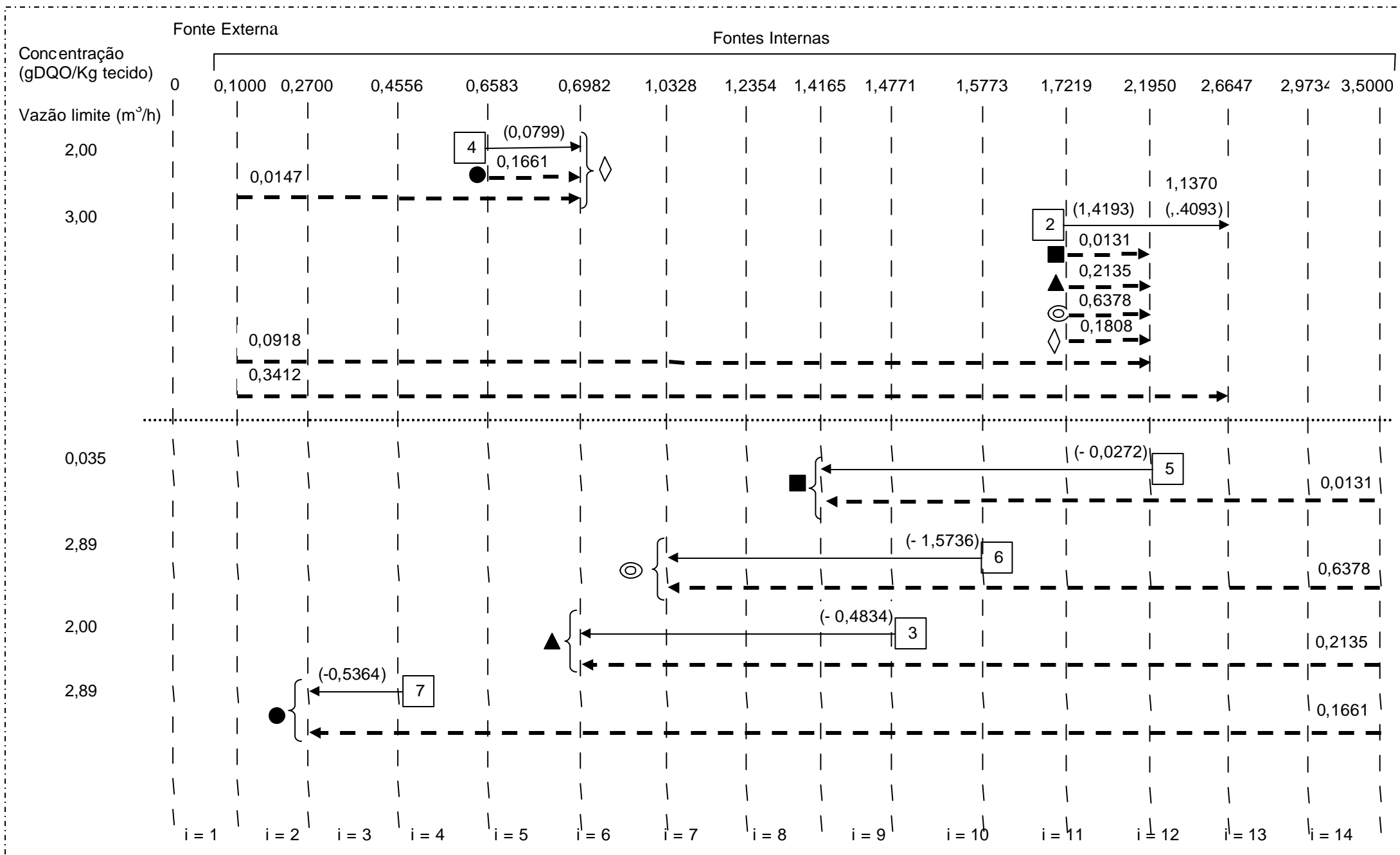


Figura 5.15 – Diagrama de Fontes de Água para a Lavanderia 4 (Múltiplas Fontes de Água).

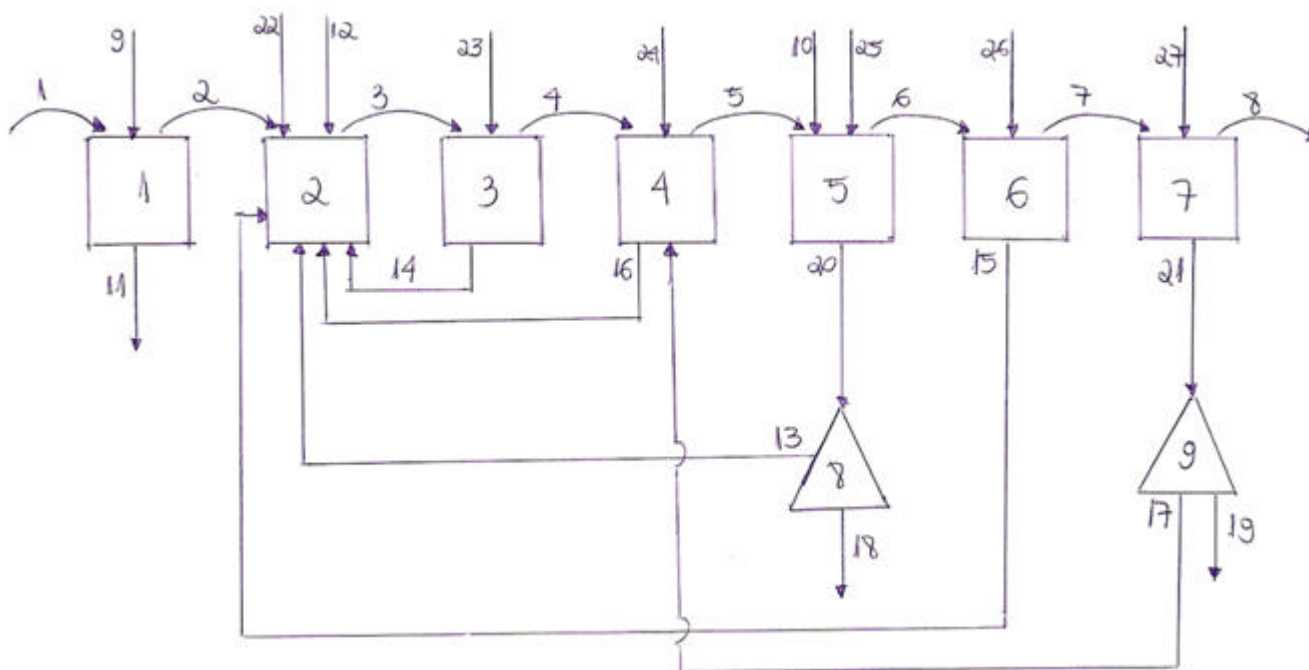


Figura 5.16 – Diagrama da Lavanderia 4C.

