Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola de Química

Programa de Pós-Graduação em
Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos

Metodologia para o Gerenciamento Sustentável do Reúso de Águas e Efluentes Industriais por meio da Integração de Processos

Reinaldo Coelho Mirre

Tese de Doutorado

Orientadores

Profª. Lídia Yokoyama, D.Sc.

Prof. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D.Sc.

2012

Reinaldo Coelho Mirre

METODOLOGIA PARA O GERENCIAMENTO SUSTENTÁVEL DO REÚSO DE ÁGUAS E EFLUENTES INDUSTRIAIS POR MEIO DA INTEGRAÇÃO DE PROCESSOS

01 volume com Apêndices em CD-ROM

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, da Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências.

Orientadores:

Prof[a]. Lídia Yokoyama, D.Sc.

Prof. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Agosto de 2012

M676m Mirre, Reinaldo Coelho.

Metodologia para o gerenciamento sustentável do reúso de águas e efluentes industriais por meio da Integração de Processos / Reinaldo Coelho Mirre. – 2012.
xxix, 685 f.: il. + 1 CR-ROM.

Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Rio de Janeiro, 2012.

Orientadores: Lídia Yokoyama e Fernando Luiz Pellegrini Pessoa

1. Integração de Processos. 2. Reúso de água e efluentes industriais. 3. Produção mais Limpa. 4. Economia ambiental. 5. Sustentabilidade dos recursos hídricos – Teses. I. Yokoyama, Lídia. (Orient.). II. Pessoa, Fernando Luiz Pellegrini (Orient.). III. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química. IV. Título.

CDD: 628.162

METODOLOGIA PARA O GERENCIAMENTO SUSTENTÁVEL DO REÚSO DE ÁGUAS E EFLUENTES INDUSTRIAIS POR MEIO DA INTEGRAÇÃO DE PROCESSOS

Reinaldo Coelho Mirre

Tese submetida ao Corpo Docente do Curso de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências.

Orientada por:

Profª. Lídia Yokoyama, D.Sc.

Prof. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D.Sc.

Aprovada por:

Prof. Carlos Augusto Guimarães Perlingeiro, D.Sc.

Prof. José Carlos Cunha Petrus, D.Sc.

Prof. José Vitor Bomtempo Martins, D.Sc.

Prof. Marco Antonio Gaya de Figueiredo, D.Sc.

Prof. Roberto José de Carvalho, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Agosto de 2012

“Não basta ensinar ao homem uma especialidade, porque se tornará assim uma máquina utilizável, mas não uma personalidade. É necessário que adquira um sentimento, um senso prático daquilo que vale a pena ser empreendido, daquilo que é belo, do que é moralmente correto”

(Albert Einstein, 1879 – 1955)

Agradecimentos

A Deus, pela saúde e força para superar as adversidades na desafiante jornada da vida.

Ao Prof. Dr. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, pelas inúmeras oportunidades de trabalho que sempre me ofereceu, em diferentes áreas de atuação. Agradeço-lhe pelo conhecimento transmitido, pela notável confiança em meu trabalho, amizade e apoio sempre presentes, permitindo meu desenvolvimento profissional, desde o início da graduação.

À Profª. Drª. Lídia Yokoyama, pela generosa capacidade de discussão e constante motivação demonstrada com o meu trabalho, me oferecendo suporte e condições indispensáveis para a sua conclusão. Agradeço-lhe pelo crédito e amparo nas ocasiões em que precisei.

Aos valiosos amigos do Laboratório de Integração de Processos "Carlos A. Guimarães Perlingeiro" (GIPQ): Alcides de Oliveira, Drª. Ana Mehl, Drª. Ariana Melo, Drª. Bernadete Delgado, Bruno Bôscaro, Cauê Torres, Claudia Ferreira, Prof. Eduardo Mach, Fábio do Nascimento, Hugo Villardi, Leonardo Nogueira, Monique Leal, Dr. Pedro Wagner, Rafael Tini, Raquel Massad, Renan Lucena, Shayane Magalhães. Registros adicionais a André Pereira, do Laboratório de Tratamento de Efluentes (LabTare/EQ), a Inaura da Rocha (UFBA), e a André França, pelo interesse demonstrado pelo meu trabalho.

Aos doutorandos Cauê Torres e Fábio do Nascimento, pela prestativa colaboração acerca da qualidade de "expressividade gráfica" relativa aos índices de estabilidade da água.

Aos alunos de Iniciação Científica, os quais prestaram inestimável contribuição neste trabalho, especialmente: Alessandra Mundy, Luiza Moreira, Pedro Viola, Tayná Esteves e Tatiana Amaral. Expresso aqui meus cordiais agradecimentos, pelo profissionalismo, zelo e dedicação demonstrados com as atividades.

Aos alunos de Projeto Final de Curso de Graduação da EQ, os quais tive a oportunidade e satisfação de direcionar a elaboração de seus respectivos trabalhos: Hugo Villardi e Rafael Tini, Aline Dias e Shaula Ferreira, Allan Borges e Larissa Sardinha, Daniele Curti e Fernanda da Costa, e Joana Borges. A todos, agradeço-lhes a confiança depositada, o respeito mútuo e a dedicação pautada em nossas discussões.

Ao ilustre amigo Dr. José da Paixão, pelas valiosas discussões filosóficas durante nosso "Café Científico" de fim de tarde.

À Profª. Drª. Fabiana Araujo, e aos ex-estagiários Flávia Coelho, Bernardo Moreno e Diego Cunha, pelo compartilhamento de aprendizado e trabalho proporcionados durante a formação e consolidação do Núcleo Estadual de Reúso, batizado de Nirae-RJ.

Aos professores Drª. Flávia Chaves Alves (EQ/UFRJ) e Dr. Josimar Ribeiro de Almeida (EP/UFRJ), e ao Dr. Paulo Sérgio Moreira Soares (CETEM/MCT), pelas valiosas contribuições prestadas como integrantes da banca do Exame de Qualificação.

Aos professores e funcionários da EQ, pelos conhecimentos e convívio harmonioso ao longo desses anos.

Aos meus pais, Lias e Wanda (*in memoriam*), pela estrutura, educação e saúde que me permitiram alcançar os objetivos. E à minha irmã, Érika, pelo carinho e compreensão.

Aos meus avós, José (*in memoriam*) e Corina, e tios, José Marcos e Maria Helena, pelo importante suporte e incentivo que sempre me ofereceram.

Ao amor e carinho de Michele Sales, cujo apoio foi fundamental para o equilíbrio social e profissional.

Ao Prof. Dr. Carlos Eduardo Frickmann Young, do Instituto de Economia da UFRJ, por me aceitar como ouvinte na disciplina “Economia do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais”, oferecida para alunos de graduação em Ciências Econômicas, atendendo à minha busca de conhecimentos por uma visão diferenciada da área.

À Coordenação do Centro de Tecnologia Ambiental da Firjan, pela oportunidade de verificar a aplicação dos conceitos de Produção mais Limpa nas empresas.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo suporte financeiro concedido.

E a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, os meus sinceros agradecimentos.

Resumo da Tese de Doutorado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências.

METODOLOGIA PARA O GERENCIAMENTO SUSTENTÁVEL DO REÚSO DE ÁGUAS E EFLUENTES INDUSTRIAIS POR MEIO DA INTEGRAÇÃO DE PROCESSOS

Reinaldo Coelho Mirre

Agosto, 2012

Orientadores: Profª. Lídia Yokoyama, D.Sc.

Prof. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D.Sc.

A preocupação com a geração e o impacto de efluentes no ambiente industrial vem estimulando o desenvolvimento de técnicas voltadas para o adequado gerenciamento dos recursos hídricos. Neste sentido, a adoção de um modelo de gestão industrial que estabeleça melhorias no aproveitamento de água contribui para disseminar a visão de sustentabilidade empresarial. Este trabalho propõe um modelo para o gerenciamento do reúso sustentável de águas e efluentes nos processos industriais, denominado P+ÁGUA. Sua base está voltada para a aplicação do método Diagrama de Fontes de Água (DFA) como ferramenta a ser utilizada em conjunto com um programa de Produção mais Limpa (P+L). Adicionalmente, como referencial para validação de cenários, o modelo adota técnicas de valoração de danos ambientais provocados pelo lançamento de efluentes nos corpos hídricos. Um estudo de caso foi conduzido a partir de dados que procuram representar os processos hídricos de uma refinaria de petróleo brasileira. O DFA foi aplicado considerando 7 componentes relevantes para as características das correntes presentes. Assim, foram gerados 37 cenários proponentes de correntes de reúso, os quais também consideraram a possibilidade de reciclo da estação de tratamento de efluentes. As propostas levaram a oportunidades de reúso com até 45% de redução de água captada, e até 37% de redução de custos. Os cenários incluíram o estudo de melhorias de condições operacionais dos ciclos de concentração das torres de resfriamento, assim como simulações de índices de estabilidade da água. A metodologia possibilitou selecionar previamente os cenários mais promissores, por meio de um procedimento que utiliza técnicas estatísticas, analisando os respectivos custos operacionais. Outro procedimento proposto refere-se à alocação de processos regenerativos, de modo a contornar problemas relacionados à violação de concentração de contaminantes nas operações. O conjunto de cenários foi então reduzido a 3 propostas consideradas promissoras. O tempo de retorno de investimento foi satisfatório, entre 1 e 2,5 anos, e apontou-se um cenário como potencial para implementação. Um estudo de sensibilidade foi efetuado sobre as três propostas promissoras, utilizando o custo adicional de impacto como parâmetro de seleção, sob a ótica das externalidades (impactos) negativas. Constatou-se que o efluente final para descarte no corpo receptor encontra-se em condições de atender ao padrão de qualidade estabelecido pela legislação. A metodologia constitui um modelo para tomada de decisão que permite identificar propostas de reúso atreladas a possíveis impactos negativos sobre os recursos hídricos, oferecendo suporte adicional para formuladores de políticas e estratégias empresariais.

Palavras-Chave: Desenvolvimento Sustentável, Produção mais Limpa, Reúso de efluentes industriais, Diagrama de Fontes de Água, Valoração ambiental de impactos.

Abstract of Thesis presented to Curso de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos (EQ/UFRJ) as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science.

METHODOLOGY FOR THE SUSTAINABLE MANAGEMENT OF INDUSTRIAL WATER AND WASTEWATER REUSE BY PROCESS INTEGRATION TECHNIQUE

Reinaldo Coelho Mirre

August, 2012

Advisors: Profª. Lídia Yokoyama, D.Sc.

Prof. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D.Sc.

The concern with the impact of effluent generation in the industrial sector has stimulated the development of techniques for proper water resources management. In this sense, the adoption of an industrial management model that establishes improvements in water utilization helps to spread the concept of corporate sustainability. This thesis proposes a model for the management of sustainable water reuse in industrial processes. The model proposed is called P+WATER and applies the method of Water Sources Diagram (WSD) as a tool in conjunction with a program of Cleaner Production (CP). Additionally, the model uses valuation techniques of the environmental damage caused by the release of effluents in water bodies as reference for validation of scenarios. A case study using data obtained from a Brazilian oil refinery was conducted. The WSD method was applied considering seven key components of the characteristics of the waste streams. Thus, thirty-seven scenarios (proposals) of waste stream reuse were generated, also including the possibility of recycling the wastewater from the treatment plant. The proposals led to opportunities of water reuse resulting in up to 45% reduction of water abstraction, and up to 37% cost reduction. The cooling system of the refinery was also assessed including analysis of the concentration cycles and simulations of water stability index. The methodology allowed selecting the most promising scenarios, through a procedure that uses statistical techniques, analyzing the operational cost of each scenario. Another proposed procedure refers to the allocation of regenerative processes in order to overcome problems related to the violation of concentration of contaminants in operations. After applying the procedure, the set of scenarios was reduced to three proposals considered promising. The payback period (from 1 to 2.5 years) obtained was satisfactory and it was possible to indicate just one proposal for potential implementation. A sensitivity study was also performed of the three proposals considered promising, using the selection parameter called additional cost of impact, from the perspective of negative externalities (impacts) on water resources. Finally, it was found that the characteristics of the final effluent for disposal are in agreement with quality standards set by law. The methodology proposed in this thesis represents a model for decision making that allows identifying scenarios of water reuse in conjunction with possible negative impacts on the water resources, offering an additional support when designing corporate politics and strategies.

Keywords: Sustainable Development; Cleaner Production; industrial wastewater reuse; water sources diagram; economic valuation of environmental impacts.

Sumário

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO ---------- 1

CAPÍTULO 2 – SUSTENTABILIDADE E MODELOS PARA GERENCIAMENTO E REDUÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL ---------- 9

2.1. DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL: ASPECTOS HISTÓRICOS ---------- 9
2.2. SUSTENTABILIDADE NAS ORGANIZAÇÕES ---------- 17
2.3. GESTÃO AMBIENTAL EMPRESARIAL E ABORDAGENS PARA A SOLUÇÃO DOS PROBLEMAS ---------- 20
2.3.1. Contribuições da literatura ---------- 30
2.4. GESTÃO INDUSTRIAL SUSTENTÁVEL: O MODELO DA PRODUÇÃO MAIS LIMPA ---------- 31
2.4.1. Avanços da literatura recente ---------- 48
2.5. OUTROS MODELOS DE GESTÃO INDUSTRIAL SUSTENTÁVEL ---------- 52
2.5.1. Produção Limpa ---------- 52
2.5.2. Ecoeficiência ---------- 53
2.5.3. Ecologia Industrial ---------- 54
2.5.4. Produção e Consumo Sustentáveis ---------- 55
2.6. COMENTÁRIOS GERAIS ---------- 58

CAPÍTULO 3 – SUSTENTABILIDADE E INTEGRAÇÃO DE PROCESSOS: O DIAGRAMA DE FONTES DE ÁGUA COMO FERRAMENTA PARA TOMADA DE DECISÃO ---------- 59

3.1. CONTRIBUIÇÃO DA INTEGRAÇÃO DE PROCESSOS PARA A SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL ---------- 59
3.2. O RECURSO ÁGUA: PRINCÍPIO ATIVO DA SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL 62
3.3. O DIAGRAMA DE FONTES DE ÁGUA: FERRAMENTA ESTRATÉGICA AMBIENTAL PARA TOMADA DE DECISÃO EM PROCESSOS ---------- 68
3.3.1. Minimização e reúso de águas e efluentes – aspectos conceituais ---------- 68
3.3.2. DFA – breve histórico ---------- 72
3.3.3. O procedimento algorítmico ---------- 82
3.3.3.1. Um exemplo para um contaminante, na condição de máximo reúso ---------- 84
3.3.3.2. Uma abordagem mais ampla: máximo reúso para múltiplos contaminantes --- 86
3.3.4. *Software* para aplicação do método DFA ---------- 87
3.3.5. O DFA como ferramenta sustentável na criação do conhecimento e na estratégia tecnológica ---------- 90
3.4. COMENTÁRIOS GERAIS ---------- 93

CAPÍTULO 4 – VALORAÇÃO AMBIENTAL COMO FERRAMENTA PARA TOMADA DE DECISÃO EM SISTEMAS DE REÚSO ---------- 95

4.1. VALORAÇÃO ECONÔMICA DE IMPACTO AMBIENTAL DOS PROCESSOS HÍDRICOS INDUSTRIAIS ---------- 95
4.2. AS EXTERNALIDADES AMBIENTAIS ---------- 101
4.3. CONTRIBUIÇÕES DA VALORAÇÃO AMBIENTAL PARA A SUSTENTABILIDADE DOS RECURSOS HÍDRICOS ---------- 103
4.4. COMENTÁRIOS GERAIS ---------- 105

CAPÍTULO 5 – INTEGRAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE ---------- 107

5.1. CONTRIBUIÇÕES RECENTES ---------- 107
5.2. COMENTÁRIOS GERAIS ---------- 113

CAPÍTULO 6 – METODOLOGIA DE GERENCIAMENTO INTEGRADO SUSTENTÁVEL PARA O REÚSO DE ÁGUAS E EFLUENTES INDUSTRIAIS ---------- 115

6.1. O MODELO P+ÁGUA ---------- 116
6.2. ETAPAS DA METODOLOGIA PARA INTEGRAÇÃO MÁSSICA COM O DFA ----- 120
6.3. METODOLOGIA DE BUSCA ORIENTADA POR FILTRAGEM APLICADA DE CENÁRIOS DE REUTILIZAÇÃO HÍDRICA ---------- 123
6.4. ANÁLISE DO SISTEMA DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO ---------- 126
6.5. PROCEDIMENTO PARA SELEÇÃO DE CENÁRIOS PROMISSORES DE REUTILIZAÇÃO HÍDRICA ---------- 138
6.6. PROCEDIMENTO PARA ALOCAÇÃO DE PROCESSOS REGENERATIVOS EM CENÁRIOS DE REUTILIZAÇÃO HÍDRICA ---------- 149
6.7. VALORAÇÃO DE QUALIDADE DOS RECURSOS HÍDRICOS E DANOS AMBIENTAIS ---------- 155
6.8. COMENTÁRIOS GERAIS ---------- 174

CAPÍTULO 7 – RESULTADOS E DISCUSSÃO ---------- 176

7.1. DEFINIÇÃO DO ESTUDO DE CASO: OBTENÇÃO DE DADOS E BALANÇO HÍDRICO DO CENÁRIO BASE ---------- 177
7.2. GERAÇÃO DE CENÁRIOS DE REUTILIZAÇÃO DE CORRENTES PARA MÁXIMO REÚSO – UM CONTAMINANTE ---------- 194
7.3. ESTUDO DE MELHORIAS DE CONDIÇÕES OPERACIONAIS DOS CICLOS DE CONCENTRAÇÃO DAS TORRES DE RESFRIAMENTO ---------- 229
7.4. APLICAÇÃO DO DFA: FLEXIBILIZAÇÃO PARA AUMENTO DE 20% NAS CONCENTRAÇÕES DE ENTRADA DOS CONTAMINANTES ---------- 240
7.5. FLEXIBILIZAÇÃO PARA LIMITE DE 16 CICLOS DE CONCENTRAÇÃO NA OPERAÇÃO DAS TORRES DE RESFRIAMENTO ---------- 241
7.6. GERAÇÃO DE CENÁRIOS DE REUTILIZAÇÃO DE CORRENTES PARA MÁXIMO REÚSO – MÚLTIPLOS CONTAMINANTES ---------- 243
7.7. APLICAÇÃO DE PROCEDIMENTO PARA SELEÇÃO DE CENÁRIOS PROMISSORES ---------- 249
7.8. APLICAÇÃO DE PROCEDIMENTO PARA ALOCAÇÃO DE SISTEMAS DE REGENERAÇÃO DE CORRENTES ---------- 258
7.9. INFLUÊNCIA DA QUALIDADE DOS RECURSOS HÍDRICOS SOBRE OS CUSTOS POTENCIAIS DE IMPACTOS DE EFLUENTES ---------- 295
7.10. COMENTÁRIOS GERAIS ---------- 298

CAPÍTULO 8 – CONCLUSÃO E SUGESTÕES ---------- 302

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ---------- 307

APÊNDICES ---------- 331

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Progresso dos objetivos do milênio alcançado pelo Brasil até o ano de 2005, segundo dados do PNUD / ONU (2009) ---------- 15

Figura 2.2 – Evolução das questões ambientais (Adaptado de CNTL, 2003) ---------- 22

Figura 2.3 – Prevenção da Poluição – Prioridades (BARBIERI, 2007, p. 123)---------- 25

Figura 2.4 – Diagrama de níveis prioritários das ações para prevenção e controle da poluição ---------- 26

Figura 2.5 – Etapas de desenvolvimento de um programa de P2 (CETESB, 2002)----- 27

Figura 2.6 – Níveis de prioridades na identificação de oportunidades de intervenção pela Produção mais Limpa ---------- 33

Figura 2.7 – Etapas para implantação de um programa de P+L (adaptado da USEPA, 1988)---------- 35

Figura 2.8 – Custos e benefícios com a implementação de medidas de P+L (CNTL, 2003) ---------- 38

Figura 2.9 – Comparação entre as principais etapas de metodologias de P+L (OLIVEIRA, 2006a)---------- 46

Figura 2.10 – Evolução da produção científica em periódicos envolvendo China, Brasil, Índia e Estados Unidos, de 2000 a 2011 ---------- 52

Figura 2.11 – Estratégias para reduzir os impactos ambientais, da concepção fim de tubo às tendências de sociedades sustentáveis (adaptado de GIANNETTI e ALMEIDA, 2006) ---------- 57

Figura 3.1 – Cadeia de causa e efeito e ligações entre água e as metas de desenvolvimento do milênio (COSGROVE, 2006, In: WWA, 2009)---------- 67

Figura 3.2 – Formas de minimização do consumo de água primária, através de (a) reúso; (b) regeneração com reúso; e (c) regeneração com reciclo---------- 70

Figura 3.3 – Etapas de implantação de um programa de conservação e reúso de água (FIESP, 2004) ---------- 71

Figura 3.4 – Representação inicial do DFA - problema exemplo ---------- 83

Figura 3.5 – DFA para máximo reúso com um contaminante para estudo de caso: fabricação de papel (MIRRE *et al*., 2007; DELGADO *et al*., 2009)---------- 85

Figura 3.6 – Fluxograma referente ao DFA da Figura 3.5 ---------- 86

Figura 3.7 – Interface principal do programa MINEA ---------- 88

Figura 3.8 – Exemplo da geração do diagrama com o uso do MINEA ---------- 89

Figura 3.9 – Legenda do DFA no programa MINEA ---------- 89

Figura 3.10 – Número de trabalhos sobre o DFA, no período de 2000 a 2010 ---------- 92

Figura 3.11 – Categorias de trabalhos com o DFA, por tipo de atividade (até 2010)---- 92

Figura 4.1 – Fluxo de matérias-primas e energia na economia e os seus impactos ambientais (LUSTOSA *et al*., 2003, p. 140) ---------- 97

Figura 4.2 – Desenvolvimento sustentável na concepção de processos (SEIFFERT, 2007, p. 71)---------- 97

Figura 4.3 – Correção de externalidades negativas: incorporação do custo marginal social aos custos marginais privados ---------- 103

Figura 5.1 – Guia para implementação de P+L na indústria, com o uso de métodos e ferramentas selecionadas (ANDERSEN *et al*., 2002)---------- 111

Figura 6.1 – Representação do modelo integrado de reúso sustentável (P+ÁGUA) ---- 117

Figura 6.2 – Estrutura representativa do modelo P+ÁGUA ---------- 118

Figura 6.3 – Macro-etapas representativas da metodologia do DFA no ambiente industrial ---------- 120

Figura 6.4 – Metodologia de busca orientada por filtragem de cenários de reutilização hídrica ---------- 125

Figura 6.5 – Esquema geral de uma torre de resfriamento de fluxo cruzado e tiragem mecânica induzida ---------- 128

Figura 6.6 – Esquema do funcionamento da torre em circuito de resfriamento semi-aberto ---------- 129

Figura 6.7 – Procedimento de cálculo para seleção de cenários de oportunidades de reúso---------- 140

Figura 6.8 – Estrutura do procedimento para alocação de processos regenerativos---- 154

Figura 6.9 – Etapas representativas da valoração de danos ambientais com vista à seleção de cenário(s) promissor(es) ---------- 156

Figura 6.10 – Representação da Matriz PEIR para o caso estudado---------- 158

Figura 6.11 – Esquema da diluição de efluentes em um rio ---------- 162

Figura 6.12 – Representação dos componentes de mensuração de danos pela qualidade do corpo hídrico---------- 163

Figura 6.13 – Curva média de variação de qualidade da água para o parâmetro $DBO_{5,20}$ (CETESB, 2011a) ---------- 165

Figura 6.14 – Curva de qualidade padrão para os parâmetros que compõem o ISTO. Se valor medido ≤ LI, então q = 1; senão, $q = 0{,}5^{\frac{(valor_medido - LI)}{(LS - LI)}}$ (CETESB, 2011b) ---------- 167

Figura 7.1 – Diagrama de blocos do processo hídrico da refinaria em estudo – Cenário base ---------- 180

Figura 7.2 – Síntese do esquema relativo à metodologia de busca orientada por filtragem de cenários de reúso, base do modelo P+ÁGUA, voltado para aplicação ao estudo de caso da refinaria ---------- 193

Figura 7.3 – Diagrama de blocos do processo hídrico da refinaria em estudo – Cenário 1: contaminante Cálcio ---------- 197

Figura 7.4 – Diagrama de blocos do processo hídrico da refinaria em estudo – Cenário 2a: contaminante Sílica ---------- 201

Figura 7.5 – Diagrama de blocos do processo hídrico da refinaria em estudo – Cenário 2b: contaminante Sílica ---------- 203

Figura 7.6 – Diagrama de blocos do processo hídrico da refinaria em estudo – Cenário 3a: contaminante Amônia ---------- 206

Figura 7.7 – Diagrama de blocos do processo hídrico da refinaria em estudo – Cenário 3b: contaminante Amônia ---------- 208

Figura 7.8 – Diagrama de blocos do processo hídrico da refinaria em estudo – Cenário 4a: contaminante Sulfeto ---------- 211

Figura 7.9 – Diagrama de blocos do processo hídrico da refinaria em estudo – Cenário 4b: contaminante Sulfeto ---------- 213

Figura 7.10 – Diagrama de blocos do processo hídrico da refinaria em estudo – Cenário 5a: contaminante Cloreto ---------- 215

Figura 7.11 – Diagrama de blocos do processo hídrico da refinaria em estudo – Cenário 5b: contaminante Cloreto ---------- 217

Figura 7.12 – Diagrama de blocos do processo hídrico da refinaria em estudo – Cenário 6a: contaminante Cianeto ---------- 220

Figura 7.13 – Diagrama de blocos do processo hídrico da refinaria em estudo – Cenário 6b: contaminante Cianeto ---------- 221

Figura 7.14 – Diagrama de blocos do processo hídrico da refinaria em estudo – Cenário 7a: contaminante Fenol ---------- 224

Figura 7.15 – Diagrama de blocos do processo hídrico da refinaria em estudo – Cenário 7b: contaminante Fenol ---------- 225

Figura 7.16 – Variação de concentração na purga das torres de resfriamento (a) TR01 e (b) TR02, em função dos ciclos de concentração (para uma dada temperatura) --------- 233

Figura 7.17 – Vazão e redução percentual da purga das torres de resfriamento (a) TR01 e (b) TR02 ---------- 234

Figura 7.18 – Vazão de reposição da (a) TR01 e (b) TR02 ---------- 234

Figura 7.19 – Perfil do índice de saturação de Langelier (LSI) em função de variações de pH e ciclo de concentração, para as condições de análise da torre de resfriamento TR01 ---------- 236

Figura 7.20 – Perfil do índice de saturação de Langelier (LSI) em função de variações de pH e ciclo de concentração, para as condições de análise da torre de resfriamento TR02 ---------- 237

Figura 7.21 – Perfil do índice de Ryznar em função de variações de pH e ciclo de concentração, para as condições de análise da torre de resfriamento TR01---------- 238

Figura 7.22 – Perfil do índice de Ryznar em função de variações de pH e ciclo de concentração, para as condições de análise da torre de resfriamento TR02---------- 238

Figura 7.23 – Perfil do índice de Puckorius em função de variações de pHeq e ciclo de concentração, para as condições de análise da torre de resfriamento TR01---------- 239

Figura 7.24 – Dosagem de produto químico em função do ciclo de concentração: (a) TR01 e (b) TR02---------- 243

Figura 7.25 – Esquema ilustrativo do procedimento de seleção de cenários aplicado ao estudo de caso ---------- 250

Figura 7.26 – Faixa de valores de pH na reposição e na purga da TR01, associado ao índice de aceitabilidade superior da purga ---------- 253

Figura 7.27 – Faixa de valores de pH na reposição e na purga da TR02, associado ao índice de aceitabilidade superior da purga ---------- 254

Figura 7.28 – Esquema da etapa de seleção de cenários com base no critério multiplicativo de divergência e fator adicional de reúso ---------- 257

Figura 7.29 – Diagrama de blocos do processo hídrico do cenário 3a com alocação de processos regenerativos---------- 263

Figura 7.30 – Diagrama de blocos do processo hídrico da nova proposta para o cenário 3a, sem o reúso nas torres---------- 264

Figura 7.31 – Diagrama de blocos do processo hídrico do cenário 11a com alocação de processos regenerativos---------- 265

Figura 7.32 – Diagrama de blocos do processo hídrico do cenário 17a com alocação de processos regenerativos---------- 266

Figura 7.33 – Vazão e percentual de redução de água bruta e de efluente final para os respectivos cenários ---------- 267

Figura 7.34 – Sensibilidade do VPL em função da taxa de desconto, indicando as taxas internas de retorno (TIR's) de cada cenário ---------- 292

Figura 7.35 – Sensibilidade do custo adicional de impacto a variações do IQA ---------- 296

Figura 7.36 – Sensibilidade do custo adicional de impacto em função do IVA, para uma faixa especificada de IVA---------- 297

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Dados limites do problema exemplo ---------- 82

Tabela 3.2 – Dados do processo de fabricação de papel (YANG *et al*., 2000)---------- 84

Tabela 6.1 – Estimativas de arrastes em água de resfriamento, expressos como percentagem da vazão de recirculação, para cada tipo de equipamento (TROVATI, 2007, p. 16)---------- 131

Tabela 6.2 – Características de estabilidade da água segundo Carrier (1965) ---------- 136

Tabela 6.3 – Comparativo entre as indicações das características de estabilidade da água, segundo Ryznar e Carrier---------- 137

Tabela 6.4 – Ponderação dos parâmetros de qualidade da água para cálculo do IQA - 165

Tabela 7.1 – Balanço hídrico do processo da refinaria ---------- 182

Tabela 7.2 – Eficiência de remoção de contaminantes da estação de tratamento de despejos industriais e padrão de lançamento da Conama 357/2005 ---------- 185

Tabela 7.3 – Dados de vazão e concentração de contaminantes dos processos da refinaria ---------- 186

Tabela 7.4 – Dados de entrada para a aplicação do DFA (componente Cálcio) --------- 195

Tabela 7.5 – Dados de entrada para a aplicação do DFA (componente Sílica) ---------- 199

Tabela 7.6 – Dados de entrada para a aplicação do DFA (componente Amônia)-------- 204

Tabela 7.7 – Dados de entrada para a aplicação do DFA (componente Sulfeto) -------- 209

Tabela 7.8 – Dados de entrada para a aplicação do DFA (componente Cloreto) -------- 214

Tabela 7.9 – Dados de entrada para a aplicação do DFA (componente Cianeto) ------- 218

Tabela 7.10 – Dados de entrada para a aplicação do DFA (componente Fenol)--------- 222

Tabela 7.11 – Síntese da redução na captação de água bruta e geração de efluente, com as respectivas estimativas de custos para cada cenário, em relação ao cenário base - 228

Tabela 7.12 – Limites teóricos de contaminantes nas torres de resfriamento, a partir do cenário base ---------- 230

Tabela 7.13 – Valores de concentração da reposição atual e da purga, considerando ciclo máximo permitido, para as torres de resfriamento TR01 e TR02---------- 232

Tabela 7.14 – Concentração de componentes nas correntes das torres de resfriamento, com a reposição e a purga permitidas ---------- 233

Tabela 7.15 – Captação de água e descarte de efluentes, com as estimativas de custos para cada cenário de reutilização levantado, em relação ao cenário base ---------- 240

Tabela 7.16 – Captação de água e descarte de efluentes, com as estimativas de custos para cada cenário de reutilização levantado, em relação ao cenário base ---------- 241

Tabela 7.17 – Dados de vazão e concentração de componentes nas operações candidatas ao reúso ---------- 244

Tabela 7.18 – Diferencial de concentração de componentes para as operações candidatas ao reúso ---------- 245

Tabela 7.19 – Dados de vazão e concentração de componentes da operação Dessalgadora como referência na análise multicomponente ---------- 246

Tabela 7.20 – Concentração de componentes antes da análise da possibilidade de deslocamento---------- 247

Tabela 7.21 – Ajuste de concentrações para a análise multicomponente – Contaminante de referência: cloreto; operação de referência: dessalgadora---------- 247

Tabela 7.22 – Concentração de componentes após a análise da possibilidade de deslocamento---------- 248

Tabela 7.23 – Análise de pH dos cenários considerados, com base no índice de aceitabilidade superior da purga ---------- 252

Tabela 7.24 – Fator adicional de reúso calculado para os cenários considerados após seleção prévia ---------- 255

Tabela 7.25 – Determinação de cenários potenciais com base no critério de análise sequencial ---------- 256

Tabela 7.26 – Identificação do ponto *pinch* com a inclusão de correntes e operações que o incorporam, para os respectivos cenários selecionados ---------- 259

Tabela 7.27 – Cenários selecionados para análise subsequente relativas às correntes que apresentam violação de concentração máxima de contaminantes no balanço hídrico ---------- 260

Tabela 7.28 – Comparação entre as correntes de reúso e a meta de concentração de entrada dos componentes nas operações receptoras, provenientes dos respectivos balanços hídricos, para o cenário 3a ---------- 268

Tabela 7.29 – Comparação entre as correntes de reúso e a meta de concentração de entrada dos componentes nas operações receptoras, provenientes dos respectivos balanços hídricos, para o cenário 11a ---------- 268

Tabela 7.30 – Comparação entre as correntes de reúso e a meta de concentração de entrada dos componentes nas operações receptoras, provenientes dos respectivos balanços hídricos, para o cenário 17a ---------- 269

Tabela 7.31 – Eficiências de remoção requeridas para enquadramento de concentrações meta de entrada nas operações receptoras de correntes de reúso ---------- 269

Tabela 7.32 – Relação de técnicas disponíveis para o processo de regeneração dos contaminantes indicados ---------- 271

Tabela 7.33 – Correlações da literatura para estimativa de custo de investimento em processos regenerativos---------- 272

Tabela 7.34 – Diferença entre eficiências de remoção na etapa de avaliação de processos regenerativos (Cenário 3a) ---------- 273

Tabela 7.35 – Diferença entre eficiências de remoção na etapa de avaliação de processos regenerativos (Cenário 11a) ---------- 274

Tabela 7.36 – Diferença entre eficiências de remoção na etapa de avaliação de processos regenerativos (Cenário 17a) ---------- 275

Tabela 7.37 – Diferença entre eficiências de remoção na etapa de alocação aditiva de processos regenerativos – segunda etapa ---------- 277

Tabela 7.38 – Diferença entre eficiências de remoção na etapa de alocação aditiva de processos regenerativos – terceira etapa---------- 278

Tabela 7.39 – Diferença entre eficiências de remoção na etapa de alocação aditiva de processos regenerativos – quarta etapa ---------- 278

Tabela 7.40 – Custo total anual para o conjunto de técnicas a serem adotadas no cenário 3a ---------- 279

Tabela 7.41 – Custo total anual para o conjunto de técnicas a serem adotadas no cenário 11a ---------- 280

Tabela 7.42 – Custo total anual para o conjunto de técnicas a serem adotadas no cenário 17a ---------- 281

Tabela 7.43 – Seleção da técnica regenerativa com base no custo total anual para o cenário 3a ---------- 282

Tabela 7.44 – Seleção da técnica regenerativa com base no custo total anual para o cenário 11a---------- 283

Tabela 7.45 – Seleção da técnica regenerativa com base no custo total anual para o cenário 17a---------- 284

Tabela 7.46 – Custo total anual do cenário 3a ---------- 285

Tabela 7.47 – Custo total anual do cenário 11a---------- 286

Tabela 7.48 – Custo total anual do cenário 17a---------- 287

Tabela 7.49 – Comparação entre as correntes a montante e a jusante dos processos regenerativos requeridos, para o cenário 3a ---------- 288

Tabela 7.50 – Comparação entre as correntes a montante e a jusante dos processos regenerativos requeridos, para o cenário 11a ---------- 288

Tabela 7.51 – Comparação entre as correntes a montante e a jusante dos processos regenerativos requeridos, para o cenário 17a ---------- 289

Tabela 7.52 – Parâmetros de viabilidade econômica dos cenários ---------- 291

Tabela 7.53 – Resultados da análise do fluxo incremental (11a – 3a) ---------- 294

Tabela 7.54 – Comparação entre as características das correntes de efluente final dos cenários com os da configuração original e do padrão de lançamento ---------- 298

Lista de Quadros

Quadro 2.1 – Gestão ambiental na empresa – abordagens (BARBIERI, 2007, p. 119) 29

Quadro 2.2 – Diferenças de atitudes entre as abordagens de controle de poluição e produção mais limpa (adaptado de *Husingh Environmental Consultants Inc*.,1994, In: GREENPEACE, 1997) ---------- 37

Quadro 2.3 – Casos de sucesso da implantação de medidas de P+L pela Cetesb, nas indústrias do Estado de São Paulo (Adaptado de CETESB, 2008) ---------- 40

Quadro 2.4 – Barreiras à implementação de Produção mais Limpa (Adaptada da Unep, In: SILVA FILHO e SICSÚ, 2003) ---------- 47

Quadro 4.1 – Classificação da valoração ambiental ---------- 98

Quadro 4.2 – Classificação dos métodos de valoração econômica dos recursos ambientais (SEROA DA MOTTA, 2006)---------- 99

Quadro 4.3 – Consequências dos impactos das atividades humanas nos recursos hídricos (TUNDISI, 2009)---------- 104

Quadro 7.1 – Formulação dos componentes dos custos da água para avaliação dos cenários de reúso ---------- 227

Lista de Abreviaturas e Siglas

3P's	Prevenção de Poluição Paga
ABES	Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ANA	Agência Nacional de Águas
BRIC	Acrônimo de Brasil, Rússia, Índia e China
BSC	*Balanced Scorecard*
CA	Custo total da água
$CaCl_2$	Cloreto de cálcio
$CaCO_3$	Carbonato de cálcio
CC	Ciclo de concentração
CE	*Chemical Engineering Plant Cost Index*
CEBDS	Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável
CEP	Controle Estatístico de Processo
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CFC's	Clorofluorcarbonos
CLEANER	*Combining Lower Emissions And Networked Energy Recovery*
CMMAD	Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento
CMPC	Custo médio ponderado de capital
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CNTL	Centro Nacional de Tecnologias Limpas
CNUMAD	Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento
CO_2	Dióxido de carbono
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
COP	Conferência das Partes, na sigla em inglês
COPOM	Comitê de Política Monetária
CSMS	Sistema de Gestão da Sustentabilidade Corporativa, na sigla em inglês
CV	Coeficiente de variação
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DFA	Diagrama de Fontes de Água
DFR	Diagrama de Fontes de Rejeito
DJSI	Índice Dow Jones Mundial de Sustentabilidade, na sigla em inglês

DM	Desvio-médio
DP	Desvio-padrão
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DTIE	Divisão de Tecnologia, Indústria e Meio Ambiente, na sigla em inglês
ECP	Estrutura-Conduta-Performance
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
ENR	*Engineering News-Record Construction Cost Index*
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETDI	Estação de Tratamento de Despejos Industriais
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
ETN	Redes de tratamento do efluentes, na sigla em inglês
FCC	Craqueamento catalítico fluido
FGV	Fundação Getulio Vargas
FNQ	Fundação Nacional da Qualidade
FOB	Livre a bordo, na sigla em inglês
GAIA	Gerenciamento de Aspectos e Impactos Ambientais
GAMS	Sistema Geral de Modelagem Algébrica, na sigla em inglês
GUIDE	*Graphics User Interface Design Environment*
H_2S	Sulfeto de hidrogênio
HDT	Hidrotratamento
IAP	Índice de Qualidade das Águas Brutas para fins de Abastecimento Público
IB	Índice de Balneabilidade
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICWE	Conferência Internacional sobre Água e Meio Ambiente, na sigla em inglês
IET	Índice de Estado Trófico
IGP-M	Índice Geral de Preços ao Mercado
ILL	Índice de Lucratividade Líquida
INCC	Índice Nacional da Construção Civil
IPA	Índice de Preços no Atacado
IPC	Índice de Preços ao Consumidor
IPCA	Índice de Preços ao Consumidor Amplo
IPMCA	Índice de Variáveis Mínimas para a Preservação da Vida Aquática
IQA	Índice de Qualidade das Águas
IQA_{NSF}	Índice de Qualidade das Águas da Fundação Nacional Sanitária dos Estados Unidos
IQA_{PVA}	Índice de Qualidade das Águas para Proteção de Vida Aquática

$IQAS_{CH}$	Índice de Qualidade de Águas Subterrâneas para Consumo Humano
IRR	Taxa interna de retorno, na sigla em inglês
ISBL	Dentro dos limites de bateria da unidade, na sigla em inglês
ISO	Organização Internacional para Padronização, na sigla em inglês
ISTO	Índice de Substâncias Tóxicas e Organolépticas
IUCN	União Internacional para a Conservação da Natureza e dos Recursos Naturais, na sigla em inglês
IVA	Índice de Preservação da Vida Aquática
LI	Limite inferior
LS	Limite superior
LSI	Índice de Langelier
MCR	Método Custo de Reposição
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
$MgCl_2$	Cloreto de magnésio
MINEA	Minimização de Efluentes Aquosos
MINLP	Programação Não Linear Inteira Mista, na sigla em inglês
mL	Mililitro
MS	*Marshall and Swift Equipment Cost Index*
MVC	Mono-cloreto de vinila
NBR	Norma Brasileira aprovada pela ABNT
NMP	Número Mais provável
NH_3	Amoníaco ou amônio
NR	*Nelson-Farrar Refinery Construction Cost Index*
NSF	Fundação Nacional Sanitária, na sigla em inglês
OD	Oxigênio dissolvido
OMS	Organização Mundial de Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
OSBL	Fora dos limites de bateria da unidade, na sigla em inglês
P&D	Pesquisa & Desenvolvimento
P+L	Produção mais Limpa
P2	Prevenção da Poluição
PCRA	Programa de Conservação e Reúso de Água
PCS	Produção e Consumo Sustentável
PDCA	Planejar, Executar, Verificar e Agir, na sigla em inglês
PEIR	Acrônimo de Pressão, Estado, Impacto e Resposta
PFC's	Perfluorcarbonos

pH	Potencial hidrogeniônico
PI	Índice de Puckorius
PIB	Produto Interno Bruto
PL	Produção Limpa
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
PPP's	Parcerias público-privadas
RCE	Reduções Certificadas de Emissão
REG	Regenerador
RI	Índice de Ryznar
RIMA	Relatório de Impactos sobre o Meio Ambiente
ROI	Retorno sobre o investimento, na sigla em inglês
RPBC	Refinaria Presidente Bernardes
SBSC	*Sustainability Balanced Scorecard*
SDT	Sólidos dissolvidos totais
SECO	Secretaria de Estado para Assuntos Econômicos do Ministério da Economia Suíça, na sigla em inglês
SELIC	Sistema Especial de Liquidação e Custódia
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
$(SiO_2)_n$	Óxido de silício (Sílica)
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SO	Substâncias organolépticas
SST	Sólidos suspensos totais
ST	Substâncias tóxicas
SWOT	Acrônimo de Forças, Fraquezas, Oportunidades e Ameaças, na sigla em inglês
TECLIM	Rede de Tecnologias Limpas e Minimização de Resíduos do Estado da Bahia
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa mínima de atratividade
TNS	*The Natural Step*
TR01	TAG relativo à torre de resfriamento 01
TR02	TAG relativo à torre de resfriamento 02
UDASF	Unidade de desasfaltação
UNEP	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, na sigla em inglês
UNICEF	Fundo das Nações Unidas para a Infância, na sigla em inglês
UNT	Unidade Nefelométrica de Turbidez

USEPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América, na sigla em inglês
VE	Valor de existência
VE	Variáveis essenciais
VERA	Valor econômico do recurso ambiental
VNU	Valor de não-uso
VO	Valor de opção
VPL	Valor Presente Líquido
VU	Valor de uso
VUD	Valor de uso direto
VUI	Valor de uso indireto
WACC	Custo médio ponderado de capital, na sigla em inglês
WAMEN	*Water Allocation and Mass Exchange Network*
WAR	Redução de resíduos, na sigla em inglês
WBCSD	Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável, na sigla em inglês
WRI	Instituto de Recursos Mundiais, na sigla em inglês
WWA	Programa Mundial de Avaliação da Água, na sigla em inglês
WWF	Fundo Mundial para a Natureza, na sigla em inglês

Lista de Símbolos

$C_{e,max}$	Concentração de entrada máxima de uma dada operação
$C_{s,max}$	Concentração de saída máxima de uma dada operação
f_L	Vazão limite
Δm_{ki}	Carga de contaminantes transferidos na operação k, no intervalo i
f_{Lk}	Vazão limite da operação k
C_{fi}	Concentração final do contaminante no intervalo i
C_{ii}	Concentração inicial do contaminante no intervalo i
Nop	Número de operações
Nint	Número de intervalos de concentração
OPi	Operação i
t	Tonelada
h	Hora
ppm	Partes por milhão
ΔC_{jk}	Diferença de concentração do contaminante j na operação k
ΔC_{ik}	Diferença de concentração do contaminante i na operação k
m^3	Metro cúbico
L	Litro
R	Vazão de água de reposição de uma torre de resfriamento
F	Vazão de outras fontes de alimentação em uma torre de resfriamento
E	Vazão de evaporação de uma torre de resfriamento
A	Vazão de arraste de gotículas em uma torre de resfriamento
D	Vazão de descargas de uma torre de resfriamento
I	Vazão de perdas indeterminadas em uma torre de resfriamento
CC	Ciclo de concentração
w	Quantidade de produto químico dosado na água de resfriamento
Cprod	Concentração desejada de produto químico na água de resfriamento
L	Vazão de perdas na fase líquida
Cevapi	Concentração da espécie i na fase evaporada
Creci	Concentração da espécie i na fase líquida
CC_{max}	Ciclo de concentração máximo
$CC_{SiO2,max}$	Ciclo de concentração máximo com base na sílica
$C_{SiO2,rep}$	Concentração de sílica na água de reposição
pH_S	Potencial hidrogeniônico de saturação

T	Temperatura
CE	Condutividade elétrica da água
pHeq	Potencial hidrogeniônico equivalente
[Ca]	Concentração de dureza cálcica
AT	Concentração de alcalinidade total
%RCO	Redução percentual nos custos operacionais
$CT_{op\text{-}base}$	Custo total operacional do cenário base
$CT_{op\text{-}considerado}$	Custo total operacional do cenário considerado
$\overline{\%RCO}$	Média aritmética dos percentuais de redução dos cenários
n	número total de cenários
$\%Div_{cen\text{-}i}$	Divergência percentual entre a média dos cenários
ID_1	Índice de desempenho de divergência
ID_2	Índice de desempenho de média
$ID_{2\text{-}1}$	Índice de desempenho de divergência em relação à média
IS	Índice de Sharpe
IS_{Reuso}	Índice de Sharpe modificado para reúso
F_{AR}	Fator adicional de reúso
IAS_P	Índice de aceitabilidade superior na purga
IAI_P	Índice de aceitabilidade inferior na purga
RR	Taxa de remoção de contaminante
R	Eficiência de remoção de contaminante
f_i	Vazão inicial limite do contaminante na corrente do intervalo considerado
f_f	Vazão final limite do contaminante na corrente do intervalo considerado
C_i	Concentração inicial do contaminante na corrente do intervalo considerado
C_f	Concentração final do contaminante na corrente do intervalo considerado
$\Delta\varepsilon$	Diferença entre eficiência de remoção disponível e calculada
ε_{Dij}	Eficiência de remoção do contaminante i pela técnica disponível j
ε_{Cij}	Eficiência de remoção do contaminante i pela técnica calculada j
I_{c2}	Investimento da unidade 2
I_{c1}	Investimento da unidade 1
c2	Capacidade da unidade 2
c1	Capacidade da unidade 1
I_{c2_atual}	Investimento da unidade 2 na data atual
I_{c2_base}	Investimento da unidade 1 na data base
I	Investimento inicial
FCt	Fluxo de caixa líquido na data “t”

VR	Valor residual do projeto ao fim de um período
r	custo de capital definido pela empresa
t	período de tempo considerado para o fluxo de caixa
n	período de tempo ao fim do valor residual
CA	Custo total da água
C_{CAP}	Custo de captação da água
C_{CON}	Custo de consumo de água no processo
C_{TRATA}	Custo de tratamento da água
C_{TRATE}	Custo de tratamento de efluentes
C_{DESCE}	Custo de descarte de efluente final
TXO	Taxa de outorga dos recursos hídricos
C_{REUSO}	Custo relativo ao reúso
VE_E	Valor econômico de uso direto e indireto na produção
DR	Função dose-resposta
C_J	Concentração de contaminante imediatamente a jusante do despejo
Q_M	Vazão do rio a montante do despejo
C_M	Concentração de contaminate a montante do despejo
Q_E	Vazão do despejo de efluentes no rio
C_E	Concentração de contaminante no efluente descartado (despejo)
wi	Peso do i-ésimo parâmetro
qi	Qualidade do i-ésimo parâmetro
n	Número de parâmetros considerados relavantes para a qualidade da água
C_{AIQA}	Custo adicional de impacto da qualidade da água
f_C	Fator de concentração
Cin	Concentração de entrada de um componente na operação
Cout	Concentração de saída de um componente na operação
Ti	Valor da tarifa i
CC_{atual}	Ciclo de concentração atual
Cp_{Si}	Concentração de sílica na purga da torre
Cr_{Si}	Concentração de sílica na água de reposição da torre
Cr_i	Concentração do componente i na água de reposição
Cp_i	Concentração do componente i na purga
Cp_{16}	Concentração do componente i na purga para 16 ciclos de concentração
Cp	Correlação referente ao custo de investimento em processos regenerativos
Q	Vazão da corrente submetida ao processo de regeneração
Crem	Concentração remanescente do componente

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

"A acumulação de capital, que veio do comércio primitivo, mais a existência de uma classe de trabalhadores sem propriedades, prenunciavam o início do capitalismo industrial. (...) Os donos dessa nova riqueza, educados na crença de que o reino dos céus era deles, se economizassem e reinvestissem suas economias, empregavam novamente seu capital em fábricas. Assim, o sistema moderno, tal como o conhecemos, começou a existir."