Conforme é possível verificar, na Lavanderia 4C foram acrescentados dois divisores de correntes (8 e 9). A Tabela 5.67 apresenta os valores de divisão de cada corrente de saída relativo à cada unidade divisor de correntes.

Tabela 5.67 – Informações sobre os fatores de divisão do divisor de correntes da Lavanderia 4C.

Número da unidade de divisor de correntes	Corrente de saída	Fator de divisão
8	13	0,27200
8	18	0,72800
9	17	0,15732
9	19	0,84268

As informações das correntes de entrada da Lavanderia 4C são apresentadas na Tabela 5.68. Sendo que estas são retiradas do Diagrama de Fontes de Água Modificado para o caso de Múltiplas Fontes de Água representado pela Figura 5.9. A corrente 9 é de água tratada, a 10 é uma corrente de insumo, e as demais correntes são referentes as fontes externas (excluindo a operação 1, que não foi utilizada). É verificado que a fonte externa 2 não é totalmente utilizada.

Tabela 5.68 – Informações das correntes de entrada da Lavanderia 4C.

Número da corrente	Vazão [m ³ /h]
9	2,0000
10	0,0350
22	0,4331
23	0,2135
24	0,0147
25	0,0131
26	0,6378
27	0,1661

Os resultados da simulação obtidos para este novo caso (Lavanderia 4C), com os valores de vazão e concentração estão na Tabela 5.69.

Tabela 5.69 – Valores de concentração (no regime estacionário) das unidades caixas da Lavanderia 4C.

Caixas	Concentração [mg/L]
1	1721,87
2	2086,83
3	1687,25
4	1693,72
5	2681,71
6	1670,12
7	1383,74

A eficiência de remoção de DQO (em g DQO/Kg tecido) de cada caixa deste modelo proposto de racionalização (Lavanderia 4C) é o mesmo que da Lavanderia 4 (a original). Isto é garantido através do Diagrama de Fontes de Água Modificado.

A relação de volume de água da ETA por massa de tecido processado da Lavanderia 4C é de 0,88L/Kg.

A partir dos resultados é possível montar uma tabela comparativa, analisando a vazão de fonte externa de água tratada da Lavanderia 4 e a vazão de água de fonte externa tratada de cada operação da Lavanderia 4C (Tabela 5.70). As vazões referentes as fontes externas que não tem um valor zero de DQO não entram neste somatório.

Tabela 5.70 – Comparação do consumo de água tratada no processo da Lavanderia 4 e da Lavanderia 4C.

Processos	Fluxo de água tratada (m ³ /h)	
	Lavanderia 4	Lavanderia 4C
OP 1	2,00	2,00
OP 2	3,00	0,00
OP 3	0,00	0,00
OP 4	2,00	0,00
OP 5	0,00	0,00
OP 6	0,00	0,00
OP 7	2,00	0,00
Σ	9,00	2,00

A partir da Tabela 5.70 é possível concluir que houve uma redução de 77,78% no consumo de água tratada depois da aplicação do caso de Múltiplas Fontes de Água do Diagrama de Fontes de Água Modificado no processo.

5.5.4 – Caso de Regeneração com Reúso

É utilizado o caso de Regeneração com Reúso no Diagrama de Fontes de Água para encontrar um novo modelo que racionalize o uso de água da Lavanderia 4. Sendo considerada a unidade caixa 1 como uma fonte.

Está sendo considerado o uso de um regenerador que tem uma perda de água de 20%, e a água de saída deste processo tem um valor de valor de DQO zero.

Com os dados das Tabelas 5.54 e 5.55 da seção 5.5.1, e as informações a respeito do processo de regeneração é possível a construção do Diagrama de Fontes de Água Modificado.

Seguindo as etapas descritas na seção 4.6, é obtido o DFA Modificado representado pela Figura 5.17. Sendo que a prioridade do uso das fontes internas e externas é nas operações que possuem o θ_{ct} com valor negativo.

A partir do DFA Modificado para o Reúso Máximo representada na Figura 5.10 (onde “R” significa uma corrente que vem do regenerador usado) é possível montar o novo diagrama da Lavanderia, o qual é chamado de Lavanderia 4D. A topologia do novo cenário deste lavador contínuo está sendo apresentada na Tabela 5.71 (Matriz do Processo), e o novo diagrama está representado pela Figura 5.18.

Conforme é possível verificar, na Lavanderia 4D foram acrescentados quatro divisores de correntes (8, 9, 10 e 11), sendo o divisor de número 11 aquele que distribuí as correntes referentes ao regenerador até as operações. E a unidade de número 12 representa o regenerador.

A Tabela 5.72 apresenta os valores de divisão de cada corrente de saída relativo à cada unidade divisor de correntes.

As informações das correntes de entrada da Lavanderia 4D são apresentadas na Tabela 5.73. Sendo que estas são retiradas do Diagrama de Fontes de Água Modificado para o caso de Regeneração com Reúso representado pela Figura 5.17.

Tabela 5.71 – Matriz do Processo referente à Lavanderia 4D.