(Leo Huberman, 1986, p. 170)

Em seu célebre livro "História da Riqueza do Homem", o historiador norte-americano Leo Huberman (1903 - 1968) analisa de modo claro e instigante como a evolução econômica dos sistemas feudal e capitalista provocou reflexos profundos nas condições de vida da sociedade, com o estabelecimento de novas doutrinas sociais. A expansão da economia no mundo foi acelerada pelo desenvolvimento de organizações empresariais e pelas transformações ocasionadas pela Revolução Industrial, no século XVIII. A partir deste período, a humanidade passou a perceber o progresso industrial como um fator de crescimento de centros urbanos e desenvolvimento social. As transformações sucedidas com o advento de tecnologias levaram ao aumento da expectativa de vida da sociedade e a uma maior utilização de matéria e energia, para a produção de bens de consumo e serviços. Como reflexo, iniciou-se uma maior competitividade entre as indústrias, alimentando o desenfreado desejo pelo aumento de sua produtividade.

Em termos gerais, o sistema de produção industrial pode ser entendido como um conjunto de recursos e atividades inter-relacionadas ou interativas que transformam as entradas (insumos, matérias-primas) em saídas desejadas (produtos ou serviços). Ineficiências no processo de transformação acarretam a geração de resíduos em proporções normalmente significativas.

Os impactos ambientais decorrentes do uso de fontes energéticas (combustíveis fósseis), particularmente o carvão e, mais tarde, o petróleo, delegaram às indústrias de transformação uma imagem negativa associada à poluição do meio ambiente. Tal fato acentuou ainda mais a associação de suas características duais de progresso e degradação. A NBR ISO 14.004 conceitua impacto ambiental como "qualquer modificação

do meio ambiente, adversa ou benéfica, que resulte, no todo ou em parte, das atividades, produtos ou serviços de uma organização" (ABNT, 1996, p. 5). Por outro lado, a expressão "dano" deve se referir a uma parte do componente negativo do impacto, e não a sua resultante final, embora esta sutileza não seja devidamente tratada pela legislação em vigor (FENKER, 2007). Dano distingue-se de impacto pelo fato de o primeiro ser uma modificação irreversível, ou seja, não restaura a estabilidade anterior à perturbação provocada, ao contrário do impacto, que permite que o equilíbrio seja restabelecido após a alteração. Aliás, desde o período paleolítico (ou "Idade da Pedra Lascada") que as atividades humanas são pautadas pelo desperdício e pelo consumo desenfreado de recursos naturais, em particular aqueles potencialmente renováveis, como água, solo e vegetação.

Durante muito tempo, porém, os interesses de produção das atividades industriais estiveram à frente de qualquer preocupação com a qualidade e a preservação dos recursos naturais, sejam eles renováveis ou não-renováveis, tais como petróleo e carvão mineral. Sobre a ideologia de progresso industrial e tecnológico e a degradação do meio ambiente com as transformações econômicas e sociais no "breve" século XX (1914-1991), o historiador britânico Eric Hobsbawn (Alexandria, 1917) comenta:

> Mal se notava ainda um subproduto dessa extraordinária explosão, embora em retrospecto ele já parecesse ameaçador: a poluição e a deterioração ecológica. Durante a Era de Ouro capitalista (1947-1973), isso chamou pouca atenção, a não ser de entusiastas da vida silvestre e outros protetores de raridades humanas e naturais, porque a ideologia de progresso dominante tinha como certo que o crescente domínio da natureza pelo homem era a medida mesma do avanço da humanidade. [...] Mesmo no Ocidente, o velho lema do homem de negócios do século XIX, "Onde tem lama, tem grana" (ou seja, poluição quer dizer dinheiro), ainda era convincente, sobretudo para construtores de estradas e "incorporadores" imobiliários, que descobriram os incríveis lucros a serem obtidos numa era de *boom* secular de especulação que não podia dar errado. [...] (HOBSBAWN, 1995, p. 257)

Assim, muito se passou até que as preocupações ambientais começassem a entrar em conflito com os interesses empresariais, impulsionados pela ambição de uma produtividade ascendente. Somente no século XX é que se firmou um compromisso oficial, passando a fazer parte da agenda de órgãos governamentais dos países e da sociedade civil organizada. Entretanto, o modelo de produção praticado no século XX baseou-se em algumas premissas e percepções; uma das mais importantes residia na crença de que o planeta Terra teria capacidade ilimitada. Outra concepção considerava a geração de poluentes como algo inevitável, e que não seria possível produzir bens e serviços sem o lançamento de resíduos sólidos, efluentes líquidos e emissões atmosféricas. Amparados nessa lógica equivocada, destituída de qualquer sensibilidade ambiental, os poluentes gerados pelas indústrias eram então descartados no meio ambiente, sem uma preocupação

com os prováveis efeitos que tal prática pudessem incorrer. Afinal, reinava a crença que o planeta seria fonte inexaurível de matérias-primas, e que, portanto, poderia receber e assimilar resíduos indefinidamente. No âmbito mundial, a partir de 1970 essa cômoda concepção começou a declinar diante das evidências de que era perfeitamente possível aliar desenvolvimento econômico e social com preservação ambiental, despertando para um estágio embrionário dos contornos conceituais da chamada “sustentabilidade”.

Como forma de evitar a geração descomedida de impactos negativos sobre o meio ambiente, foram criados organismos de controle da poluição, instituindo legislações ambientais e medidas para o monitoramento da qualidade ambiental, assim como o licenciamento e a fiscalização. Para atender a real necessidade de controle de poluição, foram desenvolvidas técnicas visando a implantação de unidades de tratamento que levassem à redução da poluição ao final do processo industrial, enquadrando o seu descarte no ambiente, em níveis entendidos como toleráveis pela legislação.

Cumpre lembrar aqui as evidências de que o desenvolvimento industrial, intrinsecamente econômico, levou (e ainda tem levado) a danos ao meio ambiente, em função de seus processos produtivos. Entretanto, as tecnologias empregadas que impulsionam o desenvolvimento e permitem a degradação ambiental também podem ser utilizadas visando um maior aproveitamento dos recursos naturais no processo, onde a maior eficiência traduz-se na diminuição dos impactos. O aumento da produção industrial, porta-voz do crescimento econômico, deve ser acompanhado pela redução nos níveis de poluição, mediante mudanças tecnológicas que permitam alcançar padrões de sustentabilidade ambiental, e que preservem evidentemente os recursos naturais para as futuras gerações.

As tecnologias ambientais utilizam uma coleção de técnicas, processos e equipamentos que têm a função de reduzir os impactos significativos ao meio ambiente dos resíduos dos recursos naturais processados no sistema. Com base nisso, é prudente observar que o aprimoramento destas tecnologias, obtidas por inovações ambientais, tem o compromisso de aumentar a eficiência operacional dos processos, não somente do ponto de vista energético e ambiental como também de consumo de matérias-primas. A competitividade empresarial, emergida do fenômeno da globalização dos mercados, sofre influência direta da pressão dos consumidores. As sociedades sustentáveis caracterizam-se pelo grau avançado de educação ambiental, as quais demandam produtos que apresentem elevado padrão de desempenho e qualidade, e que sejam preferencialmente produzidos por empresas que se preocupam em gerar o mínimo impacto ambiental pelas suas atividades. Assim, a proteção ambiental tornou-se um diferencial competitivo para as empresas, sendo vista como uma oportunidade de mercado no contexto das estratégias empresariais, e

demonstradas na necessidade de se dispor de novas tecnologias, implantar sistema de gestão ambiental, e promover o uso racional dos recursos naturais.

O cenário econômico do final da década de 1970 e início da de 1980 trouxe a necessidade de se buscar soluções tecnológicas que viabilizassem o aproveitamento racional de matérias-primas e de recursos energéticos para o sistema de produção industrial. Nessa época, o desenvolvimento científico levou à criação da Integração de Processos, no âmbito da Engenharia de Processos (PERLINGEIRO, 2005), área que teve sua origem na Engenharia de Sistemas. Sua base foi estruturada enfatizando o desenvolvimento de métodos sistemáticos para a síntese de redes de trocadores de calor (Integração Energética – aproveitamento do potencial energético de correntes de processo, gerando fluxogramas com perfis de minimização de consumo de energia), quando surgiu a Tecnologia *Pinch* ("Ponto de Estrangulamento Térmico"), difundida por Linnhoff e Hindmarsh (1983). Hallale (2001) destaca quatro grandes áreas de aplicação da Integração de Processos: uso eficiente de matérias-primas; eficiência energética; redução de emissões; e operacionalidade do processo (maiores flexibilidade e controlabilidade).

A Integração de Processos prosperou na tentativa de prover informações técnicas que solucionassem os problemas surgidos com a crise energética deflagrada na década de 1970. A ideia e os conceitos advindos da Integração Energética formaram a base para a expansão da tecnologia para novas aplicações, como no melhor aproveitamento de matérias-primas, na redução de emissões, na operação de processos (sistemas de destilação, redes de hidrogênio em refinarias de petróleo), na síntese de redes (fluxogramas de processo) de equipamentos de transferência de massa e, em particular, no gerenciamento hídrico em processos (SMITH, 2000). À medida que a preocupação com a disponibilidade da água no mundo veio à tona, houve um maior deslocamento de seus objetivos no sentido de estudar o desenvolvimento de ferramentas voltadas para a racionalização do consumo hídrico nos processos industriais. Isto acentuou o propósito de resolver os problemas ambientais pela Integração de Processos.

Com isso, a Integração de Processos tornou-se uma área importante para a tomada de decisões na indústria, principalmente pelo fato de dispor de mecanismos de otimização técnica e econômica do sistema como um todo. Ela é orientada para o alcance da sustentabilidade dos processos, uma vez que procura solucionar os problemas ligados não apenas à minimização dos custos totais, a partir da melhoria dos processos, mas também reduzir o impacto ambiental oriundo de tais atividades. E é neste sentido que se pode destacá-la como um suporte perfeitamente ajustável à filosofia de prevenção de poluição, uma vez que privilegia o aspecto de conservação, isto é, o aumento da eficiência do processo obtido com a minimização do uso e/ou com a maximização da recuperação de

energia e materiais. Suas técnicas fornecem a base para análise e desenvolvimento de projetos em sua totalidade, permitindo o seu emprego no alcance das metas da prevenção de poluição.

O instrumental de conhecimentos adquiridos pela Engenharia de Processos permite desenvolver metodologias de análise, à luz de procedimentos algorítmicos ou programação matemática, onde o foco seria diminuir a geração de efluentes e o consumo de água em um processo industrial. Sob tal perspectiva, a busca pelo cumprimento das metas de geração de poluentes com o menor consumo de água possível e a um mínimo custo do tratamento final dos efluentes (conceitualmente destinado ao descarte em corpos receptores), seria efetivada por ações de reúso ou mesmo a regeneração combinada ao reúso.

É neste contexto que o uso de ferramentas tecnológicas oferece um acréscimo sustentável à tomada de decisão relativa aos processos de gestão industrial, particularmente neste caso ao enfoque ambiental. Despontando como uma importante ferramenta da Integração de Processos, o Diagrama de Fontes de Água (DFA) – Gomes *et al*., 2007 – constitui um procedimento algorítmico, baseado em equações de balanço material e em regras heurísticas que procuram estabelecer conexões ótimas entre fontes e sumidouros de água, dentro do processo industrial, bem como entre este e o meio urbano, auxiliando na caracterização de uma ecoindústria. A metodologia gera fluxogramas de processos em diferentes situações de reúso e regeneração. Além disso, tem como vantagem adicional a geração simultânea de fluxogramas alternativos para o processo.

É de se esperar que a ausência de uma metodologia que proponha um mecanismo eficiente de reutilização da água desestimule o diálogo para a solução dos problemas entre as indústrias. Normalmente, a prática do reaproveitamento da água se dá por meio de inspeção, onde as oportunidades levantadas não seguem um procedimento sistemático; embora funcione para as necessidades de cada setor, tal medida não garante o alcance de um desejável máximo reúso.

Dentro da abordagem da prevenção da poluição, há um conjunto de modelos de gestão ambiental cujas técnicas e ferramentas proporcionam um controle eficaz do consumo de insumos e da geração de resíduos. Um importante modelo é a chamada Produção mais Limpa (P+L), lançada em 1989 pela Unep (*United Nations Environment Program* – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente) e pela DTIE (*Division of Technology, Industry and Environment* – Divisão de Tecnologia, Indústria e Meio Ambente). Trata-se da "aplicação contínua de uma estratégia integrada de prevenção ambiental a processos, produtos e serviços, para aumentar a eficiência de produção e reduzir os riscos para o ser humano e o ambiente". Diversos termos, tais como: Produção mais Limpa (*Cleaner Production*), Prevenção à Poluição (*Pollution Prevention*), Tecnologias Limpas (*Clean*

Technologies), Redução na Fonte (*Source Reduction*) e Minimização de Resíduos (*Waste Minimization*), têm sido utilizados, ao redor do mundo, para definir o conceito da P+L. Algumas vezes, estes termos são considerados sinônimos, e, às vezes, complementares, requerendo uma análise aprofundada das ações e das propostas inseridas dentro de cada contexto (CETESB, 2007). No caso da Produção mais Limpa, seu conceito ultrapassa o simples controle da poluição: envolve pesquisa e desenvolvimento de novos processos, materiais e produtos que resultem em maior eficiência no uso de recursos e energia. Dado que prevenção é a palavra-chave de governos e empresas comprometidas com o desenvolvimento sustentável, faz-se necessário assegurar estratégias ambientalmente amigáveis e economicamente robustas de produção e de serviços.

A aplicação da metodologia de implantação de técnicas de P+L a processos produtivos pode permitir a obtenção de soluções mais adequadas para os problemas ambientais, tendo em vista que sua prioridade está calcada na identificação de alternativas de não-geração dos resíduos produzidos nos processos. Além da identificação, quantificação, tratamento e disposição final de resíduos, a metodologia também procura entender a natureza do resíduo ("por que, como e quando o resíduo é gerado?"). Porém, a metodologia não fornece as ferramentas tecnológicas necessárias para atingir as metas traçadas; quando apresenta, geralmente a sua adoção requer um grande conhecimento técnico e especializado.

Como parte sensível da situação apresentada, o objetivo geral da presente proposta de trabalho está voltado para o desenvolvimento de uma metodologia que incorpore os fundamentos de um modelo de gestão ambiental ao uso eficiente e eficaz de tecnologias específicas, visando à racionalização do consumo de água e da geração de efluentes na indústria química. Adicionalmente, a filosofia de gestão procura apreender o Diagrama de Fontes de Água, utilizando aspectos de valoração ambiental como suporte à tomada de decisão, identificada como oportunidade de redução de impactos ambientais decorrentes das atividades industriais.

Como objetivos específicos desta proposta, têm-se:

1. Propor um modelo de gerenciamento do reúso de águas e efluentes industriais com um formato que incorpore o método DFA como ferramenta de um modelo P+L; a metodologia considera um conjunto de procedimentos cujo parâmetro final de seleção de alternativas de reúso leva em conta a valoração de danos sobre os recursos hídricos;

2. estudar melhorias de condições operacionais nos ciclos de concentração das torres de resfriamento da refinaria;

3. prever índices de estabilidade da água quanto aos aspectos de corrosão e incrustação, para a análise do sistema de resfriamento;

4. estabelecer um procedimento para seleção de cenários promissores;

5. estabelecer um procedimento para regeneração local de cenários promissores;

6. determinar parâmetros que permitam avaliar economicamente os cenários promissores;

7. apresentar um formato de avaliação de alternativas de cenários a partir do levantamento de parâmetros relacionados a índices que incorporem a valoração de externalidades negativas de impactos ambientais decorrentes do lançamento de efluentes em corpos hídricos.

O trabalho aqui desenvolvido toma como base a metodologia P+L, na qual suas etapas serão adaptadas para incorporar outra ferramenta estratégica ambiental, direcionados para redução dos impactos ambientais.

A preocupação com as características de originalidade do trabalho pode ser apontada pela consolidação da necessidade de se estabelecer um elo que demonstre as decisões gerenciais (gestão estratégica ambiental), intimamente influenciadas pelo arsenal tecnológico disponível e em constante evolução (conhecimento técnico). Sob tal perspectiva, pretende-se fornecer subsídios conceituais para a estruturação e o desenvolvimento continuado de um modelo de gestão sustentável dos recursos hídricos, sendo um instrumento adicional e alternativo na tomada de decisões ambientais nas organizações.

Neste contexto, os Capítulos 2, 3, 4 e 5 integram a revisão bibliográfica deste trabalho, optando-se por apresentá-la sob o formato distribuído dos capítulos supracitados, de modo a facilitar a visibilidade do numeroso conjunto de informações conceituais tratadas. Assim, o Capítulo 2 procura traçar um panorama do desenvolvimento do conceito de sustentabilidade, como foco na dimensão ambiental, onde o principal objetivo está na descrição e atualização de abordagens e modelos específicos de gestão ambiental. Consiste na apresentação de tendências tecnológicas que orientam a tomada de decisão empresarial visando à adequação de alternativas para a melhoria de processos relacionada

a uma efetiva gestão de recursos hídricos industriais. O capítulo é estruturado de modo que se compreendam os caminhos que levaram à maturidade do pensamento ecológico, intimamente ligado ao processo de desenvolvimento econômico. Assim, a sustentabilidade é o pano de fundo para discutir a evolução do gerenciamento ambiental, apontando a necessidade de se integrar técnicas e ferramentas promissoras ao contexto, como a Produção mais Limpa e a Integração de Processos (tratada no Capítulo 3), bem como a valoração econômica de impactos ambientais relativos aos recursos hídricos (tratada no Capítulo 4). Os modelos para o gerenciamento integrado de processos industriais com foco no uso racional de matérias-primas, água e energia é abordada no Capítulo 5. A partir de tais conceitos e técnicas, estrutura-se uma metodologia que torna a incorporação de ferramentas tecnológicas perfeitamente integradas ao programa de gestão da empresa, dentro da proposta de reúso de águas e efluentes. Esta abordagem conceitual procura ser trilhada ao longo do Capítulo 6, descrevendo a metodologia integrada que potencialize o gerenciamento sustentável do uso racional da água nos processos industriais, estruturado na tríade P+L (modelo), DFA (ferramenta) e Valoração (impacto). O Capítulo 7 apresenta os resultados deste trabalho, aplicando o modelo aqui denominado P+ÁGUA a um caso real de refinaria de petróleo nacional. Por fim, o Capítulo 8 trata das conclusões deste estudo, relacionando os propósitos estabelecidos pelos seus objetivos. Sugestões para novas contribuições também são apresentadas neste capítulo.

CAPÍTULO 2

SUSTENTABILIDADE E MODELOS PARA GERENCIAMENTO E REDUÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL

"(...) Vocês não sabem como reparar os buracos da camada de ozônio!
Vocês não sabem como salvar os salmões das águas poluídas!
Vocês não podem ressuscitar os animais extintos!
Vocês não podem recuperar as florestas que um dia existiram, onde hoje é deserto.
Se vocês não podem recuperar nada disso, então, por favor: parem de destruir! (...)"

(Severn Cullis-Suzuki, em seu discurso durante a Rio-92, na época com doze anos de idade e representante da Environmental Children's Organization)

Resumo – Este Capítulo fornece a base conceitual que capacita a discussão do tema sustentabilidade no ambiente organizacional, com uma breve exposição acerca dos aspectos históricos que permitiram amadurecer o conceito de desenvolvimento sustentável, estabelecendo sua importância no contexto empresarial. Em seguida, apresentam-se os principais modelos de gestão industrial adotados como forma de conduzir à aplicação efetiva na direção da sustentabilidade corporativa. Adicionalmente, são discutidas algumas das contribuições atuais da literatura que permeiam o tema, em particular para a aplicação do modelo considerado um dos mais relevantes programas para o alcance da responsabilidade ambiental corporativa: a Produção mais Limpa.

Palavras-chave: Desenvolvimento Sustentável, Gestão Ambiental Empresarial, Produção mais Limpa.

2.1. DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL: ASPECTOS HISTÓRICOS

"Se você encontrasse canibais comendo com talheres seria possível dizer que eles evoluíram?" Por trás dessa curiosa pergunta provocada pelo consultor britânico John Elkington (Padworth, 1949) em seu livro *Cannibals with forks: the triple bottom line of 21st century business* (1999) (lançado no Brasil em 2011 com o título "Sustentabilidade – Canibais com Garfo e Faca"), reportando ao questionamento original do poeta polonês Stanislaw Lec (1909-1966), há uma alusão implícita à resistência do mundo corporativo em

atender à “teoria dos três pilares” (*Triple Bottle Line: Profit, Planet, People*). A base conceitual que permite alicerçar os pilares da sustentabilidade nas empresas estabelece que a lucratividade gananciosamente buscada por elas deve ser equilibrada por ações de qualidade ambiental e justiça social. A analogia das empresas a canibais corporativos em um mundo competitivo revela o descrédito na utilização de utensílios civilizados (talheres - garfo, faca e colher) para a adoção de dietas no cardápio socioambiental.

Para entender como a equidade social e a proteção ambiental vem moldando um novo padrão de produção e consumo na sociedade é preciso voltar algumas décadas no tempo, onde as primeiras discussões sobre crescimento econômico e meio ambiente foram levantadas. Quando o biólogo norte-americano Barry Commoner (Nova York, 1917) publicou a obra “*The Closing Circle: Nature, Man, and Technology*” (1971), apresentando os efeitos do desenvolvimento industrial e tecnológico na crise ambiental e na qualidade de vida, alicerçados em suas quatro “leis da ecologia”, os pilares de uma economia sustentável começavam a ser erguidos. Antes disso, em 1968, a obra de Paul Ehrlich (Pensilvânia, 1932), “*The Population Bomb*”, já procurava alertar para um iminente colapso da sociedade, na ausência de controle populacional, caso fosse mantido o cenário de produção e consumo de alimentos, numa clara adesão às previsões catastróficas e polêmicas sentenciadas pelo demógrafo britânico Thomas Malthus (1766-1834).

O modelo de crescimento econômico erguido com a Revolução Industrial teve como lema a busca do lucro a qualquer preço, tendo reflexos no aumento de produção. Para alcançar esse objetivo, o ganancioso padrão capitalista-industrial se apropriou da exploração desmedida dos recursos naturais necessários à produção, avesso à importância do zelo pela capacidade de recuperação natural dos ecossistemas; tudo isso em prol de benefícios econômicos próprios e sem menção aos custos socioambientais. A partir da década de 1950, uma série de acidentes ambientais provocados pela operação industrial começou a chamar a atenção da sociedade pela questão do impacto negativo e degradação da qualidade ambiental. Episódios marcantes, como a contaminação de mercúrio na Baía de Minamata no Japão (1956), a nuvem tóxica liberada na atmosfera por uma fábrica em Seveso, na Itália (1976), o vazamento de isocianato de metila de uma fábrica em Bhopal, na Índia (1984), e o vazamento de óleo pelo navio-tanque Exxon-Valdez no Alasca (1989) levaram a sociedade a repensar sua conduta em relação ao uso responsável dos recursos naturais e a busca de melhoria do controle ambiental decorrente das atividades industriais.

Diante dessa perspectiva, no ano de 1972 o Clube de Roma, conhecida associação de políticos e empresários, divulgou o relatório intitulado “Os Limites do Crescimento” (MEADOWS *et al*., 1972). Neste, o problema da degradação ambiental foi vinculado ao crescimento populacional e à exploração desordenada dos recursos naturais, incutindo a

ideia de que a preservação de tais recursos dependia essencialmente do equilíbrio populacional, econômico e ecológico. Apresentava uma visão tipicamente neomalthusiana, calcada no pessimismo diante da capacidade da Terra de sustentar o crescimento econômico. Apesar disso, foi com essa perspectiva que a reinante concepção de crescimento industrial, influenciada pela ausência de limites de exploração de recursos, iniciava sua irreversível trajetória de declínio.

À luz dessa discussão, a Organização das Nações Unidas (ONU) promoveu, ainda em 1972, a Conferência de Estocolmo (Suécia), que resultou na Declaração sobre o Ambiente Humano, a qual vinculou a dimensão ambiental a uma nova postura dentro do modelo tradicional de crescimento econômico e do uso dos recursos naturais. O evento, além de ter descortinado a perspectiva global dos problemas ambientais, favoreceu a criação de organismos governamentais preocupados em estabelecer regulamentações ambientais na tentativa de controlar o problema. Foi dessa conferência que resultou o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente / *United Nations Environmental Program* (Pnuma / Unep), com o objetivo de coordenar as ações internacionais de proteção ao meio ambiente e de desenvolvimento sustentável.

Neste momento, já começava a ser aceita a visão de interdependência entre o modelo clássico de desenvolvimento e o meio ambiente. Diante disso, como uma alternativa a essa concepção, surgiu, em 1973, o termo “ecodesenvolvimento”, embrião do conceito de desenvolvimento sustentável, e que teve como grande expoente o economista polonês Ignacy Sachs (Varsóvia, 1927). Este, por sua vez, defendia a necessidade da educação, da participação e da preservação dos recursos naturais.

Outras iniciativas foram então lançadas, em 1974, com a Declaração de Cocoyok, resultado de uma reunião da Conferência das Nações Unidas sobre Comércio e Desenvolvimento e do Programa de Meio Ambiente das Nações Unidas. O documento vinculou a explosão populacional, bem como a degradação ambiental, à absoluta falta de recursos dos países; no entanto, deixou claro que os problemas globais também são frutos do elevado nível de consumo dos países desenvolvidos. No ano seguinte, a Declaração de Cocoyok foi aprofundada em um estudo da Fundação sueca *Dag-Hammarskjöld*, intitulado “Relatório Que Faire” (Que Fazer), face à evidência de relação entre a atividade humana e a degradação ambiental, acirrando as discussões relativas ao abuso de poder e sua ligação com a degradação ecológica.

Em 1980, um documento intitulado “Estratégia de Conservação Mundial” (*World’s Conservation Strategy*) apresentou pela primeira vez o termo Desenvolvimento Sustentável (IUCN *et al*., 1980, *apud* BELLEN, 2006, p. 23). Elaborado pela União Internacional para a Conservação da Natureza e dos Recursos Naturais (IUCN, *International Union for the*

Conservation of Nature and Natural Resources), com a colaboração do Pnuma e do *World Wildlife Fund* (WWF), definiu a sustentabilidade como uma característica de um processo ou atividades voltadas para a integridade social e ecológica (IUCN *et al*., 1980, *apud* BELLEN, 2006).

Para avaliar as questões críticas sobre o meio ambiente e orientar soluções, a ONU criou, em 1983, a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento / *World Commission on Environment and Development* (CMMAD / WCED), presidida pela ex-primeira-ministra da Noruega, Gro Harlem Brundtland. O estudo resultou na divulgação do relatório intitulado "Nosso Futuro Comum", em 1987, onde o termo "Desenvolvimento Sustentável" foi apresentado como "aquele capaz de satisfazer as necessidades das gerações presentes sem comprometer a capacidade de garantir as necessidades das futuras gerações". Em relação ao vago conceito apresentado em 1980, esta concepção já induz a ideia de que o único modo de se evitar que o planeta e a humanidade sofram com as iminentes catástrofes, como a amplamente discutida questão do aquecimento global, seria cumprir as ações preconizadas por esta proposta.

O documento propunha vincular o desenvolvimento econômico à preservação ambiental, o que seria consolidado com o contorno de três grandes desafios: (i) a garantia da disponibilidade de recursos naturais para o uso eficiente e controlado às necessidades da humanidade; (ii) o respeito aos limites tolerados pela capacidade de absorção da biosfera com relação aos resíduos e poluentes que nela são lançados; e, por fim, (iii) o desafio da redução da pobreza no mundo. Isto significa que toda relação do homem com a natureza – incluindo as atividades industriais, comerciais e de serviços – deve ser pautada com o mínimo de impacto ambiental, procurando preservar a biodiversidade.

Neste sentido, o conceito de desenvolvimento sustentável ainda permite diversas interpretações, porém já deixa evidente que é preciso buscar o uso racional dos recursos naturais e zelar pela proteção do meio ambiente. Este novo enfoque inclui desenvolver políticas que assegurem a adoção de estratégias eficazes para o gerenciamento dos recursos naturais empregados para promover a satisfação das necessidades humanas. Para isso, o documento da ONU (CMMAD, 1991, p. 49) propõe um processo de transformação harmônico entre "a exploração dos recursos, a direção dos investimentos, a orientação do desenvolvimento tecnológico e a mudança institucional".

Em 1992, vinte anos depois da reunião pioneira de Estocolmo, realiza-se no Rio de Janeiro a Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD), conhecida como Eco-92, com a participação de 178 países. Tendo sido um importante marco na discussão dos problemas globais na medida em que despertou para uma nova consciência acerca do modelo de desenvolvimento vigente e suas limitações.

Esta conferência representou a culminância de um processo de discussão, registrando incontáveis manifestações a favor da sustentabilidade ambiental, partindo das mais diversas áreas de conhecimento, seja na forma de publicações acadêmicas, seja em material de cunho mais panfletário e político. Com a presença maciça de chefes de Estado, o evento deu origem a cinco documentos e à chamada Agenda 21, reafirmando o compromisso das nações do planeta de proteger o meio ambiente sob a tutela do desenvolvimento sustentável, e priorizando a qualidade de vida humana. O evento auxiliou a consolidar e a nivelar a percepção do discurso que associa desenvolvimento socioeconômico e alterações do meio ambiente.

Diversas ações se seguiram após as constatações do desenvolvimento socioeconômico-ambiental, como o Protocolo de Quioto (Japão), que em 1997 firmou o comprometimento dos países industrializados de reduzir, até 2012, em média 5% suas emissões de CO_2 e outros gases do efeito estufa (CFCs - clorofluorcarbonos, PFCs - perfluorocarbonos, óxidos de nitrogênio e metano), em relação ao ano de 1990. O objetivo seria controlar as consequências do aquecimento global, onde o aumento da temperatura do planeta poderia provocar, segundo cientistas, secas, enchentes, elevação do nível dos oceanos e a extinção de centenas de espécies em um curto período de tempo. O acordo entrou em vigor em 2005 (Tratado de Quioto), após várias negociações, com 141 países signatários. Os Estados Unidos, embora os maiores emissores destes gases, cuja economia é altamente dependente de combustíveis fósseis, alegaram prejuízos econômicos e a exclusão injusta dos países em desenvolvimento; por esta razão, não ratificaram o acordo, preferindo apostar alternativamente no aperfeiçoamento de tecnologias menos poluentes.

A proposta estabelecida pelo Tratado de Quioto seria alcançada através de parâmetros financeiros, onde se destaca o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), do qual fazem parte países em desenvolvimento. Trata-se de uma medida de incentivo à produção de energias limpas, como a solar, a eólica e a que emprega biomassa, com o objetivo de remover o carbono da atmosfera, por meio de projetos de redução de emissões. Criou-se um mercado mundial de Reduções Certificadas de Emissão (RCE), onde a redução de níveis emitidos para a atmosfera pode ser comercializada entre países sob a forma de créditos de carbono, viabilizando o alcance mútuo de metas. No entanto, há quem veja nisso um pretexto para que os paises desenvolvidos continuem poluindo.

Em setembro do ano 2000, representantes de 191 países-membros da ONU, inclusive o Brasil, estabeleceram um compromisso com a sustentabilidade do planeta ao aprovarem uma lista de objetivos gerais de desenvolvimento econômico, social e ambiental, que ficou conhecida como Declaração do Milênio. Amparadas em 18 metas e 48 indicadores, a Declaração do Milênio ambiciona corrigir as deformações do planeta

causadas pela desigualdade social e pela utilização predatória dos recursos naturais, através de medidas concretas de governos e sociedade, até o ano de 2015. São eles: (1) Erradicar a extrema pobreza e a miséria; (2) Universalizar o ensino básico; (3) Promover a igualdade entre sexos e a autonomia da mulher; (4) Reduzir a mortalidade infantil; (5) Melhorar a saúde das gestantes; (6) Combater o HIV/AIDS, a malária e outras doenças; (7) Garantir a sustentabilidade ambiental; e (8) Estabelecer uma parceria global pelo desenvolvimento. Para Almeida (2007), a Declaração do Milênio é tributária do novo quadro conceitual que nasceu no bojo dos sombrios prognósticos da Avaliação Ecossistêmica do Milênio.

Em relação ao Brasil, segundo informações levantadas pelo Programa de Desenvolvimento da ONU (PNUD) e publicadas no Relatório de Desenvolvimento Humano da ONU, em 2006 (RDH / ONU, 2006), algumas das metas até o ano de 2005 já haviam sido aalcançadas, ao passo que outras se encontravam em vias de serem atingidas, com exceção das metas (5), (7) e (8). A redução do nível de pobreza extrema e da fome chegou a um quarto do nível de 1990, no ano de 2007, proporcionado pela estabilidade econômica conquistada no período (BRASIL, 2010). A Figura 2.1 personaliza a evolução percentual do alcance de metas pelo Brasil até o ano de 2005. No que tange à mortalidade materna, houve redução nas regiões Norte e Sudeste, mas aumentou no Nordeste, no Centro-Oeste e no Sul do país, segundo o Unicef (Fundo das Nações Unidas para a Infância) (RDH / ONU, 2006), no período entre 1997 e 2005. O índice de desmatamento reduziu neste período, bem como o emprego de gases que agridem a camada de ozônio; a eficiência energética aumentou, com o maior uso de fontes renováveis. O acesso à água potável tende a ser cumprido pelo país, porém há uma incerteza quanto à questão do saneamento básico. O país tem se destacado como principal articulador do G-20 nas negociações comerciais da Rodada de Doha, da Organização Mundial do Comércio, além de ser proativo na condução de parcerias globais por meio da Cooperação Sul-Sul.

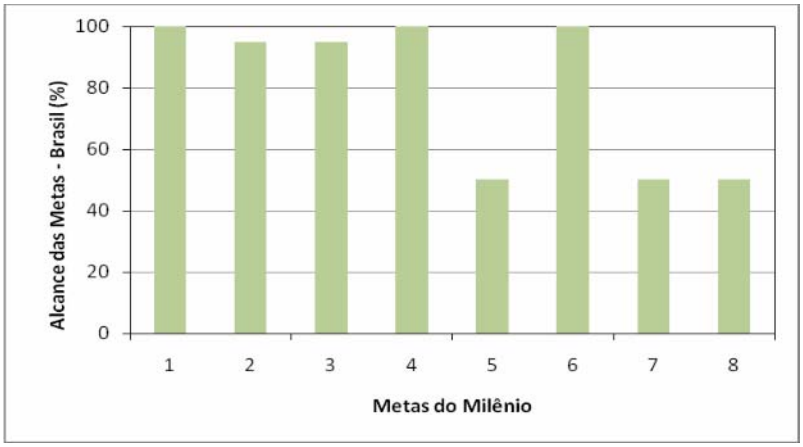


Figura 2.1 – Progresso dos objetivos do milênio alcançado pelo Brasil até o ano de 2005, segundo dados do PNUD / ONU (2009)

Dois anos depois (2002), o documento foi ratificado pelos chefes de Estado reunidos na Cúpula sobre Desenvolvimento Sustentável (denominada Rio+10), em Johannesburgo (África do Sul). O cumprimento dos objetivos no prazo previsto já começava a ficar duvidoso. Para Almeida (2007, p. 54), "não há formulação de política ou solução possível sem o envolvimento dos três atores fundamentais – empresas, governos e sociedade civil -, tendo o reconhecimento produzido pela ciência como orientação". Aliás, essa era a principal recomendação do evento: estabelecer as parcerias público-privadas (PPP's), a fim de viabilizar a prática efetiva do desenvolvimento sustentável.

Em 2007, a ilha de Bali (Indonésia) sediou a 13ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudança Climática, onde representantes de 190 países discutiram as bases de um novo acordo substituto do Tratado de Quioto, que vence no final de 2012. A reunião estabeleceu um plano estratégico ("Mapa do Caminho") para as negociações de um novo acordo nos próximos dois anos sobre mudanças climáticas, mantendo as metas de redução de emissões causadoras do efeito estufa. Em dezembro de 2011, a nova edição da Conferência do Clima (COP-17) realizada em Durban, na África do Sul, foi marcada por um avanço considerado histórico: um acordo assinado para que todos os grandes poluidores, entre aqueles de países desenvolvidos e em desenvolvimento, tomem medidas contra a emissão de gases do efeito estufa. O acordo, denominado Plataforma de Ação Avançada de Durban, tem força legal, mas só entrará em vigor em 2020. Neste evento também foi renovado o Tratado de Quioto, que poderá valer até 2017 ou 2020, além de lançado o chamado Fundo do Clima Verde, com o objetivo de reunir doações pelos países desenvolvidos em torno de 100 bilhões de dólares até 2020, voltado para auxiliar os países em desenvolvimento a enfrentarem os efeitos das mudanças climáticas.

Em 2010, foi lançada a norma ISO 26.000, cujo objetivo é servir como um guia de diretrizes (sem certificação) para auxiliar as empresas no engajamento de políticas baseadas na responsabilidade social e sustentabilidade. A norma encontra-se calcada na aplicação pelas empresas de sete princípios, dentre os quais: (i) Responsabilidade (*accountability*); (ii) Transparência; (iii) Comportamento Ético; (iv) Legalidade; (v) Consideração pelas partes interessadas (*stakeholders*); (vi) Normas Internacionais; e (vii) Direitos Humanos. Há ainda os temas centrais do documento, onde as empresas deverão estabelecer ações para incluí-las em seu modelo de gestão, e envolvem: Direitos Humanos; Práticas de Trabalho; Meio Ambiente; Práticas Leais de Operações; Combate à Corrupção e Propina; Consumidores; e Desenvolvimento e Participação Comunitária. A norma certamente representa mais um avanço em relação à responsabilidade socioambiental corporativa, e contribuirá bastante para aumentar a competitividade dos negócios por meio das ações ligadas ao desenvolvimento sustentável.

Vinte anos após a realização da importante Conferência no Rio de Janeiro, em 1992, a cidade novamente se tornou sede da Conferência das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável, chamada de Rio+20, em junho de 2012. Na pauta da discussão, além de renovar o compromisso dos líderes mundiais com o desenvolvimento sustentável, esteve a economia verde, modelo econômico que busca a baixa emissão de carbono, como o emprego das energias renováveis (energia limpa), em paralelo ao crescimento sustentável e à diminuição da pobreza. O documento final, chamado “O Futuro que Queremos”, apontou a pobreza como principal entrave ao desenvolvimento econômico, ambiental e social dos países, e delegou à economia verde um importante papel para o desenvolvimento humano e do meio ambiente, o que também provocou questionamentos contrários a essa concepção. Uma iniciativa marcante foi a dos prefeitos das 59 maiores cidades do mundo, comprometendo-se com a redução de emissões de gases de efeito estufa em 1,3 bilhão de toneladas até 2030. Embora não tenha demonstrado a expressividade que marcou a Rio-92, e há quem considere que o evento de 2012 foi ofuscado pelos reflexos da crise econômica de magnitude mundial, sua contribuição trouxe à tona a necessidade de atualização dos mecanismos de conduta dos países para o alcance das metas de desenvolvimento sustentável.

Na visão de Almeida (2007, p. 56), “a meta do desenvolvimento sustentável requer capacidade de pensar e operar tendo em conta as três dimensões (econômica, social e ambiental) em conjunto, sem predominância de uma sobre as outras”. Isso significa pensar e agir por meio da transversalidade: um conceito que reflete a necessidade de observar os ecossistemas de modo integrado, uma vez que os processos da natureza constituem um sistema inter-relacionado. Já Dias (2011, p. 37) defende que desenvolvimento sustentável é

um conceito amplamente utilizado, mas sua interpretação é de difícil convergência: para alguns, alcançá-lo requer um contínuo crescimento econômico com base em um manejo mais racional dos recursos naturais e do uso de tecnologias que sejam mais eficientes e que poluam menos; para outros, ele é visto como um projeto social e político que visa eliminar a pobreza, aumentar a qualidade de vida e atender às necessidades básicas da humanidade. Entretanto, a julgar pelo consenso, desenvolvimento sustentável pressupõe a observação simultânea e balanceada dos eixos do crescimento econômico, preservação do meio ambiente e a equidade social. Assim, trata-se de enfrentar um desafio estabelecido pela mudança do paradigma cartesiano (visão mecanicista e centralizada de crescimento econômico) para o da sustentabilidade (enfoque holístico e descentralizado de desenvolvimento), e que requer não somente um conhecimento interdisciplinar, mas principalmente transdisciplinar.

O questionamento na obra de John Elkington, no início deste item, revela a necessidade de romper o paradigma cartesiano, diminuindo resistências e vícios corporativos, no sentido de buscar a lucratividade com base em valores que colaborem igualmente para as práticas de responsabilidade ambiental e social.

2.2. SUSTENTABILIDADE NAS ORGANIZAÇÕES

A visão de desenvolvimento sustentável traz para as empresas o compromisso da produtividade sem a degradação ambiental, inserindo na cultura organizacional aspectos da preservação ambiental, inclusive adaptando tecnologias para que se alcancem tais propostas. A prática destes conceitos contribui significativamente para elevar o perfil da empresa, atentando para a eficácia de um modelo de negócio rentável, porém simultaneamente construindo uma sólida imagem de responsabilidade social e ambiental.

Andrew Savitz, um dos mais importantes especialistas mundiais no tema sustentabilidade, em entrevista concedida ao *Jornal Gazeta Mercantil* (GAZETA MERCANTIL, 2007), salienta que o processo de implantação da sustentabilidade em uma empresa pode iniciar-se através de um dirigente de alto escalão ou com alguma gerência de departamento ou área. Como exemplo, cita o caso da empresa Monsanto, onde em 1985 um engenheiro percebeu que poderia eliminar substâncias tóxicas do processo de produção, economizando algo em torno de US$ 250 mil ao reutilizar insumos e evitar o descarte do material. Um superior hierárquico viu isso e começou a incentivar outros engenheiros da empresa a ter ideias desse tipo. Trata-se de um programa que ficou conhecido como “3P’s” (*Pollution Prevention Pays* - “Prevenção de Poluição Paga”). Neste sentido, Savitz recomenda empresas e colaboradores a começarem o processo, de forma

pequena e progressiva, em seus próprios departamentos. Se o funcionário está no departamento de compras, deve começar a fazer certos requerimentos de conduta aos fornecedores. Caso esteja na produção, pode mudar etapas do processo observando valores ambientais. Caso se encontre no setor de relações públicas, pode falar mais abertamente e de forma mais consistente com a comunidade. Na realidade, essa recomendação é um dos fatores críticos para o sucesso de um programa de prevenção de poluição nas empresas: o comprometimento dos níveis hierárquicos superiores, uma vez que são eles que possuem maior capacidade para estabelecer a motivação e firmar a importância do processo de melhoria contínua na empresa ao nível operacional.

Para implantar um programa de sustentabilidade em uma empresa, Savitz propõe uma sequência de cinco etapas, a saber: (1) Escolher questões de sustentabilidade que repercutirão entre os clientes, procurando atender necessidades ou preocupações que eles tenham nas esferas social, ambiental ou econômica; (2) envolver os fornecedores para que as operações fiquem mais sustentáveis; (3) concentrar as ações naquilo que a empresa conhece e faz melhor; (4) antecipar-se às mudanças, transformando o que seriam desafios para os clientes em oportunidades de negócio; (5) capacitar os funcionários para que eles percebam oportunidades e participem da construção delas (GAZETA MERCANTIL, 2007).

Segundo Lustosa (2003, p. 164) existem quatro fatores que induzem as empresas a adotarem práticas ambientalmente saudáveis: (1) as pressões das regulamentações ambientais; (2) as pressões dos consumidores finais e intermediários; (3) a pressão dos *stakeholders* (intervenientes ou grupos de interesse); e (4) a pressão dos investidores. De acordo com dados da Confederação Nacional da Indústria (CNI) (REVISTA VOCÊ S/A, 2008), no ano de 2007 houve um crescimento de dois pontos percentuais referente às empresas que investem mais de 11% do faturamento em meio ambiente, em relação ao ano de 2005 (de 9%, em 2005, para 11%, em 2007). Por outro lado, caiu a quantidade de empresas que investem menos de 3% do faturamento, neste mesmo período (de 56%, em 2005, para 52%, em 2007). Ainda segundo a entidade, os principais motivos que levaram a indústria a investir em projetos sustentáveis em 2007 foram: regulamentos ambientais (60%); exigências para licenciamento dos produtos (54%); alinhamento com a política ambiental da empresa (51%); e atender o consumidor ambientalmente responsável (20%). Conforme esperado, a pesquisa revela que ainda é forte o papel da legislação na decisão das empresas em aderir a projetos dessa natureza.

A necessidade de se adequar às exigências previstas na incipiente legislação sobre o tema acendeu a ideia da valorização de empresas com responsabilidade social e ambiental, consolidando junto à população e aos próprios clientes a imagem de empresa amiga do meio ambiente. Foi vislumbrando essa tendência que em 1992 a Associação

Brasileira da Indústria Química (Abiquim) instituiu o chamado programa Atuação Responsável (*Responsable Care Program*), uma reação voluntária de parte da indústria química nacional visando firmar o compromisso da empresa nos campos de saúde, segurança e meio ambiente, zelando pelo diálogo e pela transparência com o público. Como princípios diretivos, representantes dos padrões éticos que orientam a política de ação da indústria química, tem-se a busca contínua da redução dos resíduos, efluentes e emissões, provenientes de suas atividades. Mesmo as empresas que não aderiram a este programa são submetidas a auditorias ambientais contratadas pelos próprios clientes, onde é traçado um perfil de sua situação e apontadas medidas para redução dos impactos ambientais.

Um exemplo de reconhecimento a organizações que caminham na direção da sustentabilidade é dado pelo *Índice Dow Jones Mundial de Sustentabilidade* (DJSI), utilizado como parâmetro de análise e decisões de investidores social e ambientalmente responsáveis. Lançado em 1999, representa o valor de um grupo de empresas consideradas sustentáveis, segundo os desempenhos econômico, ambiental e social de mais de 2.500 empresas em 57 setores (DJSI, 2008). Suas ações exibem expressiva valorização, quando comparadas às tradicionais. Além da necessidade de manter suas políticas alinhadas aos princípios do tripé da sustentabilidade (*Triple Bottom Line*: econômico, ambiental e social), as empresas são ainda avaliadas em termos de governança corporativa, gestão de marca e de risco, mudanças climáticas, obrigações com fornecedores e projetos sociais. Inspirado no DJSI, a Bolsa de Valores de São Paulo (Bovespa, atual BM&F Bovespa), em conjunto com Associações e ONGs, criou o Índice de Sustentabilidade Empresarial (ISE) (BM&F BOVESPA, 2008), adotando parâmetros que demonstrem a responsabilidade socioambiental das empresas.

Para avaliar o grau de sustentabilidade de um sistema foram propostos diversos indicadores; os mais utilizados e consideradas ferramentas promissoras são: (i) *ecological footprint method,* conhecido como “Pegada Ecológica” (WACKERNAGEL e REES, 1996, In: BELLEN, 2006), o (ii) *dashboard of sustainability* (Painel de Controle da Sustentabilidade) (HARDI, 2000, In: BELLEN, 2006)*;* e o (iii) *barometer of sustainability* (Barômetro de Sustentabilidade) (PRESCOTT-ALLEN, 1997, In: BELLEN, 2006). Destes, a “pegada ecológica” é a mais conhecida, sendo calculada como a soma de todos os componentes que podem causar impactos ambientais, como a área de energia fóssil, de terra arável, de pastagens, de floresta, de urbanização, e do mar. Como o objetivo é diminuir a “pegada ecológica”, uma sociedade sustentável procura tornar este parâmetro inferior à capacidade de carga (ou biocapacidade) do planeta ou região. Segundo Dias (2011, p. 53), o valor que garante a sustentabilidade é de 2,1 hectares/ano por pessoa; a média brasileira é de 2,4 hectares/ano por pessoa.

O conceito de “pegada ecológica” permitiu a criação de um termo mais restrito, o de “pegada de carbono”, utilizado para calcular os impactos ambientais provocados pelas emissões de CO_2 individuais ou coletiva através da análise de ciclo de vida de um produto ou serviço. Outro termo que tem sido discutido é a “pegada hídrica”, onde já existe interesse em padronizar uma norma internacional (ISO 14.046, “*Water Footprint: Requirements and Guidelines*”) que estabeleça uma metodologia de avaliação de impactos sobre os recursos hídricos, com base na análise de ciclo de vida; a norma encontra-se em fase de discussão, com previsão de lançamento para 2013/2014.

2.3. GESTÃO AMBIENTAL EMPRESARIAL E ABORDAGENS PARA A SOLUÇÃO DOS PROBLEMAS

A gestão ambiental pode ser entendida como um mecanismo inserido na abordagem estratégica das empresas, cuja visão holística e sustentada na política, no planejamento e gerenciamento ambiental, auxilia no alcance da sustentabilidade nas organizações. Seiffert (2011, p. 55) acrescenta o monitoramento ambiental como o quarto integrante deste conceito. Já para Barbieri (2007, p. 25), a Gestão Ambiental está relacionada com

> as diretrizes e as atividades administrativas e operacionais, tais como, planejamento, direção, controle, alocação de recursos e outras realizadas com o objetivo de obter efeitos positivos sobre o meio ambiente, quer reduzindo ou eliminando os danos ou problemas causados pelas ações humanas, quer evitando que eles surjam.

As propostas de gestão ambiental empresarial devem se apoiar em três critérios de desempenho: eficiência econômica, equidade social e respeito ao meio ambiente, parâmetros estes que devem ser considerados simultaneamente, pois representam com propriedade os preceitos da sustentabilidade. Sob esse prisma, a gestão ambiental pode ser vista como o instrumento que indicará a direção a ser tomada para a sustentabilidade. Entretanto, Seiffert (2007, p. 24) pondera que:

> a gestão ambiental dentro de um contexto organizacional não é somente uma forma de fazer com que as organizações evitem problemas com inadimplência legal e restrições ou riscos ambientais, como também uma forma de adicionar valor a elas, principalmente considerando-se que, atualmente, em todo processo de fusão e aquisição de empresas, o passivo ambiental associado, bem como o seu desempenho ambiental atual, são utilizados como fortes argumentos de negociação.

A maior exposição das empresas a cobranças relacionadas com a responsabilidade ambiental tem levado à exacerbação do papel estratégico da gestão ambiental nas

organizações, incentivando, ainda que compulsoriamente, a adoção de posturas cautelosas e proativas quanto aos efeitos de suas atividades.

Para Moura (2000, *apud* SEIFFERT 2007, p. 34), “não é mais suficiente analisar somente o processo produtivo, mas também olhar o produto em toda sua trajetória, ou seja, desde a matéria-prima até o descarte final”. A formação de uma sociedade que passou a valorizar atitudes de responsabilidade ambiental por parte das empresas foi um fator que auxiliou no compromisso de qualidade dos produtos oferecidos aos consumidores. Parte desta postura se deve à globalização financeira e produtiva da economia mundial, iniciada na década de 1980, modificando os mercados internacionais, e que redefiniu os padrões de concorrência industrial. Como consequência, surgiram normas gerais de padronização, de processo, de qualidade e de gestão ambiental, e que induziram adaptações das empresas às exigências da globalização econômica (LUSTOSA, 2003, p. 167).

Anteriormente a esta fase, as empresas adotavam uma postura reativa em relação ao aspecto ambiental, influenciada sobremaneira pelo teor da legislação pertinente. A globalização dos mercados exigiu que essa postura fosse modificada, passando a um comportamento proativo direcionado para práticas ecologicamente corretas, facilitando o relacionamento das empresas com comunidades vizinhas, com a opinião pública e mesmo com grupos ambientalistas.

A evolução das abordagens quanto à solução dos problemas ambientais de modo mais proativo pode ser mais bem entendida pela análise histórica do processo de gerenciamento ambiental nas últimas décadas, conforme mostra a Figura 2.2.

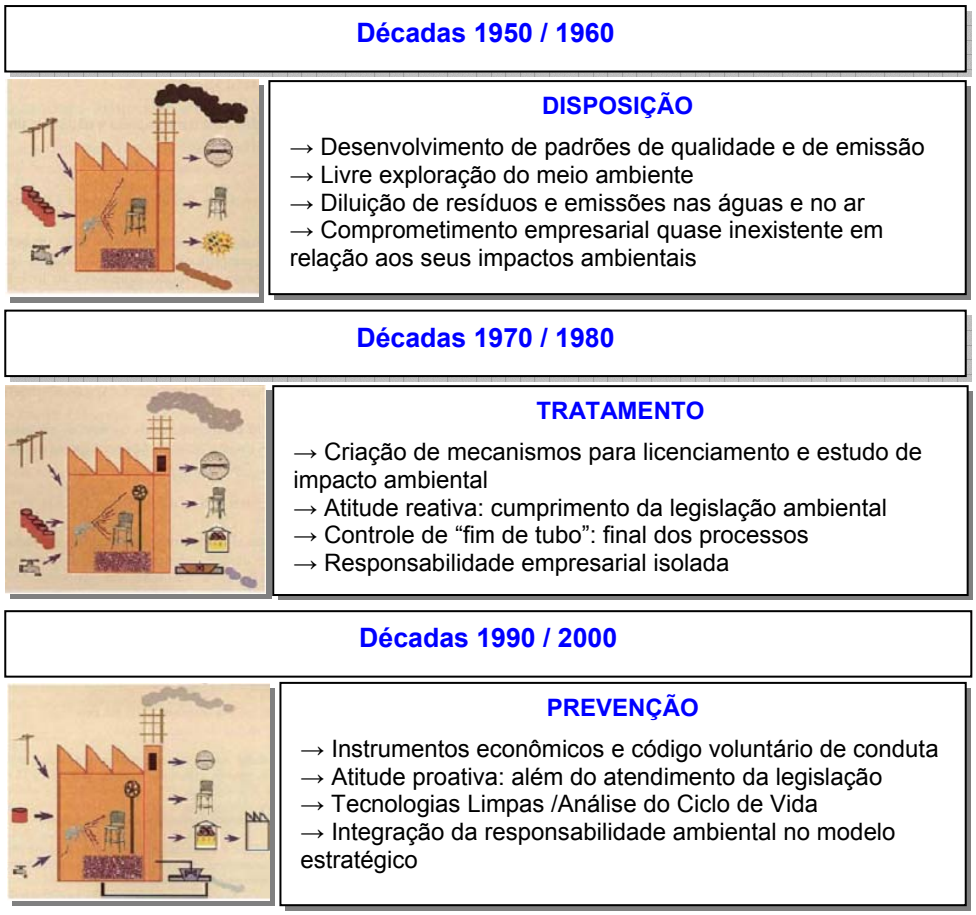


Figura 2.2 – Evolução das questões ambientais (Adaptado de CNTL, 2003)

Em termos gerais, as décadas de 1950 e 1960 foram marcadas pela falta de preocupação dos setores industriais com os impactos gerados pelas suas atividades sobre o meio ambiente; apenas soluções paliativas eram consideradas. Porém, um novo modelo de desenvolvimento já se apresentava como necessário, de modo que nas décadas de 1970 e 1980 foram criadas as primeiras normas para a preservação ambiental, como instrumentos legais de comando e controle, tornando obrigatório a realização de Estudos de Impacto Ambiental e Relatórios de Impactos sobre o Meio Ambiente (EIA-RIMA). Já na década de 1990, a questão ambiental já começava a ser mais bem assimilada pelas empresas no Brasil, influenciadas fortemente pelo rigor dos mecanismos regulatórios; as empresas, no entanto, procuravam conciliar seu interesse econômico ao atendimento das normas ambientais, inseridos na esfera proativa de transformação social. A redução de impactos ambientais nas empresas ganhava contornos que possibilitavam simultaneamente diminuir os custos, e, com isso, programas voltados para a conservação de energia, otimização de processos para maior aproveitamento de matérias-primas, combate a desperdícios, e outros, influenciaram a conscientização pelo uso racional dos recursos naturais. Neste

contexto, a preocupação em implementar programas de qualidade que conduzam a certificações, como as normas ISO 14.001, criada pelos países membros da *International Standard Organization*, trouxe à tona o compromisso de aliar a produtividade de seus negócios ao respeito com o meio ambiente, transpondo a tênue e tradicional resistência que sempre existiu em relação a possíveis investimentos requeridos com a implementação.

A ISO 14.000 tem como objetivo permitir a certificação de sistemas de gestão ambiental de empresas que demonstrem qualidade no desempenho ambiental, estimulando a prevenção da poluição e o aprimoramento da conformidade com as normas ambientais existentes (ALMEIDA, 2007, p. 142-143). Representa "uma ferramenta eficaz para transformar a política em prática de gestão, a custos relativamente baixos" (WBCSD, *apud* ALMEIDA, 2007, p. 143); embora oportuna para grandes empresas, não demonstra os impactos no mercado ou na cadeia de suprimentos, o que restringe sua utilidade como mecanismo auxiliar para decisões de alto nível hierárquico. Além disso, trata-se de uma norma típica de melhoria contínua em ciclos, não favorecendo o processo de aprendizado e inovação por mudanças descontínuas (WBCSD, *apud* ALMEIDA, 2007, p. 143).

A abordagem de controle da poluição se caracteriza pela adoção de práticas que efetivamente demonstrem a postura reativa da empresa diante dos prováveis impactos ambientais negativos gerados por suas atividades. Nesse caso, a empresa procura atenuar tais impactos através de práticas de controle pontuais, investindo na aquisição e no uso de tecnologias adequadas para a finalidade de remediação alternativa, de modo que leve às condições de enquadramento determinadas pelos instrumentos (regulatórios) de comando e controle. Trata-se, portanto, de uma maneira corretiva de atuar sobre os problemas gerados com os processos de produção, utilizando tecnologias especificamente voltadas para o controle da poluição, e sem que significativas alterações sejam realizadas. Mesmo com o amadurecimento da questão ambiental pelo setor industrial, ainda hoje os organismos de comando e controle são peças fundamentais para a fiscalização e o cumprimento da regulamentação ambiental, até porque muitas empresas ainda não enxergam o meio ambiente como uma oportunidade para estabelecer um diferencial competitivo.

Duas concepções tecnológicas fazem parte desta categoria: as tecnologias de remediação e as tecnologias de controle no final do processo (*end-of-pipe*). A primeira atua na tentativa de abrandar os efeitos ocasionados por um problema ambiental; como exemplo, têm-se as tecnologias disponíveis para a descontaminação do solo degradado por um poluente ou ainda para a remoção de petróleo derramado no mar. Já as tecnologias de fim de tubo (*end-of-pipe*) oferecem a oportunidade de tratar a poluição gerada em um processo antes de lançar a carga mássica ao meio ambiente. Para isso, são alocados equipamentos específicos para o tratamento nos pontos de descarga dos poluentes, e que normalmente

agregam diferentes tipos de tecnologia, dependendo da complexidade do processo e da quantidade de contaminantes presentes.

Na realidade, esse enfoque requer um inevitável investimento que ocasiona aumento de custos de produção, aparentemente sem garantias imediatas de benefícios voltados para as atividades produtivas da empresa, à exceção do simples atendimento às exigências legais, tendendo a aumentar, inclusive, diante de restrições mais rigorosas. Aliás, essa é uma percepção que tradicionalmente desalenta a preocupação ambiental por parte das empresas, pois a necessidade de investimento a fundo perdido dificulta um envolvimento sistemático mais ativo na busca por soluções oportunamente viáveis quanto aos aspectos ambientais. Por outro lado, essas soluções se tornam insuficientes quando se percebe que tais medidas se voltam exclusivamente para o controle da poluição, sem preocupação com a possibilidade de reduzir a sua geração.

Uma iniciativa que vai de encontro a essa concepção inicial de controle de efluentes, resíduos e emissões foi lançada em 1990, através de um Decreto-Lei norte-americano, pelo Programa de Prevenção à Poluição (*Pollution Prevention Act*), da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*US Environmental Protection Agency* – Usepa). A Prevenção à Poluição é definida como "qualquer prática, processo, técnica ou tecnologia que vise à redução ou eliminação em volume, concentração e/ou toxicidade dos resíduos na fonte geradora". Trata-se de uma abordagem de gestão ambiental cuja proposta concentra-se na adoção de medidas que evitam ou atenuam preventivamente a geração dos efeitos da poluição no processo, calcada na racionalização e otimização dos recursos naturais.

De acordo com a Usepa (*apud* GIANNETTI e ALMEIDA, 2006, p. 10), um programa de prevenção à poluição (P2 ou PP) deve considerar: (i) a redução ou total eliminação de materiais tóxicos, pela substituição de materiais no processo de produção, pela reformulação do produto e/ou pela instalação ou modificação de equipamentos de processo; (ii) a implantação de ciclos fechados de reciclagem; e (iii) o desenvolvimento de novas técnicas.

Os programas de prevenção à poluição (redução na fonte) procuram evitar o uso de técnicas de remediação, tratamentos de resíduos (final de tubo), reciclagem em circuito aberto, incineração para recuperação de energia, descarte, transferência de resíduos a outros produtos. Considera-se que essas práticas não atuam na redução da quantidade de resíduos ou poluentes, mas tão-somente corrigem impactos causados pela geração de resíduos (GIANNETTI e ALMEIDA, 2006, p. 10). Em substituição, procura-se entender melhor o processo de modo a prevenir na fonte a possível geração do poluente, orientando ações eficazes para o alcance de metas de longo prazo. No entanto, os rejeitos que ainda permanecem devem ser inevitavelmente captados e tratados pelas tecnologias de fim de

tubo. A produtividade é incrementada neste caso, tanto pela economia proporcionada com a redução de custos de matéria-prima, insumos e energia, quanto pela disposição final de resíduos (aterro) e a diminuição de passivos ambientais.

A prevenção da poluição incorpora dois níveis conceituais: uso sustentável dos recursos e controle da poluição (BARBIERI, 2007, p. 122). Os mecanismos destinados ao uso sustentável se estruturam nas atividades conhecidas como 4R's: redução de poluição na fonte, reúso, reciclagem e recuperação energética, nessa ordem, conforme esquema da Figura 2.3. A primeira opção é sempre reduzir na fonte, ou seja, diminuir a quantidade de poluentes e resíduos gerados, alterando suas características. Isto se consegue por meio de susbtituição de equipamentos e matérias-primas, com o uso racional de energia, com reúso e reciclo internos, por exemplo.

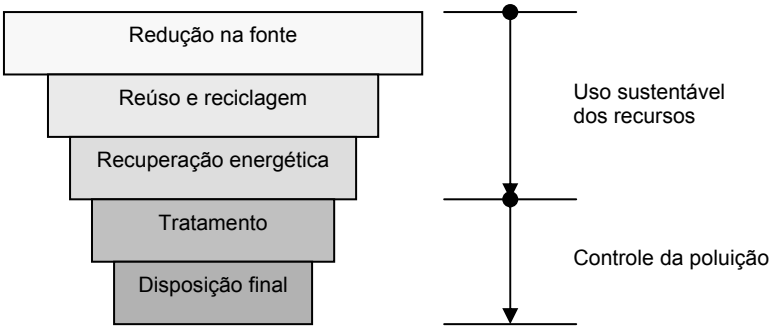


Figura 2.3 – Prevenção da Poluição – Prioridades (BARBIERI, 2007, p. 123)

Um dos modelos que organiza adequadamente as técnicas de redução da poluição foi desenvolvido por LaGREGA *et al*. (1994), que reúne em um diagrama de níveis prioritários as diferentes etapas de intervenção em um processo produtivo. Esses estágios são representados por ações que vão de atitudes gerenciais e tecnológicas, iniciadas com a redução na fonte, envolvendo mudança de produto e insumo, até a disposição final dos resíduos, incluindo alterações tecnológicas, boas práticas operacionais (*good housekeeping*), reúso e reciclagem. De acordo com a estrutura da Figura 2.4, à medida que as ações se deslocam para a esquerda e acima, as soluções se orientam no sentido da prevenção, atendendo melhor a questão da ecoeficiência.

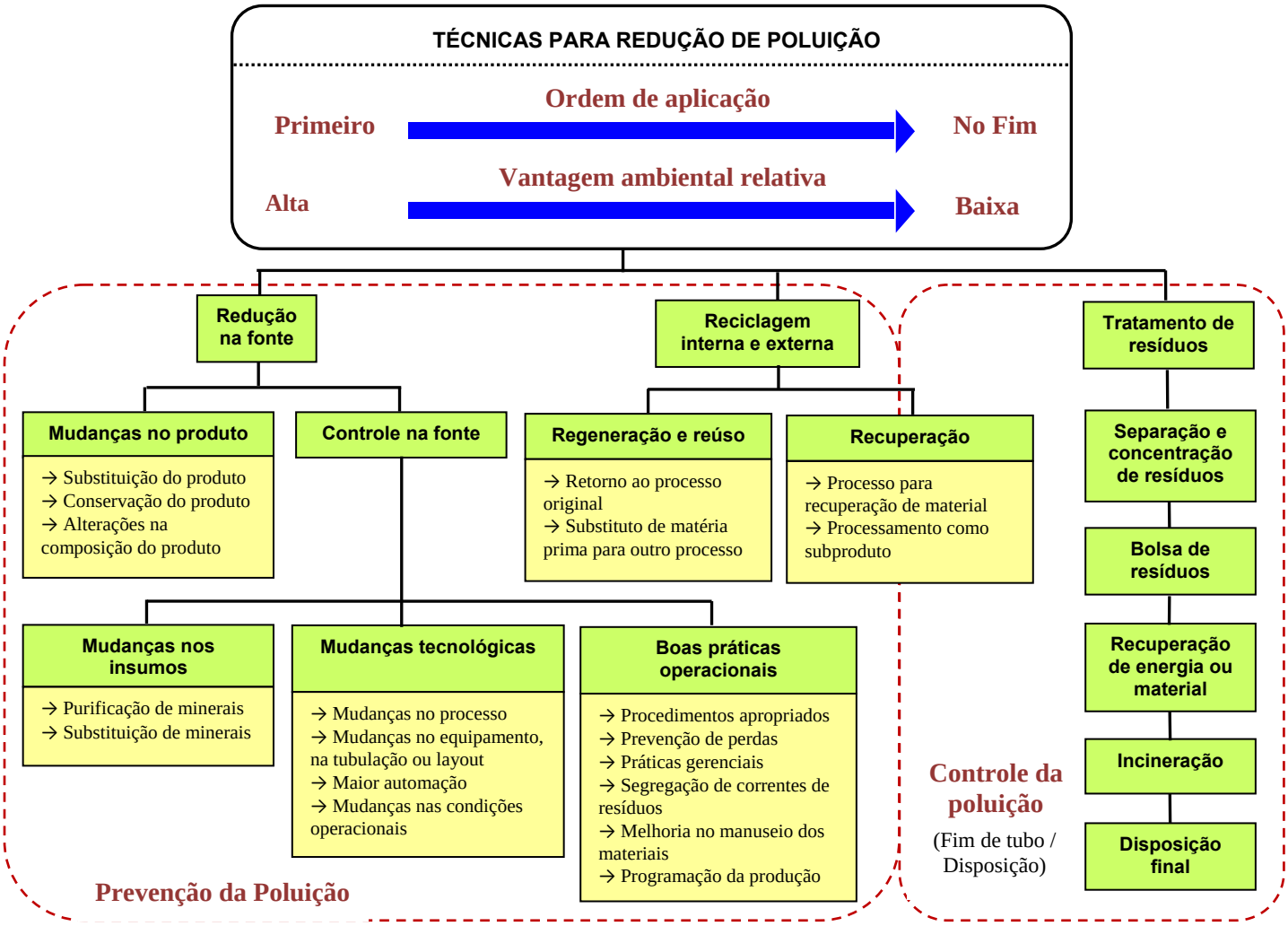


Figura 2.4 – Diagrama de níveis prioritários das ações para prevenção e controle da poluição

A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (Cetesb) desenvolveu uma metodologia de apoio para o planejamento e desenvolvimento de um programa de P2, e que permite adaptações de acordo com as características da empresa interessada. As etapas para a implantação deste programa são listadas no esquema da Figura 2.5.

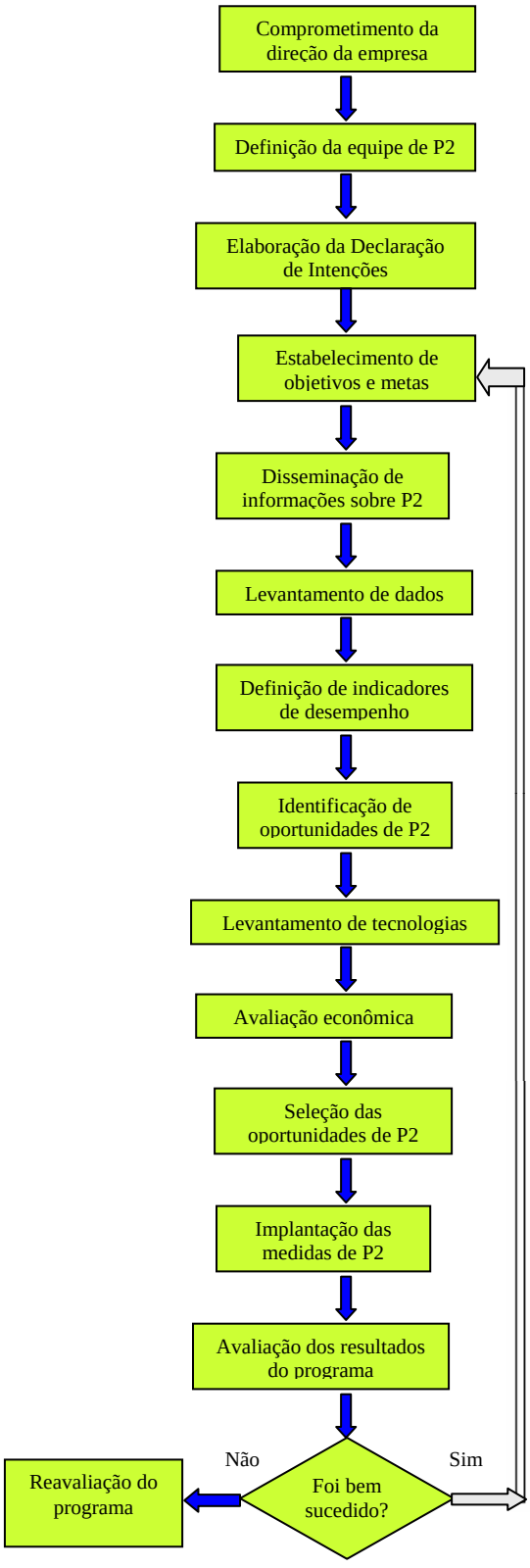


Figura 2.5 – Etapas de desenvolvimento de um programa de P2 (CETESB, 2002)

O programa de P2 segue a lógica de aprimoramento contínuo, permitindo que a empresa se mantenha sempre atualizada com as inovações tecnológicas e as alterações da legislação ambiental. Além disso, promove a melhoria da eficiência nos seus processos produtivos e assegura o envolvimento de todo o corpo funcional e das partes interessadas no programa. Ao concluir o projeto com sucesso, o programa deverá ser reiniciado através do estabelecimento de novos objetivos e metas; nesta fase, deverão ser identificadas novas oportunidades de P2 e também de melhoria dos projetos em andamento. Caso o programa não alcance os resultados esperados, deverão ser avaliadas todas as etapas do programa, de forma a identificar as causas do insucesso, propor medidas corretivas e reiniciar o programa (CETESB, 2002).

Embora tragam benefícios ambientais e econômicos para as empresas, existem barreiras que impedem uma clara divulgação da prevenção da poluição na indústria. Tais barreiras, ligadas principalmente à falta de conscientização em relação aos seus benefícios, podem ser transpostas através de uma divulgação planejada de conceitos e ferramentas de apoio à identificação de oportunidades de melhorias, visando ao monitoramento e à avaliação do desempenho ambiental dos processos produtivos (SANTOS, 2005).

Em relação à abordagem estratégica, a preocupação ambiental assume a pauta do planejamento estratégico da empresa, o que a torna propensa não somente a atender parâmetros de controle e prevenção da poluição, como também buscar oportunidades de mercado que se traduzam em benefícios econômicos decorrentes dessa prática. Dentre os benefícios estratégicos que podem ser alcançados com a gestão ambiental, apontam-se (NORTH, 1997, *apud* BARBIERI, 2007, p. 125): (i) melhoria da imagem institucional; (ii) renovação do portfólio de produtos; (iii) produtividade aumentada; (iv) maior comprometimento dos funcionários e melhores relações de trabalho; (v) criatividade e abertura para novos desafios; (vi) melhores relações com autoridades públicas, comunidades e grupos ambientalistas ativistas; (vii) acesso assegurado aos mercados externos; e (viii) maior facilidade para cumprir os padrões ambientais. Além disso, cumpre salientar que a popularização do interesse ambiental pela sociedade força as empresas a acompanharem essa tendência, à medida em que começam a surgir consumidores e investidores que valorizem empresas que demonstrem preocupação por essas questões.

O Quadro 2.1 resume as características tratadas pelas três abordagens discutidas, as quais se relacionam principalmente a questões comportamentais, tais como: preocupação básica, postura e ações típicas, percepção e comprometimento de gestores e líderes, e áreas envolvidas.

Quadro 2.1 – Gestão ambiental na empresa – abordagens (BARBIERI, 2007, p. 119)

Características	Abordagens		
	Controle da poluição	Prevenção da poluição	Estratégica
Preocupação básica	Cumprimento da legislação e resposta às pressões da comunidade	Uso eficiente dos insumos	Competitividade
Postura típica	Reativa	Reativa e proativa	Reativa e proativa
Ações típicas	Corretivas; Uso de tecnologias de remediação e de controle no final do processo (*end-of-pipe*); Aplicação de normas de segurança	Corretivas e preventivas; Conservação e substituição de insumos; Uso de tecnologias limpas	Corretivas, preventivas e antecipatórias; Antecipação de problemas e captura de oportunidades utilizando soluções de médio e longo prazos; Uso de tecnologias limpas
Percepção dos empresários e administradores	Custo adicional	Redução de custo e aumento da produtividade	Vantagens competitivas
Envolvimento da alta administração	Esporádico	Periódico	Permanente e sistemático
Áreas envolvidas	Ações ambientais confinadas nas áreas geradoras de poluição	Crescente envolvimento de outras áreas como produção, compras, desenvolvimento de produto e marketing	Atividades ambientais disseminadas pela organização; Ampliação das ações ambientais para toda a cadeia produtiva

Segundo levantamento da ISO, no ano de 2008 o Brasil possuía cerca de 2.000 empresas certificadas pela norma ISO 14.001 (JABBOUR *et al*., 2012), a maior quantidade da América do Sul, número superior ao da Rússia; no entanto, na comparação com países do BRIC (Brasil, Rússia, Índia e China), possui menos empresas certificadas do que na Índia e na China. A maioria das certificações no país pertence a empresas dos setores automotivo, químico e petroquímico, todas com investimentos internacionais e com alto nível de impacto ambiental. Grande parte das empresas, principalmente de pequeno e médio

portes ainda tem dificuldades em lidar com a gestão ambiental, adotando estratégias reativas e preventivas. Jabbour *et al*. (2012) constataram que o fato de as empresas brasileiras adotarem uma postura essencialmente preventiva, ainda que focada em ecoeficiência, não cria vantagem competitiva; estas empresas não devem apenas se preocupar em atender à legislação vigente, mas além de promover a reutilização de resíduos e a redução no consumo de matérias-primas, devem buscar a abordagem proativa, procurando desenvolver novos produtos com melhor desempenho ambiental.

2.3.1. Contribuições da literatura

Diversos estudos têm sido propostos nesta direção, principalmente relacionados à minimização da geração de poluição associados aos impactos ambientais. Cabezas *et al*. (1999) apresentaram uma metodologia geral a partir de um algoritmo de redução de resíduos chamado WAR (*waste reduction*), visando avaliar os principais impactos ambientais dentro dos processos, ilustrando sua aplicação com dois estudos de casos utilizando simuladores de processos químicos. Os índices adotados quantificam a redução da poluição e sugerem mudanças no fluxograma do processo. Entretanto, para que se possa efetivamente incorporar a redução de poluição aos processos químicos, a metodologia requer melhorias na estimativa de impactos potenciais ambientais, incluindo aspectos econômicos que possam melhor avaliar as alternativas de mudança no processo, tornando-a uma ferramenta bastante útil na análise.

Reyes-Cordoba *et al*. (2007) apresentaram uma metodologia cujo objetivo é fornecer ferramentas para identificar e gerenciar as informações necessárias para a análise específica do processo, visando à aplicação de estratégias de minimização de resíduos. O modelo proposto privilegia o gerenciamento das informações provenientes de várias fontes e que são necessárias para aplicar metodologias de minimização de resíduos – no campo da Ciência da Informação, a ontologia (do grego *ontos* e *logoi*, “conhecimento do ser”) é utilizada para realizar inferência sobre os objetos pertencentes a um domínio, como uma forma de representação de conhecimento sobre o mundo ou sua parcela. No entanto, o estudo se resume a apresentar e analisar a contribuição do gerenciamento da informação e do conhecimento para a implantação de práticas de prevenção da poluição dentro de processos industriais, discutindo os aspectos chaves para a ontologia para minimização de resíduos. Ou seja, trata-se de um quadro analítico teórico de uma ferramenta que procura integrar as metodologias e fornecer critérios para identificar oportunidades de minimização de resíduos. Dentre as diversas metodologias relacionadas pelos autores estão: a

abordagem do Órgão Ambiental, a Integração de Processos para a Prevenção da Poluição, a metodologia da DuPont, e a Análise do Ciclo de Vida para a otimização de processos.

Uma revisão das metodologias voltadas para a Prevenção da Poluição na indústria é realizada por Hossain *et al*. (2008), e que propõe uma abordagem sistemática e sustentável denominada "IP2M", baseada na análise de ciclo de vida, com considerações de saúde e segurança. É aplicável a processos industriais no estágio inicial bem como durante modificações de projeto que incluam melhorias operacionais mediante otimização do sistema produtivo. Mesmo com uma metodologia bem estruturada e de acordo com os preceitos da Prevenção de Poluição, os autores também não demonstraram sua aplicação através de um estudo quantitativo, embora acrescentem a intenção de fazê-lo em trabalhos posteriores.

Hossain *et al*. (2008) enfocam ainda as limitações gerais que tornam incompletas as metodologias voltadas para a prevenção de poluição, tais como: (i) ausência de uma fase adequada de identificação de oportunidades de prevenção de poluição (P2); (ii) ausência de uma adequada fase de análise de viabilidade; (iii) ausência da consideração de outras opções hierárquicas de gerenciamento ambiental (vide Figura 2.5). Devido às contínuas melhorias tecnológicas, uma opção de reciclo ou de controle *end-of-pipe* pode tornar-se mais viável do que a adoção de P2. Deve-se verificar se a adoção de P2 traduz-se na alternativa ótima, uma vez que podem existir soluções sub-ótimas (soluções alternativas caracterizadas como ótimos locais) mais facilmente implementáveis; (iv) ausência de consideração de critérios de risco e segurança durante a análise de viabilidade das diferentes opções de P2. Tanto risco como segurança constituem fatores muito importantes para reduzir os danos potenciais à saúde humana e ao ecossistema. A abordagem proposta por Hossain *et al*. (2008) prevê essa necessidade no programa de P2.

2.4. GESTÃO INDUSTRIAL SUSTENTÁVEL: O MODELO DA PRODUÇÃO MAIS LIMPA

O conceito de "Produção mais Limpa" (P+L) foi lançado pela Unep e pela DTIE, em 1989, como a "aplicação contínua de uma estratégia ambiental preventiva e integral voltada para processos, produtos e serviços, visando aumentar a eficiência de produção e reduzir os riscos aos seres humanos e ao meio ambiente". Em relação aos processos, conserva as matérias-primas e a energia, eliminando a toxicidade e reduzindo as emissões e os resíduos. Quanto aos produtos, reduz os impactos negativos ao longo do ciclo de vida do produto, da extração das matérias-primas à disposição final. E quanto aos serviços, incluindo as preocupações ambientais no projeto e na prestação de serviços (DIAS, 2011, p. 146).

Em 1998 foi lançada na Coréia do Sul, pelo Pnuma, no “5th *International High-Level Seminar on Cleaner Production*” a Declaração Internacional sobre Produção mais Limpa, documento público de adesão voluntária e com o objetivo de garantir o compromisso dos países em adotar estratégias de P+L. A Declaração pode ser assinada por uma pessoa ou qualquer empresa que queira cumprir voluntariamente as exigências especificadas na declaração, inclusive apoiando as atividades já atuantes de P+L.

As técnicas de P+L, no entanto, não constituem um conjunto de práticas ou códigos preestabelecidos, a exemplo dos sistemas de gerenciamento existentes. Tem como vantagem ser menos burocrática em relação aos demais, o que contribuiu para sua rápida aceitação e difusão, inclusive no Brasil. Assim, a P+L é mais abrangente que a P2 no sentido de reduzir os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida dos produtos, procurando a melhoria contínua dos processos de produção, para que se tornem mais eficientes e menos impactantes ao meio ambiente e à saúde humana. Além disso, aplica-se não somente às organizações industriais, mas também ao setor de bens e serviços.

A Figura 2.6 mostra um diagrama representativo da hierarquização (níveis de prioridades) que orienta a aplicação de práticas de P+L (CNTL, 2000); nele, nota-se a inexistência da opção de medidas de “fim de tubo”, prática que se torna inevitável em determinados casos. Ainda assim, a ideia consiste em adotar as alternativas que garantam o melhor resultado ambiental possível, levando à progressiva ampliação das práticas de P2.

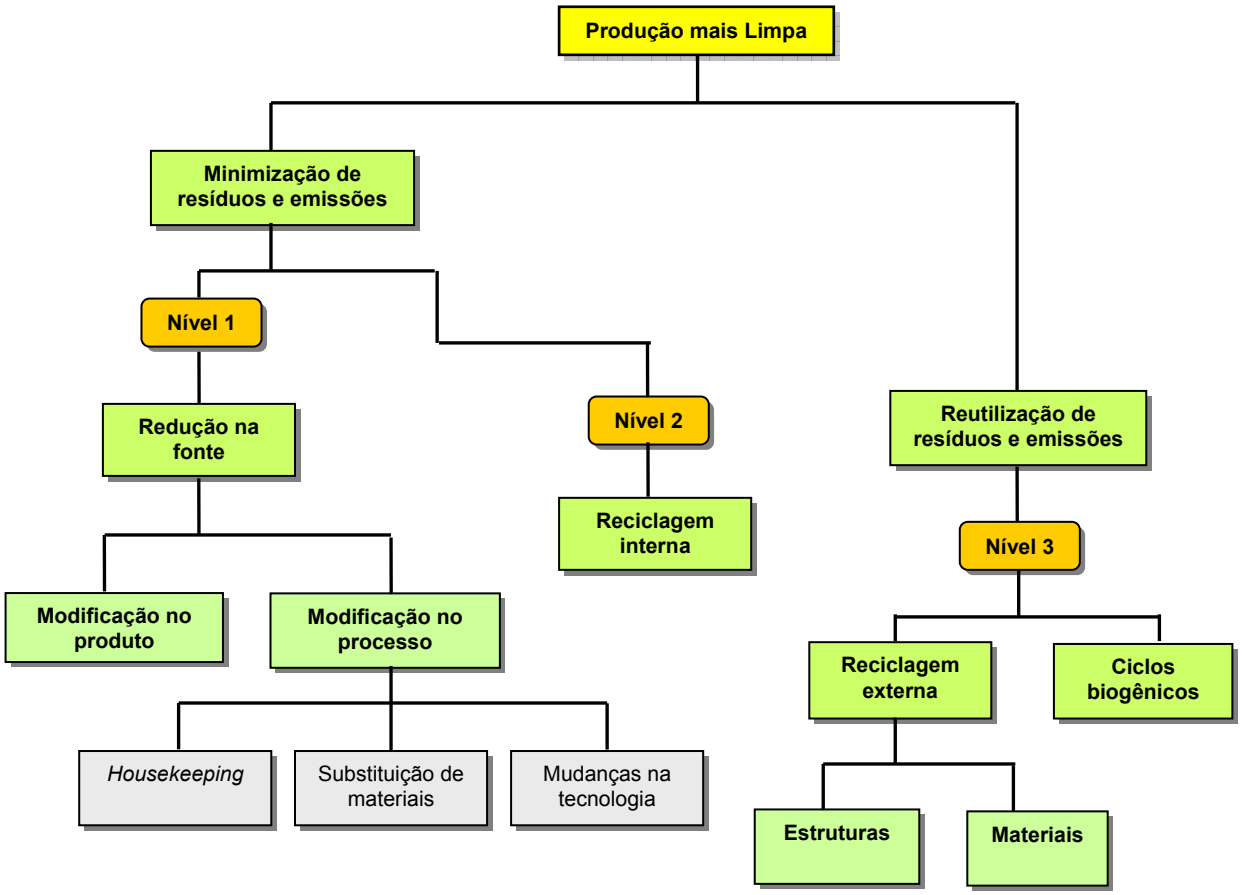


Figura 2.6 – Níveis de prioridades na identificação de oportunidades de intervenção pela Produção mais Limpa

O diagrama de prioridades da Figura 2.6 mostra que as práticas de redução na fonte (nível 1) são mais vantajosas que as de reciclagem interna (nível 2), uma vez que procuram reduzir ou evitar a geração de resíduos, emissões e/ou efluentes. Essa abordagem preventiva tem como foco a fonte geradora, por meio de boas práticas operacionais, substituição de matéria-prima e modificação de tecnologia como modificação de processo. Como segunda opção, a reciclagem interna passa a ser considerada quando não se consegue evitar que os poluentes sejam gerados; neste caso, deve-se procurar reintegrá-los ao processo de produção pela reciclagem interna (nível 2). Por fim, quando não é possível reaproveitá-los internamente, deve-se então buscar medidas de reciclagem externa, ou seja, fora da empresa (nível 3).

O diagrama de P+L não inclui as tecnologias de “fim de tubo”, pois o foco está na prevenção da poluição. Assim, a prática da P+L desloca o foco da preocupação com o tratamento de efluentes e a reciclagem fora do processo produtivo, uma vez que tratam-se de mecanismos corretivos (e não preventivos, o foco da P+L) que não levam à diminuição

efetiva da quantidade de resíduos e emissões geradas. Já o diagrama de LaGREGA *et al*. (1994) separa as boas práticas operacionais de mudanças de tecnologia, na qual considera mudança de processo como uma de suas medidas. Da mesma forma, não faz distinção entre reúso e reciclagem, que também não é hierarquizada em interna e externa. Por outro lado, o diagrama de P+L prioriza a reciclagem interna da externa, porém também não diferencia reúso de reciclagem.

A implementação de P+L nos processos produtivos das empresas segue uma metodologia desenvolvida e apoiada pela Unido, onde são identificadas técnicas que resultem na minimização de resíduos sólidos, efluentes líquidos e emissões atmosféricas, eficiência no uso da energia e racionalização no emprego da água. As etapas para a implementação são descritas na Figura 2.7.

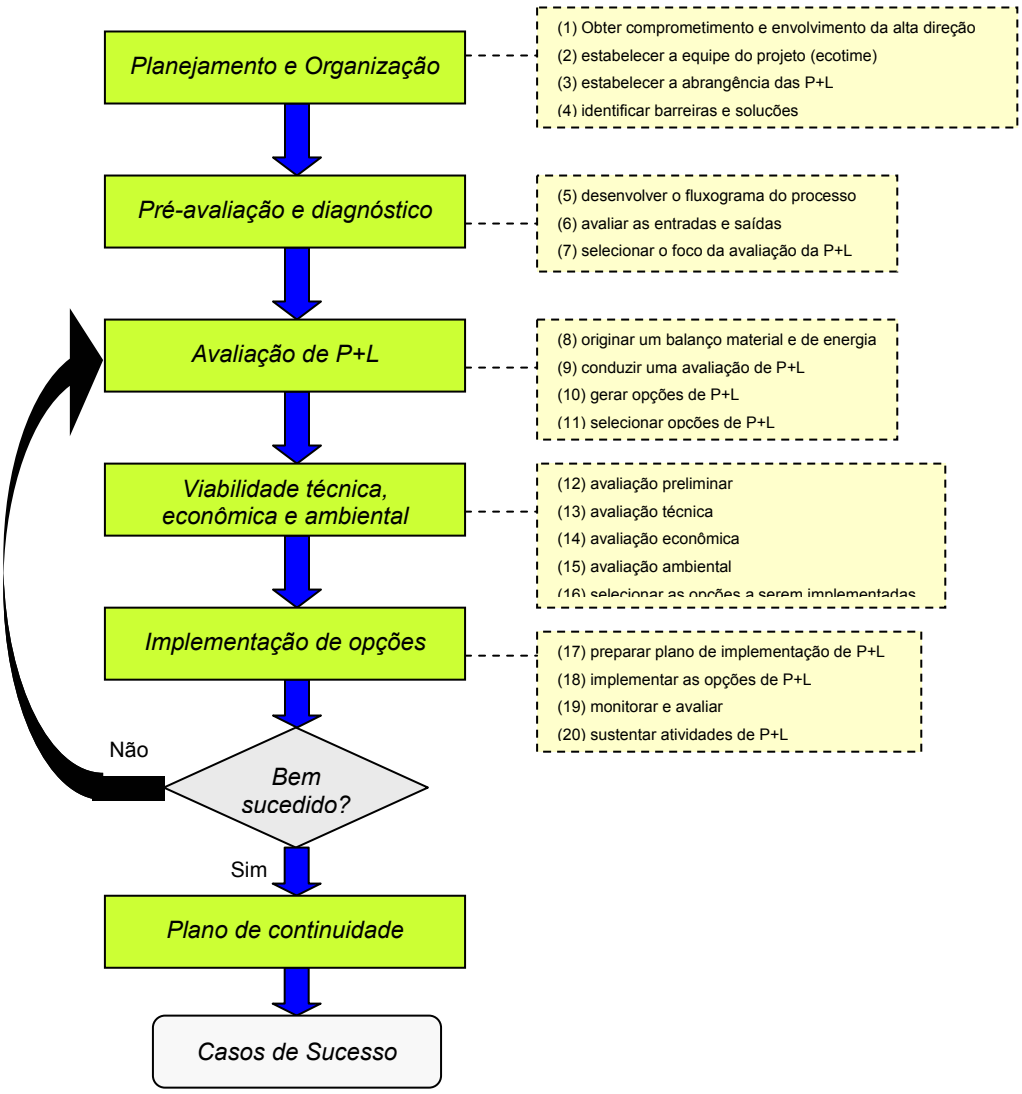


Figura 2.7 – Etapas para implantação de um programa de P+L (adaptado da USEPA, 1988)

Um programa efetivo de P+L deve compreender as fases de:

(1) sensibilização, onde aos colaboradores são apresentados os conceitos da metodologia e mostradas as vantagens da aplicação na empresa, como por exemplo, a redução de custos com perdas de matérias-primas/insumos e tratamento e disposição de resíduos.