Unidades	Correntes associadas							
1	1	-2	9	-27	0	0	0	0
2	2	-3	12	-24	0	0	0	0
3	3	-4	13	-19	0	0	0	0
4	4	-5	14	-23	0	0	0	0
5	5	-6	10	15	-28	0	0	0
6	6	-7	16	-21	0	0	0	0
7	7	-8	17	-29	0	0	0	0
8	-13	-15	-16	-17	-18	27	0	0
9	-20	-25	28	0	0	0	0	0
10	-22	-26	29	0	0	0	0	0
11	-11	-12	-14	30	0	0	0	0
12	18	19	20	21	22	23	24	-30

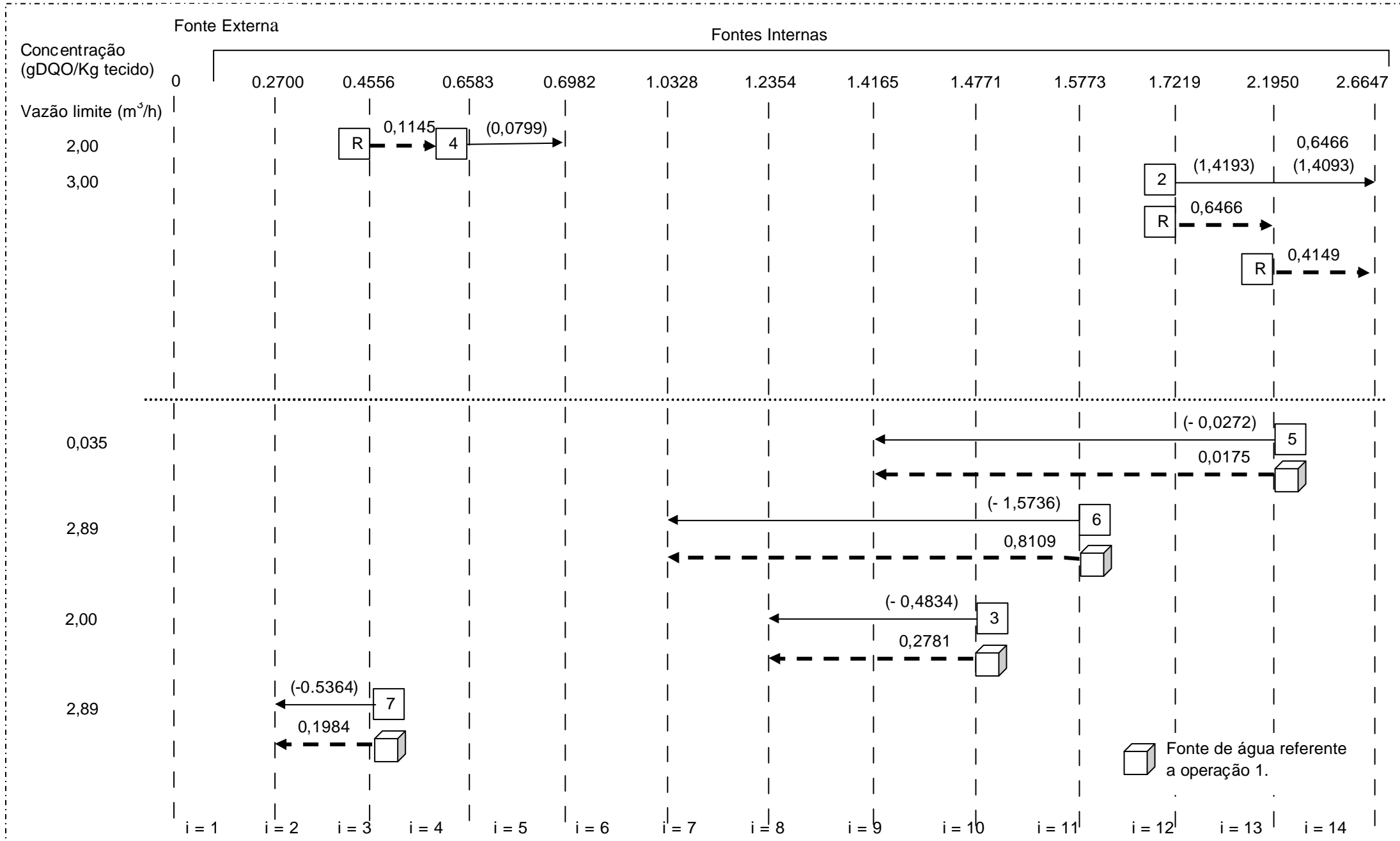


Figura 5.17 – Diagrama de Fontes de Água para a Lavanderia 4 (Regeneração com Reúso).