Posteriormente, inicia-se a elaboração do diagnóstico ambiental (2), mapeando as atividades da empresa em relação aos aspectos e impactos ambientais, para então elaborar um diagrama do processo de produção (3), incluindo o balanço material e energético dos processos envolvidos e importantes na análise; os fluxos das entradas e as saídas são caracterizados em termos de consumo de água e de energia, de matérias-primas e insumos, de produtos e resíduos gerados, sejam eles sólidos, líquidos ou atmosféricos,

procurando, neste caso, identificar as causas, o modo e o local de geração dos resíduos, bem como suas características, realizando-se um levantamento quali e quantitativo destes resíduos (4), que servirão de base para a identificação das técnicas alternativas de P+L aplicáveis às oportunidades de melhorias no processo (5), dentre as quais, mudanças de matérias-primas e insumos, processos e/ou produto, de tecnologia, reciclagem tanto interna quanto externa, entre outras formas que permitem reduzir os resíduos na fonte.

Após isso, procede-se à priorização das técnicas de P+L (6), analisando o custo/benefício e a viabilidade técnica e econômica das alternativas, bem como as barreiras existentes para a sua implementação. São definidos indicadores ambientais e estabelecido um plano de ação para adotar as técnicas oportunamente viáveis de P+L, com a realização de um plano de monitoramento que inclua as medidas dos indicadores ambientais (7). Por fim, são avaliados os benefícios econômicos, tecnológicos e ambientais (8) a partir das opções de P+L implementadas, buscando a melhoria e a manutenção de processos mais competitivos (9).

O Quadro 2.2 compara algumas diferenças de atitudes entre os enfoques de controle de poluição, atribuído ao que se deve fazer com os resíduos que já foram gerados, e P+L, que procura responder por quê, quando e como o resíduo é gerado.

Quadro 2.2 – Diferenças de atitudes entre as abordagens de controle de poluição e produção mais limpa (adaptado de *Husingh Environmental Consultants Inc*.,1994, In: GREENPEACE, 1997)

Controle de poluição	**Produção mais limpa**
→ Poluentes são controlados por filtros e métodos de tratamento do lixo	→ Poluentes são evitados na origem, através de medidas integradas
→ O controle de poluição é avaliado depois do desenvolvimento de processos e produtos e quando os problemas aparecem	→ A prevenção da poluição é parte integrante do desenvolvimento de produtos e processos
→ Controles de poluição e avanços ambientais são sempre considerados fatores de custo pelas empresas	→ Poluição e rejeitos são considerados recursos potenciais e podem ser transformados em produtos úteis e sub-produtos desde que não tóxicos
→ Desafios para avanços ambientais devem ser administrados por peritos ambientais tais como especialistas em rejeitos	→ Desafios para avanços ambientais deveriam ser de responsabilidade geral na empresa, inclusive de trabalhadores, designers e engenheiros de produto e de processo
→ Avanços ambientais serão obtidos com técnicas e tecnologias	→ Avanços ambientais incluem abordagens técnicas e não técnicas
→ Medidas de avanços ambientais deveriam obedecer aos padrões definidos pelas autoridades	→ Medidas de desenvolvimento ambiental deveriam ser um processo de trabalho contínuo, visando a padrões elevados
→ Qualidade é definida como ‘atender as necessidades dos usuários’	→ Qualidade total significa a produção de bens que atendam às necessidades dos usuários e que tenham impactos mínimos sobre a saúde e o ambiente

Giannetti e Almeida (2006, p. 12) esclarecem que “a Produção mais Limpa é uma filosofia proativa que permite antecipar e prever possíveis impactos”, e que “pode ser utilizada ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, desde a fase de projeto, passando pela fase de consumo, até sua disposição final”. Sua simplicidade e fácil execução procuram aperfeiçoar processos isolados e maximizar a circulação de água e matérias-primas dentro do processo e antes do descarte, levando ao melhor aproveitamento não somente de matéria-prima, mas também de energia (GIANNETTI e ALMEIDA, 2006, p. 14). A proposta da abordagem se insere na análise e no desenvolvimento contínuo dos processos de

produção, aperfeiçoando-os e otimizando-os e/ou implementando total ou parcialmente novos processos.

Uma comparação relativa aos ganhos econômicos obtidos por uma empresa nas situações anterior e posterior à prática de P+L revela um decréscimo nos custos com o tempo, proporcionado pelos benefícios advindo de um aumento do rendimento dos processos, do uso eficiente de matérias-primas e insumos, de água e energia, e da redução na geração de efluentes, resíduos e emissões. Essa tendência é mais bem ilustrada na Figura 2.8: na ausência de investimentos, a estrutura dos custos totais mantém-se praticamente constante no período (linha horizontal), ao contrário de quando se iniciam ações de P+L, ocorrendo reduções nos custos influenciados por medidas sem investimento, como adoção de boas práticas operacionais (região A); um em seguida, um aumento nos custos totais é sentido em função de novos investimentos que são requeridos, como adaptações com novas tecnologias e/ou mudanças no processo (região B); após essa fase, ocorre uma redução nos custos, dando início ao período de retorno do capital inicialmente investido, resultado de processos mais eficientes em operação (diferença entre ambas as curvas na região C).

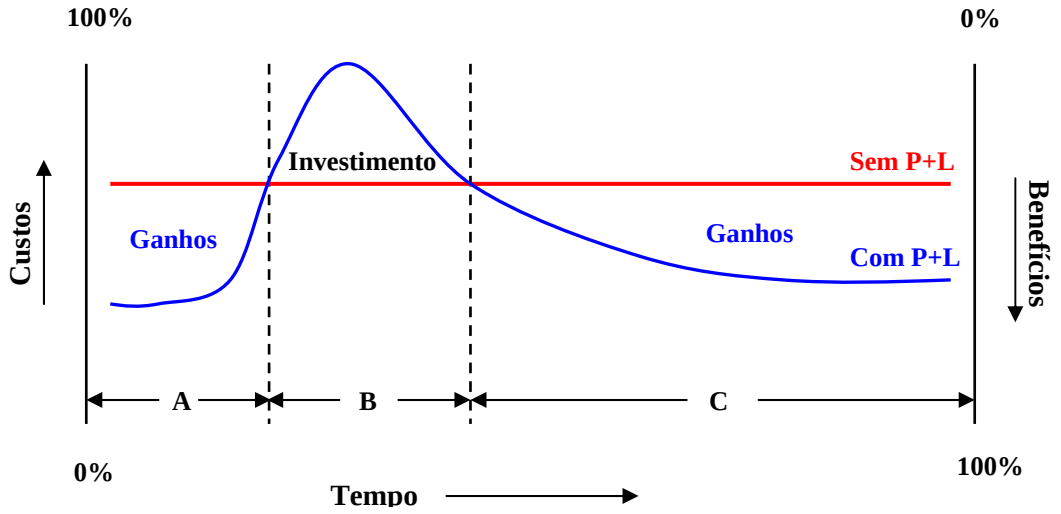


Figura 2.8 – Custos e benefícios com a implementação de medidas de P+L (CNTL, 2003)

A prática de P+ L permite desenvolver e implantar tecnologias limpas nos processos produtivos, observando as metas ambientais, econômicas e tecnológicas. Não obstante, o tema não se limita somente ao enfoque ambiental e econômico, mas também se insere na gestão das empresas. A geração de resíduos em um processo produtivo muitas vezes está diretamente relacionada a problemas de saúde ocupacional e de segurança dos trabalhadores (UNNIKRISHNAN e HEGDE, 2006). Desenvolver a P+L minimiza estes riscos,

na medida em que são identificadas matérias-primas e auxiliares menos tóxicas, contribuindo para a melhor qualidade do ambiente de trabalho (CNTL, 2000).

Diversas são as empresas que têm se interessado pela adoção de medidas de P+L, visando estabelecer o modelo de prevenção da poluição, mas sua aplicação requer mudança de atitudes, gestão ambiental responsável e avaliação de opções tecnológicas. No Brasil, vale destacar as iniciativas do Centro Nacional de Tecnologias Limpas (CNTL), criado na metade da década de 1990 e vinculado ao Senai-RS (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial do Estado do Rio Grande do Sul), e da Cetesb, em São Paulo, que começou a organizar uma divisão de prevenção da poluição. A instalação do CNTL ocorreu por iniciativa do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (Pnuma), em parceria com a Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (Unido). O maior propósito é prestar consultoria para estimular sistemas de gerenciamento ambiental e de implantação de programas de P+L (FURTADO, 2002). O Brasil é um dos 11 países que possuem Centros de Produção mais Limpa financiados pela SECO (*Swiss State Secretariat for Economic Affairs*) (GRUTTER e EGLER, 2004).

Diversos são os casos de sucesso no Brasil alcançados com a aplicação da técnica de P+L nas indústrias de processos. O Quadro 2.3 relaciona alguns exemplos de sucesso decorrentes da aplicação de P+L nas empresas localizadas no Estado de São Paulo pela Cetesb.

Quadro 2.3 – Casos de sucesso da implantação de medidas de P+L pela Cetesb, nas indústrias do Estado de São Paulo (Adaptado de CETESB, 2008)

Empresa (porte)	Oportunidade	Investimento	Resultados
3M do Brasil Ltda. - Fábrica Sumaré (Grande)	Reciclagem de retalhos de PVC (policloreto de vinila) na indústria química	Para a produção dos tapetes personalizados foi necessário um investimento de aproximadamente US$ 3.000,00, relativo à compra de diferentes tipos de facas usadas para o corte dos retalhos de PVC, permitindo a fabricação de diversos tipos de desenhos nos tapetes personalizados.	Em vez de vender os resíduos gerados na fabricação de tapetes de PVC, a empresa passou a reutilizá-los e a fabricar 14.400 tapetes de PVC personalizados por ano, gerando uma receita de US$ 35.700,00/ano.
	Reutilização dos efluentes líquidos tratados na indústria química	US$ 20.000,00 para a reforma da unidade de tratamento de efluente desativada e em obras civis para a adequação do sistema	Como ganho ambiental, a reutilização dos efluentes permitiu uma redução na captação de água da empresa, em aproximadamente 97.600 m^3/ano.
Erimpress Etiquetas Ltda. (Pequena)	Substituição de matéria-prima em indústria gráfica	A substituição do uso de silicone à base de solvente por silicone à base de água não exigiu investimentos adicionais	Ganho financeiro obtido da ordem de 17% na aquisição de matéria-prima, ou seja, para a siliconização de 100.000 m² de papel, o custo de compra de silicone à base de solvente é de U$ 3.000,00 e para o silicone à base de água U$ 2.500,00.
Janssen-Cilag Farm. Ltda. (Grande)	Eliminação do uso de produtos químicos em torres de resfriamento - indústria farmacêutica	Investimento de R$ 143.500,00 na implantação de novo sistema de tratamento físico da água (realização de testes e instalação de equipamentos)	Redução de custo da ordem de R$ 15.000,00 por ano, com os produtos químicos usuais para tratamento. Eliminação do uso de produtos químicos, os poluentes na água de resfriamento e os resíduos sólidos gerados.
BSH Continental Eletrod. Ltda. (Grande)	Redução do consumo de água na indústria metalúrgica	Investimento de R$ 4.285,00 em equipamentos	Redução de 30% do consumo de água da rede pública (de 86.400 para 60.480 m^3/ano, em média). A economia estimada em R$135.000,00 / ano.

Quadro 2.3 – Casos de sucesso da implantação de medidas de P+L pela Cetesb, nas indústrias do Estado de São Paulo (continuação)

Empresa (porte)	Oportunidade	Investimento	Resultados
Elekeiroz S.A. - Unidade de Anidrido Maleico (Média)	Recuperação energética e minimização de perdas na indústria química	Investimento de R$ 5.432.000,00 em equipamentos	Geração interna de energia elétrica de 2,1 MWh (ganho de R$ 900.000,00/ano) - Redução da emissão de compostos orgânicos voláteis - Redução da perda de benzeno, por volatilização, nos tanques de estocagem.
	Reúso de efluente líquido na indústria química	Adequação da unidade de fabricação de ácido fumárico: investimento da ordem de R$ 300.000,00 Adequação do tanque de transporte do efluente: cerca de R$ 20.000,00.	
Rohm and Haas Química Ltda. (Grande)	Redução das emissões gasosas e otimização da produção de polímeros acrílicos	US$ 150.000,00 na aquisição dos novos equipamentos	Com a redução de cerca de 50% das emissões de vapores de matérias-primas encaminhadas ao sistema de lavagem de gases, houve uma redução de cerca de 70% da solução cáustica utilizada na lavagem dos gases, redução dos efluentes a serem tratados na estação de tratamento e aproveitamento de 3t/ano de matéria-prima, anteriormente lançadas na atmosfera. O retorno das matérias-primas para o reator proporcionou um incremento de 0,1% no rendimento da produção de produto acabado, um ganho anual em torno de US$ 50.000,00, além dos ganhos econômicos obtidos com a redução de insumos para tratamento de resíduos. O retorno do investimento para a medida implantada ficou em torno de 3 anos.

Quadro 2.3 – Casos de sucesso da implantação de medidas de P+L pela Cetesb, nas indústrias do Estado de São Paulo (continuação)

Empresa (porte)	Oportunidade	Investimento	Resultados
Companhia Brasileira de Bebidas - Filial Jaguariúna (Grande)	Redução do consumo de água na indústria de bebidas	O investimento total das medidas implantadas foi de R$ 97.500,00, incluindo: instalação do sistema de recuperação da água de lavagem dos filtros na ETA, aquisição de torneiras, registros, válvulas, mão de obra, e outros materiais não especificados.	O uso racional de água na empresa resultou em economia anual R$ 249.503,00, decorrente da redução do uso de insumos (produtos químicos, energia), mão de obra etc, nos sistemas de tratamento, sendo: - R$ 46.348,00/ano no tratamento de água e - R$ 203.155,00/ano tratamento de efluentes industriais.
DOW Química S.A. (Grande)	Redução de compostos tóxicos e otimização do uso de insumos na indústria química	O investimento total para implantação das melhorias na planta de Látex SBL foi de R$ 3,6 milhões, assim distribuídos: R$ 3,0 milhões para projeto, aquisição e instalação do sistema de re-destilação e de queima de resíduos em caldeira, incluindo equipamentos e mão de obra, e R$ 0,6 milhões gastos na adaptação do sistema de queima de resíduos em caldeira	Ganho econômico total (base anual) de R$ 362.000,00 (economia de água de processo: R$ 150.000,00; Geração adicional de vapor: R$ 100.000,00; Custo de queima de resíduos por terceiros: R$ 100.000,00; Custo de tratamento de efluentes: R$ 12.000,00) O tempo de retorno simples do investimento, calculado em função da economia anual gerada, foi de 10 anos
BASF S.A. (Grande)	Ferramenta para Minimização de Resíduos - WMT (*Waste Minimization Tool*), desenvolvida pela empresa	Não houve investimentos	1) Reaproveitamento dos efluentes líquidos de produtos para eletrodeposição catódica: redução do volume de efluentes líquidos do setor para tratamento em 9%, o que representa cerca de 119 m^3/ano, e a correspondente redução do consumo anual de água desmineralizada (cerca de 1%), utilizada na produção. O ganho econômico correspondente foi de R$ 52.617,00/ano, referente à redução de custos com transporte e tratamento de efluentes.

Quadro 2.3 – Casos de sucesso da implantação de medidas de P+L pela Cetesb, nas indústrias do Estado de São Paulo (continuação)

Empresa (porte)	Oportunidade	Investimento	Resultados
BASF S.A. (Grande)	Ferramenta para Minimização de Resíduos - WMT (*Waste Minimization Tool*), desenvolvida pela empresa	Não houve investimentos	2) Melhoria no sistema de limpeza de reatores: redução do volume gerado de efluentes em aproximadamente 3%, o que correspondeu, na ocasião, a cerca de 39 m^3/ano. Com isto, houve uma economia de cerca de R$ 100.000,00/ano referente à redução de custos com horas trabalhadas da equipe de limpeza técnica e com consumo de água.
Zetti Ind. Com. G. B. EPP Ltda. (Pequena)	Redução no consumo de produtos em eletrodeposição	Não houve investimentos	Como resultado ambiental houve uma redução no consumo de produtos químicos utilizados na preparação dos banhos, e também uma redução do efluente gerado à ser enviado ao sistema de tratamento. Como resultado econômico, esta medida proporcionou uma economia diária de R$ 110,40 (R$ 26.500,00/ano).
Coats Corrente Ltda. (Grande)	Utilização de água de reúso nos processos industriais têxteis	Os investimentos necessários consistiram no seguinte: - instalação da tubulação ligando a empresa até a Estação de Tratamento Jesus Neto; - adequação do tratamento daquela estação às necessidades da empresa; - aquisição de *booster* e outros equipamentos para bombeamento da água; e - construção de caixas de recebimento e estocagem de água. O valor total deste investimento foi de cerca de R$ 250.000,00	O resultado mais importante obtido certamente foi o fato de a empresa passar a utilizar água de reúso ao invés de água potável em seus processos industriais, mantendo a água potável especificamente para uso no refeitório, pias, chuveiros e instalações para combate a incêndio. Além disso, em termos econômicos o custo da água de reúso é 75% inferior ao da água potável, permitindo um retorno do investimento em 10 meses.

Quadro 2.3 – Casos de sucesso da implantação de medidas de P+L pela Cetesb, nas indústrias do Estado de São Paulo (continuação)

Empresa (porte)	Oportunidade	Investimento	Resultados
Coats Corrente Ltda. (Grande)	Utilização de água de reúso para geração de vapor	Os investimentos consistiram na aquisição de um abrandador, bombas e dosadores automáticos, além de produtos para controle da qualidade da água. O valor total do investimento foi de aproximadamente R$ 100.000,00	O aspecto mais importante desta medida sem dúvida é o emprego de água de reúso ao invés de água potável, preservando esta exclusivamente para uso no refeitório, pias, chuveiros e instalações de combate a incêndio. Se considerarmos a redução de uso de água potável como sendo de 1.600 m^3/mês, pode-se dizer que a empresa deixou de captar o equivalente ao consumo de cerca de 300 pessoas. Economicamente, o custo da água de reúso é 75% inferior ao da água potável, sendo neste caso ainda acrescido o custo do tratamento necessário para adequar a água ao uso na caldeira.
E.G. Industria e Comércio Ltda. M.E. (Micro)	Redução na geração de lodo e consumo de energia	Não houve gasto significativo	A empresa passou a economizar 46,3% em energia elétrica no processo de rebarbação, o que significou uma redução de custos de R$ 812,12 para R$ 436,14 por ano, e reduziu a mão de obra na separação de alguns tipos de peças, o que não foi quantificado. A empresa economizou também 82,63% no custo de aterro para disposição do lodo gerado, e 87% na aquisição de matérias-primas. No total, houve redução de custos anuais de R$ 1.081,00 para R$ 140,00, com menor geração de lodo, mais os ganhos de energia elétrica e produtividade.

Quadro 2.3 – Casos de sucesso da implantação de medidas de P+L pela Cetesb, nas indústrias do Estado de São Paulo (continuação)

Empresa (porte)	Oportunidade	Investimento	Resultados
Uniforme Lavanderia e Locação Ltda. (Pequena)	Redução no Consumo de Percloroetileno em Lavanderia Indústrial	A empresa investiu R$ 350.000,00 no novo equipamento	Com a troca de um dos equipamentos, reduziu-se o consumo de uma substância perigosa, o percloroetileno. Este não era descartado diretamente para o meio, porém era necessário o descarte dos resíduos gerados, que são encaminhados à co-processamento, além de perdas eventuais, e desta forma a medida reduziu os riscos à saúde ocupacional e ao meio ambiente. Economicamente, pela redução do consumo de percloroetileno (cerca de 3.600 kg/mês), a aquisição da nova lavadora promoveu uma economia de R$ 9.000,00/mês. Com esta redução de custos, o retorno do investimento é de aproximadamente 36 meses.

Uma comparação entre as metodologias propostas para a aplicação de P+L é apresentada na Figura 2.9, onde um conjunto de cores similares indica que a etapa da metodologia foi obtida daquele conjunto. Cabe lembrar que algumas etapas estão incorporadas em outras de uma metodologia. Isto explica uma eventual ausência de etapas entre as metodologias, em relação à proposta aparentemente mais recente e completa do Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável (CEBDS – braço brasileiro do Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento sustentável, WBCSD).

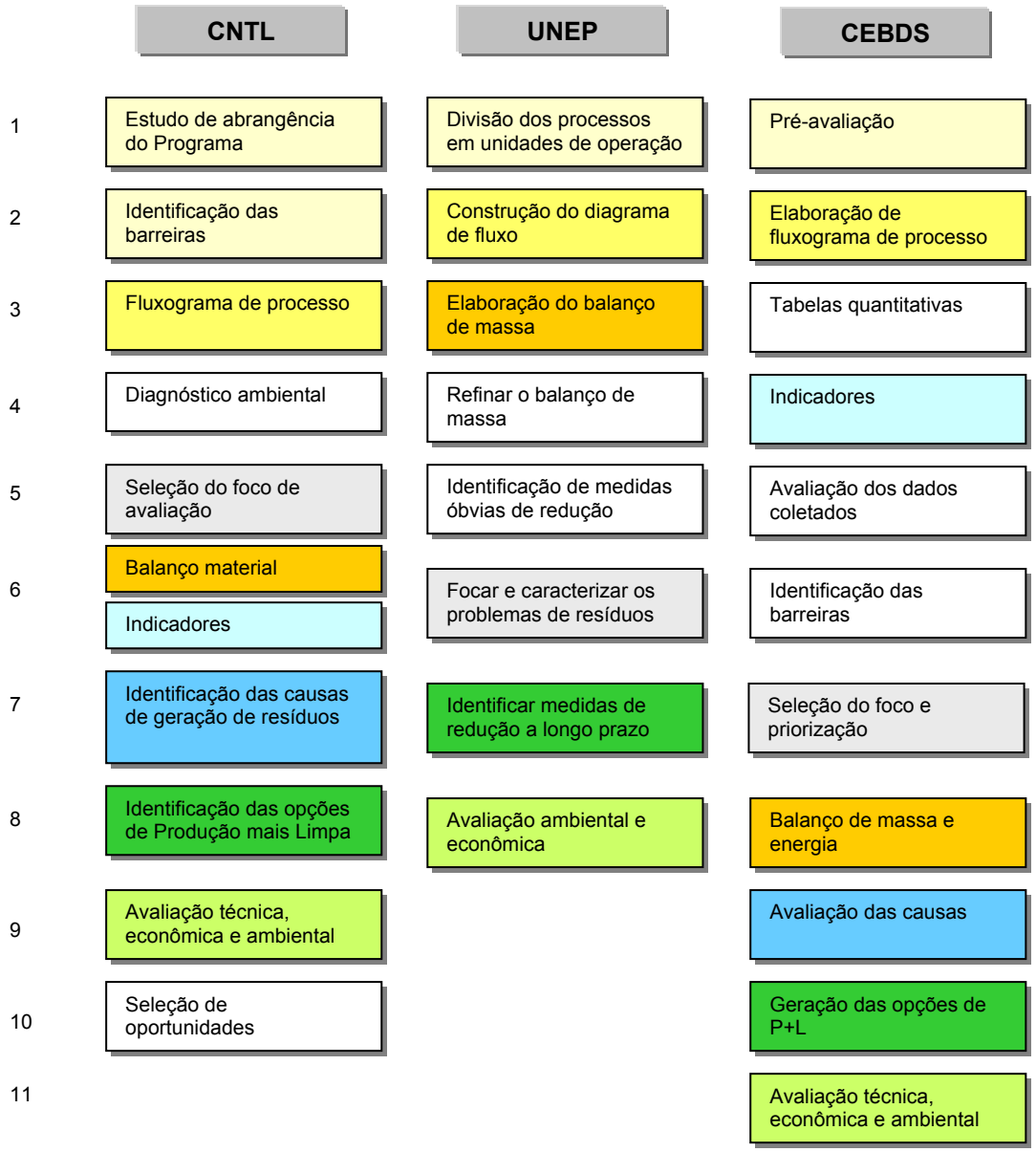


Figura 2.9 – Comparação entre as principais etapas de metodologias de P+L (OLIVEIRA, 2006a)

A implementação de medidas de P+L dentro das empresas também enfrenta resistências, principalmente quando envolvem mudanças de hábitos fielmente incorporados às rotinas operacionais (barreiras cognitivas e culturais na organização). Porém, elas podem ir ao encontro das expectativas positivas da direção da empresa, com a devida demonstração do alcance de vantagens econômicas. A internalização do conceito de prevenção da poluição nas atividades da empresa é um dos fatores críticos de sucesso para a implantação da P+L, podendo levar inclusive ao desestímulo e a consequente perda de continuidade da proposta inicial. Em muitos casos, a aplicação de P+L nas organizações é

enxergada sob modos diferentes tanto por consultores externos que as aplicam quanto pelos representantes das empresas. Taylor (2006) mostrou como programas bem estruturados de P+L podem romper as resistências para sua aplicação, apresentando diversos estudos de casos industriais de sucesso, e provando que uma divulgação eficiente da metodologia no meio industrial contribuem para esclarecer melhor seus objetivos. O Quadro 2.4 descreve algumas das principais barreiras identificadas na implementação de P+L.

Quadro 2.4 – Barreiras à implementação de Produção mais Limpa (Adaptada da Unep, In: SILVA FILHO e SICSÚ, 2003)

Classificação	Descrição das barreiras
Econômica	- Imaturidade das práticas de alocação de custos - Imaturidade dos planos de investimento
Política	- Pouca ênfase na P+L como estratégia ambiental, tecnológica e de desenvolvimento industrial
Organizacional	- Falta de incentivos aos funcionários na implementação de P+L - Falta da função Gestão Ambiental nas operações - Resistência a mudanças - Escassa experiência com o envolvimento dos funcionários - Imaturidade da estrutura orgânica e de seus sistemas de informação
Técnica	- Complexidade da P+L na avaliação e identificação das oportunidades -- Ausência de uma base operacional com práticas estruturadas de produção e de manutenção - Acesso restritivo a equipamentos de suporte à P+L
Conceitual	- Falta de percepção da importância de melhorias ambientais - Desentendimento do conceito de P+L

A adoção de práticas de P+L requer o conhecimento dos processos de produção, identificando os pontos que possam levar a perdas de matéria-prima, insumos, utilidades e produtos ao longo da cadeia produtiva, bem como nas instalações físicas de toda a empresa. É bastante comum que a adoção de práticas de P+L esteja vinculada basicamente a pequenas mudanças realizadas tanto sobre o processo de produção em si como nos processos auxiliares que se vinculam à competência essencial (*core competence*) da empresa. Assim, medidas que já deveriam ter sido identificadas e remediadas pela equipe envolvida na administração da produção, passam despercebidas, sustentadas pela concepção de que as pessoas que vivenciam o problema de dentro (funcionários atuantes no processo) tendem a não enxergar eventuais lacunas ou mesmo não dispõem do tempo

necessário para corrigir as falhas, dada a pressão exercida sobre eles para que se levante a produtividade. Por outro lado, essas pequenas distorções operacionais constituem o grande foco de atuação dos profissionais que praticam a P+L na indústria, pois é fato que estas falhas e outras, somadas, assumirão a linha de frente quando forem contabilizadas as perdas que o sistema apresenta, e que a sua correção trará um benefício econômico a curto/médio/longo prazo, dependendo do investimento que seja necessário para se alcançar tal objetivo. Enfim, pode-se dizer que a P+L de certa forma também incorpora ações de *housekeeping* ("arrumação"), uma vez que promove a organização das atividades da empresa. A grande diferença é que a P+L está essencialmente preocupada com as consequências diretas sobre a produtividade e a qualidade dos processos de produção, identificando oportunidades de retorno financeiro no curto prazo através de ações que visem ao melhor aproveitamento do consumo de matérias-primas, da redução no consumo de água e energia (eficiência energética) na empresa (estando ou não diretamente envolvidos na linha de produção), e na minimização da geração de efluentes e resíduos.

Definições de desenvolvimento sustentável mencionam responsabilidades quanto ao emprego mais eficiente possível de recursos naturais, sem que isso prejudique as gerações futuras. Pela ótica da P+L, produzir sustentavelmente significa transformar recursos naturais em produtos, e não em resíduos (CNTL, 2000).

Vale mencionar ainda que um importante evento internacional sobre o desenvolvimento da Produção mais Limpa tem sido realizado a cada dois anos no Brasil (*International Workshop: Advances in Cleaner Production*, São Paulo, 2007, 2009 e 2011 – In: http://www.advancesincleanerproduction.net/). Diversos trabalhos são publicados sobre o tema, representando um fórum multi e interdisciplinar de troca de informações e resultados de pesquisa sobre tecnologias, conceitos e políticas baseadas em P+L.

2.4.1. Avanços da literatura recente

Yokoyama *et al*. (2005) implementaram medidas de P+L em uma pequena empresa comercial de produtos químicos, avaliando os benefícios econômicos e ambientais alcançados. Conseguiram reduzir o consumo de água e de efluente gerado em 65%. O benefício econômico proporcionado pelas oportunidades de melhorias representou 3,2% do faturamento anual da empresa. Da mesma forma, Rubino *et al*. (2007) aplicaram a P+L a uma empresa de grande porte do setor de corte base da indústria têxtil. Foram identificadas oportunidades de melhorias que, em grande parte, estavam relacionadas com boas práticas operacionais (*housekeeping*), mas que permitiram minimizar a geração de resíduos e melhor aproveitar a matéria-prima. O resultado econômico obtido foi de R$ 550 mil, além de

melhorias no sistema de informações e da conscientização por parte da empresa da importância do treinamento de funcionários.

Abou-Elela *et al*. (2007) aplicaram a P+L em uma indústria química produtora de resina naftaleno-formaldeído sulfonada, usada como superplastificante para concreto, visando à redução (quase) zero de emissões. Avaliaram as oportunidades de implementação da prevenção da poluição e da minimização de resíduos. As etapas do programa consistiram do mapeamento e caracterização das condições atuais quanto às maiores fontes de desperdícios e emissões. As medidas praticadas proporcionaram diversos benefícios nos processos, como a redução do consumo de água utilizado na lavagem de reatores, reciclo de água retida em filtro-prensa, circuito fechado do sistema de resfriamento para a bomba de alta pressão, redução de perdas de matérias-primas, produto e água, e recuperação de produtos a partir de rejeitos. A implementação das medidas levou à eliminação do tratamento *end-of-pipe*, reduziram a quantidade de água, produtos e matérias-primas, sendo que os custos estimados das soluções propostas mostraram uma economia total anual de aproximadamente US$ 5 milhões, com período de recuperação do capital (*payback period*) relativamente baixo.

A P+L também pode ser um instrumento decisivo na conquista da certificação ISO 14.001:2004 em organizações de países em desenvolvimento, como mostrado por Khan (2008), que apresentou cinco estudos de casos de empresas do setor industrial automotivo, as quais aperfeiçoaram seus processos com a metodologia, e, com isso, obtiveram economias anuais bastante significativas.

No mundo inteiro, discute-se a importância da adoção de P+L como medida para se atingir o desenvolvimento sustentável (GOMBAULT e VERSTEEGE, 1999; PETEK e GLAVIÇ, 2000; NARAYANASWAMY e SCOTT, 2001; HINZ *et al*., 2006; CICCOZZI *et al*., 2003; GRUTTER e EGLER, 2004; NHAPI e HOKO, 2004; HAMED e EL MAHGARY, 2004; FRESNER e ENGELHARDT, 2004; SIAMINWE *et al*., 2005; GHAZINOORY, 2005; KJAERHEIM, 2005; GALE, 2006; KLIOPOVA e STANISKIS, 2006; WOLNIK e FISCHER, 2006; MITCHELL, 2006; SCAVONE, 2006; TAYLOR, 2006; ADAMS e GHALY, 2007; BAAS, 2007; BROWN e STONE, 2007; HICKS e DIETMAR, 2007; BERKEL, 2007; LAKHANI, 2007; NARAYANASWAMY e STONE, 2007; GIANNETTI *et al*., 2008; MILLER *et al*., 2008; BÜYÜKBAY *et al*., 2010; BONILLA *et al*., 2010). Tais iniciativas, ainda que implementadas por todas as esferas (governamentais e empresariais, públicas e privadas) não garantem alcançar o desenvolvimento sustentável, em virtude da ausência de um efetivo programa que permita sistematizar a adoção de tecnologias adequadas, facilitando a integração conceitual das metodologias. Kjaerheim (2005) ressalta e discute a importância de se fazer P+L, não para se criar uma sociedade sustentável, pois apresenta limitações, mas para se

caminhar na sua direção, à medida que gera resultados palpáveis, aumento de conscientização e mudanças de atitudes. Para isso, considera importante a adoção de um modelo que inclua módulos de programas de treinamento em P+L, com melhoria e desenvolvimento cíclico deste processo, bem como a realização orientada de pesquisa e desenvolvimento.

Acerca das experiências brasileiras na adoção da P+L, especialmente no Rio Grande do Sul e em São Paulo, Furtado (2002) ressalta a sua importância para o setor industrial, que vislumbra os resultados benéficos quando a teoria salta para o trabalho de campo. Aliás, o pioneirismo dos estados mencionados tem estimulado a criação redes de propagação dos programas pelo País; no Estado da Bahia, por exemplo, a Universidade Federal possui departamento específico para desenvolver o tema: trata-se da Rede de Tecnologias Limpas e Minimização de Resíduos do Estado da Bahia (Teclim), que desde 1998 vem exercendo forte interação com o setor produtivo através de projetos de consultoria, bem como atividades de ensino e pesquisa. Diversos trabalhos foram concluídos na área de Produção mais Limpa e Produção Limpa, assim como em reutilização de efluentes e minimização de resíduos. Dentre outros, merecem destaque as seguintes contribuições: Coelho (2004), que aplicou a metodologia de P+L da Unido/Unep nas Estações de Tratamento de Água (ETA) e de Esgoto (ETE) da Empresa Baiana de Águas e Esgoto (EMBASA), possibilitando reduzir a geração de resíduos, efluentes, consumo de água e energia, a partir da implementação de soluções simples, propostas pelos colaboradores da empresa, e que demandaram, na maioria dos casos, baixo investimento financeiro; Ogata (2004), que aplicou a P+L na otimização do processo de produção de álcool butílico, comparando as soluções adotadas com técnicas de fim de tubo e P+L, demonstrando que esta última opção levou a uma redução do custo de produção anual consideravelmente inferior ao da primeira alternativa, com um investimento comparativamente menor, e retorno de investimento simples (*pay-back*) de 1,4 mês. Oliveira (2006a), que desenvolveu uma metodologia com base na P+L para a otimização ambiental de um processo de produção de petróleo; e Prestrelo (2006), que aplicou a P+L no gerenciamento do uso da água em atividades terrestres de exploração e produção de petróleo.

Também vale citar as contribuições reportadas nos trabalhos de Andres (2001), que analisou o processo de implantação das técnicas de P+L nas indústrias do Vale do Taquari (RS); de Mello (2002), que analisou os efeitos da implementação do programa de P+L na empresa AGCO do Brasil Comércio e Indústria Ltda., identificando os principais resultados econômicos e de redução de impactos ambientais; de Harada (2006), que aplicou a P+L a estações de tratamento de efluentes de indústrias em geral, enfocando os tratamentos de

fim de tubo; e de Kist *et al*. (2009), que promoveram o gerenciamento do uso da água em um abatedouro de aves com base na avaliação de P+L, adotando medidas que permitiram reduzir o consumo de água em 13%.

Atualmente a P+L tem se colocado como um tema bastante explorado quando o objetivo é demonstrar a necessidade de dispor processos industriais cujas atividades busquem reduzir impactos negativos ao meio ambiente. Nos últimos dez anos houve um crescente interesse de aperfeiçoar os processos industriais na China, por exemplo, influenciado pelo emergente poder econômico do outrora chamado "gigante adormecido". Trata-se atualmente da segunda maior economia do mundo (superada apenas pela dos Estados Unidos), com um Produto Interno Bruto (PIB) em 2010 de US$ 5,878 trilhões, maior inclusive que a soma das economias de Brasil (US$ 2,029 trilhões), Rússia (US$ 1,465), Índia (US$ 1,645) e África do Sul (US$ 364 bilhões), do grupo Bric (bloco de países em desenvolvimento, acrônimo de Brasil, Rússia, Índia e China – cogita-se a participação de África do Sul e México), segundo a consultoria britânica *Economist Intelligence Unit* (SALEK, 2011). O país, que se sustenta com uma matriz energética basicamente composta de carvão mineral, vem investindo no desenvolvimento de energias renováveis, com eólica e solar, o que pode ser uma demonstração de se ajustar mais aos padrões econômicos que possam garantir sua estratégia de exportações.

Entretanto, em relação ao comportamento econômico desempenhado por países emergentes, como China e Índia, Barros e Giambiagi (2008, p. 192) explicam que a poluição atmosférica e a poluição dos rios representam as duas maiores fontes de preocupação, como reais ameaças ao meio ambiente. Na China, principalmente, dados do Banco Mundial apontam que o custo da poluição oriundo dessas duas fontes atingiu 5,8% do PIB em 2003; o país é o maior emissor de SO_2 atualmente, cujas emissões já atingem o Oeste dos Estados Unidos. Superou os Estados Unidos em 2007 como maior emissor de CO_2, onde 82% dessa fonte provém da queima de carvão, e metade é destinada à geração de energia. As projeções para a China afirmam que até 2030 responderá por 40% do aumento da emissão de CO_2.

Diante disso, uma procura pela base de dados multidisciplinar *Science Direct* sobre o tema "Cleaner Production", "China" e "Journals" revela a prioridade que o país tem dado à pauta de desenvolvimento de tecnologias ambientais no meio científico. A Figura 2.10 mostra essa evolução no período de 2000 a 2011, onde a partir de 2006 houve grande contribuição do tema, em relação a países como Brasil, Índia e Estados Unidos, pesquisados pelo mesmo critério.

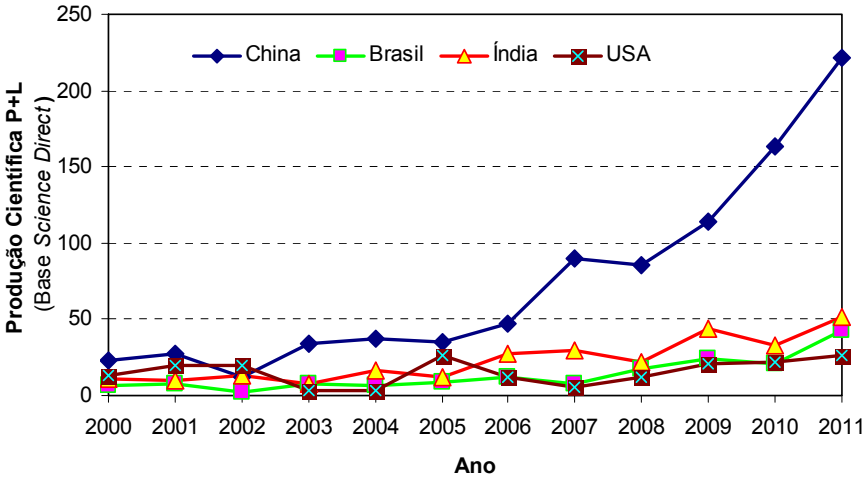


Figura 2.10 – Evolução da produção científica sobre P+L em periódicos (Base *Science Direct*) envolvendo China, Brasil, Índia e Estados Unidos, de 2000 a 2011

2.5. OUTROS MODELOS DE GESTÃO INDUSTRIAL SUSTENTÁVEL

2.5.1. Produção Limpa

Na mesma linha da P2 também se encontra o conceito de Produção Limpa, proposto nos anos 1980 pela organização não-governamental internacional *Greenpeace*, que pressupõe uma produção com utilização de tecnologias que proporcionem um menor consumo de recursos naturais (água, energia e outros produtos), minimização dos resíduos, dos riscos e dos impactos ambientais, através dos princípios da ecoeficiência e da precaução (ANDRADE *et al*., 2001). O conceito de Produção Limpa inclui quatro elementos fundamentais: (1) o Princípio da Precaução, que obriga o eventual poluidor a arcar com o ônus da prova de que uma substância ou atividade não causará dano ao ambiente; (2) o Princípio da Prevenção, que consiste em substituir o controle da poluição pela prevenção da geração de resíduos na fonte, evitando as emissões perigosas para o ambiente e o homem; (3) o Princípio do Controle Democrático, que prevê o direito de acesso à informação sobre questões que dizem respeito à segurança e uso de processos e produtos, por todos os interessados, inclusive as emissões e registros de poluentes, planos de redução de uso de produtos tóxicos e dados sobre componentes perigosos de produtos; (4) Princípio da Integração, que proporciona uma visão holística do sistema de produção de bens e serviços, utilizando, por exemplo, a ferramenta ACV (Avaliação do Ciclo de Vida) (ANDRADE *et al*., 2006; GREENPEACE, 1997).

Embora haja quem considere PL e P+L como sinônimos, cabe ressaltar que há uma diferença conceitual significativa entre estas abordagens. Enquanto a P+L e a ecoeficiência buscam a redução do impacto ambiental do processo produtivo, independente deste ser sustentável ou não, a PL busca implantar um processo que seja realmente sustentável, e não apenas melhorar os processos existentes. Entretanto, a distinção mais sensível entre PL e P+L é que esta última não inclui o Princípio do Controle Democrático nem o Princípio da Precaução. Assim, a adoção de estratégias preventivas que visem aspectos de defesa ambiental e da saúde da população, tem sido reconhecida como avanço frente às medidas paliativas de "fim de tubo", o que as aproximam do conceito de desenvolvimento sustentável.

2.5.2. Ecoeficiência

Um outro modelo de gestão ambiental empresarial bastante promissor é denominado Ecoeficiência. Introduzido na Suécia em 1992, pelo Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (WBCSD), a ecoeficiência é uma filosofia proativa de gestão empresarial que busca produzir bens e serviços, a preços competitivos, que satisfaçam às necessidades humanas e melhorem a qualidade de vida, voltado simultaneamente para a redução progressiva do impacto ambiental e o uso de recursos naturais, durante seu ciclo de vida, a um nível que, no mínimo, atenda à capacidade de sustentação estimada do Planeta. Este último requisito sugere considerar ferramentas criadas na visão da ecologia industrial e de outras abordagens, como o *The Natural Step* (TNS®) (In: http://www.thenaturalstep.org).

A ecoeficiência estabelece ações para reduzir o consumo de materiais e energia com bens e serviços, reforçando a prática de reciclagem de materiais e redução de poluentes, pondendo ainda trazer vantagens competitivas (GASI e FERREIRA, 2006, p. 54; GINANNETTI e ALMEIDA, 2006, p. 17). É considerada um "modelo de produção e consumo sustentável, na medida que ressalta a produção de bens e serviços necessários e que contribuam para melhorar a qualidade de vida" (BARBIERI, 2007, p. 138). Além disso, o modelo incentiva uma "nova relação com os consumidores para reduzir os impactos ambientais negativos decorrentes do consumo, assumindo, por exemplo, a responsabilidade estendida do produtor" (BARBIERI, 2007, p. 138).

A Unep não diferencia ecoeficiência de P+L. Porém, o WBCSD caracteriza a Ecoeficiência pelo direcionamento da minimização de impactos ambientais, devido ao uso racional de matérias-primas, ou seja, produzir mais com menos. Assim, por caminhos distintos, ambas procuram transpor as fronteiras da empresa em relação a prevenção da

poluição, tanto pela atenção à eficiência dos processos produtivos, no caso da P+L, quanto pelas características do produto ou serviço e seus impactos ambientais, como na ecoeficiência. A preocupação da P+L com os produtos está mais ligada à necessidade de prevenção da poluição ao longo do processo. A ecoeficiência valoriza bastante a reciclagem interna e externa, ao contrário da P+L, cuja opção é de segundo e terceiro níveis. Mesmo com tais diferenças, esses dois modelos de gestão guardam muitas semelhanças entre si, sendo a ecoeficiência aceita como uma opção preferível pela Declaração Internacional sobre Produção mais Limpa do Pnuma.

De acordo com Savitz e Weber (2007, p. 42), "a ecoeficiência é o componente básico da sustentabilidade, que se aplica à gestão da empresa", e tem como propósito reduzir a quantidade de recursos empregados na produção de bens e serviços, onde o aumento de lucros é alcançado simultaneamente com a redução de impacto ambiental. Portanto, a ecoeficiência é vista como uma meta a se buscar, que mantém o enfoque preventivo empregado pela P+L e pela P2, mas inclui preocupações com a viabilidade econômica e a satisfação dos clientes (GASI e FERREIRA, 2006, p. 54).

Assim, embora a ecoeficiência indique o caminho para a sustentabilidade empresarial, há um distanciamento conceitual entre elas e a responsabilidade social corporativa, na medida em que estende a ação preventiva de impactos à esfera da sociedade, facilita a aproximação dessa dimensão. Neste sentido, Vinha (2003, p. 187) esclarece que a ecoeficiência considera a "reorientação do padrão de produção", e está mais direcionada para atender ao mercado, enquanto que o desenvolvimento sustentável incorpora aspirações sociais abrangentes, não apenas ligada à adaptação do processo de produção industrial, como também pela negociação das mudanças institucionais entre os atores. A dimensão social encontra-se enraizada no desenvolvimento sustentável, e as empresas que quisessem se apropriar dos benefícios de imagem proporcionados por esta tendênci não poderiam se esquivar dos objetivos da responsabilidade social. Este fato inaugurou um novo perfil na evolução da trajetória organizacional.

2.5.3. Ecologia Industrial

Os conceitos de ecologia e metabolismo industriais são desenvolvidos desde a década de 1970 (MAERBAL e KIPERSTOK, 2001, *apud* GASI e FERREIRA, 2006, p. 55), nos quais relacionam sistemas industriais e atividades econômicas com os sistemas naturais. Tratam-se de modelos de gestão ambiental que procuram comparar os sistemas biológicos, nos quais os alimentos utilizados pelos organismos são metabolizados por meio de um processo de aproveitamento de nutrientes e descarte de resíduos, aos efeitos sobre os elementos de

um ecossistema. Assim, as empresas são tratadas como uma comunidade empresarial (eco-rede) onde os resíduos de produção de uma(s) tornam-se insumos para outra(s) empresa(s). Esse metabolismo industrial é representado pelos fluxos de matéria e energia que descrevem os processos, com a alocação otimizada entre as atividades produtivas das empresas.

O sistema industrial tem à sua disposição diferentes rotas para solucionar o problema da poluição, como o simples controle de efluentes, os programas de P2, de P+L e ecoeficiência, e os mecanismos de interação ambiental (metabolismo industrial). Na visão de Gasi e Ferreira (2006), a ecologia industrial objetiva o máximo aproveitamento dentro de um ecossistema industrial, que por si só constitui um sistema fechado de reciclagem, com foco em economia de recursos e prevenção da poluição. Já para Giannetti e Almeida (2006), embora a Ecologia Industrial se encontre em uma etapa de construção, é inegável o seu grande potencial frente aos problemas ambientais, uma vez que dispõe um caminho para as empresas explorarem seus recursos (incluindo seus resíduos), resgatando a interdependência do homem e da biosfera.

Grande parte dos modelos de gestão ambiental existentes permite que sejam adotados pela própria empresa interessada, a partir de seus próprios recursos. Todavia, modelos inspirados na natureza, como o metabolismo industrial e a ecologia industrial, dependem de uma intensa articulação entre o conjunto de empresas interessadas, haja vista que formariam uma rede de empresas ambientalmente integradas, procurando reproduzir o mecanismo de funcionamento dos ciclos biogeoquímicos de um ecossistema, levando à economia de recursos naturais e à melhoria da qualidade ambiental.

2.5.4. Produção e Consumo Sustentáveis

Um novo enfoque voltado para atender às premissas de P+L e seguir adiante na direção da sustentabilidade é o de Produção e Consumo Sustentável (PCS). Segundo o Pnuma, Consumo Sustentável é definido como “o uso de bens e serviços que atendam às necessidades básicas, proporcionando uma melhor qualidade de vida, enquanto minimizam o uso dos recursos naturais e materiais tóxicos, a geração de resíduos e a emissão de poluentes durante todo ciclo de vida do produto ou do serviço, de modo que não se coloque em risco as necessidades das futuras gerações” (CETESB, 2004).

O conceito foi inicialmente discutido na Rio-92, na qual os Estados foram convocados a reduzir e eliminar padrões não-sustentáveis de produção e consumo, a fim de alcançar o desenvolvimento sustentável e uma melhoria na qualidade de vida dos povos. A Agenda 21, embora não defina o termo produção e consumo sustentáveis, evidencia que as

políticas públicas devem se voltar para os padrões de uso e demanda de recursos naturais, bem como reduzir a poluição e evitar ocorrência da degradação ambiental.

Esta abordagem tem caráter holístico e é voltada para a minimização dos impactos ambientais negativos provocados pelos padrões atuais de produção e consumo decorrentes do desenvolvimento; busca maximizar a eficiência e a eficácia dos produtos, serviços e investimentos sob uma ótica de eficiência econômica, equidade social e proteção ambiental. A produção sustentável está ligada à oferta, voltado para os impactos econômicos, sociais e ambientais dos processos de produção. Já o consumo sustentável enfoca a demanda, incluindo opções dos consumidores quanto a bens e serviços (alimentação, moradia, lazer), de modo a atender às necessidades básicas e melhorar a qualidade de vida.

Em 2002, na Cúpula de Johannesburgo, a produção e o consumo sustentáveis receberam prioridade máxima, convocando ao desenvolvimento de um marco de programas, em um período de dez anos, para acelerar as mudanças em direção a padrões sustentáveis. Essa medida ficou conhecida como Processo de Marrakech, iniciado em 2003, como resposta ao Plano de Implementação de Johannesburgo, apoiando iniciativas regionais e nacionais para transformar esses padrões. Neste sentido, cabe mencionar que o Brasil também vem estruturando um programa para a implantação do Plano Nacional de Ação para a Produção e Consumo Sustentável, através de um Comitê Gestor Nacional.

A Figura 2.11 relaciona a abrangência dos conceitos e estratégias de gerenciamento ambiental que atuam na minimização de impactos ambientais, cuja evolução segue na direção do alcance de sociedades sustentáveis.

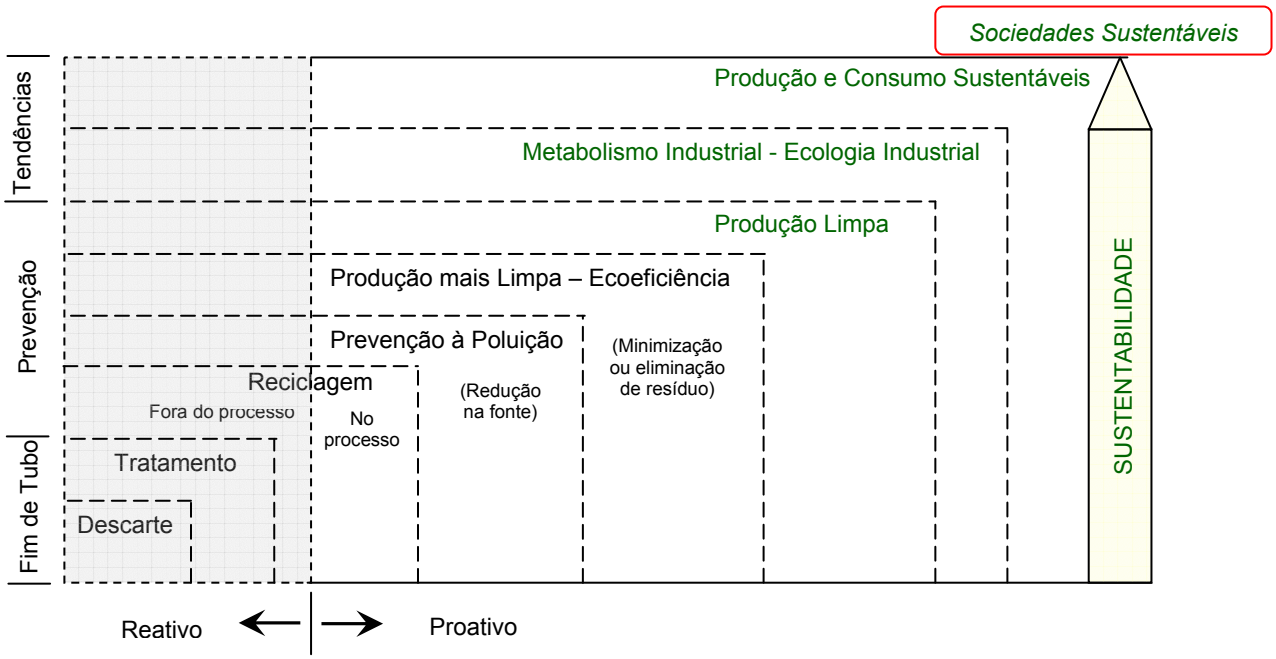


Figura 2.11 – Estratégias para reduzir os impactos ambientais, da concepção fim de tubo às tendências de sociedades sustentáveis (adaptado de GIANNETTI e ALMEIDA, 2006)

A sustentabilidade total do planeta não é realidade assegurada, mas também não se pode dissociá-la da premissa de crescimento econômico, sendo necessário harmonizar e integrar os modelos de modo que proporcione a desaceleração do processo de degradação ambiental. A sustentabilidade deve ser percebida não como uma solução definitiva para os problemas ambientais no mundo, mas sim como uma alternativa concreta de abordagem. Promover a substituição do uso de recursos não renováveis por renováveis é uma atitude necessária, mas não suficiente; o mais importante é estabelecer novos padrões de produção e consumo, uma tarefa ingrata, principalmente em um mundo já habituado aos vícios do padrão capitalista, e que equivocadamente tenderia a creditar a redução de consumo de bens e serviços a uma degeneração do crescimento econômico.

Entretanto, Binswanger (1996, p. 51) procura esclarecer essa percepção analisando uma situação na qual se assume que o estoque de uma fonte não renovável seja dez mil vezes o volume do consumo atual; neste caso, se o consumo cresce 10% ao ano, o estoque se esgota após 71 anos; mas se ele crescer cerca de 1% por ano, o estoque irá se esgotar somente após 463 anos. E conclui que se o nível de consumo atual se mantiver, o recurso durará dez mil anos; no entanto, a busca pela redução do patamar atual irá disponibilizar o recurso por um período ainda maior. Diante disso, é fácil perceber a importância de reduzir o consumo de materiais e energia, de modo que produção e consumo sustentável representam a evolução do conceito de P+L, sendo uma inclusão das melhores soluções

possíveis identificadas para minimizar custos ambientais e sociais, durante todo o ciclo de vida de bens e serviços. Por essa razão, a implantação gradual de consumo sustentável torna-se um importante fator para a garantia do desenvolvimento sustentável, sendo que a adoção de P+L exerce um efeito indutivo na promoção deste alcance.

2.6. COMENTÁRIOS GERAIS

Este capítulo teve a preocupação de pormenorizar e fomentar a discussão acerca de estratégias e modelos de gestão industrial nascidos no contexto histórico do conceito de desenvolvimento sustentável. O capítulo seguinte estabelece um elo de ligação entre a sustentabilidade e a chamada Integração de Processos, voltando-se particularmente para a descrição de uma ferramenta suporte para a tomada de decisão em processos que necessitem redução do consumo hídrico e da geração de efluentes industriais.

CAPÍTULO 3

SUSTENTABILIDADE E INTEGRAÇÃO DE PROCESSOS: O DIAGRAMA DE FONTES DE ÁGUA COMO FERRAMENTA PARA TOMADA DE DECISÃO

"A Integração de Processos constitui a base para a análise holística da performance dos processos e o desenvolvimento de relação custo-benefício e estratégias de soluções sustentáveis. Dentre seus objetivos estão o aumento da produtividade, a conservação de recursos e o planejamento a longo prazo, tendo um impacto positivo na sustentabilidade das Companhias."

(Russell Dunn e Mahmoud El-Halwagi, 2003, p. 1019)

Resumo – Este Capítulo apresenta inicialmente a Integração de Processos como uma área intimamente ligada aos anseios da sustentabilidade corporativa, na medida em que suas técnicas estão voltadas para a conservação e o uso racional de matéria-prima, água e energia. Em seguida, introduz-se a discussão sobre recursos hídricos, abrindo caminho para a apresentação do método Diagrama de Fontes de Água como ferramenta de tomada de decisão em processos sustentáveis, orientado para a identificação de oportunidades de reúso de águas e efluentes industriais. Neste caso, sua contribuição refere-se ao desenvolvimento de ferramentas para a síntese de redes (fluxogramas) de águas, com foco na minimização do consumo de água e da geração de efluentes. Uma revisão da literatura abordando os principais trabalhos que permitiram o desenvolvimento do método também é apresentada, de modo a firmar sua importância e utilidade como ferramenta para a sustentabilidade.

Palavras-chave: Integração de Processos, Reúso de Efluentes Industriais, Diagrama de Fontes de Água.

3.1. CONTRIBUIÇÃO DA INTEGRAÇÃO DE PROCESSOS PARA A SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL

Em relação à Engenharia de Processos, Perlingeiro (2005, p. 13) menciona que ela se tornou "a grande novidade na Engenharia Química depois dos Fenômenos de Transporte. Ela revolucionou a prática do projeto, tornando possível aprimorar os processos a partir da

própria concepção estrutural e não mais apenas pelo aprimoramento dos equipamentos". Acrescenta ainda que a maior contribuição deste campo veio a ser a sistematização do projeto:

> Hoje, o projeto é reconhecido como uma combinação de duas atividades complementares e distintas: Síntese e Análise. A primeira trata da geração sistemática dos fluxogramas alternativos, e a segunda, da avaliação desses fluxogramas. O projeto é também considerado como um problema, com um enunciado bem definido, dotado de um conjunto crescente de métodos sistemáticos de resolução (PERLINGEIRO, 2005, p. 11).

Os modelos de gestão ambiental aqui apresentados incorporam a premissa da prevenção da poluição, e procuram abordar os problemas ambientais sob um contexto mais geral, podendo estar alinhados à estratégia da empresa, de qualquer porte e setor. A Integração de Processos, como parte da Engenharia de Processos, tem sua aplicação ligada à melhoria da eficiência do processo a partir da minimização do uso e/ou com a maximização da recuperação de energia e materiais. Neste sentido, ela se encontra perfeitamente ajustável à filosofia da prevenção da poluição.

Dunn e El-Halwagi (2003) fizeram uma revisão das tecnologias de Integração de Processos, enfatizando suas aplicações industriais, como, por exemplo, na síntese de processos, com o uso de ferramentas voltadas para a redução de efluentes, e sistemas de conservação de água (integração mássica) e energia (integração energética).

A abordagem conceitual da Integração de Processos químicos apresenta relativo sucesso como suporte para o desenvolvimento de metodologias que tem como meta a redução da vazão de efluentes aquosos. As metodologias apresentadas e discutidas na literatura abordam duas categorias principais: a que envolve Procedimentos Algorítmicos e a que lança mão de técnicas de Programação Matemática.

A classe do Procedimento Algorítmico tem grande utilidade no estabelecimento de uma proposta de reconfiguração do processo, voltando seus objetivos tanto para a redução do consumo de energia como para a redução de água de processo por meio de reúso e/ou reciclo das correntes. Inclui-se nesta classe a Tecnologia do Ponto de Estrangulamento (*Pinch Technology*), que aborda conceitos de termodinâmica na análise sistemática do comportamento de correntes de processos industriais. Também neste grupo podem ser incluídos os Sistemas Especialistas (*knowledge-based systems*) (GOMES, 2002), outra linha de classificação de métodos sistemáticos da Síntese de Processos, os quais contemplam a utilização de métodos heurísticos, baseados na experiência acumulada com a resolução de determinados problemas. As vantagens dos métodos inseridos nesta classe encontram-se

na facilidade de utilização das ferramentas de que dispõem e a possibilidade da gradual interferência do engenheiro de processo no alcance de seus resultados.

A obtenção de um ótimo local nem sempre se refere a um ótimo global (melhor de todas as soluções); esta equivalência é somente assumida quando o problema apresenta características especiais, como a convexidade. A solução inicial pode levar a paradas prematuras em ótimos locais, uma vez que influencia na obtenção de vários deles. No caso de um procedimento heurístico, são determinados diferentes ótimos locais, onde a principal tarefa está em escolher o melhor dentre estes, sem qualquer garantia de alcance do ótimo global.

Relativamente à segunda classe, os métodos de programação matemática são caracterizados pelo equacionamento da otimização numérica através de uma função objetivo, buscando minimizar os efluentes ou maximizar a economia do processo através de condições de balanço material e energético, por restrições específicas do processo e/ou termodinâmicas, satisfazendo as condições de igualdade e de desigualdades estabelecidas. Na área da otimização, existem técnicas que são definidas como determinísticas e não-determinísticas. No primeiro grupo inclui-se a Programação Matemática, ao passo que o segundo relaciona os métodos de Pesquisa Estocástica, na qual existem informações de entrada que são aleatórias ou sujeitas a flutuações.

Na visão de Savitz e Weber (2007, p. 153), em comparação com a ideia de sustentabilidade, minimização significa reduzir o tamanho das pegadas da empresa (entendida como a extensão do território utilizada para se sustentar), em termos de impactos ambientais, sociais e econômicos adversos resultantes de suas atividades. O propósito da minimização é reduzir os danos ecológicos, reduzir os acidentes de trabalho e reduzir os malefícios à comunidade. Em termos gerais, minimização é “ser menos prejudicial”. Já a otimização é entendida como “ser mais benéfico”, no sentido da produção de benefícios nas áreas de impacto ambiental, social e econômico. A otimização, portanto, pode ir além da minimização. Assim, a otimização busca não somente reduzir a poluição, como também restaurar o meio ambiente, por exemplo.

Em 2007, um projeto realizado pela Refinaria Presidente Bernardes da Petrobras (RPBC, Cubatão, SP) foi vencedor do “Prêmio Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia” (CNI, 2008), concedido pelo Ministério de Minas e Energia e coordenado pela Confederação Nacional da Indústria (CNI). O estudo empregou a Tecnologia *Pinch* e obteve redução de 55% do consumo energético na unidade avaliada, mediante o aumento de trocas térmicas entre as correntes quentes dos derivados produzidos e do petróleo frio, que deve ser aquecido antes de ser encaminhado à torre de destilação. Realizaram-se a otimização energética na bateria de pré-aquecimento e o aumento da eficiência dos fornos

da unidade de destilação atmosférica. A unidade queimava óleo e gás com o auxílio de dois fornos, visando o fornecimento de calor ao petróleo; passou então a operar com apenas um, com a queima somente de gás de refinaria, resultante da melhor recuperação de calor nos trocadores, associado às melhorias introduzidas no forno, cuja eficiência aumentou de 72 para 80%.

Sobre o futuro da Integração de Processos, Relvas (2002, p. 116) arrisca uma afirmar que "o novo paradigma do desenvolvimento industrial irá promover cada vez mais a aplicação das metodologias de Integração de Processos como uma das áreas de maior importância na Engenharia Química, e em todas as vertentes da Engenharia de Processos". A globalização, ao acirrar a competitividade dos mercados, assume um papel indutor à medida que estimula o constante aprimoramento dos processos industriais, observando não somente a redução nos custos de produção, como também aspectos irreversíveis de qualidade ambiental exigidos pela sociedade civil e pelo atendimento aos preceitos do próprio Protocolo de Quioto.

3.2. O RECURSO ÁGUA: PRINCÍPIO ATIVO DA SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL

À Água

Ninguém ouve a canção, mas o ribeiro canta!
Canta porque um alegre deus o acompanha!
Quantos mais tombos, mais a voz levanta!
Canta porque vem limpo da montanha!

Espelho do céu, é quanto mais partido
Que as imagens tem da grande altura.
E quebra-se a cantar, enternecido
De regar a paisagem de frescura.

Água impoluta da nascente,
És a pura poesia
Que se dá presente
Às arestas da humana penedia...

(Miguel Torga. Odes, Poesia Completa I, Círculo de Leitores, 2002, p. 220. In: OUTORGA, 2011)

Nos versos do poeta português Miguel Torga (1907-1995), uma composição poética (ode) revela a dádiva beleza da água como líquido precioso, materializando o Santo Graal da sustentabilidade de todos os organismos vivos que habitam o planeta. No entanto, sua disponibilidade é limitada, contrariando a visível abundância na superfície terrestre: segundo o *World Resources Institute* (WRI, 2003, *apud* MIERZWA e HESPANHOL, 2005, p. 9) as

reservas de água doce representam cerca de 2,5% do volume total disponível; desse percentual, algo próximo a 13% encontram-se no Brasil.

No início do século XXI, uma em cada cinco pessoas residentes em países em desenvolvimento – cerca de 1,1 bilhão de pessoas – não tinha acesso à água potável. A quantidade é ainda maior quando se avalia o acesso da população total destes países a saneamento básico: cerca de 2,6 bilhões de pessoas. Foi o que constatou o Relatório de Desenvolvimento Humano, da ONU (RDH, 2006), que aponta ainda como fatores responsáveis pela situação a ineficiência de ações políticas, as alterações ambientais e a escassez de recursos econômicos. No entanto, este estudo leva a acreditar que a crise de água é essencialmente de natureza logística e local, contrariando a constatação alarmante de sua insuficiência global para o atendimento das necessidades humanas (escassez do líquido).

Ainda de acordo com o estudo (RDH / ONU, 2006), para alcançar a meta dos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio de reduzir pela metade o déficit global de cobertura de 1990, seria necessário dispor saneamento adequado a mais de 120 milhões de pessoas todos os anos, até 2015; porém, mesmo que esse objetivo fosse atingido, restariam 1,9 bilhão de pessoas sem acesso. Diante disso, é oportuno acreditar que o espírito de Thomas Malthus, que no século XIX desconcertou os líderes políticos com a previsão de um futuro de escassez alimentar, está cada vez mais presente nos debates internacionais que levantam a crise mundial da água. Pela perspectiva de Malthus, o crescimento populacional e o aumento da demanda pela água são fatores que certamente levarão para um cenário de real escassez; já o estudo da ONU infere que a origem do problema não está na atual disponibilidade física, mas no poder, na pobreza e na desigualdade social.

Por outro lado, um relatório publicado no Fórum Econômico Mundial de Davos (Suíça), realizado entre janeiro e fevereiro de 2009, alerta que em menos de 20 anos o mundo pode sofrer gravemente com a falta de água doce, dado o constante aumento da demanda, que cresce em um ritmo mais rápido que a população mundial (AFP, 2009, *apud* Folha Online, 2009). Segundo o documento, muitos lugares do mundo estão a ponto de esgotar suas reservas de água. Cerca de 40% dos recursos aquíferos dos Estados Unidos são destinados à produção energética, enquanto apenas 3% vão para o consumo doméstico. O estudo estima ainda que as necessidades de água para gerar energia devem aumentar em 165% nos Estados Unidos e 130% na União Europeia.

Durante o 5º Fórum Mundial da Água (Istambul, Turquia), realizado em março de 2009, a divulgação do 3 º Relatório das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Mundial dos Recursos Hídricos (WWA, 2009) advertiu sobre a perspectiva de aumento de consumo e de escassez, dado o crescimento anual de 80 milhões de novos habitantes e um consumo

de água em torno de 64 bilhões de metros cúbicos anuais. O documento alerta para a necessidade de se conter a expansão do consumo de recursos hídricos, por meio de políticas públicas regulatórias para o uso da água, sem as quais a demanda mundial pela água crescerá entre 70% e 90% até o ano de 2050.

Na indústria, a água é um elemento chave para a funcionalidade operacional de grande parte dos processos, sendo utilizada tanto como matéria-prima, incorporada ao produto final, como um composto auxiliar na preparação de matérias-primas, fluido de transporte, fluido de aquecimento e/ou refrigeração ou nos processos de limpeza de equipamentos, para a rede de combate a incêndio, instalações sanitárias, refeitórios etc.. Os níveis de qualidade e quantidade da água dependem das características do processo de produção, podendo variar dentro de uma mesma indústria.

No Brasil, as atividades industriais respondem por aproximadamente 20% do consumo de água, sendo que, pelo menos 10% são extraídos diretamente de corpos d'água e mais da metade é tratada de forma inadequada ou não recebe nenhuma forma de tratamento (BERNARDI, 2003).

A distribuição dos recursos hídricos no país é bastante irregular: segundo a Agência Nacional de Águas (*apud* SANTOS e MANCUSO, 2003, p. 4), pelo menos 8% da reserva mundial de água doce está no Brasil, sendo que 80% destes estão na região Amazônica, de baixa concentração populacional, ao passo que na região Sudeste, mais industrializada e de maior concentração populacional, sentem-se problemas de desabastecimento, poluição de mananciais e escassez das reservas de água doce. Neste sentido, é visível que o problema de distribuição da água para o pronto atendimento das necessidades humanas existe em todo o mundo. Assim, a gestão dos recursos hídricos assume um importante papel quanto ao estímulo à necessidade de se criar e implantar medidas preventivas como estratégias visando a preservação pela racionalização do uso da água, contrariando a equivocada tendência de se tratar este recurso natural como abundante e, transmitindo, desse modo, uma sensação de infinita disponibilidade. No Brasil, os primeiros passos para a consolidação de um mecanismo de valorização dos recursos hídricos vêm sendo estruturados desde o início do século passado, através de imposições legislativas que fiscalizem e comprometam para o seu uso racional.

Um dos primeiros registros normativos que regulamentaram a questão da água no Brasil foi o chamado Código das Águas (Decreto n° 24.643/1934), que definiu os tipos de água no território nacional, os critérios de aproveitamento e os requisitos relacionados com as autorizações para derivação, abordar ainda a contaminação dos corpos d'água. No entanto, somente em 1981, com a criação do Sisnama (Sistema Nacional do Meio Ambiente) e a Lei 6.938 (alterada pela Lei n° 7.804/1989 e pela Lei Complementar n°

140/2011), é que se estabeleceu a Política Nacional de Meio Ambiente, instituindo um conjunto de órgãos voltados para controlar e fiscalizar a proteção do meio ambiente. Após isso, a Constituição de 1988 (em vigor até o presente) promoveu a água como um bem da União ou dos estados, e que seus usos econômico e social devem buscar a redução de desigualdades.

Em janeiro de 1992, ou seja, antes da Eco-92, realizou-se em Dublin (Irlanda) a Conferência Internacional das Nações Unidas sobre Água e Meio Ambiente (*International Conference on Water and the Environment* - ICWE). Como resultado do evento, a Declaração de Dublin apontou que "a escassez e o desperdício da água doce representam sérias e crescentes ameaças ao desenvolvimento sustentável, e a proteção ao meio ambiente, a saúde e o bem estar do homem, a garantia de alimentos, o desenvolvimento industrial e o equilíbrio dos ecossistemas estarão sob risco se a gestão da água e do solo não se tornarem realidade na presente década, de forma bem mais efetiva do que tem sido no passado". Dois dos quatro princípios formulados atribuíam à água a condição de "recurso finito e vulnerável, essencial para a manutenção da vida, do desenvolvimento e do meio ambiente", além de dotada de "valor econômico para todos os seus usos, devendo ser considerada como um bem econômico...". Assim, os princípios de Dublin estabeleceram critérios para a tomada de decisão quanto à gestão de recursos hídricos e às políticas públicas da água no mundo, atribuindo a água potável um relativo *status* de *commodity*.

Em 1998, a Declaração de Paris, elaborada durante a Conferência Internacional sobre Água e Desenvolvimento Sustentável, afirma que a água doce é essencial tanto para o desenvolvimento sustentável como para a vida, tendo inclusive dimensões sociais, econômicas e ambientais interdependentes e complementares.

No Brasil, uma política de gerenciamento mais efetiva referente ao controle da qualidade dos recursos hídricos passou a ser realizada a partir da criação dos Comitês de Bacias Hidrográficas, com o objetivo de realizar um levantamento das bacias para posterior monitoramento e manutenção da qualidade de suas águas. Dentre as medidas anunciadas está a segmentação dos rios nas esferas municipal, estadual e federal. Com a Lei Federal n° 9.433/1997, a água tornou-se um "bem de domínio público, recurso natural limitado, dotado de valor econômico", suscitando a discussão por uma incipiente proposta para o estabelecimento de cobranças pelo uso da água nas diferentes bacias hidrográficas, instituindo taxas diferenciadas relativas ao uso, à captação e ao despejo de efluentes nos rios.

Os limites para lançamento de efluentes nos corpos d'água e as concentrações máximas para o lançamento de algumas substâncias são estabelecidos pela Resolução Conama (Conselho Nacional de Meio Ambiente) nº 357/2005, em substituição à antiga

Resolução n° 20/1986, e que classifica os corpos d'água (águas doces, salobras e salinas) segundo seus distintos usos. Em 2011, foi estabelecida a Resolução Conama n° 430/2011, que complementa e altera parcialmente sobre condições, parâmetros, padrões e diretrizes para gestão do lançamento de efluentes em corpos de água receptores. Vale citar nesse contexto a criação da Agência Nacional de Águas, responsável por implementar a Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e regular o acesso à água, com a Lei Federal n° 9.984/2000; e a Resolução CNRH (Conselho Nacional de Recursos Hídricos) n° 16/2001, que estabeleceu critérios gerais para a outorga de direito de uso de recursos hídricos.

Os mais sérios desafios a serem enfrentados pelas indústrias químicas neste novo milênio são os seus impactos sobre o meio ambiente. Nas últimas duas décadas, significativos esforços têm sido feitos para reduzir a quantidade de resíduos industriais gerados. A tendência mais sensata é deslocar o foco da abordagem de controle de poluição *downstream* (tratamento final de tubo – *end-of-pipe*) para uma prática mais pró-ativa de se tentar prevenir a poluição na fonte de sua geração.

A prática da sustentabilidade ambiental e a elevação dos custos de água limpa e com o tratamento de efluentes têm estimulado as indústrias de processos a buscarem novas formas de reduzir a vazão de água limpa e de efluentes aquosos. O controle associado a restrições legislativas mais rigorosas sobre os responsáveis pelas fontes emissoras desperta para a busca da máxima redução do impacto ambiental na indústria. Tal perspectiva vem condicionando as indústrias brasileiras a encomendarem grandes projetos de reúso de efluentes, como no caso atual da Petrobras, motivada pela escassez de água nas regiões em que suas principais refinarias estão instaladas (FURTADO, 2005 e 2006). Em consequência, há uma necessidade maior para o aperfeiçoamento tecnológico de metodologias sistemáticas voltadas para ações de reciclagem e reúso de águas dentro do processo.

A Rede de Tecnologias Limpas da Bahia, vinculado institucionalmente à Universidade Federal da Bahia, produziu diversos trabalhos voltados para o uso racional da água em processos industriais, os quais foram desenvolvidos, em sua grande maioria, em parceria com os setores industriais. Dentre algumas destas contribuições, citam-se Mustafa (1998), Gonçalves (2001), Miguel e Santos (2002), Bravo (2003), Ávila Filho (2004), Del Grande (2004) e Cunha (2006).

A garantia da sustentabilidade da gestão dos recursos hídricos nacionais passa pela necessidade de se desenvolver uma cultura e uma política de conservação de água em todos os setores da sociedade, além do reúso consciente e planejado de águas de baixa

qualidade (para drenagem agrícola, águas salobras, águas de chuva e, principalmente, esgotos domésticos e industriais) (HESPANHOL, 2003, p. 38-39).

A sustentabilidade ambiental consiste na capacidade de assimilação contínua do meio ambiente face ao desenvolvimento econômico e social, sem que isso leve a impactos que comprometam a qualidade dos ecossistemas. Tanto as metas para obtenção de água potável quanto as de saneamento contribuem para o alcance dos objetivos do milênio pelo gerenciamento hídrico, conforme mostrados na cadeia de causa e efeito da Figura 3.1.

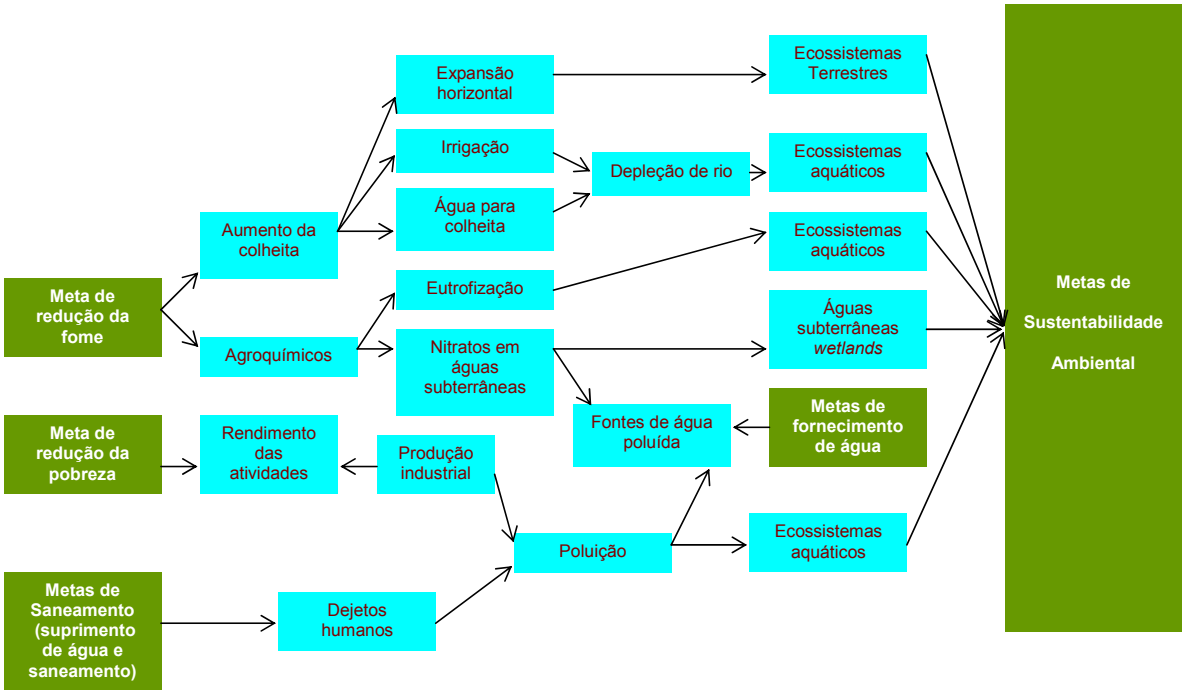


Figura 3.1 – Cadeia de causa e efeito e ligações entre água e as metas de desenvolvimento do milênio (COSGROVE, 2006, In: WWA, 2009)

Em virtude do exposto, é fácil perceber porque o reúso e a reciclagem de água e seus efluentes na indústria constituem ferramentas de gestão fundamentais para a sustentabilidade da produção industrial. A institucionalização da cobrança pelo uso da água é um fator que leva ao aumento nos custos de produção, o que estimula a conservação e o uso racional, bem como um adequado tratamento de efluentes; em virtude disso, a aplicação de técnicas de reúso torna-se um incentivo adicional. Além disso, a redução de vazões de captação e lançamento traria um decréscimo na tributação hídrica; a economia gerada pelo menor consumo poderia suprir os custos de instalação de um sistema de regeneração e reúso de água e seus efluentes na própria unidade, muito embora a cobrança de água na fonte represente um inevitável aumento nos custos de produção. Todavia, sendo a água um bem dotado de valor econômico, a tendência é que os sistemas de recuperação

(tratamento intermediário e/ou final) e reúso de água e efluentes se tornem cada vez mais necessários, de modo que, no futuro, esta prática seja incorporada a todas as indústrias ambientalmente corretas.

A preocupação com o uso racional da água encontra-se diretamente ligada a outro recurso fundamental para a humanidade: a energia. Esta pode perfazer algo em torno de 60% a 80% dos custos de transporte e tratamento de água e 14% do total dos custos de utilidades (água de resfriamento e vapor de aquecimento) de água (WWA, 2009). Em 2005 e 2006, as companhias de água e efluentes da Inglaterra e do País de Gales gastaram $ 632 milhões em energia elétrica (7.700 gigawatts), tornando-se o maior item dos custos operacionais, exclusive *staff*. A eficiência e a conservação não se encontram ligadas apenas aos recursos hídricos, mas também à questão energética (WWA, 2009).

A questão da interdependência das funções ambientais não deve ser ignorada, uma vez que a exploração de um recurso, como a água, pode comprometer a utilização de outros recursos em momentos posteriores, como a própria energia. E essa percepção vem sendo subestimada, de acordo com Webber (2009, p. 28): "[...] enormes quantidades de água são consumidas para gerar energia e quantidades imensas de energia são gastas para distribuir água limpa". E essa interdependência aumenta a preocupação com a mantenção dos recursos: "restrições da água impedem soluções para gerar mais energia, e problemas de energia, especialmente o aumento de preços, restringem os esforços de fornecimento de mais água limpa" (WEBBER, 2009, p. 28). É consenso que o pico do petróleo pode gerar profundas alterações na sociedade, mas o pico da água teria consequências mais extremas, pois implicaria no aumento da mortalidade atual ocasionada pelo acesso limitado à água doce.

3.3. O DIAGRAMA DE FONTES DE ÁGUA: FERRAMENTA ESTRATÉGICA AMBIENTAL PARA TOMADA DE DECISÃO EM PROCESSOS

3.3.1. Minimização e reúso de águas e efluentes – aspectos conceituais

Mierzwa e Hespanhol (2005, p. 19) apontam o uso racional da água como uma das primeiras medidas de um programa de gerenciamento dos recursos hídricos. Para esse objetivo, deve-se conhecer as atividades nas quais a água é empregada, e assim determinar a quantidade e a qualidade necessária em cada aplicação, bem como localizar os pontos de geração de efluentes.

O conceito de reúso de água tem gerado imprecisões quanto à sua padronização, e isto se deve principalmente ao entendimento dos diferentes setores de atividade nos quais

são destinados os recursos hídricos, ainda que a literatura aborde oportunamente esta terminologia. A Organização Mundial de Saúde (OMS) define este conceito como (In: BREGA FILHO e MANCUSO, 2003):

► Reúso indireto: ocorre quando a água já usada, uma ou mais vezes para uso doméstico ou industrial, é descarregada nas águas superficiais ou subterrâneas e utilizada novamente a jusante, de forma diluída;

► Reúso direto: é o uso planejado (consciente) e deliberado de esgotos tratados para certas finalidades, como irrigação, uso industrial, recarga de aquífero e água potável;

► Reciclagem interna: é o reúso da água internamente às instalações industriais, antes de sua descarga em um sistema de tratamento ou outro ponto qualquer de disposição, tendo como objetivo a economia de água e o controle da poluição.

Para Lavrador Filho (1987, *apud* BREGA FILHO e MANCUSO, 2003, p. 25), reúso de água

> é o aproveitamento de águas previamente utilizadas, uma ou mais vezes, em alguma atividade humana, para suprir as necessidades de outros usos benéficos, inclusive o original. Pode ser direto ou indireto, bem como decorrer de ações planejadas ou não planejadas.

Brega Filho e Mancuso (2003, p. 24) qualificam o reúso como “descargas de efluentes que são subsequentemente utilizados por outros usuários, diferentes do original”. De acordo com Westerhoff (1984, *apud* BREGA FILHO e MANCUSO, 2003, p. 26), o reúso de água abrange duas categorias: potável e não potável. Essa classificação foi adotada pela Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), seção São Paulo. O reúso potável é dividido em direto (o esgoto recuperado é diretamente no sistema de água potável) e indireto (o esgoto, após tratado, é disposto para diluição, purificação, captação e tratamento, antes de ser utilizado como água potável). Na classe de reúso não potável, dividem-se em: para fins agrícolas, industriais, recreacionais, domésticos, para manutenção de vazões, aquicultura e recarga de aquíferos subterrâneos. No caso de reúso para fins industriais, a abordagem considera os uso industriais de refrigeração, águas de processo, para uso em caldeiras etc.

Uma definição bastante aceita para o termo reúso de água é, dada por Mierzwa (2002): “uso de efluentes gerados para fins benéficos, tais como irrigação, uso industrial e fins urbanos não potáveis”. No entanto, quando se considera o ambiente industrial, torna-se mais adequada a conceituação apresentada por Wang e Smith (1994a), que classificam a geração de efluentes industriais líquidos sob a ótica de três modalidades:

► Reúso: quando o efluente é reaproveitado diretamente em outra operação sem passar por qualquer tratamento prévio, obedecendo ao nível de contaminantes na corrente de entrada da operação receptora. Esta medida dispensa o consumo de água primária (Figura 3.2a). Em linhas gerais, contaminante refere-se à qualquer substância que se encontra acima do nível natural para o meio, porém dentro de um limite que não ocasione efeitos deletérios ao ambiente.

► Regeneração com reúso: o efluente de quaisquer das operações sofre um tratamento para remoção parcial de contaminantes, para que atinja um nível de contaminantes permissível à seu desvio para a entrada de outra operação. Esta forma de manipulação também diminui o consumo de água primária, bem como o volume de efluente gerado e a carga de contaminantes, através da regeneração (Figura 3.2b).

► Regeneração com reciclo: o efluente sofre remoção parcial de contaminantes para ser reaproveitado no mesmo processo ou operação que o gerou. Da mesma forma que a anterior, há uma redução no consumo de água primária, na geração do efluente e na carga de contaminantes (Figura 3.2c). Esta modalidade apresenta a possibilidade indesejável de gerar acúmulo de contaminantes que não foram removidos na regeneração, por meio do reciclo de correntes.

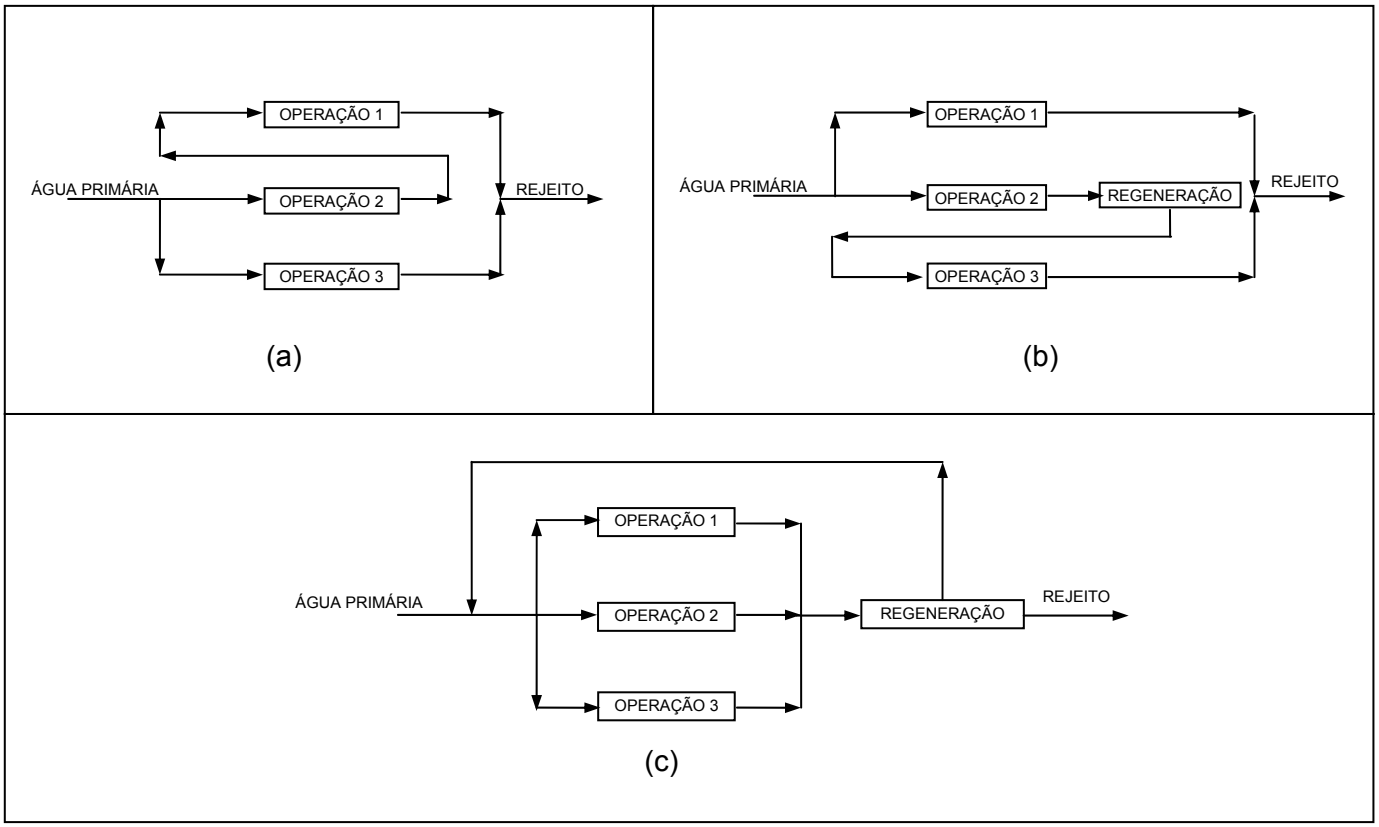


Figura 3.2 – Formas de minimização do consumo de água primária, através de (a) reúso; (b) regeneração com reúso; e (c) regeneração com reciclo

Em princípio, a regeneração pode representar qualquer processo de separação ou reacional que efetue a remoção de contaminantes, como oxidação química, filtração, adsorção, *stripping* (retificação com vapor). Em tal caso, no entanto, os custos de regeneração devem ser levados em conta.

Um programa de conservação e reúso de água (PCRA) engloba um conjunto de ações específicas de racionalização do uso da água na unidade industrial, que deve ser gerenciada a partir de análises detalhadas de demanda e oferta de água, com base em viabilidade econômica e técnica para a implantação (FIESP, 2004). São ações que procuram otimizar o consumo hídrico nos processos e manter os índices de consumo alcançados, com o monitoramento contínuo e prática de ações preventivas e corretivas com o tempo. A Figura 3.3 mostra as etapas típicas deste programa.