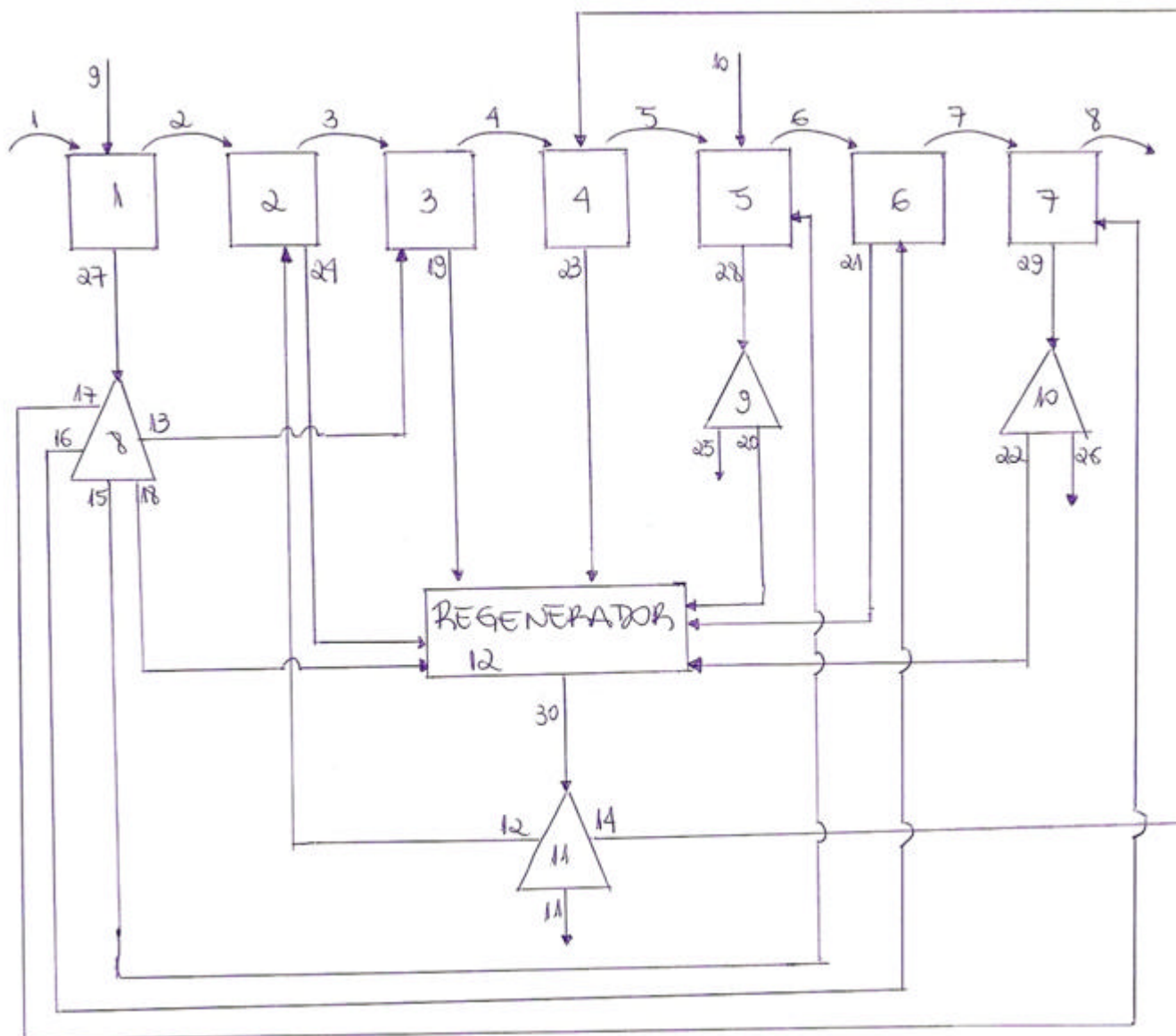


Figura 5.18 – Diagrama da Lavanderia 4D.

Os resultados da simulação obtidos para este novo caso (Lavanderia 4D), com os valores de vazão e concentração estão na Tabela 5.74.

A eficiência de remoção de DQO (em g DQO/Kg tecido) de cada caixa deste modelo proposto de racionalização (Lavanderia 4D) é o mesmo que da Lavanderia 4 (a original). Isto é garantido através do Diagrama de Fontes de Água Modificado.

Tabela 5.72 – Informações sobre os fatores de divisão do divisor de correntes da Lavanderia 4D.

Número da unidade de divisor de correntes	Corrente de saída	Fator de divisão
8	13	0,167760
8	15	0,010556
8	16	0,489100
8	17	0,119680
8	18	0,212900
9	20	0,333330
9	25	0,666670
10	22	0,182370
10	26	0,817630
11	11	0,585030
11	12	0,374570
11	14	0,040392

Tabela 5.73 – Informações das correntes de entrada da Lavanderia 4D.

Número da corrente	Vazão [m ³ /h]	Concentração [mg/L]
9	2,00	0,00
10	0,035	118800,00

Tabela 5.74 – Valores de concentração (no regime estacionário) das unidades caixas da Lavanderia 4D.

Caixas	Concentração [mg/L]
1	1721,89
2	1818,47
3	1592,55
4	1554,50
5	2553,45
6	1933,60
7	1745,88

A relação de volume de água da ETA por massa de tecido processado da Lavanderia 4D é de 0,88L/Kg.

A Tabela 5.75 é uma tabela comparativa, analisando a vazão de fonte externa de água tratada da Lavanderia 4 e a vazão de água de fonte externa tratada de cada operação da Lavanderia 4D.

Tabela 5.75 – Comparação do consumo de água tratada no processo da Lavanderia 4 e da Lavanderia 4D.

Processos	Fluxo de água tratada (m ³ /h)	
	Lavanderia 4	Lavanderia 4D
OP 1	2,00	2,00
OP 2	3,00	0,00
OP 3	0,00	0,00
OP 4	2,00	0,00
OP 5	0,00	0,00
OP 6	0,00	0,00
OP 7	2,00	0,00
Σ	9,00	2,00

A partir da Tabela 5.75 é possível concluir que houve uma redução de 77,78% no consumo de água tratada depois da aplicação do caso de Regeneração com Reúso do Diagrama de Fontes de Água Modificado no processo.

5.5.5 – Resultados da Avaliação Econômica

Os resultados para avaliação econômica do problema exemplo (Lavanderia 4) podem ser vistos na Tabela 5.76. O custo total anual é a soma do custo operacional (US\$/ano) com custo de investimento em base anual (US\$/ano). O custo operacional anual de operação é a soma dos custos operacionais dos processos de tratamento informados na Tabela 4.1, dos custos de consumo de água tratada e de água suja. O custo de investimento em base anual é a soma dos custos de investimento nos processos pertinentes multiplicados pelo fator de depreciação anual.

Com base nos dados apresentados a melhor alternativa do ponto de vista econômico para o problema exemplo é o caso de reúso máximo ou restrição de vazão. Ambos têm a mesma estrutura, já que no caso de restrição de vazão são somente aplicados reciclos nas operações que não alcançaram a vazão limitante especificada através da aplicação do DFA Modificado para o caso de Reúso Máximo.

Analisando em termos de quantidade de água tratada usada, as melhores alternativas seriam os casos onde existe o uso de múltiplas fontes de água e aquele que usa o regenerador. Ambas utilizam somente 2,00m³/h de água tratada. Entre estas duas a melhor alternativa seria o caso de Regeneração com Reúso, pois este tem um custo total anual menor que o caso de Múltiplas Fontes de Água aplicado.

Tabela 5.76 – Resultados da avaliação econômica da Lavanderia 4.