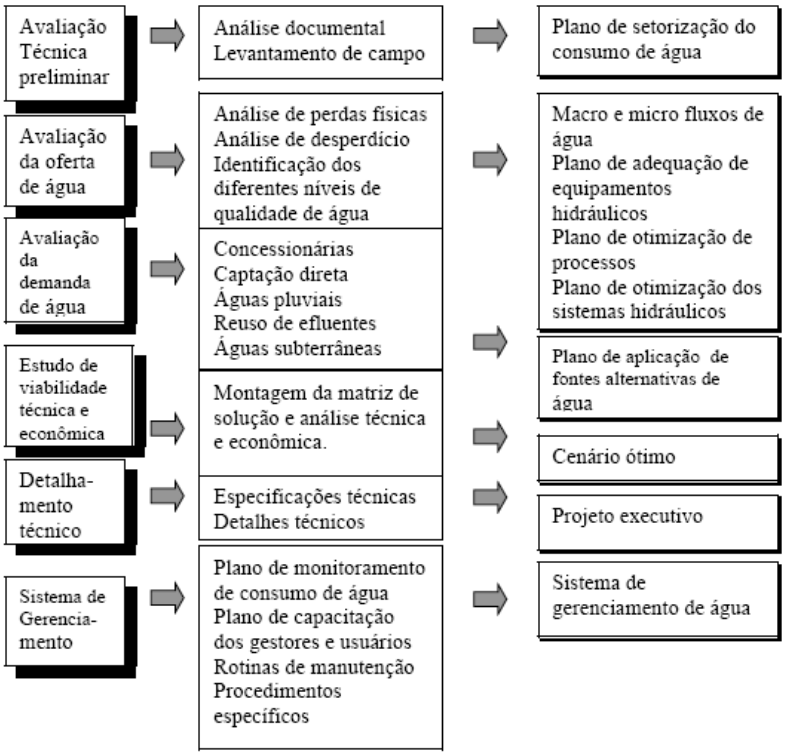


Figura 3.3 – Etapas de implantação de um programa de conservação e reúso de água (FIESP, 2004)

Mierzwa (2002) propõe e avalia os conceitos de uso racional e reúso como ferramentas para o gerenciamento de águas e efluentes nas indústrias, através de programas específicos. Foi desenvolvido um estudo de caso na empresa Kodak Brasileira – Indústria e Comércio Ltda., avaliando os principais processos produtivos e identificando oportunidades para aplicação de uso racional e reúso de água. O potencial de redução global chegou próximo de 15%, mostrando a importância do uso destas ferramentas dentro

do programa de gerenciamento. No entanto, Mierzwa destaca que as ferramentas voltadas para o reúso devem ser bem avaliadas, pois apresentam limitações tanto técnicas como econômicas para sua aplicação.

Lopes (2006) avaliou o impacto do gerenciamento de recursos hídricos em função das estratégias das empresas, observando a influência de pressões da sociedade, da concorrência, de custos e a legislação. Estudaram-se seis empresas que praticam o gerenciamento hídrico como resposta às pressões externas, concluindo que as pressões são responsáveis por todas as mudanças nas ações desta prática, sendo as conformidades legais, a imagem empresarial e os custos os principais motivadores para o gerenciamento racional da água.

Mierzwa e Hespanhol (2005, p. 20) ressaltam que a prática de reúso, embora seja uma ferramenta bastante útil, não deve ser considerada a principal meta em um modelo de gerenciamento de águas e efluentes, o que, de certa forma, não atende aos princípios defendidos pela Agenda 21. Ela deve ser vista como um dos componentes desse modelo, importante para a preservação dos recursos naturais e controle da poluição ambiental, mas deve estar vinculada a outras medidas que busquem a racionalização do uso da água e demais recursos naturais. Paralelamente, devem-se considerar os investimentos necessários para adequação das características dos efluentes aos requisitos de qualidade, bem como da vazão a ser tratada. Deve-se considerar também que a concentração de determinados contaminantes pode aumentar à medida que se aplica o reúso, o que implica em maior ciclo de tratamento. Essas observações tornam-se relevantes à medida que podem comprometer todas as atividades nas quais a água de reúso é aplicada. Da mesma forma, o sistema de tratamento de efluentes também tende a ser afetado.

3.3.2. DFA – breve histórico

O Diagrama de fontes de Água é um procedimento algorítmico-heurístico que surgiu como uma evolução dos trabalhos de Castro *et al.* (1999) e Wang e Smith (1994a,b; 1995), a partir de conceitos de tecnologia *Pinch*, e que tem como marcante característica o mecanismo de solução do tipo fontes-sumidouros. Silva *et al.* (2001) estenderam a aplicação inicialmente formulada para um contaminante a casos de múltiplos contaminantes, incluindo reúso e regeneração com reúso na análise. Foi sintetizada uma rede com estrutura similar a uma das obtidas por Wang e Smith (1995), o que levou a um custo total levemente superior. Com isso, incorporou-se um procedimento heurístico com a vantagem da simplicidade do algoritmo em relação àquele baseado na Tecnologia *Pinch*, conforme usado por Wang e Smith (1994a).

Logo em seguida, incentivada pela na iniciativa de Silva *et al*. (2001), Gomes (2002) estendeu o algoritmo DFA, considerando a presença de um e de múltiplos contaminantes nas correntes. Foram contempladas ainda situações com múltiplas fontes de água, operações com perda de água, regeneração com reúso, regeneração com reciclo. No caso de sistemas com múltiplos contaminantes, o diagrama é construído com base em um contaminante de referência. O algoritmo utiliza as concentrações máximas de entrada e saída na operação e permite localizar o ponto *pinch* global. Com o diagrama montado, gera-se a rede de águas. Foram testadas várias situações envolvendo exemplos da literatura, em opções como reúso e regenerações com reúso e com reciclo, e, com os resultados, foram calculados os respectivos custos totais anuais para a comparação das alternativas geradas. A descrição e o desenvolvimento do DFA para casos unicontaminantes encontram-se pormenorizados em Gomes *et al*. (2007).

As considerações do trabalho de Gomes (2002) foram ampliadas por Delgado (2003), testando simultaneamente todas as vias de redução de vazão, para quatro casos industriais, incluindo sistemas com múltiplos contaminantes. Aplicou a mesma metodologia explorada por Gomes (2002), para a situação de regeneração diferenciada, onde se faz a remoção de um dado contaminante na corrente. Foram obtidos, pela aplicação do procedimento, os fluxogramas com redução da vazão para o tratamento de efluentes e consumo de água. Delgado também estruturou um procedimento para aquisição de dados industriais, por meio de um questionário específico, e com o propósito de sistematizar a coleta de informações necessárias para aplicar o DFA.

Stelling (2004) também se interessou pelo algoritmo DFA, mas não se limitou apenas à sua aplicação, preferindo expandir horizontes do método pela combinação das técnicas de integrações energética e mássica desenvolvidas nos trabalhos de Liporace (1996) e Gomes (2002). Deste modo, Stelling (2004) criou um novo procedimento visando à síntese (geração de fluxograma) combinada de redes de equipamentos de transferência de massa e de trocadores de calor. A intenção foi encontrar uma solução técnica e economicamente viável para minimizar simultaneamente o consumo de água de processo e de utilidades quentes e frias. O procedimento consistiu em realizar primeiramente a integração mássica, com o uso do DFA, para reutilizar a água nas operações, e, em seguida, identificar as correntes quentes e frias para proceder à etapa de integração energética.

A exemplo do DFA, o procedimento descrito por Stelling (2004) demonstra vantagens na simplicidade e na possibilidade de se considerar redes com restrições de vazão, múltiplas fontes de água, equipamentos de regeneração, multicontaminantes e perda de água no processo. Verificou-se que a síntese combinada de redes de água e energia necessita de regras heurísticas que levem à geração de mais de uma rede, de forma que a

seleção da melhor rede se dê por critérios econômicos. Os resultados alcançados em termos de custos foram maiores quando comparados aos da literatura, os quais empregam técnicas de programação matemática; os resultados sugerem ainda que problemas complexos levam a custos maiores em relação aos da literatura, embora outros exemplos complexos não foram testados de modo a se comprovar a tendência. Uma característica positiva do método é que o diferencial mínimo de temperatura entre as correntes quente e fria ($\Delta T_{approach}$), o qual influencia a área de troca térmica, é perfeitamente atendido, ao contrário de resultados apresentados na literatura.

Pouco depois, Húngaro (2005) desenvolveu um procedimento para minimizar as vazões de efluentes enviadas para o tratamento. As restrições dos tratamentos foram dadas pelas concentrações máximas e pelas vazões requeridas, visando o atendimento da taxa de remoção (eficiência) especificada, as quais foram consideradas constantes. A seleção dos tratamentos é realizada em função da maior eficiência de remoção ou pela diversidade de contaminantes removidos. Um procedimento foi desenvolvido para os casos de um e múltiplos contaminantes, considerando tratamentos cujas concentrações máximas de entrada são conhecidas ou desconhecidas. A maior contribuição deste trabalho está na seleção e na escolha da sequência de tratamento para um conjunto de correntes de efluentes, embora a seleção das alternativas não tenha sido proposta com base na estimativa do custo de tratamento de efluentes. O procedimento foi aplicado a quatro exemplos da literatura e a um efluente real de um laboratório de pesquisa. O algoritmo gerou a menor vazão para o tratamento distribuído, relativamente à configuração centralizada.

Mirre *et al*. (2006) aplicaram o procedimento algorítmico diagrama de fontes de água aos dados típicos de processos de uma refinaria de petróleo. A metodologia empregada teve como meta o máximo reúso de água, considerando a presença de múltiplos contaminantes nas correntes. Foram encontradas configurações de reutilização de correntes de efluentes com cerca de 7% de redução do consumo de água primária e industrial, proporcionando uma redução do custo operacional do processo. Com isso, constatou-se que a redução no consumo de água atingiu valores satisfatórios para as necessidades de operação de uma refinaria de petróleo, contribuindo para ratificar a viabilidade da metodologia aplicada.

Higa *et al*. (2007) também verificaram a aplicabilidade do DFA frente aos processos de refino de petróleo que utilizam água. Os dados utilizados na análise referem-se a uma refinaria nacional, no qual foram geradas configurações de reúso para sistemas com três componentes (cloro, amônia e fenol), e pH como parâmetro de controle. Em relação às alternativas propostas, verificou-se a redução no consumo de água em torno de 5%, e nos

custos totais anuais acima de 1%, o que foi importante para comprovar a aplicabilidade do DFA ao caso industrial.

Mirre (2007) empregou o DFA em um estudo de caso de uma refinaria de petróleo, com múltiplos contaminantes. Foram gerados diferentes cenários propostos por meio de reúso e/ou reciclo de correntes, incluindo os processos regenerativos. Foi proposto um realinhamento onde a estação de tratamento de efluentes atuasse como recuperadora da qualidade da água para reúso no processo, não somente do efluente final, como também das correntes intermediárias de processo, por meio de tratamentos do tipo centralizado e distribuído. Os cenários obtidos levantaram alternativas de configurações de reaproveitamento de correntes com aproximadamente 20% de redução nos custos totais, contribuindo para a integração das redes de processos hídricos com a de tratamentos de efluentes industriais.

Para facilitar e agilizar a geração e interpretação de cenários de reutilização hídrica com o DFA, havia a necessidade de se automatizar o procedimento, o que foi realizado por Santos (2007), através da elaboração de um *software*, denominado MINEA (Minimização de Efluentes Aquosos). Paralelamente, foi proposto um procedimento para a seleção do contaminante e da operação de referência, importante na consideração de múltiplos contaminantes. Foram avaliadas as restrições de processos, como perdas e proibições de reúso, testando e aplicando o programa nas opções de máximo reúso, confrontando os resultados com os correspondentes da literatura.

O método DFA foi originalmente concebido para processos contínuos, onde as condições operacionais são constantes em um dado ponto do processo, mas não ao longo do processo. Neste caso, as condições de operação não variam com o tempo, caracterizando um estado estacionário. Immich *et al*. (2007) apresentaram uma adaptação do método DFA para processos em batelada, onde o regime não permanente insere a variável tempo na análise. O procedimento foi então comparado à técnica gráfica adotada por Majozi *et al*. (2006). Os resultados obtidos foram similares aos da literatura, porém ficou evidente a simplicidade da aplicação do DFA na consideração de problemas deste tipo.

Mirre *et al*. (2007) apresentaram o DFA como uma importante ferramenta para a avaliação decisória de medidas voltadas para a minimização do consumo de água e da geração de efluentes industriais. O procedimento foi ilustrado com dados de uma planta de fabricação de papel, gerando uma configuração para máximo reúso na presença de um contaminante na corrente, cuja vazão de água limpa foi reduzida em cerca de 21%.

Em 2008, Mirre *et al*. Iniciaram um estudo para a alocação de tanques de reúso nas operações, onde estes atuariam como estações de mistura, recebendo e destinando correntes para as operações envolvidas. A ideia seria encontrar uma maior combinação de

correntes que levasse ao mínimo emprego de tanques, sem necessidade de utilizar programação matemática, de modo que não houvesse violação de concentração máxima de contaminantes nas operações. Entretanto, embora os resultados iniciais tenham sido satisfatórios, tornaram-se evidente a dificuldade frente a complexidade combinatorial do problema, e os estudos não foram esclarecedores a este respeito, necessitando de continuidade de estudos nesta linha.

Também Delgado, em 2008, desenvolveu distintos procedimentos para síntese de sistemas de regeneração diferenciada e para o tratamento final distribuído de efluentes, visando à mínima vazão de consumo de água e de efluente gerado, a seleção e determinação da sequência de técnicas de tratamento, e o tratamento distribuído do efluente final. Foram propostos dois algoritmos para a regeneração diferenciada de contaminantes: o primeiro, cujo tratamento de referência baseou-se na configuração com mínimo custo anual, enquanto que o segundo baseou-se na menor concentração de entrada das operações para o cálculo da concentração de água regenerada. Para a seleção da sequência de tratamento (síntese do sistema), propôs-se um procedimento, tendo como critérios propriedades físicas, químicas e estruturais dos contaminantes, bem como a eficiência e o custo dos respectivos tratamentos. Um terceiro algoritmo envolveu a síntese do sistema de tratamento distribuído, considerando múltiplos contaminantes, múltiplos tratamentos, tratamentos com concentração de entrada máxima, e tratamentos com máxima vazão de entrada. As propostas foram testadas a vários exemplos, com o alcance satisfatório de resultados, onde alguns cenários tiveram custos semelhantes ou inferiores aos da literatura.

Os trabalhos de Delgado foram de grande repercussão para o desenvolvimento do procedimento algorítmico e, representam hoje, uma relevante referência para o direcionamento dos estudos com o método. Seguindo na mesma linha, Marques (2008) diversificou a aplicação do DFA para diferentes segmentos industriais, particularmente nas indústrias de celulose e papel, de sucos cítricos, têxtil e petroquímica, demonstrando, com isso, a característica de flexibilidade do método. Diversos cenários foram gerados: na indústria de celulose e papel, houve uma redução de água captada em torno de 90%, considerando reúso máximo, chegando a 100% quando se utilizou regeneração e reúso, levando a uma economia de 80% (máximo reúso) e cerca de 90% (regeneração e reúso) nos custos totais anuais. No caso da indústria de suco cítrico e na indústria têxtil, a redução obtida foi próxima de 25% e 18%, para máximo reúso e, para regeneração com reúso, as reduções foram de aproximadamente 31% e 51% (com reúso e reciclo), respectivamente. Já na indústria petroquímica, considerando um contaminante, a redução foi cerca de 13,2% e 20,4%, para máximo reúso e regeneração com reúso, incluindo restrições, respectivamente; no caso de múltiplos contaminantes, a redução alcançada foi cerca de

22%. A viabilidade econômica também foi calculada, e acompanhou satisfatoriamente a redução de vazão dos cenários gerados.

Melo (2008), por sua vez, preocupou-se em criar uma adaptação do DFA para situações requeridas pelos processos típicos da indústria têxtil, visando reduzir o volume de efluentes pela recirculação e pelo reaproveitamento de água e recuperação de produtos químicos e subprodutos. 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. Foi desenvolvida uma metodologia baseada no DFA, visando à redução do consumo de água industrial, com uma estratégia para o reúso de efluentes oriundos da lavanderia têxtil. 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. Para a visualização dos dados gerados na simulação, foi implementado um programa no ambiente Matlab com uma interface amigável com o usuário, com o auxílio da ferramenta gráfica GUIDE (*Graphics User Interface Design Environment*), e que permite informar os parâmetros requeridos para a simulação.

O método DFA tem grande sucesso ao orientar a busca de soluções que minimizem o consumo de água em processos reais, favorecendo a prática do reúso industrial, com ou sem processos regenerativos. Entretanto, ele não garante o alcance do ótimo global, mas sua resposta permite sistematicamente servir de ponto de partida para aperfeiçoar a solução encontrada.

Neste sentido, Xavier (2009) estudou as possibilidades de implementação do DFA para máximo reúso de água e a regeneração diferenciada, visando minimizar a vazão de efluente a ser tratado e o custo global da rede. Foi desenvolvida uma metodologia para alocação de recursos visando a obtenção da melhor rede de distribuição de água possível. Para isso, formulou-se um modelo matemático das operações envolvidas, incluindo as unidades regenerativas, para compor a chamada superestrutura do problema. Na segunda etapa realizou-se a síntese de uma rede integrada de operações que usam água, onde neste caso o DFA foi adotado para a geração de cenários viáveis. Para demonstrar a resolução do problema, foram utilizados três estudos de caso com dados da literatura. Observou-se que no primeiro caso o valor de mínima vazão regenerada relatada na literatura corresponde a um custo 9,61% superior ao obtido com a aplicação do DFA. Com o uso de um algoritmo de programação não linear do *software* GAMS para verificar a melhoria da solução proposta, a redução de custo alcançada foi de 16,33%. No segundo exemplo, a

partir da solução proposta no nível de mínimo custo, obteve-se um acréscimo de custo de 19,4% para uma redução de vazão regenerada de 2,7%. Já no terceiro caso, a redução no consumo de água utilizando máximo reúso, em comparação com a rede sem reúso foi de 17,61%; utilizando regeneração diferenciada, a redução na captação de água na fonte foi de 76,81%, em relação à rede sem reúso. No entanto, no método DFA o custo não é considerado na função objetivo, sendo calculado após a distribuição das correntes dentro do processo. Em todo caso, constatou-se que a associação do DFA com programas de otimização torna-se uma boa estratégia para impulsionar a busca pelo ponto de mínimo custo, permitindo incluir características de custo e seleção preliminar de equipamentos que irão compor a rede, facilitando o alcance de soluções aprimoradas.

Os resultados de Xavier (2009) foram reportados por Ulson de Souza *et al*. (2009), que aplicaram o DFA a processos de refino de petróleo, em um exemplo da literatura envolvendo seis operações consumidoras de água, incluindo quatro contaminantes. Foram estudados casos de máximo reúso, tratamento *end-of-pipe* e regeneração diferenciada. Os resultados foram comparados tanto em termos de vazão como de custos, em relação à rede sem reúso da literatura, referente ao exemplo estudado. Com máximo reúso, a redução na captação foi de 18%; já considerando a regeneração diferenciada (com três regeneradores distribuídos no processo), essa redução foi menor ainda, cerca de 77%, mostrando que a aplicação do DFA foi mais atrativa para este último caso, em termos de vazão captada e de custos totais (água limpa e regenerações).

A aplicação do DFA em uma unidade de tratamento de água industrial, visando identificar oportunidades de redução na geração de efluentes, foi realizada por Moreira (2009). O estudo de caso tratado refere-se à Unidade de Insumos Básicos da empresa Braskem S.A., no Pólo Petroquímico de Camaçari (BA). O tratamento deste efluente representa anualmente mais de R$ 1,2 milhão de custo variável no fluxo de caixa da empresa. Priorizou-se o desejável alcance de redes com máximo reúso dos efluentes do processo de desmineralização da água, considerando três contaminantes-chave. O estudo foi dividido em cinco etapas: levantamento de dados, análise crítica dos dados, aplicação do DFA, levantamento das restrições e avaliação conjunta das redes propostas. Com a aplicação do método, obteve-se uma redução potencial da captação de água fresca e geração de efluentes da ordem de 6 a 12%, podendo proporcionar uma redução dos custos variáveis de produção na unidade em torno de R$ 72 mil a R$ 144 mil por ano.

Delgado *et al*. (2009) aplicaram o DFA a três casos industriais apresentados na literatura, considerando a presença de um contaminante nas correntes hídricas. Foram consideradas situações com múltiplas fontes externas, vazão fixa, ganho e perda de água no processo, e regeneração. Os casos industriais estudados envolveram indústria de

fabricação de papel, especialidades químicas e refinaria de petróleo. Com a aplicação do algoritmo, o consumo de água foi reduzido em 21,40%, 45% e 7,45% no consumo de água da fonte externa, respectivamente, em cada planta analisada. O procedimento se beneficia da realização oportuna de cálculos manuais, de grande utilidade para engenheiros de processos que, além de minimizar o uso de fontes externas para o máximo reúso, gera o fluxograma e um conjunto de informações que podem ser usadas para estimar o custo de sistemas distribuídos de efluentes.

A perspectiva de que o método DFA pudesse tornar-se uma importante ferramenta de suporte às ações de Gestão Ambiental, particularmente inserida no contexto das práticas de Produção mais Limpa no ambiente industrial, foi apresentada no trabalho de Mirre *et al*. (2009), mostrando que ela também poderia ser útil como uma alternativa eficiente para a minimização e o reúso sustentável de águas e efluentes industriais.

Ainda em 2009, Kumaraprasad e Muthukumar acoplaram o método DFA a outros conceitos de fontes de água, para simplificar a rede de tubulações e reduzir custos, desenvolvendo um procedimento que associa processos de tratamento de efluentes a redes de tratamento (ETN). Foram testados alguns exemplos da literatura envolvendo múltiplos contaminantes. O DFA foi combinado ao modelo de redes ou sistemas de distribuição de efluentes (EDN) para gerar uma nova proposta, denominada WAMEN (*Water Allocation and Mass Exchange Network*), e que reúne as principais características de ambas as técnicas, para impulsionar os resultados, com o objetivo de minimizar o consumo de água limpa. O modelo WAMEN é composto por uma rede de distribuição, uma rede de transferência de massa, e uma rede de tratamento de águas. A proposta combinada permitiu uma redução do consumo de água limpa superior a 70%, em relação ao alcançado na literatura, demonstrando também a utilidade do DFA para turbinar resultados obtidos com outros modelos, como neste caso.

Karthick *et al*. (2010) abordaram o procedimento algorítmico heurístico WAMEN (KUMARAPRASAD e MUTHUKUMAR, 2009) para a síntese de redes de distribuição de efluentes, bem como a síntese de rede de águas, visando reduzir o consumo de água de "limpa" nos processos. Utilizaram uma estratégia híbrida como estimativa inicial, onde o problema de síntese foi decomposto em duas etapas principais: (1) síntese de um candidato de rede com ferramentas gráficas mais simples e (2) representação pelo modelo de espaço de estados, considerado como uma estimativa inicial, e formulando o problema como um MINLP e otimização de toda a rede. A alocação de água e a síntese da rede é proposta juntamente com a otimização da rede, visando à máxima remoção de poluentes com o mínimo consumo de água potável. Foi otimizada uma rede de águas residuais em conjunto com a rede de transferência de massa para um processo de refinaria de petróleo, ilustrando

a eficácia da metodologia proposta. A combinação da rede pelo DFA e EDS reduziu o consumo de água potável em 73%, considerando a rede com reciclo de efluentes. O consumo de água potável foi eliminado através da otimização da rede pela abordagem de programação baseada na superestrutura representada pelo espaço de estados. Esta abordagem foi modificada pela formulação do modelo WAMEN para correntes com um e múltiplos contaminantes. A vantagem deste modelo está na facilidade em incorporar todas as opções de síntese possíveis, como as unidades de tratamento de águas residuais e os trocadores de massa diretos e indiretos.

Ulson de Souza *et al*. (2010) utilizaram o método DFA para avaliar a possibilidade de reaproveitamento de correntes de água em lavanderias têxteis, cujos efluentes são normalmente enviados para tratamento final. Os processos de lavagem contínua geram efluentes com elevado potencial poluidor e a redução do volume de efluentes por reúso direto ou utilizando processos regenerativos, sem afetar a qualidade do produto acabado, constitui um grande desafio para este setor. Um estudo de caso foi conduzido considerando reúso direto, sem necessidade de empregar processos regenerativos. Um algoritmo foi implementado com o método DFA modificado para simular o processo de lavagem contínua, tendo a vazão de tecido como referência e aplicando o conceito de pseudo-concentração para de distintos valores de correntes de entrada e saída dos tanques, com diferentes números de tanques. Foram utilizados modelos matemáticos para representar o balanço material do sistema composto por 6-8 tanques com banho em contracorrente. O programa permite três tipos de unidades modulares: unidades de tanque, divisores e misturadores de fluxo. Foram realizados testes com dados reais de lavagem da indústria têxtil, considerando como parâmetro a eficiência de remoção da demanda química de oxigênio (DQO). Foi possível alcançar uma alternativa com redução de 64% no consumo de água. Os resultados da simulação demonstraram que os dados previstos pelo modelo estão em boa concordância com aqueles obtidos a partir do próprio processo industrial, permitindo concluir que o programa proposto é capaz de modelar um processo real de lavagem contínua.

Quando se está diante de um problema com número considerável de operações e contaminantes, a análise de possibilidade de ajuste de concentrações por meio de relações de transferência de massa requer a escolha de um contaminante e uma operação de referência. Este procedimento, porém, pode resultar em violações de limites máximos de concentração na entrada e saída das operações. Para solucionar esse critério restritivo, Calixto (2011) apresentou uma nova abordagem, envolvendo o conceito macro-estrutural de *Total Site*, visando maximizar o reúso de água, em conjunto com uma estratégia que permite identificar, por meio de uma superestrutura, o melhor contaminante e a operação de referência. A metodologia se baseia nos critérios de Savelski e Bagajewicz (2003), além da

idéia de *Total Site*. Segundo Calixto (2011), o enfoque consiste em dividir o problema em blocos ou subestruturas que integram um determinado conjunto de operações, aplicando em seguida o DFA a cada um dos blocos que formam a superestrutura *Total Site*. A lógica está em promover o máximo reúso sem violar os limites máximos de entrada e saída dos contaminantes nas operações. Em seguida, os resultados são então migrados para a superestrutura. Foram gerados quatro cenários para quatro diferentes contaminantes de referência, onde apenas um bloco com todas as operações é formado em cada cenário.

No estudo de Calixto (2011) foi possível alcançar cenários cuja captação de água primária e descarte de efluentes apresentou um desvio em torno de 45% em relação à captação original, utilizando o procedimento proposto. Também foi possível constatar que há casos em que o aplicativo MINEA torna-se inviável para este procedimento, uma vez que permite apenas escolher um contaminante de referência por DFA gerado; isto quer dizer que se houver mais de uma operação candidata à operação de referência (no mínimo um contaminante com concentração máxima na entrada igual a zero), as que não forem escolhidas sofrerão violação nas suas concentrações.

A abordagem adotada por Calixto (2011) conseguiu resolver um dos grandes entraves da aplicação do DFA tradicional: a escolha do contaminante e da operação de referência para problemas complexos. Normalmente, as eventuais violações podem ser resolvidas aumentando a vazão de água a montante das operações envolvidas. No entanto, Calixto (2011) mostrou que para as operações candidatas à operação de referência, ou seja, aquelas que possuem pelo menos um contaminante com concentração nula na entrada, não é possível determinar a vazão necessária para obedecer à restrição deste contaminante. Neste caso então reside a importância do algoritmo proposto. Diante disso, para diminuir o tempo de análise e tomada de decisões, há a necessidade de implementação computacional do algoritmo *Total Site* proposto.

Mirre *et al*. (2011) verificaram a importância da estação de tratamento de efluentes na recuperação da qualidade de correntes intermediárias de processo, através de configurações de tratamento centralizado e distribuído. Os resultados mostraram reduções superiores a 4% e 20%, em termos de vazão e de custos totais (operacionais e de investimento), respectivamente. Já Mirre *et al*. (2012) estenderam a aplicação do DFA a processos em batelada, a partir do procedimento definido por Immich *et al*. (2007) para a definição de metas de mínimo consumo de água. Dois estudos de caso foram apresentados, voltados para a redução de consumo de água e da geração de efluentes, incluindo custos de tratamento final e de investimento em tanques de estocagem, em relação à configuração original. Os resultados mostraram redução de até 45%, com o uso de tanques de estocagem. A redução nos custos de investimento em tanques foi da ordem de 37%,

dispensando o uso de processos regenerativos. Mais uma vez, a técnica se mostrou flexível e importante na qualidade de ferramenta alternativa e perfeitamente integrada a programas de gerenciamento de recursos hídricos.

3.3.3. O procedimento algorítmico

A resolução do DFA segue um conjunto de regras heurísticas cujo objetivo é atender a transferência de massa nos intervalos de concentração, utilizando a menor vazão da fonte de água externa mais limpa; desse modo, reduz-se a vazão de consumo desta e também do efluente gerado. O procedimento do diagrama de fontes de água encontra-se descrito no trabalho de Gomes *et al*. (2007), onde cada restrição (vazão fixa, múltiplas fontes de água, ganhos e perdas de vazão) é demonstrada separadamente.

A metodologia gera fluxogramas de processos em diferentes situações de reúso e regeneração. Além disso, tem como vantagem adicional a geração simultânea de fluxogramas alternativos para o processo. O procedimento DFA divide o problema em intervalos de concentração, cujos limites são considerados como fontes internas de água, enquanto que a água primária e a água regenerada são definidas como fontes externas.

As etapas de elaboração do algoritmo são apresentadas a seguir. O procedimento considera constante a carga mássica removida em cada operação. Os valores da Tabela 3.1 foram obtidos de dados de um processo exemplo.

Tabela 3.1 – Dados limites do problema exemplo

Operação	$C_{e,max}$ (ppm)	$C_{s,max}$ (ppm)	f_L (t/h)
1	0	100	20
2	50	100	100
3	50	800	40
4	400	800	10

Etapa 1

Dividir o problema em intervalos de concentração, limitados pela concentração da fonte de água externa e concentrações de entrada (C_e) e saída (C_s) das operações, conforme mostra a Figura 3.4.

Etapa 2

Representar cada operação com uma seta partindo da respectiva concentração de entrada até a saída. As operações são colocadas no diagrama, onde se posicionam seguindo a ordem crescente de concentração de entrada. A identificação da operação, assim como sua vazão limite (f_L), são apresentadas na lateral esquerda do diagrama (Figura 3.4).

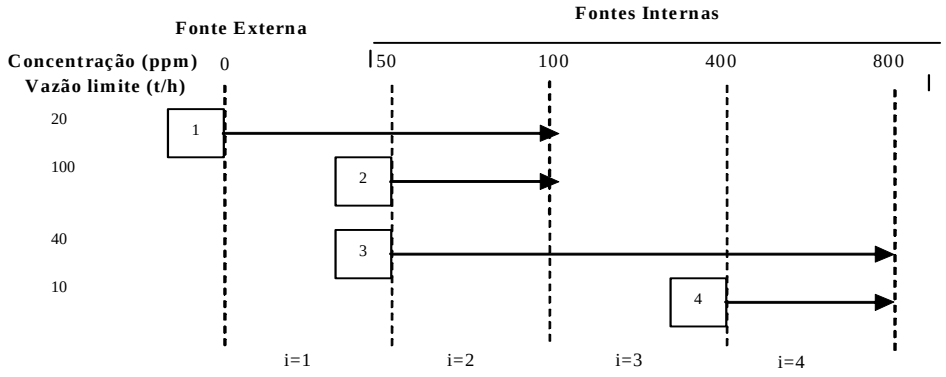


Figura 3.4 – Representação inicial do DFA - problema exemplo

Etapa 3

Calcular a quantidade de contaminante transferido em cada operação e em cada intervalo i, usando a Equação 3.1.

$$\Delta m_{ki} = f_{Lk}.(C_{fi} - C_{ii}) \qquad (3.1)$$

onde Δm_{ki} é a quantidade de contaminante a ser transferida na operação k, no intervalo i; f_{Lk} é a vazão através da operação k; C_{fi} é a concentração final no intervalo i; C_{ii} é a concentração inicial no intervalo i; k = 1,..., N_{op}; e i = 1,..., N_{int}, onde N_{op} é o número de operações, e N_{int} o número de intervalos de concentração. Os valores de cada Δm_{ki} são colocados entre parênteses sobre cada segmento de seta correspondente.

Etapa 4

Elaborar a rede de transferência de massa. Para garantir o consumo de água mínimo, devem ser seguidas três regras mínimas na seleção da fonte de água.

(i) Usar fonte de água externa apenas quando fontes de água interna não estão disponíveis;

(ii) Transferir a máxima quantidade de contaminante possível dentro do intervalo de concentração;

(iii) Para operações que estão presentes em mais de um intervalo, quando mudar o intervalo, a corrente deve continuar através da operação até o final; esta heurística evita dividir operações.

3.3.3.1. Um exemplo para um contaminante, na condição de máximo reúso

A indústria de papel e celulose é grande consumidora de água devido a características próprias do processo. Este exemplo foi retirado do trabalho de Yang *et al*. (2000) e envolve a minimização do consumo de água através de máximo reúso em uma planta de fabricação de papel. O problema é resolvido utilizando a metodologia do DFA para um contaminante: sólidos suspensos totais (SST). Os dados do processo estão apresentados na Tabela 3.2. O consumo inicial de água é de 186 t/h.

Tabela 3.2 – Dados do processo de fabricação de papel (YANG *et al*., 2000)

OP	f_L (t/h)	$C_{e,max}$ (ppm)	$C_{s,max}$ (ppm)	Δm (kg/h)
1	35	0	200	7
2	56	100	500	22,4
3	139	200	650	62,55
4	10	0	200	2

A Figura 3.5 apresenta o diagrama de fontes de água para o estudo de caso. O consumo de água limpa (0 ppm) neste caso é de 146,2 t/h, conforme indicado no primeiro intervalo de concentração da Figura 3.4. A concentração de 500 ppm, sobre a qual ocorre queda na vazão total requerida entre os intervalos 3 e 4, indica a localização do ponto *pinch* (mínimo consumo de água).

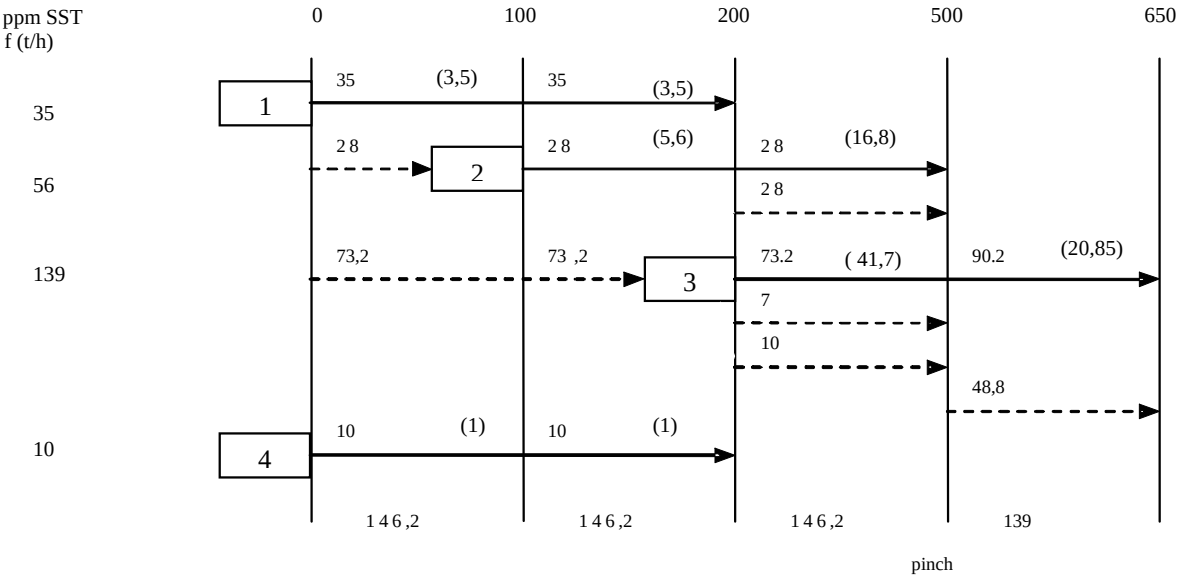


Figura 3.5 – DFA para máximo reúso com um contaminante para estudo de caso: fabricação de papel (MIRRE *et al*., 2007; DELGADO *et al*., 2009)

Ao final das etapas realizadas para a determinação da demanda de água para as operações, é possível a elaboração de um fluxograma representativo do consumo de água e da geração de efluente. A Figura 3.6 apresenta o fluxograma referente ao DFA da Figura 3.5 para o processo de fabricação de papel. Em cada operação é destinada a quantidade de água necessária para a assimilação da respectiva carga mássica de contaminante (Δm), estabelecendo as possíveis reutilizações de correntes definidas pelo DFA.

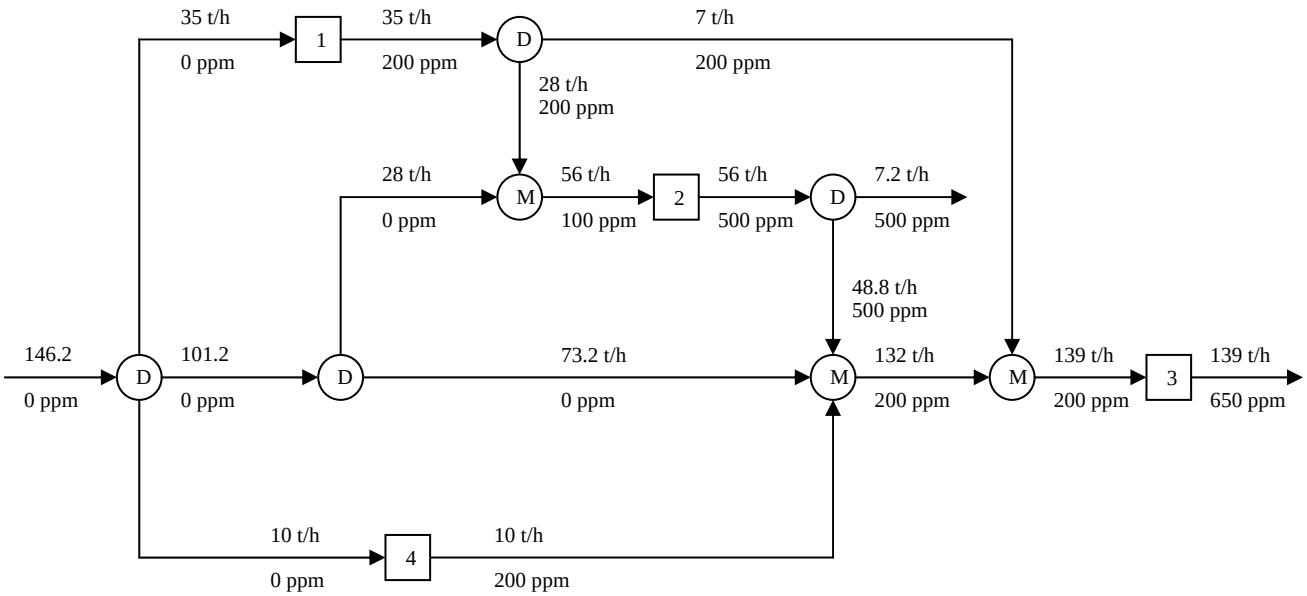


Figura 3.6 – Fluxograma referente ao DFA da Figura 3.5

A vazão de consumo de água a 0 ppm foi reduzida de 186 t/h para 146,2 t/h (21,4%). O DFA permitiu obter uma vazão de consumo de água limpa igual à obtida por Yang *et al*. (2000).

Diversos outros exemplos sobre o procedimento apresentado podem ser vistos nos trabalhos supracitados.

3.3.3.2. Uma abordagem mais ampla: máximo reúso para múltiplos contaminantes

Todas as considerações feitas para um contaminante são estendidas para múltiplos contaminantes. Em problemas deste tipo, mais condizentes com a realidade industrial, devido à diversidade de contaminantes presentes, a transferência destes ocorre simultaneamente. Desta forma, existe a possibilidade de, ao se analisar um contaminante, as concentrações de entrada de outros contaminantes ultrapassarem os valores estabelecidos como limites pela operação, com a realização do balanço material. Esta condição caracteriza “violação de concentração”. Visando garantir o mínimo consumo de água no processo, a carga mássica de cada contaminante a ser transferida (ou assimilada) entre as correntes (Δm_k) precisa ser atendida. Assim, faz-se necessária a análise dos dados de entrada e seu possível deslocamento (para um menor valor de concentração de entrada), de modo a não violar a referida carga de contaminantes entre as correntes, nem mesmo ultrapassar a mínima concentração de entrada na operação.

Os contaminantes transferidos seguem uma lei de transferência de massa cuja relação é simplificadamente considerada linear, ou seja, todos os contaminantes são transferidos na mesma proporção (Equação 3.2).

$$\frac{\Delta C_{jk}}{\Delta C_{ik}} = cte \qquad (3.2)$$

onde ΔCjk representa a diferença de concentração do contaminante j na operação k; e ΔCjk representa a diferença de concentração do contaminante i na operação k.

A partir dos limites de concentração definidos para um contaminante, os valores para os demais são então determinados na mesma operação, seguindo a mesma linha de análise pelas relações de transferência.

Para garantir o máximo reúso de água no processo, um dos contaminantes deve ter seus limites de concentração mantidos como limitante do processo. Esse contaminante é então chamado de contaminante de referência. Os cálculos são efetuados com base neste contaminante e todos os demais necessitarão da mesma vazão de água para atender às restrições do processo.

Para a definição do contaminante de referência usa-se a menor concentração de saída dos contaminantes das operações que usam água limpa e compara-se com a maior concentração de entrada dos contaminantes das operações que podem usar água contaminada. Aquele que tiver a maior diferença de concentração será então definido como contaminante de referência. Após definir o contaminante de referência, as concentrações dos demais são ajustadas de acordo com as respectivas relações de transferência.

Dados os objetivos deste estudo, não será aqui apresentado um exemplo acerca da utilização da metodologia para este caso. Uma descrição mais detalhada do procedimento para o caso de múltiplos contaminantes nas correntes hídricas pode ser encontrada no trabalho de Mirre (2007).

3.3.4. *Software* para aplicação do método DFA

Em um problema com diversas operações e contaminantes, a aplicação manual do método torna-se mais complexa; neste caso, o uso do programa computacional MINEA (SANTOS, 2007), em plataforma Microsoft Excel®, exerce importante papel no sentido tornar mais rápida a síntese de redes de transferência de massa baseado no DFA. No entanto, o programa apenas resolve o DFA, sem gerar o balanço de contaminantes diretamente no

fluxograma, deixando para o usuário e engenheiro de processos a tarefa de analisar e realizar o balanço material e o fluxograma correspondente.

A Figura 3.7 apresenta a interface principal do *software* e, a Figura 3.8, o DFA gerado a partir das informações de vazão e concentração das operações. Após inserir os dados necessários, clica-se sobre o ícone “Calcular”, para que seja atualizada a carga mássica do contaminante na operação (Δm); em seguida, clica-se sobre o ícone “Gerar Linha Base de Concentrações”, para que o programa ordene as concentrações por intervalo no diagrama ilustrado na região inferior da tabela de dados. Clica-se novamente sobre o ícone “Calcular”, e então o DFA é gerado, com a indicação das respectivas vazões e concentrações definidas para cada operação, no caso de máximo reúso. O ícone “Gerar Saída” é utilizado para que o diagrama seja transferido para um novo arquivo.

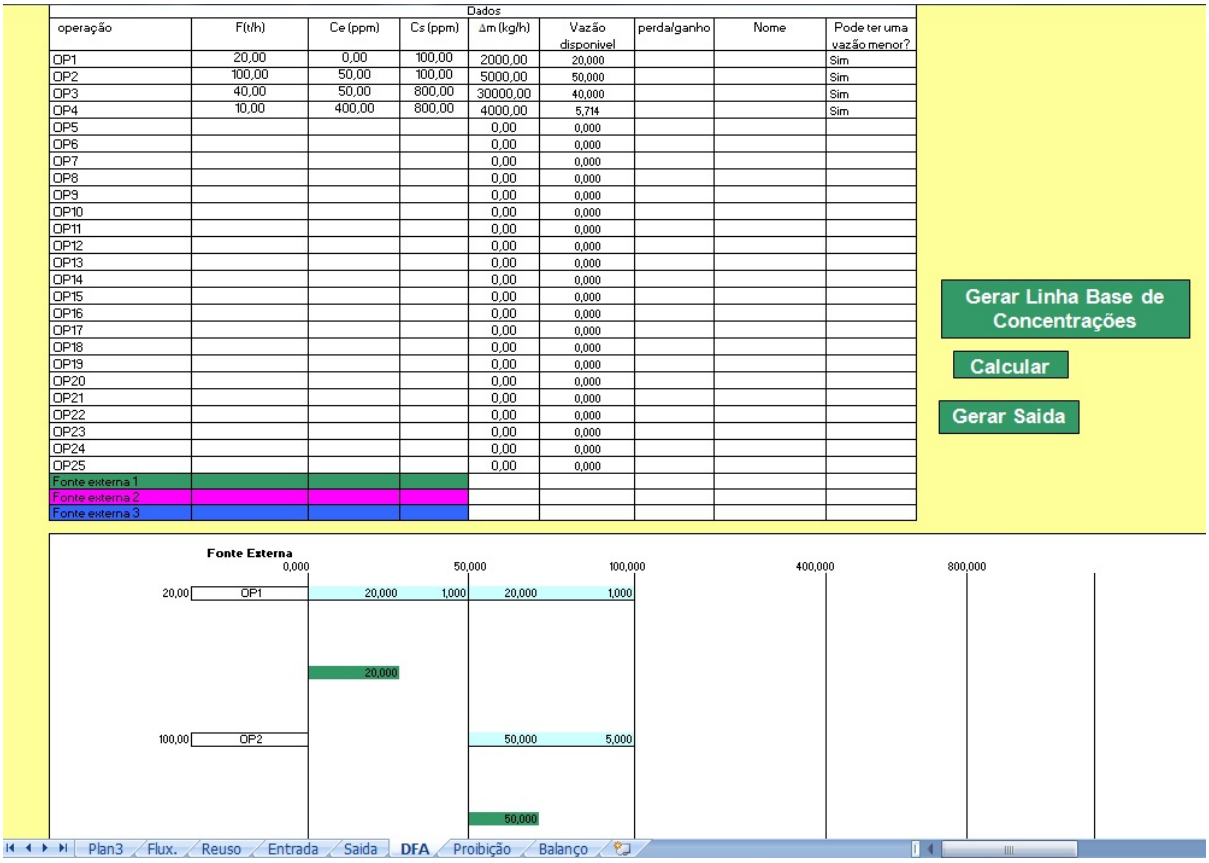


Figura 3.7 – Interface principal do programa MINEA

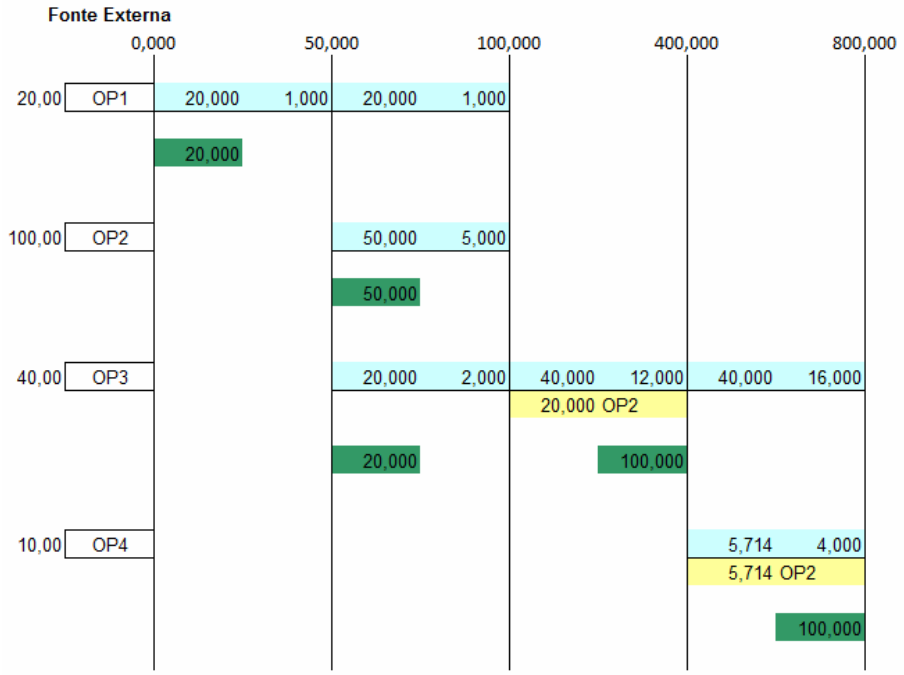


Figura 3.8 – Exemplo da geração do diagrama com o uso do MINEA

A Figura 3.9 sintetiza a identificação dos dados obtidos com o uso do programa.

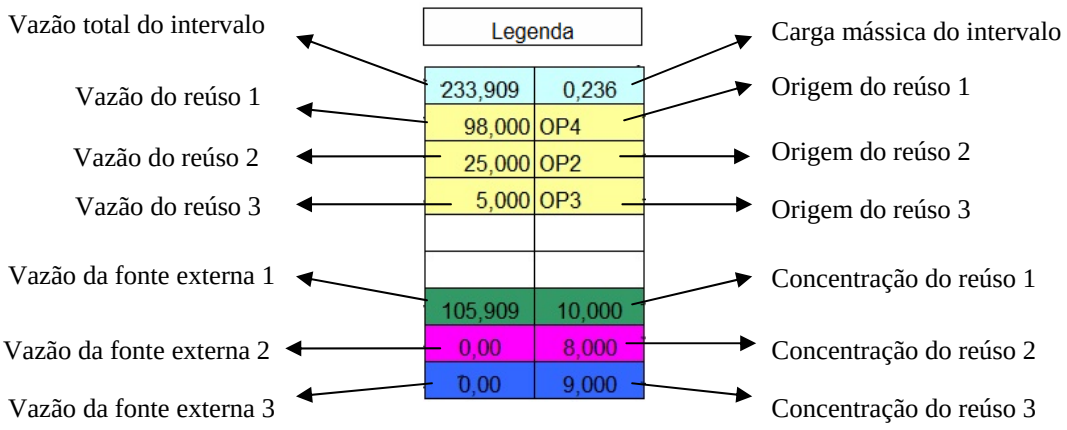


Figura 3.9 – Legenda do DFA no programa MINEA

Uma apresentação detalhada dos recursos oferecidos pelo programa MINEA encontra-se no Apêndice 1 deste trabalho.

3.3.5. O DFA como ferramenta sustentável na criação do conhecimento e na estratégia tecnológica

Uma pesquisa realizada em maio de 2011 com representantes de 63 empresas filiadas à Fundação Nacional da Qualidade (FNQ) indicou que 97% destes reconhecem a necessidade de se buscar a sustentabilidade por meio das inovações, seja do modelo de negócios ou da economia e do planeta (GONZALEZ, 2011). No entanto, 70% dos entrevistados revelaram que, mesmo assumindo tal necessidade, acabam não destinando recursos adequados voltados para inovações com foco em crescimento sustentável. Esse comportamento é reflexo do atual modelo de desenvolvimento, que estabelece o sucesso das organizações pelo viés econômico, medido pelo Produto Interno Bruto (PIB). Pelo fato de as empresas de hoje ainda associarem inovação à pesquisa e desenvolvimento tecnológico, a necessária visão sistêmica da gestão é prejudicada, pois não só deve fazer parte do planejamento estratégico da empresa como deixar de enxergar a sustentabilidade como um subconjunto da gestão, e tornar-se parte integrante de todo o processo. Há, portanto, um desafio de gestão a ser vencido.

Segundo Porter e Linde (1999, *apud* BARBIERI, 2007, p. 84), ao contrário da visão predominante que defende a imiscibilidade entre economia e ecologia, as regulamentações ambientais podem incentivar o processo de inovação voltado para a redução de custos ambientais e que permitam o melhor uso dos recursos. Os progressos em ciência e tecnologia viabilizam o surgimento de novos produtos e processos, levando a um aperfeiçoamento contínuo dos recursos necessários à garantia da competitividade inerente ao processo de inovação.

Esse mecanismo propulsor da inovação pode ser mais bem representado pelo modelo interativo do “Elo de cadeia”, proposto por Kline e Rosenberg (1986), onde são consideradas as ligações existentes entre as diferentes atividades de P&D e as demais funções da empresa (atividades industriais e comerciais). Por ser interativo, há a possibilidade de as atividades transitarem entre etapas anteriores ou posteriores, priorizando a troca de informações entre os diferentes agentes envolvidos (*feedbacks*), durante todo o processo; isto é importante na medida em que favorecem as devidas correções em cada etapa, permitindo retornar às etapas anteriores quando necessário e, com isso, ampliar a capacidade de alcançar bons resultados.

Para Kline e Rosenberg, ao aplicar o conhecimento no processo, a lógica do encadeamento de idéias é projetada no modelo. O processo se inicia com a identificação de uma oportunidade de mercado, ou mesmo de uma demanda do mercado consumidor, isto quer dizer que o sentido natural tende para uma aplicação voltada para as necessidades do

mercado. Em cada estágio realizam-se buscas por conhecimentos já existentes (na empresa, em outras empresas ou no sistema de Ciência & Tecnologia) que podem resolver aquele determinado problema tecnológico, e somente na medida em que ele não está disponível (na empresa ou fora dela) é que a busca pelo conhecimento poderá desencadear uma nova pesquisa. O modelo enxerga a inovação como um resultado de um processo interativo entre oportunidade de mercado, a base de conhecimentos e capacitações da firma.

Analogamente, o desenvolvimento do DFA foi planejado para atender a uma demanda de mercado, dada a crescente necessidade de se estabelecer alternativas de reúso nos processos industriais, associado a conhecimento técnico da engenharia de processos, em um mecanismo interativo proveniente de ampla divulgação técnica e parceria universidade-empresa. Isto favorece o compartilhamento do conhecimento tácito (pessoal e intangível), gerando uma nova ideia ou a explicitação de um novo e aplicável conceito, mediante um processo "social" entre indivíduos, conforme colocado por Nonaka e Takeuchi (1997). Segundo esses autores, a criação de conhecimento decorre da relação existente entre indivíduos, grupos e organização, no qual o conhecimento possui uma natureza dinâmica e interativa entre o tácito e o explícito presente na organização, sendo representado por uma "espiral do conhecimento".

Dentro deste aspecto, o DFA pode ser de grande utilidade quando empregado em empresas que têm a água como um importante e indispensável recurso para a operação de suas atividades industriais, como volumes que possam justificar a necessidade de minimização do consumo de água e da geração de efluentes, por meio de práticas efetivas (eficientes e eficazes) de reúso no processo.

No que concerne ao desenvolvimento do método, a Figura 3.10 relaciona a produtividade anual gerada com o DFA, desde o ano 2000 até 2010. Nota-se claramente que a partir de 2004 houve um grande estímulo ao desenvolvimento da metodologia, motivado pelo aumento de interesse de outros grupos e mesmo de empresas pela sua utilização, levando ao preenchimento de lacunas identificadas entre a criação de conhecimento acadêmico e a necessidade de adequação técnica da realidade dos processos industriais. Esse amadurecimento pode ser sentido pela crescente evolução de trabalhos entre 2004 e 2010. Esse processo é similar a uma curva de aprendizado (ilustração menor, no interior da Figura 3.10), onde a evolução do conhecimento ao longo do tempo se inicia com a etapa de nucleação, passando pela maturação, até alcançar o grau de saturação de idéias; o surgimento de inovações permite transpor esta última etapa, iniciando um novo processo de nucleação, maturação e saturação, em um ciclo que pode evoluir ininterruptamente. A distribuição de categorias de trabalhos é apresentada na Figura

3.11. Atualmente, o amadurecimento do método permite atender a uma demanda por projetos de consultoria em empresas interessadas, embora o aparente estágio de saturação de idéias, sugerido pelo perfil da Figura 3.10, ainda não foi alcançado, pois há grande potencial para desenvolvimento do método.

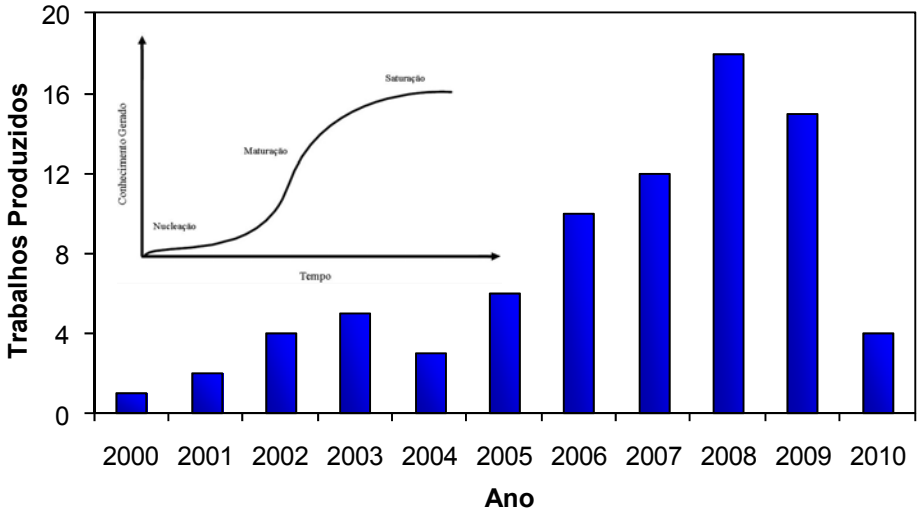


Figura 3.10 – Número de trabalhos sobre o DFA, no período de 2000 a 2010

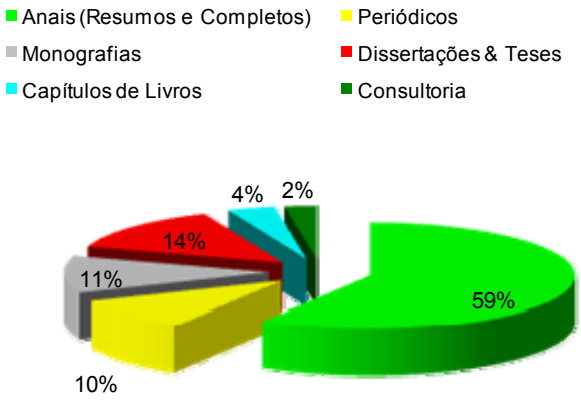


Figura 3.11 – Categorias de trabalhos com o DFA, por tipo de atividade (até 2010)

A inovação, portanto, pode ser entendida como um resultado interativo com a participação de vários atores e instituições, os quais constituem uma rede que canaliza e molda o conhecimento na direção de um resultado econômico no mercado. Embora ainda não possa ser considerado um processo de inovação, pois até o presente não se alcançou a disponibilidade efetiva ao mercado, o arsenal de conhecimentos criado para o método DFA

torna possível sua disponibilidade e popularização como uma ferramenta estratégica ambiental para tomada de decisão sustentável em processos industriais. Pelo fato de sua necessidade estar mais ligada às características do processo produtivo em relação ao uso de água, esta não constitui, a exemplo de outras ferramentas, a solução de todos os problemas em qualquer atividade industrial, pois nem sempre haverá necessidade de empregá-la, como em processos menos complexos e onde o uso (e o reúso) da água já está delimitado.

3.4. COMENTÁRIOS GERAIS

Este capítulo iniciou ressaltando a contribuição da Integração de Processos para a sustentabilidade ambiental, passando pela importância de se almejar soluções para uma real possibilidade de escassez de recursos hídricos, o que provocaria alterações substanciais no uso da água destinado a consumo humano e a outros segmentos. Foi apresentado o método DFA como uma ferramenta que pode auxiliar no remanejamento racional das fontes hídricas em processos industriais, permitindo dispor maior quantidade para outros usos, como por exemplo o abastecimento humano.

Basicamente, os estudos encontrados na literatura na área da minimização de efluentes aquosos assumem a preocupação em desenvolver metodologias ou procedimentos para a resolução de problemas diretamente ligados à síntese de redes de transferência de massa. Para tanto, utilizam diferentes técnicas e ferramentas que auxiliam nesta tarefa, como por exemplo a formulação de um problema de programação matemática voltado para a minimização de uma função objetivo ligada à vazão de consumo de água, à geração de efluentes, ou a seus respectivos custos. Do mesmo modo, técnicas como o Diagrama de Fontes de Água criam um atalho para a rápida resolução de problemas desta natureza, poupando etapas de esforço computacional em relação à programação matemática, e mesmo constituindo um suporte na adoção de mecanismos de otimização de sistemas. O arsenal de conhecimentos técnicos acumulados como reflexo do desenvolvimento da área ambiental requer a disseminação dos benefícios gerados, sob um enfoque sistemático, amplo e integrado, a partir das ferramentas e técnicas disponíveis. Tal proposta materializa a tentativa de aproximar conceitos que involuntariamente remetem a práticas independentes, como Ciência e Gestão; deste modo, busca-se sintonizar o canal de comunicação entre todos os interessados (*stakeholders*), pela necessidade de incentivar estudos e aplicar os resultados do aprimoramento científico e tecnológico.

O capítulo seguinte propõe o uso integrado de ferramentas de valoração de efeitos adversos sobre os recursos hídricos, a fim de permitir a seleção de alternativas menos

impactantes em termos de racionalização e conservação dos recursos hídricos resultantes do ambiente industrial.

CAPÍTULO 4

VALORAÇÃO AMBIENTAL COMO FERRAMENTA PARA TOMADA DE DECISÃO EM SISTEMAS DE REÚSO

"(...) A valoração econômica ambiental busca avaliar o valor econômico de um recurso ambiental através da determinação do que é equivalente, em termos de outros recursos disponíveis na economia, que estaríamos (os seres humanos) dispostos a abrir mão de maneira a obter uma melhoria de qualidade ou quantidade do recurso ambiental. Em resumo, a valoração econômica de recursos ambientais é uma análise de trade-offs (escolha entre opções)."

(Ramon Ortiz, 2003, p. 81-82)

Resumo – Neste Capítulo são apresentadas e discutidas técnicas de valoração ambiental que constituem ferramentas importantes no julgamento de alternativas promissoras de reúso de correntes industriais. Sob a ótica das externalidades (impactos) negativas sobre os recursos hídricos, mediante a vazão de efluentes lançados nos corpos receptores, pode-se consolidar as oportunidades de reúso identificadas pela aplicação da Integração de Processos, especificamente neste caso utilizando o Diagrama de Fontes de Água.

Palavras-chave: Valoração ambiental, Recursos hídricos, Externalidades ambientais.

4.1. VALORAÇÃO ECONÔMICA DE IMPACTO AMBIENTAL DOS PROCESSOS HÍDRICOS INDUSTRIAIS

O economista clássico escocês Adam Smith (1723-1790), um dos pais do liberalismo econômico, descreve em seu famoso livro "A Riqueza das Nações" (1776), o que considerava o paradoxo da água e do diamante. Para Smith (1981), sendo a água extremamente útil e indispensável à vida, é uma contradição o fato de não valer nada, ao contrário de um diamante, quase sem nenhum valor de uso, mas que ao mesmo tempo vale fortunas. Embora o diamante tenha sua utilidade relacionada à sua reserva limitada, ao contrário da água, Adam Smith argumentava que, se a exigência depende da utilidade do produto, a água deveria ser mais valorizada. Naturalmente, o discurso de Adam Smith

ganharia mais adeptos se as preocupações com a escassez de água da atualidade já fossem sentidas em sua época.

A Ciência Econômica estuda os mecanismos que permitem administrar os recursos escassos de modo a produzir bens e serviços e distribuí-los para o atendimento de desejos e necessidades humanas. Neste sentido, é fácil imaginar que a existência do direito humano de adquirir e consumir produtos e serviços possa transcender a suficiência de recursos destinados a toda a sociedade. A existência de limitações quanto à disponibilidade dos recursos (fatores de produção, os quais são utilizados na produção de bens e serviços) para serem destinados à sociedade estabelece o fenômeno da escassez econômica. Esta condição levantou a discussão de que a água, baseada na evidência de limitação de disponibilidade ao consumo humano, não poderia ser tratada como um bem livre, onde não há concorrência no consumo e o acesso é ilimitado. Essa concorrência está associada à própria limitação do recurso, uma vez que o maior consumo de uma determinada pessoa implicará menor consumo de outra. Por essa razão, ao reconhecer a existência da escassez o recurso passa a ser classificado como um bem econômico, onde há necessidade de se pagar por este e incentivar medidas para seu uso racional.

Neste sentido, a percepção mundial do valor econômico da água alcançou a esfera legislativa brasileira através da Lei Federal 9.433/1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, reconhecendo os recursos naturais, como a água, um bem de domínio público, limitado e dotado de valor econômico. Este fato levanta a necessidade de se controlar o uso dos recursos hídricos pelos diversos setores econômicos, e o mecanismo adotado para isso tem sido a outorga do direito de uso da água, de competência da Agência Nacional de Águas (ANA), permitindo a concessão, autorização para o uso e a derivação das águas. A cobrança pelo uso da água tem sido um importante instrumento para estabelecer um novo paradigma de conduta em relação à conservação da água, embora esteja unicamente amparada em mecanismos de comando e controle, na tentativa de reverter impactos ambientais negativos. De modo mais amplo, a Lei Federal de Crimes Ambientais 9.605 de 12/02/1998, dispõe sobre sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente.

O atual padrão tecnológico de produção industrial é intensivo em recursos naturais, os quais são transformados em energia e matérias-primas, gerando impactos ambientais iniciais (desmatamento, emissões de gases poluentes, erosão dos solos, entre outros). Como resultado da produção, tem-se o produto final e os rejeitos industriais – emissões gasosas, resíduos sólidos e efluentes líquidos -, conforme o fluxo representado na Figura 4.1 (LUSTOSA *et al*., 2003, p. 139).

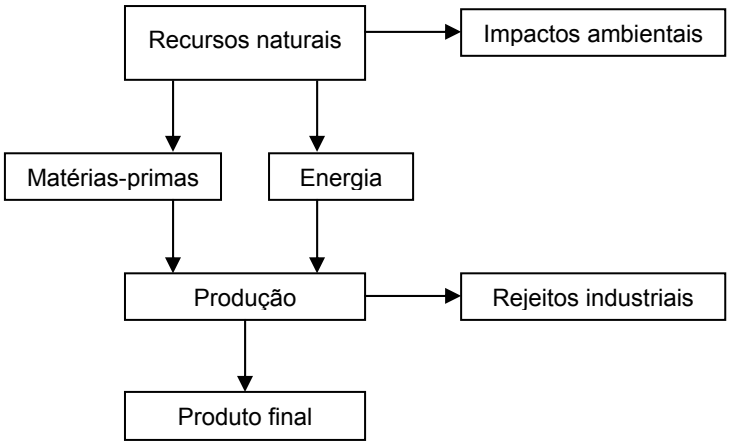


Figura 4.1 – Fluxo de matérias-primas e energia na economia e os seus impactos ambientais (LUSTOSA *et al.*, 2003, p. 140)

A Engenharia de Sistemas visualiza a abordagem conceitual dos processos produtivos como uma associação do objetivo de reduzir o impacto ambiental pela racionalização do uso de todas as matérias-primas e insumos envolvidos na produção. Para isso, adota os princípios de Produção Limpa como parte forma de alcançar o desenvolvimento sustentável. Essa abordagem é ilustrada na Figura 4.2.

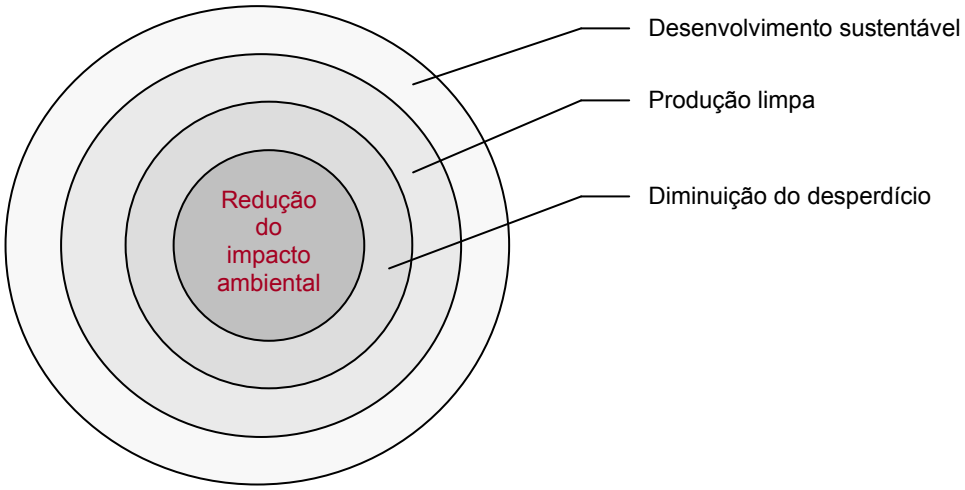


Figura 4.2 – Desenvolvimento sustentável na concepção de processos (SEIFFERT, 2007, p. 71)

O valor econômico ou o custo de oportunidade dos recursos ambientais normalmente não é observado no mercado por intermédio do sistema de preços. No entanto, como os demais bens e serviços presentes no mercado, seu valor econômico deriva de seus atributos, com a peculiaridade de que estes atributos podem ou não estar associados a um

uso (SEROA DA MOTTA, 2006). O valor econômico do meio ambiente tem sido alvo de grandes discussões.

O valor econômico dos recursos ambientais (VERA) pode ser decomposto em valor de uso (VU) e valor de não-uso (VNU), sendo expressa de acordo com a Equação 4.1.

$$VERA = (VUD + VUI + VO) + VE \quad (4.1)$$

onde:

Valor de uso direto (VUD) – valor que os indivíduos atribuem a um recurso ambiental pelo fato de que dele se utilizam diretamente;

Valor de uso indireto (VUI) – valor que os indivíduos atribuem a um recurso ambiental quando o benefício do seu uso deriva de funções ecossistêmicas;

Valor de opção (VO) – valor que o indivíduo atribui em preservar recursos que podem estar ameaçados, para usos direto e indireto no futuro próximo;

Valor de não-uso ou valor de existência (VE) – valor que está dissociado do uso (embora represente consumo ambiental) e deriva de uma posição moral, cultural, ética ou altruística em relação aos direitos de existência de outras espécies que não a humana ou de outras riquezas naturais, mesmo que estas não representem uso atual ou futuro para ninguém.

O Quadro 4.1 apresenta a classificação das parcelas que compõem os valores do meio ambiente.

Quadro 4.1 – Classificação da valoração ambiental

Valor de uso			**Valor de não-uso**
Valor de uso direto	Valor de uso indireto	Valor de opção	Valor de existência
Bens e serviços ambientais apropriados diretamente da exploração do recurso e consumidos hoje	*Bens e serviços ambientais que são gerados de funções ecossistêmicas e apropriados indiretamente hoje*	*Bens e serviços ambientais de usos diretos e indiretos a serem apropriados no futuro*	*Valor não associado ao uso atual ou futuro e que reflete questões morais, culturais, éticas ou altruísticas*

De acordo com Merico (1996, *apud* MATTOS *et al*., 2006), os métodos de valoração ambiental podem ser classificados em diretos (diretamente relacionados aos preços de mercado ou produtividade) e indiretos (quando a valoração pelo comportamento do mercado não se aplica). Para Marques e Comune (1996, *apud* MATTOS *et al*., 2006), os métodos diretos são mais comumente usados para estimar valores de bens e serviços ambientais que se baseiam em informações de mercados já existentes ou hipoteticamente criados, como o de valoração contingencial, custo de viagem e mercado substituto ou preço hedônico. Os métodos indiretos, por sua vez, procuram relacionar inicialmente a alteração ambiental e efeitos na saúde humana, ou nos ecossistemas naturais ou antrópicos. Como exemplo, têm-se os métodos do custo de reposição, da produção sacrificada, e da redução da produtividade. Seroa da Motta (2006) enfatiza que os métodos de valoração econômica ambiental são classificados de acordo com o Quadro 4.2.

Quadro 4.2 – Classificação dos métodos de valoração econômica dos recursos ambientais (SEROA DA MOTTA, 2006)

Método da Função de Produção	**Método da Função de Demanda**
- Método da Produtividade Marginal	- Método dos Mercados de Bens Complementares
- Método de Mercados de Bens Substitutos	- Métodos dos Preços Hedônicos
- Custo de Reposição	- Método do Custo de Viagens
- Gastos Defensivos ou Custos Evitados	- Método da Valoração Contingente
- Custo de Controle	

Segundo Sillos (2006), dentre os benefícios ambientais proporcionados pela valoração ambiental do reúso de águas, podem-se destacar:

► a redução do lançamento de efluentes industriais em corpos hídricos, permitindo melhorar a qualidade das águas interiores das regiões mais industrializadas;

► a redução da captação de águas superficiais e subterrâneas, permitindo uma situação ecológica mais equilibrada;

► o aumento da disponibilidade de água para usos mais exigentes, como abastecimento público, hospitalar etc.

Dentre os benefícios econômicos, destacam-se:

► a conformidade ambiental em relação a padrões e normas ambientais estabelecidos;

► as mudanças nos padrões de produção e consumo;

► redução dos custos de produção e aumento da competitividade;

► habilitação para receber incentivos e coeficientes redutores dos fatores da cobrança pelo uso da água.

Dentre os benefícios sociais, citam-se:

► a ampliação da oportunidade de negócios para as empresas fornecedoras de serviços e equipamentos, e em toda a cadeia produtiva;

► a melhoria da imagem do setor produtivo junto à sociedade, com reconhecimento de empresas socialmente responsáveis.

Os rios têm suas nascentes originadas do acúmulo de águas de natureza pluvial no lençol freático, mas também podem ser formados tanto pelo degelo no alto de montanhas como a partir de lagos. Pela contínua disponibilidade de água que oferecem, os rios sempre desempenharam importante papel para o desenvolvimento de civilizações, notadamente nas proximidades de suas margens. Constituem notáveis exemplos alguns dos mais conhecidos e importantes rios do mundo: Amazonas (Brasil), Nilo (África Ocidental), Yang-tzé ou Azul (China), Huang-Ho ou Amarelo (China), Mississippi-Missouri (Estados Unidos), Mekong (Sudeste da Ásia), Amur (Rússia e China), Ganges (Índia), Volga (Rússia), Danúbio (Europa), Paraná (Brasil), Sena (França), Congo (África Central), Jordão (Jordânia) Tigre e Eufrates (Turquia). No Sudeste brasileiro, deve-se destacar a importância do rio Paraíba do Sul, estratégico para o desenvolvimento econômico do país, por servir aos estados de duas metrópoles nacionais (Rio de Janeiro e São Paulo), com alta concentração demográfica e industrial, além do Estado de Minas Gerais, e que por essa razão sofre com o alto nível de poluentes em seu curso.

Dada essa importância, para validar a influência de práticas de racionalização de consumo hídrico nos processos, deve-se verificar o impacto positivo que a redução na captação de água do rio provoca no abastecimento público. Pode-se, por exemplo, mostrar o benefício que a economia de *x* metros cúbicos de água não captada de um rio provoca em uma população, sendo suficiente para o consumo de *y* habitantes durante um ano, considerando um consumo de 200 litros de água/ hab.dia. Segundo dados da ONU (*apud* SABESP, 2011), uma pessoa necessita de 3,3 m³/pessoa/mês, em torno de 110 L diários de água para o atendimento de necessidades de consumo e higiene. No Brasil, o consumo por pessoa pode superar 200 L/dia. Para cidades com população de 50.000 a 250.000 habitantes, os valores médios de cota per capita equivalem a 170 L/hab.dia; para cidades com população acima de 250.000 habitantes consideram-se 225 L/hab.dia (SPERLING, 1995).

4.2. AS EXTERNALIDADES AMBIENTAIS

As atividades industriais provocam impactos cujos efeitos fazem parte de um conceito bastante difundido nas Ciências Econômicas como externalidades (economias – ou "deseconomias" – externas). Embora existam externalidades positivas e negativas, seus efeitos são mais bem interpretados sob o aspecto negativo; no caso de uma indústria, por exemplo, os malefícios que esta acaba gerando na sociedade em função de suas atividades, pelo lançamento de rejeitos em um rio cujas águas são utilizadas como fonte de irrigação ou de pesca, constituem externalidades negativas, as quais geram um custo para a sociedade, que sofre as consequências ao dispor de água poluída para suas atividades. Em termos gerais, representam os efeitos positivos (benefícios) ou negativos (custos) provocados pela ação de um agente econômico sobre outros agentes, os quais são atingidos sem que exerçam qualquer influência sobre a decisão inicialmente tomada.

Uma externalidade positiva ocorre quando os agentes são beneficiados através de investimentos em infraestrutura pública, por exemplo. É importante que as externalidades positivas sejam consideradas, pois elas podem decidir a viabilidade de um empreendimento. Por outro aspecto, contribui para o fortalecimento da imagem de uma empresa junto à comunidade. Como exemplo, pode-se citar o caso das fábricas da Coca-Cola e da Pepsi, reportado por Savitz e Weber (2007, p. 162), quando, em 2002, manifestantes políticos culparam as empresas de retirar muita água dos mananciais de Kerala, Estado ao sul da Índia, por acreditarem que a escassez do recurso, agravada pela falta de chuvas, tinha forte relação com as atividades das empresas. Estudos promovidos pela Pepsi demonstraram que a água era captada de um aquífero profundo, à parte, e sem ligação com as fontes de água da cidade; mesmo assim, os protestos continuaram. Em contrapartida, a empresa resolveu melhorar o manancial da comunidade, restabelecendo o fornecimento de água, e iniciou um programa para a construção de mananciais comunitários em outras áreas. Paralelamente, a fábrica passou a gerenciar melhor o uso de água nos processos de produção, perfurando poços em sua área industrial para aumentar o reabastecimento do aquífero. Os protestos prosseguiram, e a fábrica da Coca-Cola acabou sendo fechada pelo governo local. Ativistas políticos pressionaram o governo para que a fábrica da Pepsi também fosse fechada. Diante da pressão, a fábrica foi fechada, mas a falta de apoio local dissolveu os protestos e ela foi logo reaberta. Ao tentarem fechá-la pela segunda vez, os próprios habitantes locais impediram a manifestação. Este exemplo reforça a tese de que o bem-estar da comunidade é parte da responsabilidade (social e ambiental) de uma empresa.

As externalidades constituem falhas de mercado que surgem quando parte dos custos envolvidos na produção ou consumo de um recurso não é totalmente assimilada pelos que se beneficiam de seus efeitos. Para corrigir as externalidades negativas, o economista britânico Arthur Cecil Pigou (1877-1959) propôs que o Estado deveria cobrar pela diferença entre o custo marginal privado e o custo marginal social, tratando-se como um tributo corretivo (CÁNEPA, 2003, p. 62). Esse argumento é sustentado pelo fato de os custos privados não serem contabilizados, o que desestimula qualquer ação corretiva por parte de quem os gerou, embora seus efeitos possam incidir sobre uma parte da sociedade. Neste caso, diz-se que ocorre uma socialização dos custos por meio das externalidades geradas.

A Figura 4.3 ilustra o perfil de um setor produtivo formado por empresas em regime de concorrência perfeita, ou seja, situação caracterizada pela grande quantidade de vendedores e compradores, com produtos homogêneos (padronizados), livre entrada e saída de empresas e transparência de mercado. A curva de demanda (soma lateral de todas as demandas individuais dos consumidores) intercepta a curva de oferta de mercado (soma lateral de todas as curvas de custo marginal privado das empresas que compõem o mercado, ou seja, refere-se à curva de custo marginal privado global) no ponto C (Q_1, CMg_1).

Custo marginal representa o custo adicional dado pela produção de uma unidade extra. Na ausência de externalidades tanto na produção do bem como nos demais mercados sob concorrência perfeita, o ponto C representa o chamado ótimo de Pareto. Entretanto, quando há externalidade negativa, p = AB por unidade produzida (somada aos custos privados), deixa-se o ponto ótimo, pois não há mais igualdade entre preço e custo marginal (CÁNEPA, 2003, p. 62). A solução para isso é estipular que o poluidor, como responsável pelos problemas ambientais gerados para a sociedade, inclusive, assuma os custos da poluição ou reduza seu grau de poluição. Desse modo, o órgão ambiental do Estado interfere ao estabelecer um tributo (por unidade produzida) igual ao valor da externalidade. Neste caso, a curva de custo marginal privado global é reajustada com a incorporação do custo marginal social aos privados (internalização das externalidades). Isto leva ao aumento do preço do produto para os consumidores (que passam a pagar um preço incluindo os custos da sociedade) e diminuição da quantidade transacionada no mercado, representado pelo ponto A (Q_2, CMg_2), condição na qual é gerada uma menor pressão sobre o meio ambiente. O novo ponto de equilíbrio (B) corresponde então à igualdade do preço aos custos marginais privado e social, condição na qual o ótimo de Pareto é restabelecido (ótimo social), considerando concorrência perfeita e ausência de externalidades nos demais mercados.

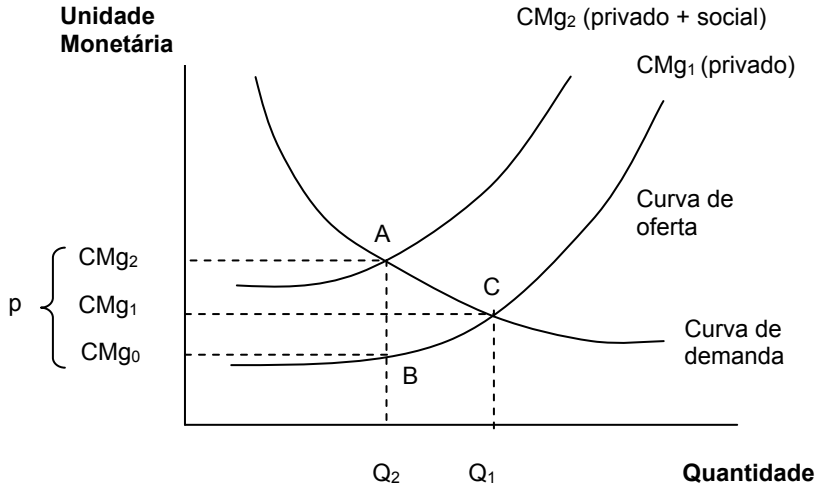


Figura 4.3 – Correção de externalidades negativas: incorporação do custo marginal social aos custos marginais privados

A cobrança pelo uso dos recursos hídricos, particularmente o lançamento de efluentes nos corpos hídricos, constitui uma aplicação do princípio poluidor-pagador, cuja natureza é de um tributo corretivo, ou melhor, um imposto. A internalização das externalidades ambientais negativas constitui uma medida encontrada para compensar os efeitos de tais consequências, através da incorporação de componentes relativos aos custos sociais atribuídos aos responsáveis por tais efeitos. Normalmente os processos produtivos que geram benefícios econômicos ao produtor encontram-se associados a um aumento nos custos sociais; portanto, a ideia é maximizar o lucro do empreendimento sem comprometer a qualidade do impacto ambiental e social, ou seja, minimizando as suas externalidades.

4.3. CONTRIBUIÇÕES DA VALORAÇÃO AMBIENTAL PARA A SUSTENTABILIDADE DOS RECURSOS HÍDRICOS

O Quadro 4.3 relaciona os efeitos resultantes das atividades humanas sobre os recursos hídricos, de acordo com o setor ou o meio de atividade. As indústrias são responsáveis pela maior parte dos impactos observados, principalmente por possuírem um campo de atuação mais amplo, com maior utilização de recursos como matérias-primas e insumos.

Quadro 4.3 – Consequências dos impactos das atividades humanas nos recursos hídricos (TUNDISI, 2009)

Consequências	Sedimentação	Eutrofização	Poluição térmica	Oxigênio dissolvido	Acidificação	Contaminação microbiana	Salinização	Traço de metais, contaminação	Mercúrio	Toxinas não metálicas	Pesticidas	Hidrocarbonetos	Diminuição de micronutrientes
Setor													
Agricultura	X	X	X			X	X	X			X		
Uso urbano	X	X	X	X		X	X	X			X	X	
Floresta	X	X	X								X		
Hidroelétricas e geração de energia	X	X	X	X					X				X
Mineração	X	X	X	X	X			X		X			
Indústrias	X	X	X	X	X		X	X	X	X		X	

O desequilíbrio ecológico gerado pelas externalidades negativas causa danos sociais, além de ambientais. Futuramente, esses impactos podem se tornar um fator limitante para o desenvolvimento econômico.

Para efeito de cobrança pelo uso da água, uma abordagem por custo-benefício deveria compensar a percepção social do dano ambiental causado pelo uso. Isto incluiria calcular, por exemplo, o aumento de custos representados pelo adicional de gastos públicos e privados com tratamento de água, aumento da incidência de doenças de veiculação hídrica, perdas da flora e da fauna, perda de atividades de lazer, desvalorização de áreas marginais, entre outros (SANTOS, 2003, p. 296)

Dentre as inúmeras e importantes contribuições relativas a valoração econômica de impactos ambientais, vale destacar os trabalhos de Cardoso (2000), Lemme (2000), Ferreira *et al*. (2005), Sinisgalli (2005), Oliveira (2006b), Paula (2008) e Silva (2008). Cabe acrescentar, porém, que não foram encontrados estudos que contemplam a valoração de impactos ambientais e de externalidades negativas resultantes da diminuição destes efeitos através de ações de regeneração e/ou reúso/reciclo de correntes de processos industriais, em função do menor volume e da carga (vazão x concentração) de efluentes lançados no

corpo receptor. Cada unidade federativa brasileira possui a sua legislação específica para a disposição de efluentes no corpo hídrico, e o fato de o efluente encontrar-se enquadrado às exigências legais não significa necessariamente a inexistência de impacto ambiental, resguardando aspectos da capacidade de autodepuração dos rios. A capacidade de recuperação ou de autodepuração é um importante processo natural que se caracteriza pela ocorrência de fenômenos como diluição, sedimentação, oxidação, decomposição e reaeração atmosférica, decorrentes de fatores como velocidade das águas, vazão, profundidade, quantidade de oxigênio dissolvido e cascalhamento. A qualidade dos corpos hídricos resulta da capacidade de autodepuração e de processos associados à intervenção humana, como barramentos ou obras de retificação, cujo equilíbrio ecológico é restabelecido no meio aquático, após as alterações induzidas pelo despejo de efluentes contendo matéria orgânica biodegradável.

Em linhas gerais, pode-se dizer que Economia Ambiental (ou Economia do Meio Ambiente) se enquadra na abordagem teórica da ciência econômica tradicional, voltada à incorporação do meio ambiente, em suas análises de equilíbrio e eficiência. Para a economia ambiental, a qualidade ambiental é considerada um bem que proporciona utilidade aos indivíduos e, portanto, é tratada como os demais bens da economia. Já a economia ecológica é uma abordagem alternativa à economia ambiental. É profundamente crítica a esta visão, rejeitando a valoração monetária do meio ambiente e a abordagem custo-benefício, aplicada em questões com impactos ambientais. Conforme Souza (2002, *apud* DINATO, 2006), a economia ecológica promove uma fundamentada crítica à economia ambiental, mostrando que esta não atende, necessariamente, aos padrões de sustentabilidade ambiental, mas, sim, ao objetivo de reduzir os problemas ambientais apenas às suas dimensões econômicas e tornar a sua compreensão e tratamento compatíveis com as possibilidades de gestão da economia de mercado. O ecodesenvolvimento, deste modo, tende a se colocar como uma perspectiva crítica ao modelo de desenvolvimento sustentável, invertendo muitas de suas estratégias (*Ibid*).

A valoração de danos ambientais representa uma importante ferramenta na tomada de decisão relativa aos cenários de reutilização de correntes mais promissores pela metodologia proposta neste estudo. Desse modo, torna-se particularmente importante como forma de assegurar a necessidade de se implantar medidas para o uso racional de água.

4.4. COMENTÁRIOS GERAIS

Este capítulo apresentou técnicas de valoração ambiental que permitem julgar as alternativas que visam ao uso racional dos recursos hídricos em processos industriais pela

ótica das externalidades ambientais, sendo particularmente importante na proposta integrada a um programa de gerenciamento de recursos hídricos. O capítulo seguinte relaciona algumas metodologias voltadas para a integração da sustentabilidade empresarial, com foco não apenas no uso da água como também na busca pela eficiência energética.

CAPÍTULO 5

INTEGRAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE

"(...) Consumimos quantidades imensas de água para gerar energia e quantidades imensas de energia para distribuir água limpa. Há muitas pessoas preocupadas com o perigo do pico do petróleo – o fim do petróleo barato – e poucas envolvidas com o pico da água. Mas quase ninguém fala da tensão entre os dois: restrições de agua impedem soluções para gerar mais energia, e problemas de energia, especialmente o aumento de preços, restringem os esforços de fornecimento de mais água limpa."

(Michael Webber, 2009, p. 28)

Resumo – Um conjunto de trabalhos acerca da integração da sustentabilidade corporativa é apresentada neste Capítulo. As abordagens estão voltadas para a minimização de efluentes, resíduos e emissões e conservação de água e energia, otimização de processos, análise de ciclo de vida e redução de impactos ambientais. Os métodos e as ferramentas tratadas em cada metodologia estabelecem a importância de se praticar modelos integrados que incluam as dimensões da sustentabilidade nas organizações, utilizando oportunamente plataformas computacionais e indicadores ambientais.

Palavras-chave: Integração de Processos, Abordagem estratégica ambiental, Sustentabilidade corporativa.

5.1. CONTRIBUIÇÕES RECENTES

Savitz e Weber (2007, p. 144) afirmam que não existe uma linha demarcatória quanto à sustentabilidade ou insustentabilidade da empresa e de seus produtos. Para os autores, a sustentabilidade é tida como um "ponto doce", ou seja, um centro de repercussão na direção da qual as empresas responsáveis se movimentam, buscando lucratividade e sucesso duradouros.

A integração da sustentabilidade requer o desenvolvimento e o uso de metodologias apropriadas para tal finalidade, coordenando as ações que induzem a aproximação das suas dimensões conceituais. Gwehenberger e Narodoslawsky (2008) apresentam alguns

desafios que a engenharia química enfrentará no que concerne ao desenvolvimento processos sustentáveis, com o uso de matérias-primas mais adequadas e de tecnologias mais limpas e flexíveis, reduzindo os impactos ambientais e sociais. Neste contexto, Irabien *et al*. (2007) apontam para a importância de se desenvolver metodologias voltadas para a integração da sustentabilidade pela engenharia de processos químicos, onde dois critérios devem ser considerados: (i) a abordagem do ciclo de vida e (ii) o uso da métrica da sustentabilidade, incluindo diferentes indicadores disponíveis.

Petek e Glavič (1996) propuseram uma abordagem voltada para a minimização de resíduos, a partir de sete regras heurísticas baseadas na prevenção da poluição, para serem aplicadas no sentido de se alcançar as metas de redução. A metodologia incorpora a necessidade de se estabelecer os balanços materiais e energéticos no processo, para a racionalização do consumo de água e energia, através da identificação de opções de reúso e redução da geração de resíduos ao longo do processo. Esta abordagem foi aplicada à indústria têxtil, e levou à redução da geração de efluente em 21%, reduziu o consumo de corantes em 24%, de auxiliares e químicos em 14%, e o consumo de vapor em 25%. O período de retorno do capital investido (*pay-back*) para a implementação das opções levantadas foi inferior a um ano.

Dunn e Bush (2001) aproveitaram as ferramentas da tecnologia de integração de processos, que têm como foco a conservação de água e energia através de metodologias de integração energética e mássica, respectivamente. Desenvolveram então uma abordagem denominada CLEANER (*Combining Lower Emissions And Networked Energy Recovery*), definida como uma estratégia de síntese de produção mais limpa, baseada nas técnicas de integração de processos voltada para soluções *end-of-pipe* (fim de tubo) e *in-plant design* (na fonte), na redução de resíduos e a conservação de energia. Apresentaram exemplos de integração mássica baseada na representação gráfica de diagramas de correntes fontes-sumidouros da literatura, em diagramas de mapeamento de correntes (*mapping diagrams*), e diagramas de atalho (*path diagrams*), também da literatura. Os autores, no entanto, não esclarecem de que forma a metodologia poderia ser inserida na abordagem de P+L, limitando-se a apresentar uma abordagem de integração de processos, cujos resultados se inserem na filosofia de prevenção da poluição. Seria oportunamente desejável que os autores estendessem para uma abordagem simultânea da integração mássica e energética, uma vez que a metodologia procura atender tanto a redução de resíduos quanto a conservação de energia nos processos.

Na tentativa de integrar e adequar estratégias empresariais no contexto da globalização foi desenvolvido no trabalho de Abreu (2001) um modelo geral de avaliação estratégica como ferramenta de tomada de decisão, e que classifica as empresas em função

da conduta ambiental e da pressão exercida sobre a indústria. O modelo, denominado de Avaliação da Estratégia Tripla, considera a existência de um resultado triplo, nas esferas econômica, ambiental e social, estendendo os conceitos do modelo tradicional de Estrutura-Conduta-*Performance* (ECP). Este modelo foi criado para avaliar o ambiente de operação das firmas industriais através da estratégia a ser adotada diante do potencial de vantagens competitivas, para melhor se ajustarem aos mercados nos quais se inserem; no modelo tradicional, o desempenho é considerado em termos unicamente financeiros (SCHERER e ROSS, 1990). Já na proposta de Abreu (2001), a dimensão ambiental é incorporada e avaliada por meio de conduta e de indicadores ambientais, sendo o modelo ECP-Ambiental testado nos setores petroquímico, têxtil e de bebidas. Os resultados foram dispostos em uma matriz que relaciona as funções gerenciais com um conjunto de indicadores de conduta ambiental, os quais foram classificados de acordo com o nível de mensuração. Observou-se que o modelo funciona como um mecanismo simples de avaliação empresarial quanto a seu posicionamento estratégico, sendo também um instrumento de comparação com os seus principais competidores, ou entre as diferentes unidades de negócios da empresa.