	Lavanderia 4	Reúso Máximo (Lavanderia 4A)	Restrição de Vazão (Lavanderia 4B)	Múltiplas Fontes de Água (Lavanderia 4C)	Regeneração com Reúso (Lavanderia 4D)		
Vazão (m ³ /h)	9,00	2,2592	2,2592	2,0000	1,4782	2,00	1,1759
Concentração (gDQO/Kg tecido)	0,00	0,00	0,00	0,00	Diferente de zero	0,00	0,00
						(água tratada)	(água regenerada)
Custo	Custo (US\$/ano)	Custo (US\$/ano)	Custo (US\$/ano)	Custo (US\$/ano)	Custo (US\$/ano)	Custo (US\$/ano)	Custo (US\$/ano)
Custo da água tratada	23220	5829	5829	5160	5160	5160	5160
Custo da água suja	0	0	0	381	381	0	0
Custo total de investimento com amortização anual	15922	6050	6050	8184	8184	7438	7438
Custo total operacional	101140	25388	25388	35654	35654	32588	32588
Custo total anual	117062	31438	31438	43838	43838	40026	40026

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O setor industrial a cada dia que passa vem se preocupando mais com a questão da água e seu reúso. E as indústrias têxteis por utilizarem um elevado volume de água estão buscando alternativas de reúso que gerem soluções eficazes, minimizando o consumo de água e conseqüentemente menor geração de efluentes.

No presente trabalho desenvolveu-se uma ferramenta para contribuir para a obtenção da melhor maneira de reusar as correntes aquosas em um lavador contínuo de um processo têxtil; empregando o reúso de correntes aquosas que são atualmente enviadas para o tratamento final. O reúso das correntes pode ser de forma direta, ou sendo diluída com água da ETA, ou até mesmo diluindo-as entre si. Foi apresentado um procedimento para minimização de efluentes aquosos em sistemas com um contaminante.

Para validar os algoritmos implementados foram feitos testes utilizando o programa (retirando a parte de cálculo de relação de banho) com um exemplo apresentado em WANG E SMITH (1994b), e foi comprovado a eficácia do mesmo.

Foram realizados vários testes com lavanderias têxteis reais, para comprovar que o programa está apto a simular processos com diferentes valores de correntes de entrada, e saída das caixas; com número de caixas diferentes.

Foram estudados 4 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 valor de DQO estimada (atuando como fonte negativo) ou aporta acréscimos ao valor de valor 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 quatro 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.

- O modelo proposto para a simulação do lavador contínuo (DFA Modificado) mostrou-se eficaz na racionalização de água de processos com reciclo e nas transferências de dados através dos processos iterativos adotados, sendo possível simular várias possibilidades de reúso para um único caso.

Cabe ressaltar que muitas contribuições podem ser introduzidas no programa para tornar esta ferramenta mais eficaz. Com base nos estudos apresentados, é possível apresentar algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Inserção de outros parâmetros nos critérios de racionalização como cor, turbidez, pH, carga iônica, condutividade, etc;

- Introduzir a possibilidade de avaliação da concentração ideal de uma fonte externa de água para que o custo viabilize a sua utilização no sistema;

- Apresentar um procedimento para a minimização de efluentes aquosos que envolvem mais de um contaminante.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCÂNTARA, M.R., DALTIM, D., **A química do processamento têxtil**. Revista Química Nova, Vol. 19, pp. 320-330, 1996.

ALMEIDA, E.; ASSALIN, M. R.; ROSA, M. A.; DURÁN, N., **Tratamento de efluentes industriais por processos oxidativos na presença de ozônio**. Química Nova. V27 N5 (2004).

ANDRADE, F. A., **Um sistema de gestão de custos para a indústria têxtil. O caso da indústria de fiação, tecelagem e acabamento**. Florianópolis: UFSC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, dissertação, 118p., 2002.

BITENCOURT, M. P. **Reaproveitamento do lodo gerado no processo de tratamento dos efluentes de lavanderia (tingimento e lavagem)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, 2002.

BERNARDIS, R., **Novos conceitos em tratamento e reúso da água**. Latin Chemical, 2002.

BRAILE, P.M. E CAVALCANTI, J.E.W.A. **Manual de tratamento de águas residuárias industriais**. CETESB, São Paulo – Brasil, 1993.

BRITO, N.N., PATERNIANI, J.E.S., ZAMORA, P.P., OLIVEIRA NETO, A.L., BATTISTI, A., PELEGRINI, R.T. **Alguns métodos de tratamento para efluentes indústrias visando a minimização dos impactos ambientais**. IV Fórum de Estudos Contábeis. Faculdades Integradas Claretianas, Rio Claro, SP, Brasil, 2004.

BUEB, M., **Decentralized wastewater treatment in the chemical industry**. Colloquium of the Foeder-verein Chemieingenieurweswn Aechen e. V., October. 1989.

CARREIRA, M. F. **Sistemas de tratamento de efluentes têxteis – uma análise comparativa entre as tecnologias usadas no Brasil e na península Ibérica**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Departamento de Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, 2006.

CASTRO, P., MATOS, H., FERNANDES, M.C., NUNES, C.P., **Improvements for mass-exchange networks design**. Chemical Engineering Science. 54(11), 1649-1665, 1999.

CASTRO V., A.S.C., ASENJO, E.O.B., SILVA, J., **Uma ferramenta na simulação / visualização de fluidos**. Revista de Pesquisa e Pós-Graduação, Vol.1, pg. 201 – 216, Erechim, RS, Brasil, 2000.

CECCHIN, C., **Reúso de água: Um modelo proposto para a redução de consumo de água industrial através da metodologia do gerenciamento de processos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia da Produção) - Programa de Pós Graduação em Engenharia da Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

CORRÊA JR., B., FURLAN, L. T., **Redução do consumo de água e da vazão de efluentes através do gerenciamento das fontes e reutilização de águas – a experiência de Paulínea.** Petro & Química, nº 251, 72-78, agosto de 2003.

CRUZEIRO NET, 2005. Disponível em:
http://www.poupeagua.com.br/clipping_apenas.asp. Acessado em: 13/08/07.

DICK, Rurth S. Meinzen; ROSEGRANT, Mark W. **Overcoming water scarcity and quality constraints-** overview. 2020 Focus, 2001. Disponível em:
http://www.ifpri.org/2020/focus/focus09/focus09_01.htm. Acesso em 14/05/07.

DOMINGUES, A.F., **O papel das empresas de arquitetura e engenharia consultiva na qualidade ambiental e gestão dos recursos hídricos.** 7º Encontro Nacional das Empresas de Arquitetura e Engenharia Consultiva, Recife, 2005. Disponível em:
http://www.sinaenco.com.br/downloads/Palestras_Enaenco_VII/Antonio_Felix_Superintendente_Conservacao_Agua_e_Solo_ANA.pdf. Acesso em: 14/08/07.

ECKENFELDER, W. W. Jr., PATOCZKA, J., WATKIN, A. T., **Wastewater treatment.** Chem. Engng. Sept 2, 60-74, 1985.

FARIA, D. C., **Reúso das correntes de efluentes aquosos em refinarias de petróleo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 246 pg., 2004.

FIGUEIREDO, M.G., SANTOS, M. S., FERRARI, L.R., **ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DAS INDÚSTRIAS TÊXTEIS – Otimização através da implantação de medidas de prevenção à poluição.** XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Fortaleza 2002.

FRAGA, L., **A nova cadeia têxtil.** Revista Química Têxtil, nº 79, pp. 14-16, junho de 2005.

FREEMAN, H., HARTEN, J.S., RANDFALL, P., **Industrial pollution prevention: a critical review.** Journal of the Air and Waste Management Association, Vol. 42, nº 5, pp. L19-L56, 1992.

GARDINER, K. D., BORNE, B. J., **Textile wastewaters; treatment and environmental effects.** Stevenage, Water Research Centre. 1978.

GUARATINI, C.C.I., ZANONI, M.V.B., **Corantes têxteis.** Revista Química Nova, Vol. 23, pp. 71-78, 2000.

GIORDANO, G. **Avaliação ambiental de um balneário e estudo de alternativa para controle da poluição utilizando o processo eletrolítico para o tratamento de esgotos.** Niterói – RJ, 137 p. Dissertação de Mestrado (Ciência Ambiental) Universidade Federal Fluminense, 1999.

GIORDANO, G., **Tratamento e controle de efluentes industriais.** UFMT (apostila), 2004.

GOMES, J.F.S., **Procedimento para a minimização de efluentes aquosos.** Rio de Janeiro: EQ/UFRJ. Tese de Mestrado, 2002.

HASSEMER, M. E. N. **Oxidação fotoquímica – UV/H₂O₂ – para degradação de poluentes em efluentes da indústria têxtil.** Florianópolis – SC, 162 p. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

HIGGINS, T. E., **Hazardous waste minimization handbook.** Lewis Publishers Inc. Boca Raton, Florida.USA. 1989.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Santa Catarina em Dados, 2005.

IEMI – Instituto de Estudos de Marketing Industrial. **Relatório setorial da indústria têxtil brasileira**, 2002. Disponível em www.textilia.net. 20.08.2004

LANKFORD, P. W., ECKENFELDER, W. W. Jr., TORRENS, K. D., **Reducing wastewater toxicity.** Chem. Engng Nov 7, 72-81, 1988.

MACHADO, J., **A Importância do uso racional dos recursos hídricos.** 2007. Disponível em: http://www.amchamrio.com.br/publicacoes/bb/2007/07_bb_jul_07/capa05.htm. Acesso em: 05/08/2007.

MANN, J.G., **Cultural changes and water-asset realignment to support water-reuse projects.** Resources, Conservation and Recycling, 37, 175-180, 2003.

MANUAL DE CONSERVAÇÃO E REÚSO DA ÁGUA NA INDÚSTRIA, Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <http://www.sebraerj.com.br>. Acesso em: 13/08/07.

MENEZES, J.C.S.S., SCHNEIDER, I.A.H., **Estudo de processos de tratamento de efluentes de lavanderias industriais.** Revista Química Nova, Vol. 79, pp.20-26, junho de 2005a.

MENEZES, P.A.V.M., **Tensoativos na indústria têxtil.** Revista Química Nova, nº 80, setembro de 2005b.

MENON, R., RAVAGNANI, M.A.S.S., MÓDENES, A.N., **Minimização da emissão de poluentes utilizando a análise pinch em conjunto com técnicas de programação matemática.** Acta Scientiarum, Maringá, Vol. 23, nº 6, pp. 1341-1349, 2001.

MUSTAFA, G. S., **Reutilização de efluentes líquidos em indústria petroquímica.** Salvador, Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia, 1998.

PINHEIRO, H. M.; TOURAUD, E.; THOMAS, O. **Aromatic amines from azo dye reduction: status review with emphasis on direct UV spectrophotometric detection in textile industry wastewaters.** *Dyes and Pigments*, V61, p.121-139, 2004

QUEIROZ, E.M., PESSOA, F.L.P., **Uma ferramenta para minimizar o consumo energético e o impacto ambiental.** (Fronteiras da Engenharia Química I), 2003.

SANTILLI, J. F. R., **A política de recursos hídricos e sua implementação no Distrito Federal.** *Revista Fundação Escola Superior do Ministério Público do Distrito Federal, Brasília*, v.17, p.144-179, Jan./Jun. 2001.

SANTOS, M. O. R. M., **O impacto da cobrança pelo uso da água no comportamento do usuário.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002.

SILVA, G.L.; **Redução de corante em efluente de processo de tingimento de lavanderias industriais por adsorção em argila.** Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química, 2005.

SILVERNS, S., WILSON, C., D'AILLY, J., **Process water treatment: Navigating the options.** *Chemical Engineering*, June 2000.

SKAF, P., **Paulo Skaf, presidente da FIESP, analisa o mercado têxtil.** *Revista Química Têxtil*, nº 79, junho de 2005. Disponível em: http://www.abqct.com.br/revistas/pdf/QT_79.pdf. Acesso em: 14/0807.

SUÁREZ, R.H.; FERNÁNDEZ, J.C.; ZAMORA, J.M., **Superstructure decomposition and parametric optimization approach for the synthesis of distributed wastewater treatment networks.** *Ind. Eng. Chem.*, Vol. 43, p. 2175-2191, 2004.

TAKAMA, N., KURIYAMA, T., SHIROKO, K., UMEDA, T., **Optimal allocation in a petroleum refinery.** *Computers and Chemical Engineering*, 4, 251-258, 1980.

TIERNAN, J.C., **"An efficient search algorithm to find the elementary circuits of a graph"**, *Comm. ACM*, 13, 722, 1970.

TOLEDO, R.A.S., **Visão do mercado têxtil.** *Revista Química Têxtil*, nº72, pp. 8-10, setembro de 2003.

TWARDOKUS, R. G., **Reúso de água no processo de tingimento da indústria têxtil.** Florianópolis, Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

ULSON DE SOUZA, A.A., **Desenvolvimento de um programa executivo para a simulação de processos químicos.** Campinas. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, 1985.

ULSON DE SOUZA, S.M.A.G., MELO, A.R., ULSON DE SOUZA, A.A., **Re-utilisation conditions of wastewaters from textiles industries.** Resources, Conservation and Recycling, 01, 1-13, 2006.

WANG, Y., SMITH, R., **Design of distributed effluent treatment systems.** Chemical Engineering Science, Vol. 49, nº 18, pp. 3127-3145, 1994a.

WANG, Y., SMITH, R., **Wastewater minimization.** Chemical Engineering Science, Vol. 49, nº 7, pp. 981-1006, 1994b.

YANG, Y.H., LOU, H.H, HUANG, Y.L., **Synthesis of an optimal wastewater reuse network.** Waste Management, 20, 311-319, 2000.

APÊNDICE 1 – Memória de Cálculo para o DFA Modificado da Figura 5.2.

Inicialmente são identificadas e contadas todas as fontes de água, internas e externas, disponíveis nos intervalos. O número de fontes externas de água é um dado do problema e deve ser verificado em termo de qualidade (concentração) em cada intervalo i . O número de possíveis fontes internas de água em cada intervalo é dado pelo número de operações presentes nos intervalos anteriores.

Para o caso da Lavanderia 1, temos somente uma fonte externa de vazão ilimitada e de concentração zero (água primária, que estará disponível para qualquer operação).

Parte-se então para o cálculo da vazão necessária de água em cada operação por intervalo de concentração. Para o segundo intervalo de concentração existe somente a fonte externa de água e nenhuma fonte interna encontra-se disponível (não é necessário analisar os intervalos dos quais não existe nenhuma operação).

Através da Equação 21 é possível calcular a vazão necessária para remover toda a carga contaminante do intervalo em questão.

Exemplo da conta realizada:

$$\Delta ct_k = f_{L_k} \times \Delta C_k \times Rb = DQO_k \times f_{L_k}$$

$$0,2164 = f_{L_k} \times (0,2304 - 0)$$

$$f_{L_k} = 0,9392 \frac{m^3}{h}$$

O intervalo seguinte a ser analisado é o quarto, onde existe uma operação com remoção negativa. Como não existe água disponível com um valor de DQO maior que a concentração de saída da operação 6, não é possível fazer nenhum tipo de reúso. Sendo assim, daqui por diante, sempre que houver água disponível, antes tem que ser feita uma análise na operação 6, para ver a possibilidade de reúso na mesma.

O próximo intervalo a ser analisado é o sexto, no qual há somente a operação 3. Tem a existência de uma fonte externa (de água primária), e uma fonte interna, oriunda da operação 7, que tem um valor de vazão de $0,9392 m^3/h$ e concentração de $0,2304 gDQO/Kg$ tecido. De acordo com a Equação 21, a operação 3 necessita de $1,0706 m^3/h$ ($0,2304 gDQO/Kg$ tecido), as quais não podem ser completamente fornecidas pela fonte interna originada na operação 7, no intervalo 2. Neste caso é calculado o quanto de carga contaminante é removida (Δct_k) usando-se a vazão

disponível da operação 7, sendo utilizada então a fonte externa para suprir a vazão exigida para a total remoção de contaminante nesta etapa. Sendo esta representada por uma seta tracejada, tendo um valor de vazão de $0,0945\text{m}^3/\text{h}$.

No intervalo 7, estão disponíveis 2 fontes, uma externa de água primária, e outra interna de $1,0337\text{ m}^3/\text{h}$ ($0,8239\text{gDQO}/\text{Kg tecido}$), disponível na operação 3. Existem as operações 3 e 5 neste intervalo. Para o operação 3, mesmo utilizando toda a água interna disponível, não é possível remover toda a carga contaminante. Sendo assim é feito o cálculo do quanto é removido usando essa fonte interna:

$$\Delta ct_k = f_{L_k} \times \Delta C_k \times Rb = DQO_k \times f_{Lk}$$

$$\Delta ct_k = 1,0337 \times (0,8256 - 0,8239)$$

$$\Delta ct_k = 0,0018 \frac{\text{gDQO}m^3}{\text{Kg tecido}h}$$

E o cálculo do quanto será necessário remover depois deste reuso:

$$\Delta ct_k = 0,0042 - 0,0018 = 0,0024 \frac{\text{gDQO}m^3}{\text{Kg tecido}h}$$

Existe somente a fonte externa disponível (água primária). Sendo assim tem que ser feito o cálculo da vazão necessária para remover a carga de contaminante que não foi removida pelo reuso da fonte interna.

$$\Delta ct_k = f_{L_k} \times \Delta C_k \times Rb = DQO_k \times f_{Lk}$$

$$0,0024 = f_{L_k} \times (0,8256 - 0)$$

$$f_{L_k} = 0,0029 \frac{m^3}{h}$$

Sendo que para a operação 5, agora existe somente a fonte externa disponível. Utilizando a Equação 21 para o cálculo da vazão necessária, é encontrado o valor de $0,0130\text{m}^3/\text{h}$.

O intervalo seguinte é o oitavo, tendo a fonte externa disponível e duas fontes internas disponíveis, de $1,0367\text{ m}^3/\text{h}$ ($0,8256\text{gDQO}/\text{Kg tecido}$), com prioridade de uso para a operação 3, e $0,0130\text{ m}^3/\text{h}$ ($0,8256\text{gDQO}/\text{Kg tecido}$), com prioridade de uso na operação 5.

Conforme a seqüência no DFA Modificado, a primeira operação que deve ser analisada é a 3. Da mesma forma que ocorreu no intervalo anterior, a fonte de água interna disponível não é suficiente para remover todo o contaminante deste intervalo nesta operação. Então é feito o cálculo de quanto é possível remover utilizando 1,0367 m³/h, o quanto falta ser removido, e a vazão de água primária que deve ser utilizada para a remoção do restante. Não podendo ser utilizada a fonte interna de 0,0130 m³/h, porque esta tem prioridade de uso na operação 5 (segundo a regra de número um, da quarta etapa do DFA, comentada na seção 2.8.1).

O mesmo procedimento é feito para a operação 5 deste oitavo intervalo de concentração. Sendo assim utilizada certa quantidade de água primária, para absorver toda a quantidade de contaminante a ser transferida neste intervalo.

Por fim é analisada a operação 4, tendo somente água externa disponível, utilizando-se a Equação 21, e calculando a vazão necessária para a remoção total do contaminante neste intervalo.

Para o intervalo de número 9, tem a fonte externa e 3 fontes internas disponíveis. Sendo que uma delas não tem prioridade, que seria a oriunda da operação 4, com 0,8988 m³/h (1,2778gDQO/Kg tecido). Como esta fonte tem um valor de DQO maior que o valor de saída da operação 6, esta pode ser reusada nesta operação de remoção negativa.

É realizado então o cálculo para verificar se esta vazão disponível é suficiente para a remoção de contaminante da operação 6.

$$\Delta ct_k = f_{L_k} \times \Delta C_k \times Rb = DQO_k \times f_{L_k}$$

$$-0,3465 = f_{L_k} \times (0,3748 - 1,2778)$$

$$f_{L_k} = 0,3837 \frac{m^3}{h}$$

Sendo obtido um valor de vazão necessária menor que a disponível, toda a carga contaminante da operação em questão pode ser removida. Sendo esta vazão que sai da operação 6, uma fonte interna disponível para reuso no intervalo 9.

Lembrando sempre que a prioridade de utilização é das fontes internas, sempre da fonte de maior concentração para a de menor concentração.

Seguindo este raciocínio é possível desenvolver o restante do DFA Modificado para o caso da Lavanderia 1, apresentado na Figura 5.2.

Para as operações do intervalo 9, a primeira a ser analisada é a 3, da qual utiliza a priori uma corrente de vazão vinda da própria operação ($1,5262\text{m}^3/\text{h}$), na qual não consegue remover todo o contaminante deste intervalo. Sendo necessário utilizar vazões das correntes oriundas da operação 4 e 6. O mesmo ocorre na operação 5, que utiliza a vazão vinda da própria operação e para ser possível a total remoção de contaminante utiliza também o restante de vazão disponível na operação 6 e da fonte externa.

No intervalo de número 10 tem somente a operação 3, tendo a fonte externa e duas fontes internas disponíveis para reúso. Sendo elas: a da operação 3 ($2,2039\text{ m}^3/\text{h}$, $1,9573\text{gDQO}/\text{Kg tecido}$), e da operação 5 ($3,6152\text{ m}^3/\text{h}$, $1,9573\text{gDQO}/\text{Kg tecido}$).

Fazendo os cálculos utilizando a Equação 21, chegou-se no seguinte resultado: é utilizada a vazão vinda da própria operação ($2,2039\text{ m}^3/\text{h}$), e uma vazão de $0,2161\text{ m}^3/\text{h}$ oriunda da operação 5.

Para o décimo primeiro intervalo existem a água primária como fonte, e também outras 2 fontes internas, oriundas da operação 3 e 5. Conforme a ordem no DFA Modificado, a primeira operação a ser analisada é a 3, a prioridade de reúso é da vazão oriunda de própria operação, com valor de vazão de $2,42\text{ m}^3/\text{h}$ ($2,0006\text{ gDQO}/\text{Kg tecido}$). Esta vazão já remove toda a carga de contaminante neste intervalo, não sendo necessário o uso de outras fontes. Em seguida é feita a análise na operação 2, na qual somente com o uso da fonte interna oriunda da operação 5 já é possível remover toda a carga de contaminante do intervalo ($0,0873\text{ gDQO}\cdot\text{m}^3/\text{Kg tecido}\cdot\text{h}$).

O intervalo seguinte é o de número 12, no qual tem somente a operação 2. Tendo como água disponível a fonte externa e outras 3 fontes internas: da operação 2 ($1,5142\text{ m}^3/\text{h}$, $2,0150\text{gDQO}/\text{Kg tecido}$), da operação 3 ($2,42\text{ m}^3/\text{h}$, $2,0150\text{gDQO}/\text{Kg tecido}$) e da operação 5 ($1,8849\text{ m}^3/\text{h}$, $1,9573\text{gDQO}/\text{Kg tecido}$). Foi utilizada a corrente oriunda da própria operação, na qual não removeu todo o contaminante. Como a prioridade de reúso é das correntes que tem uma maior concentração, foi utilizada primeiro a oriunda da operação 3, em seguida parte da vazão disponível da operação 5.

Para o intervalo 13 tem as seguintes fontes disponíveis: água primária, da operação 2 (5,7211 m³/h, 2,3284gDQO/Kg tecido) e da operação 5 (0,0979 m³/h, 1,9573gDQO/Kg tecido). Na operação 2 são utilizadas as seguintes fontes: a oriunda da própria operação, a da operação 5 e como mesmo assim não foi possível remover todo o contaminante, é utilizada a fonte externa também. Sendo que para a remoção do contaminante na operação 1, tem-se somente a fonte externa disponível.

E por fim, o intervalo 14, no qual é utilizada vazão oriunda da própria operação, da operação 2 e da fonte externa (sendo feitos todos os cálculos utilizando a Equação 21).