Khan *et al*. (2001) propuseram uma metodologia voltada para a síntese de processos mais limpos e "mais verdes", através de uma ferramenta batizada de *GreenPro*. A metodologia considera a avaliação e a minimização de impactos ambientais provocados pelos processos industriais como um todo, baseado em princípios de análise de ciclo de vida e inserido em uma plataforma de síntese e otimização de processos. A metodologia para a análise do ciclo de vida compreende quatro fases: (i) definição de metas ou seleção de contornos do sistema; (ii) análise do inventário do sistema; (iii) avaliação de impactos ambientais; e (iv) interpretação de resultados para redução dos impactos associados a produtos ou processos. Estas etapas são então incorporadas às do algoritmo *GreenPro*, o qual foi demonstrado pela aplicação a um estudo de caso real. A ferramenta mostrou-se especialmente útil na identificação de níveis ótimos de geração de resíduo e na síntese e otimização de processos mais limpos e mais ecológicos ("verdes").

Leripio (2001) desenvolveu um método para o gerenciamento de aspectos e impactos ambientais, denominado GAIA, com o objetivo de estimular a percepção de administradores e colaboradores de organizações produtivas para a melhoria do desempenho e planejamento ambiental. Aliás, esta é a hipótese central do trabalho: o desempenho ambiental das organizações depende da percepção de seus administradores e colaboradores. O estudo foi validado com a realização de uma pesquisa qualitativa com 55 aplicações em 12 diferentes setores produtivos, e também mostrou-se adequado como instrumento de avaliação preliminar da sustentabilidade corporativa.

Andersen *et al*. (2002) também desenvolveram uma abordagem para identificar, avaliar e implementar soluções de P+L para recuperação e reúso de água, energia e substâncias em indústrias de processos. A metodologia possui uma sequência de etapas envolvendo o uso de ferramentas alternativas e amigáveis ao usuário dentro da indústria. São incorporadas três fases nesta abordagem: (i) síntese e análise de sistemas; (ii) avaliação de cenários, de ordem técnica, econômica e ambiental; e (iii) implementação, operação e controle, com o monitoramento de indicadores. A Figura 5.1 esquematiza a estrutura para incorporação de métodos e ferramentas em conjunto com ações de P+L. No entanto, os autores não demonstram a aplicação da metodologia em um estudo de caso, limitando-se a informar que as ferramentas encontram-se em desenvolvimento. As técnicas de Integração de Processos (*Water Pinch*) também são apontadas como ferramentas de suporte à abordagem proposta, assim como a simulação de processos e a avaliação de ciclo de vida para os cenários passíveis de implementação.

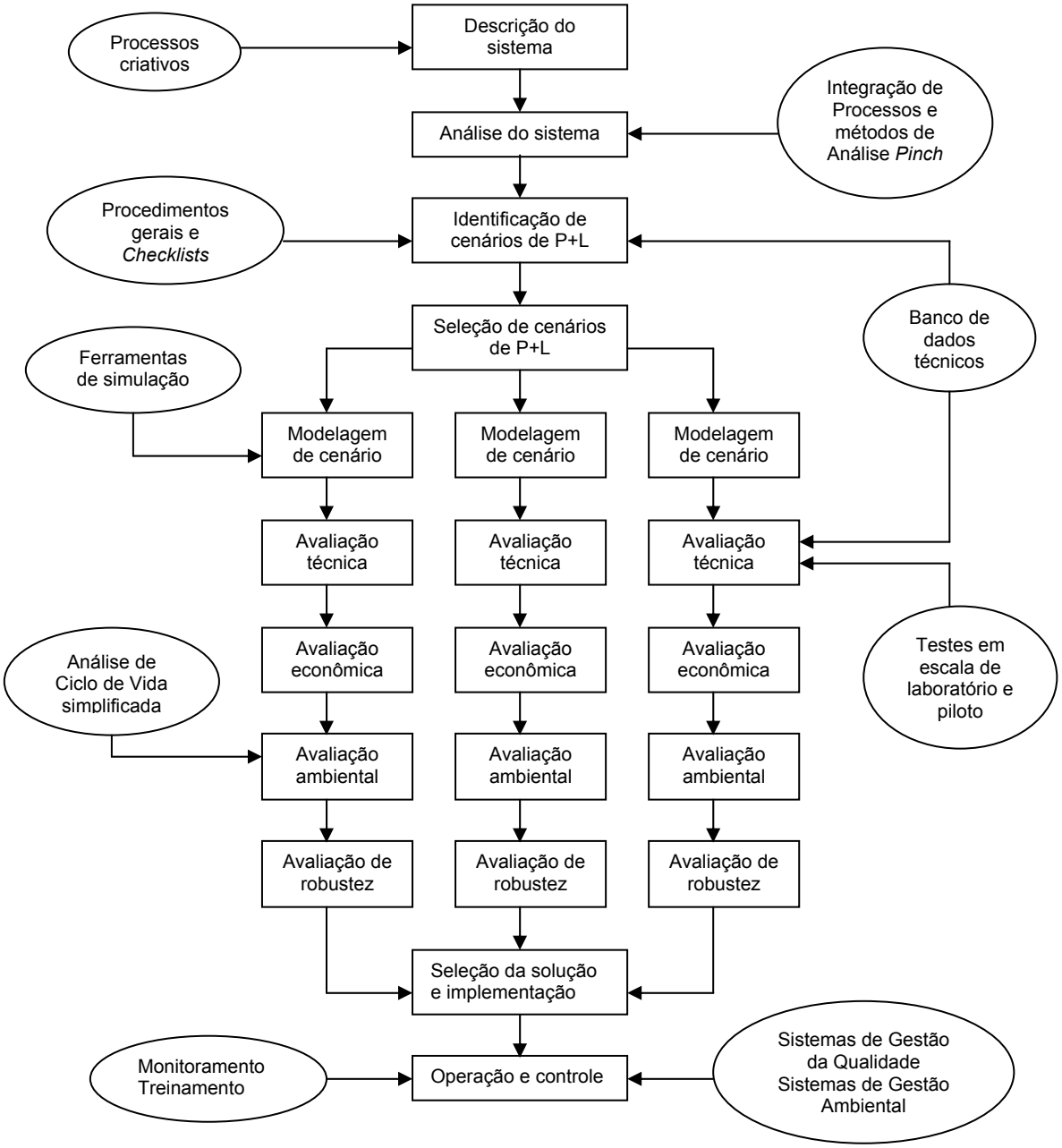


Figura 5.1 – Guia para implementação de P+L na indústria, com o uso de métodos e ferramentas selecionadas (ANDERSEN *et al*., 2002)

A incorporação de conceitos da sustentabilidade empresarial a um modelo de planejamento estratégico foi apresentada no trabalho de Coral (2002), que estabeleceu as lacunas dos modelos tradicionais em relação aos aspectos ambientais e sociais, e identificou a complementaridade entre os modelos de planejamento estratégico e de estratégia ambiental. Foi apresentado um modelo de diagnóstico estratégico que relaciona a variável ambiental e a social às estratégias de negócios e indicadores de desempenho, apresentando, ainda, um método para determinar o grau de sustentabilidade das

organizações e uma análise de convergência estratégica. O modelo foi testado através de um estudo de caso real, e mostrou-se relevante para o alcance da sustentabilidade pelas organizações, pois insere as variáveis ambientais e sociais no contexto da gestão ambiental em toda a cadeia de valores das empresas.

Azapagic (2003) apresentou uma plataforma para o gerenciamento da sustentabilidade corporativa (*Corporate Sustainability Management System* – CSMS). Dotado de visão sistêmica e desenvolvido em conjunto com o setor industrial, o modelo possui características similares a Sistemas de Gestão Ambiental e a Gestão pela Qualidade Total, o que facilita sua integração dentro da estrutura organizacional. O sistema de gerenciamento proposto percorre cinco estágios: (i) Política de Desenvolvimento sustentável; (ii) planejamento; (iii) implementação; (iv) comunicação; e (v) verificação e ação corretiva. Cada estágio é desmembrado em sub-etapas, que permitem identificar os *stakeholders* e os índices de sustentabilidade, desenvolver uma política de desenvolvimento sustentável, realizar a análise SWOT (forças, oportunidades, fraquezas e ameaças), medir o grau de sustentabilidade através de indicadores, e comunicar políticas e progressos, incluindo a elaboração de um relatório de sustentabilidade. Azapagic (2003) apresenta ainda um questionário para posicionar a empresa em relação a sua estratégia sustentável, permitindo avaliar e redirecionar suas ações dentro dos objetivos preconizados pela sustentabilidade corporativa.

A consciência para a prática da sustentabilidade empresarial tem levado ao desenvolvimento de propostas que busquem a integração de suas dimensões dentro do ambiente organizacional. A ausência de uma metodologia geral que possa nortear a busca por processos sustentáveis dentro do setor industrial estimulou Azapagic *et al*. (2006) a contribuírem para essa área emergente, com a proposta de uma nova abordagem que considere a integração de critérios de sustentabilidade na própria etapa de síntese. Baseada na análise do ciclo de vida da planta e do produto, a metodologia orienta os projetistas por meio de diferentes estágios que integram critérios técnicos, econômicos, ambientais e sociais. Esses estágios compreendem o (i) início do projeto, a (ii) síntese preliminar, a (iii) síntese detalhada, e a (iv) síntese final. A proposta é ilustrada com um estudo de caso do processo de produção de mono-cloreto de vinila (MVC), mostrando como identificar critérios relevantes, comparando alternativas, como avaliar o grau de sustentabilidade e como usar as informações obtidas para tornar a síntese do processo mais sustentável. Deste modo, é possível alcançar uma configuração estrutural do processo que possa garantir um desempenho mais sustentável da planta e do produto, uma vez que são identificados e analisados “pontos quentes” (*hot spots*) no ciclo de vida do sistema.

Para incorporar os princípios do Desenvolvimento Sustentável na estratégia das organizações, em especial na indústria química brasileira, Delgado (2007) propôs uma análise de posturas empresariais, considerando a importância do planejamento estratégico e o uso da ferramenta *Balanced Scorecard* (BSC). Foram analisadas quatro hipóteses: (1) as práticas empresariais quanto ao planejamento estratégico são determinantes para definir a postura das empresas; (2) posturas empresariais mais avançadas quanto ao Desenvolvimento Sustentável têm impacto positivo nos resultados econômicos, sociais e ambientais; (3) quanto mais avançada for essa postura empresarial maior será o uso de ferramentas como o BSC na busca de melhores resultados; e (4) a adoção do BSC focada no Desenvolvimento Sustentável (SBSC – *Sustainability Balanced Scorecard*) também traz impacto positivo nos resultados. As quatro hipóteses foram validadas mediante análise estatística das práticas de gestão de trinta e seis empresas do setor químico. Propôs-se, ainda, um processo para o desdobramento estratégico voltado para o Desenvolvimento Sustentável, além de algumas maneiras de empregar o SBSC em empresas do setor químico, embora não tenham sido testados os modelos sugeridos para o referido desdobramento.

Outras metodologias têm sido desenvolvidas recentemente para a integração da sustentabilidade na fase de síntese de projeto (HOSSAIN *et al*., 2010; HALIM *et al*., 2011; CORDER *et al*. 2012), abordando procedimentos heurísticos, simulação, otimização e avaliação de processos por meio de índices de sustentabilidade; as metodologias disponíveis apresentem semelhanças estruturais, sendo os processos de avaliação em sua maioria limitados por critérios de impactos ambientais.

5.2. COMENTÁRIOS GERAIS

Os modelos e as ferramentas apresentados e discutidos neste Capítulo e os que o precedem constituem uma trilha bastante útil para o alcance da sustentabilidade empresarial, uma vez que procuram maximizar o reaproveitamento de efluentes, resíduos e emissões gerados nos processos, bem como os insumos empregados. No caso deste trabalho, o foco se volta para a questão do reúso de águas e efluentes nos processos, tendo uma ferramenta (DFA) que pode ser perfeitamente integrada às etapas de um programa de P+L, dado o seu atual estágio de desenvolvimento. Um programa que viabilize a minimização da captação de água e de geração de efluentes industriais também precisa avaliar o efeito que a redução no lançamento de carga mássica de contaminantes provoca no corpo receptor. Partindo dessa premissa, torna-se importante associar a valoração econômica de danos ambientais sobre os recursos hídricos, propondo uma metodologia que

assegure essa integração da sustentabilidade, pois as externalidades negativas, incluindo seus impactos sociais, poderão ser evitadas ou atenuadas.

CAPÍTULO 6

METODOLOGIA DE GERENCIAMENTO INTEGRADO SUSTENTÁVEL PARA O REÚSO DE ÁGUAS E EFLUENTES INDUSTRIAIS

"Atualmente o desenvolvimento sustentável é tão discutido que virou uma espécie de modismo, mas a verdade é que ele não passa de uma utopia. Não há produção sem geração de resíduos, como também não há desenvolvimento sem agressão ao meio ambiente. Para termos uma sociedade sustentável, teríamos que não gerar resíduos; uma vez que estamos gerando resíduo, não conseguimos alcançar a sustentabilidade."

(Asher Kiperstok, 2011)

Resumo – Este Capítulo apresenta uma metodologia para gerenciamento do reúso de águas e efluentes industriais, com base nas diferentes oportunidades geradas dentro do processo hídrico industrial. Chamado aqui de P+Água, está alicerçado no trinômio Modelo de Gestão Sustentável – Método de Integração Mássica - Valoração de Externalidades Ambientais Negativas. Neste formato, um dos pilares é o modelo da Produção mais Limpa, como forma de sustentar a aplicação do Diagrama de Fontes de Água, cujas alternativas de reúso eventualmente geradas serão avaliadas sob o contexto final da valoração ambiental. Assim, propõe-se valorar o impacto da água (captação e descarte) resultantes dos cenários de reutilização hídrica gerados pela ferramenta Diagrama de Fontes de Água, mostrando que as técnicas de reúso podem contribuir para reduzir o lançamento de carga de efluentes no corpo hídrico, resultando no abrandamento de impactos ambientais. No entanto, o modelo P+Água vai além desta proposta integrada; ele também incorpora um processo seletivo de cenários de reúso gerados com o DFA, estabelecendo um procedimento interno no sentido de filtrar alternativas promissoras, e tornar a avaliação por meio da valoração ambiental mais compacta e direcionada. Também há uma abordagem para o sistema de resfriamento de correntes industriais, uma vez que dependendo do tipo de indústria, a torre de resfriamento torna-se um dos potenciais candidatos à receptação de correntes de reúso, dado o grande volume de água que movimentam. E por fim, um procedimento para alocação de processos regenerativos nos cenários promissores de reúso, voltados para os casos onde há violação de concentrações máximas nas operações receptoras de correntes de reúso. Com isso, o modelo P+Água torna-se mais abrangente do ponto de vista técnico e

econômico, facilitando estudos mais detalhados visando a implementação da melhor proposta de reúso industrial.

Palavras-chave: Reúso de efluentes, Torres de resfriamento, Valoração de danos ambientais.

6.1. O MODELO P+ÁGUA

No tom realista da afirmação do Prof. Asher Kiperstok, na abertura do capítulo, a qual procura desarticular a trivialidade que se tem artificialmente despertado na sociedade quando o assunto é sustentabilidade, está a oportunidade para o melhor questionamento da solução dos problemas ambientais. Na perspectiva de que a total eliminação de resíduos gerados torna-se uma atividade difícil de ser monitorada e alcançada, em termos mundiais, o que se deve buscar é a maximização da redução e do reaproveitamento dos resíduos, despertando a consciência individual e coletiva para a redução de impactos ambientais. Ainda assim, requer um envolvimento global e gradativo focado em educação ambiental, para conscientizar não somente as atuais gerações como também as futuras.

Com base nos instrumentos tecnológicos que permitem se alinhar aos objetivos da sustentabilidade dos processos industriais, particularmente voltados para a racionalização do uso da água e da geração de efluentes, com a desejável redução de impactos ambientais, pretende-se desenvolver uma metodologia que associe ferramentas que auxiliem na tomada de decisão empresarial.

O modelo adotado aborda a filosofia de prevenção da poluição, utilizando a Produção mais Limpa como estrutura principal, por se tratar de uma abordagem reconhecidamente aceita como um dos instrumentos que devem ser praticados na direção da sustentabilidade empresarial. Por outro lado, tendo como foco o uso racional dos recursos hídricos nos processos industriais, o método do diagrama de fontes de água é internalizado na filosofia de P+L, tornando-se uma ferramenta de suporte de grande utilidade para a consolidação de cenários de plantas com o mínimo consumo de água e a mínima geração de efluentes, por meio de práticas de reaproveitamento sistemático de correntes hídricas.

Para validar e ratificar a redução dos impactos ambientais sobre os corpos hídricos e seu entorno, os quais passam a receber uma carga de contaminantes menor, são utilizadas técnicas de valoração econômica ambiental, de modo a avaliar a influência qualitativa e quantitativa provocada por tais descargas. Assim, a metodologia aqui apresentada procura

reunir os benefícios proporcionados pela adoção de um modelo efetivo de gestão ambiental (P+L) e de uma ferramenta sustentável que permite gerar redes de transferência de massa, minimizando o consumo hídrico (DFA), de modo que seja perfeitamente aplicável às indústrias cujos processos dependem fortemente do uso de recursos hídricos. A metodologia, neste sentido, procura ajustar-se às necessidades de melhorias de processos e caminhar em sinergia com a atual proposta de se praticar o desenvolvimento sustentável no ambiente empresarial. Com isso, pretende-se alcançar os objetivos previamente estabelecidos de vincular as decisões gerenciais às ferramentais tecnológicas disponíveis, demonstrando a importância de não se negligenciar os aspectos de natureza técnica para a determinação de metas no planejamento, conforme já comentado no Capítulo 1 desta proposta.

A metodologia em desenvolvimento recebeu a denominação de "Gerenciamento Integrado de Processos para o Reúso Sustentável de Águas e Efluentes Industriais" (P+ÁGUA, uma alusão a "processos para o uso racional de água"), e tem como dimensões a tríade econômica/social/ambiental da sustentabilidade. Porém, neste caso, trata-se de uma espécie de derivado (*spin-off*) da dimensão ambiental, cujo desdobramento está ligado à composição das ferramentas adotadas. A base do método é representada pela Figura 6.1.

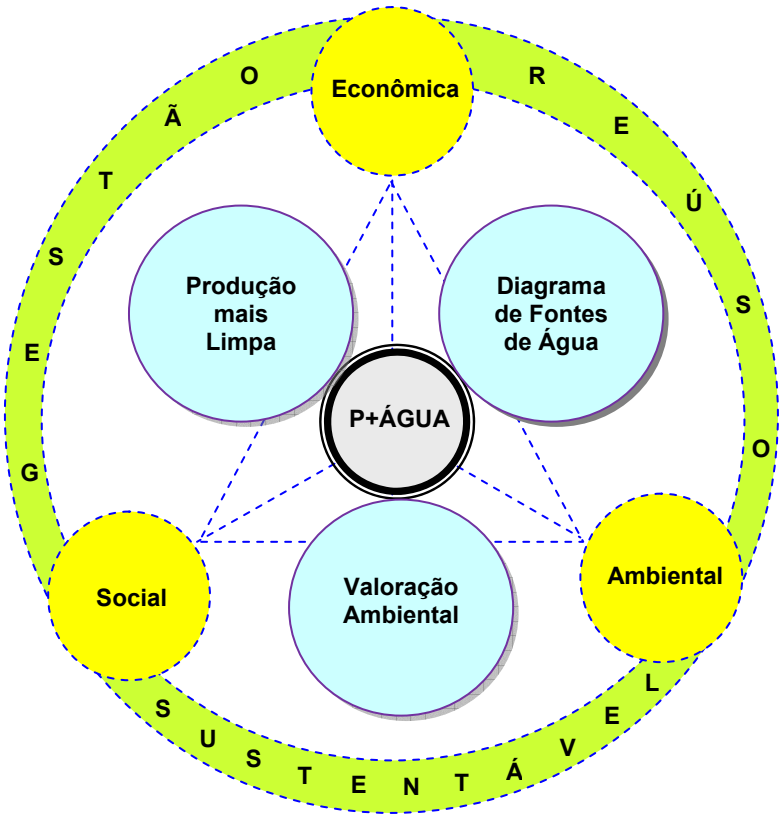


Figura 6.1 – Representação do modelo integrado de reúso sustentável (P+ÁGUA)

Este modelo auxilia no preenchimento de uma lacuna quanto às necessidades das indústrias de reduzir os impactos ambientais, pois lança mão de ferramentas de aplicação de técnicas para reúso, bem como de valoração das alternativas geradas. Assim, sua proposta inclui não somente o desenvolvimento da metodologia de integração de processos, mas principalmente a avaliação dos impactos sobre os recursos hídricos. A intenção é validar a necessidade de aplicação das técnicas de reúso e contribuir para o aumento da disponibilidade hídrica das fontes.

A Figura 6.2 apresenta uma visão macro do modelo P+ÁGUA, indicando as etapas nas quais as ferramentas para a integração de processos e de valoração ambiental são utilizadas, dentro da lógica apresentada na Figura 6.1. As setas reversas nas etapas indicam *feedbacks* e a proposta de melhoria contínua, que deve permear todo o processo, os quais são importantes para que se mantenha a necessidade de aprimoramento das etapas.

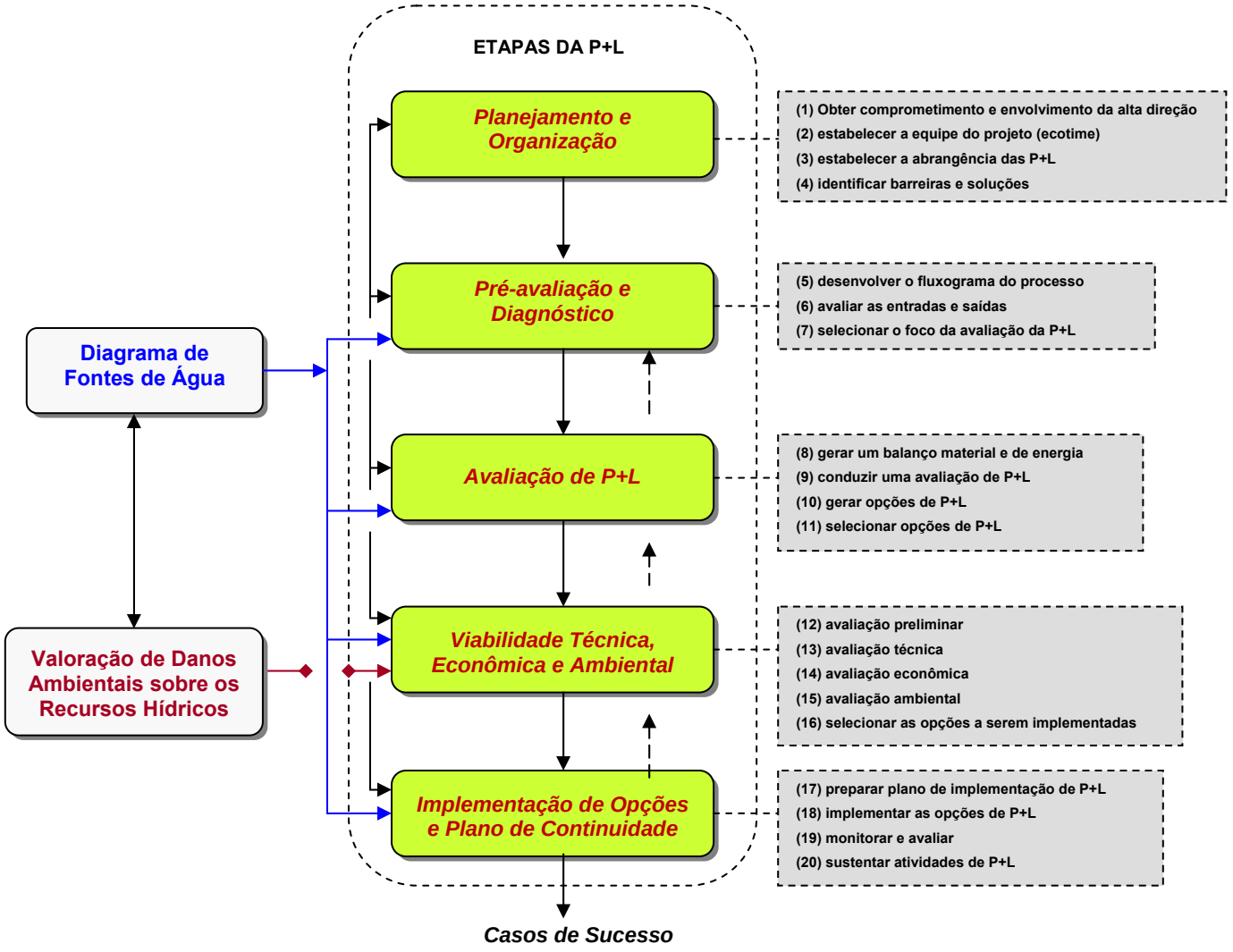


Figura 6.2 – Estrutura representativa do modelo P+ÁGUA

Como citado, a metodologia engloba basicamente a incorporação do DFA à base conceitual da P+L, tendo a valoração ambiental como ferramenta de tomada de decisão quanto às oportunidades de reúso de menor impacto econômico, ambiental e social. O DFA passa a ser aplicado como parte integrante da segunda etapa da P+L. Dentro desse modelo, propõe-se a análise de oportunidades de reúso e/ou regeneração de correntes hídricas por meio de um procedimento seletivo que leva em conta elementos estatísticos. Adicionalmente, são propostos parâmetros de análise com base nas características de um sistema de resfriamento de água, bem como um parâmetro que considera a dimensão do realinhamento de correntes de reúso, denominado aqui de fator adicional de reúso. Propõe-se também um procedimento voltado para a interposição de regeneradores locais e diferenciados para cada contaminante, cuja concentração máxima permitida foi ultrapassada em determinada operação, por efeito do reúso. Por fim, o modelo propõe ainda que as opções selecionadas como as mais promissoras e passíveis de implementação na prática, em termos de custos e viabilidade de realinhamento, sejam analisadas pela valoração ambiental; o objetivo é restringir a indicação de cenários que apresentem menor impacto sobre os recursos hídricos, consolidando benefícios de natureza econômica, ambiental e social, com foco na sustentabilidade. Naturalmente, o modelo é aplicável a casos nas quais um número significativo de contaminantes está presente na análise, uma vez que permitirá ampliar a análise de processos industriais reais e alcançar quantidades proporcionais de cenários de reúso, reciclo e/ou regeneração. Esta condição apenas justificaria o emprego de um procedimento seletivo para a busca orientada por filtragem de cenários; no entanto, quando o número de cenários levantados com a aplicação do DFA for estrito, de modo que se permita uma análise individual detalhada de suas características, o modelo P+ÁGUA torna-se mais objetivo como suporte na tomada de decisão ambiental.

Para a realização deste trabalho, a metodologia requer maior exploração da fase de valoração de impactos ambientais sobre os recursos hídricos, uma vez que tanto a P+L quanto o próprio DFA já apresentam uma estrutura desenvolvida e adequada para a análise proposta, a julgar pela quantidade de trabalhos disponíveis na literatura. Por outro lado, é importante desenvolver uma metodologia que identifique o reúso sustentável como uma prática eficiente e eficaz, através da mensuração de impactos ambientais, mas com alcance tanto econômico quanto social. Com isso, este trabalho pretende apresentar uma abordagem de valoração perfeitamente integrada ao formato do modelo P+ÁGUA, tornando possível incorporar e validar as externalidades ambientais negativas resultantes das atividades industriais associadas aos processos hídricos.

6.2. ETAPAS DA METODOLOGIA PARA INTEGRAÇÃO MÁSSICA COM O DFA

Para a aplicação da metodologia de integração mássica utilizando o DFA, podem-se seguir as etapas sugeridas pela Figura 6.3, e conforme descritas adiante.

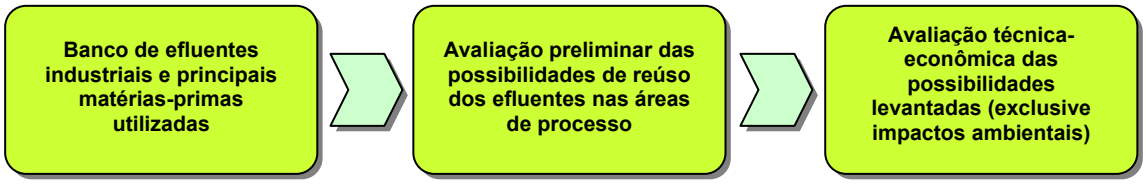


Figura 6.3 – Macro-etapas representativas da metodologia do DFA no ambiente industrial

(i) Desenvolvimento de banco de efluentes industriais líquidos e principais matérias-primas utilizadas

Nesta etapa são identificados os efluentes das diversas operações unitárias dos processos produtivos de uma empresa. Uma metodologia de pesquisa pode seguir o preenchimento de um questionário padrão elaborado visando a identificação das correntes principais de efluente e a utilização das matérias-primas. De acordo com as características do efluente em estudo, são definidas todas as restrições iniciais do problema.

A etapa de coleta de dados relativos à caracterização das correntes aquosas, em termos de concentração de contaminantes, bem como as vazões que representam as respectivas operações do balanço hídrico, constitui a fase mais importante neste procedimento, por ser um momento de discussão e definição de valores representativos do processo.

A partir da elaboração do fluxograma completo do processo hídrico são determinadas as operações que irão compor o balanço hídrico. Na prática, esta etapa normalmente requer a discussão com representantes das unidades operacionais, a fim de validar as informações de forma detalhada acerca da vazão e da caracterização quantitativa dos principais parâmetros e contaminantes presentes. É comum que esse tipo de informação (caracterização quantitativa das correntes) não esteja disponível completamente, evidenciando a lacuna existente sobre o sistema hídrico; neste caso, os valores podem ser determinados através do balanço material das correntes, com base nos valores disponíveis e em restrições do processo, como limites de solubilidade e ainda operacionais, que não afetem a qualidade do equipamento ou operação, em relação a determinado contaminante.

Em um primeiro momento, a obtenção dos dados é realizada através de consulta a documentos internos ou a sistemas de monitoramento de contaminantes em tempo real, por meio da localização de pontos de amostragens disponíveis nas bases de dados do sistema. As informações não disponíveis tornam-se foco de discussão com os setores operacionais, visando ao seu preenchimento, ou mesmo sugerindo uma requisição para futuras análises de qualidade da água. Além disso, no sistema real, cabe citar a existência de fluxos intermitentes em determinadas operações, ou seja, vazões destinadas a determinados equipamentos (*by-pass*, por exemplo) ou enviadas para tratamento final, e que não são previstos para aplicação do procedimento DFA; por simplificação, assume-se a existência de fluxos contínuos nos processos.

Assim, dentro da etapa de obtenção de dados, seguem-se as sub-etapas relativas às características do processo em análise, as quais incluem: i.1) realização de balanço hídrico; i.2) identificação de contaminantes relevantes; i.3) mapeamento de restrição de vazão; i.4) necessidade de dados precisos para determinadas operações; i.5) análise do nível atual de contaminantes; e i.6) análise das condições limitantes do processo. As sub-etapas são descritas a seguir:

i.1) Balanço hídrico

A etapa inicial envolve o mapeamento do ciclo hídrico do processo executando o seu balanço de massa. Não são considerados, portanto, os processos que não usam ou que não geram água. É importante fechar o balanço com uma precisão em torno de 90%. O principal objetivo aqui está em identificar as restrições que permitam ou evitem o reúso.

Quando não se consegue fechar o balanço hídrico, seja por vazamentos em tubulações ou por incerteza de medição, pode-se recorrer à técnica de reconciliação de dados (SOUZA *et al*. 2009), de modo a ajustar valores conhecidos, em função da incerteza e de restrições do sistema, utilizando uma função objetivo a ser minimizada.

i.2) Contaminantes relevantes

A abordagem dos contaminantes deve estar limitada ao menor número possível, dentre aqueles que efetivamente concorrem para a importância do processo. Se necessário, deve-se agrupá-los na forma de orgânicos totais, sais, sólidos suspensos, sólidos totais. Apenas os contaminantes que aparecem com restrições de entrada são considerados, começando a análise preferencialmente com um único contaminante.

i.3) Restrição de vazão

Existem processos onde a vazão deve ser mantida fixa, como nos casos de reposição (*make-up*) das torres de resfriamento, operações manuais com mangueiras (*hosing*), ejetores de vapor etc. Tais processos, passíveis de restrição de vazão, devem ser devidamente identificados. Por outro lado, inicialmente, não são consideradas correntes com baixas vazões (~< 1t/h), uma vez que, a princípio, o reúso não se justifica economicamente viável.

i.4) Precisão dos dados

A necessidade da precisão na coleta de dados não se estende por todo o processo. Esse fator está ligado à sensibilidade das metas estabelecidas. Assim, deve-se identificar a região de proximidade do *pinch* e verificar a condição mencionada. Caso as metas sejam sensíveis à incerteza dos dados, faz-se necessário coletar dados mais precisos abaixo do ponto *pinch*. Outro aspecto relevante desta região de estudo é que as operações que a compõem são as indicadas para serem otimizadas.

i.5) Análise do nível atual de contaminantes

O atual nível de contaminantes e as metas devem ser determinados. Uma vez que o processo esteja especificado, deve-se restringir a análise para as condições atuais.

i.6) Condições limites

As condições limites do processo são determinadas pelas seguintes observações: julgamento e experiência; limitações de corrosão; solubilidade máxima; simulação; investigação das mudanças fazendo estudos em laboratório; tentativas na planta; análise de sensibilidade. A partir destes dados novos estudos serão realizados com o objetivo de máximo reúso.

(ii) Avaliação preliminar das possibilidades de reutilização do efluente líquido nas áreas dos processos

Partindo dos dados levantados na pesquisa anterior e de uma avaliação preliminar dos riscos envolvidos na utilização de determinado efluente, será feita uma triagem das alternativas viáveis, onde serão definidas quais as possibilidades passíveis de uma avaliação técnica/econômica.

(iii) Avaliação técnico-econômica das possibilidades existentes

Tecnicamente, a reutilização do efluente é avaliada tendo em vista eventuais riscos que seu desvio possa acarretar em outros processos industriais, entre as quais a neutralização de efluentes e impactos ao meio ambiente e à comunidade em geral.
Sob os aspectos econômicos, a reutilidade do efluente estudado pode envolver os custos de investimentos de instalação de novos equipamentos e os custos operacionais. Deve-se avaliar a taxa de retorno do investimento e/ou outros índices que representem o desempenho econômico das redes de transferência de massa propostas.

Delgado (2003) também estruturou um procedimento para obtenção de dados de plantas industriais visando à aplicação do DFA, elaborando, para tanto, um questionário que inclui as informações necessárias, e que são similares às etapas acima listadas, como a caracterização do processo através do balanço hídrico geral e de contaminantes. Devem-se conhecer as fontes de alimentação existentes, as máximas concentrações dos contaminantes relevantes em cada corrente e operação; deve-se, ainda, levar em conta os reúsos já praticados, bem como o tipo de tratamento existente (centralizado ou distribuído) na planta. Todas as informações disponíveis sobre os processos hídricos tornam-se importantes para a aplicação do método DFA, favorecendo a geração de cenários alternativos de reutilização de correntes.

6.3. METODOLOGIA DE BUSCA ORIENTADA POR FILTRAGEM APLICADA DE CENÁRIOS DE REUTILIZAÇÃO HÍDRICA

Em processos hídricos reais a quantidade de contaminantes presentes deve ser caracterizada preferencialmente por meio de técnicas de análises químicas adequadas para tal propósito. Aquelas correntes que não dispuserem de informações qualitativas e quantitativas podem então ser caracterizadas mediante outras ferramentas, como balanço material e simulação de processos, por exemplo. De qualquer modo, quanto maior o número de contaminantes identificados na amostra e que representem o processo em análise, mais próximo estará da realidade e, portanto, mais precisa será a geração de oportunidades de reúso. No entanto, um número maior de contaminantes pressupõe multiplicidade de soluções propostas, o que implica maior quantidade de cenários de reúso a serem avaliados. Neste caso, a falta de uma metodologia que permita selecionar as melhores e mais promissoras oportunidades constitui um problema a ser tratado, uma vez que traria a necessidade de se testar cada uma dos cenários levantados e avaliar qual deles seria o mais adequado para implementação na prática, e isto demandaria tempo e esforço para lidar com a possível complexidade do problema.

Visando oferecer instrumentos de análise, o modelo P+ÁGUA, por valorizar o uso da ferramenta DFA na tomada de decisão ambiental, procura prever como aprimorar os mecanismos de seleção e implementação de cenários promissores de reúso; deste modo, a sistemática é aqui proposta para inserir o uso do DFA no modelo desenvolvido e propiciar a análise final orientada para a valoração de impactos negativos. Esse procedimento, batizado de “busca orientada por filtragem de cenários de reutilização hídrica”, considera que, após aplicar o DFA para sistemas com um e múltiplos contaminantes, devem ser seguidas etapas que permitam avaliar a natureza dos processos de acordo com os custos operacionais envolvidos. A Figura 6.4 esquematiza o conjunto de etapas propostas para esta metodologia.

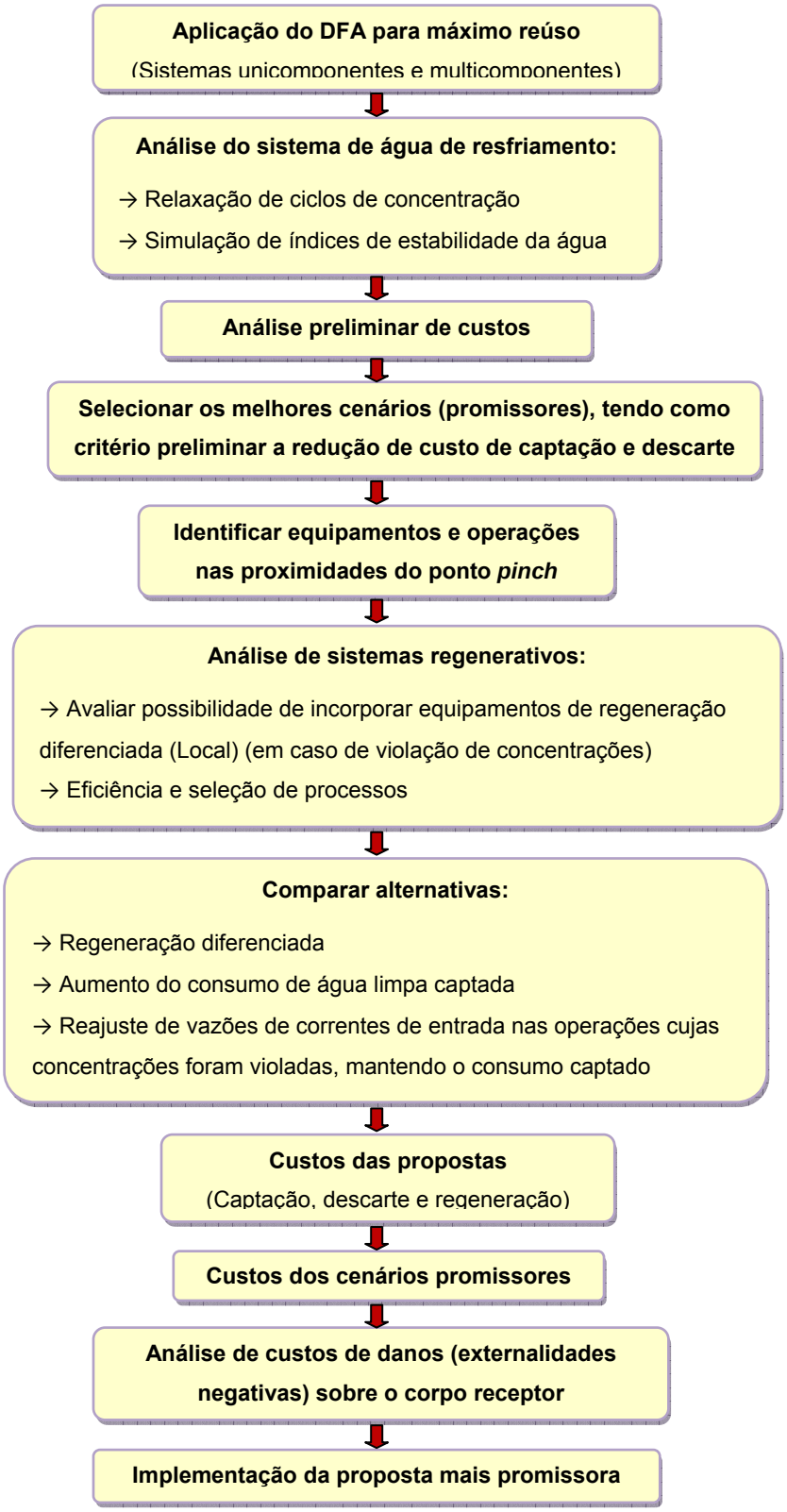


Figura 6.4 – Metodologia de busca orientada por filtragem de cenários de reutilização hídrica

De acordo com a metodologia, é importante que se estabeleça a análise do sistema de resfriamento, para tipos de indústrias onde torres de resfriamento são utilizadas para trocas térmicas ao longo dos processos. Assim, deve-se seguir a análise de relaxação dos ciclos de concentração, ou seja, flexibilizar as concentrações de modo que a elevação do ciclo favoreça a escolha de correntes de menor qualidade, o que eventualmente levaria ao aumento do reúso. Por outro lado, deve-se monitorar e controlar as características de corrosividade e incrustações da água neste sistema, tornando-se necessário estimar os índices de qualidade da água, os quais permitem prever as tendências relacionadas a estes inconvenientes. A abordagem conceitual desta etapa é apresentada no item 6.4 deste capítulo.

Em seguida, a análise de custos dos cenários permite estabelecer critérios estatísticos para selecionar aqueles mais provavelmente adequados para serem implementados; estes critérios são apresentados no item 6.5 deste capítulo. A identificação de equipamentos e operações localizados nas proximidades do ponto *pinch* tem sua importância ligada à precisão dos dados levantados para tais operações. Após a seleção preliminar de cenários, deve-se avaliar a possibilidade de alocar regeneradores específicos para contaminantes que tiveram suas concentrações máximas ultrapassadas em operações que receberam correntes de reúso.

Um procedimento para alocação de regeneradores com base na eficiência de remoção de contaminantes também é proposto como mais uma contribuição deste modelo, sendo apresentado adiante no item 6.6. As alternativas remanescentes são comparadas em termos de custos de captação, descarte e investimento e operação de processos regenerativos. A estas opções são acrescidos os custos das externalidades negativas consideradas como efeito provocado pelo descarte de efluentes sobre o corpo hídrico. Esta etapa final, mais uma proposta a ser considerada pelo modelo P+ÁGUA, é apresentada no item 6.7 deste capítulo. Com isso, pode-se restringir o número de opções de reúso passíveis de implementação, tornando o modelo um instrumento importante na avaliação integrada das dimensões econômica, ambiental e social visando ajustá-lo ao gerenciamento sustentável do uso racional da água na indústria.

6.4. ANÁLISE DO SISTEMA DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO

Como parte integrante dos processos hídricos de uma refinaria, a unidade do sistema de resfriamento de água de circulação utiliza a transferência de calor para absorver grandes quantidades residuais de calor que permeiam os processos de refino. A água possui a função de meio de resfriamento, removendo o calor e cedendo-o para outro meio. Esta

função representa cerca de 90% das necessidades do volume de água nas refinarias (ECKENFELDER, 1970), sendo o sistema mais importante a avaliar quando se pretende reduzir a quantidade de água captada e a geração de efluentes.

Normalmente, os sistemas de resfriamento podem ser classificados como aberto sem recirculação (ou abertos de uma só passagem – *once through systems*), aberto com recirculação (semi-aberto ou *open recirculating systems*) e fechado (*closed recirculating systems*).

Os sistemas abertos de uma só passagem ocorrem quando a água captada de uma fonte com grande quantidade disponível, como rio, lago ou mar, é empregada para refrigeração de um sistema, sendo posteriormente devolvida sem necessidade de tratamento específico, em alguns casos com temperaturas superiores a 40ºC; este sistema pode levar a uma situação de poluição térmica, com diminuição da quantidade de oxigênio dissolvido na água.

Um sistema aberto com recirculação, também chamado de trocadores de calor evaporativos, é bastante utilizado na indústria, principalmente em refinarias de petróleo; trata-se de um sistema adotado quando se tem quantidade limitada de água ou quando há necessidade de se estabelecer um tratamento específico para enobrecer a qualidade da água como meio refrigerante. Neste sistema, utiliza-se uma torre de resfriamento para reduzir a temperatura da água circulante, ocasionada pelas trocas de calor latente e sensível entre as gotículas evaporadas e as não evaporadas (calor latente absorvido pela evaporação e calor sensível perdido pela parcela não vaporizada).

Os sistemas fechados operam de modo semelhante ao anterior, não sendo, porém, do tipo evaporativos, mas sua troca térmica ocorre com o ar; podem ser utilizados em sistemas de aquecimento, sistemas fechados de água quente, ou fechados de água gelada, com auxílio de uma torre de refrigeração.

Existem duas classificações quanto às características construtivas das torres de resfriamento: (i) tiragem natural, onde o fluxo do ar é determinado pelas condições atmosféricas; e (ii) tiragem mecânica, onde o fluxo de ar é gerado através de ventiladores; esta última pode ser dos tipos forçada (ventiladores instalados na região inferior da torre, impelindo o ar para seu interior) ou induzida (ventiladores posicionados na região superior, de modo a succionar o ar para o interior da torre). Neste último caso, as torres podem ser do tipo tiragem induzida contra-corrente (entrada de ar pela base da torre, ascendendo no sentido do topo, na qual a água é distribuída), ou corrente cruzada (entrada de ar pela lateral da torre, em fluxo cruzado com a água, que desce do topo), conforme esquema estrutural da Figura 6.5.

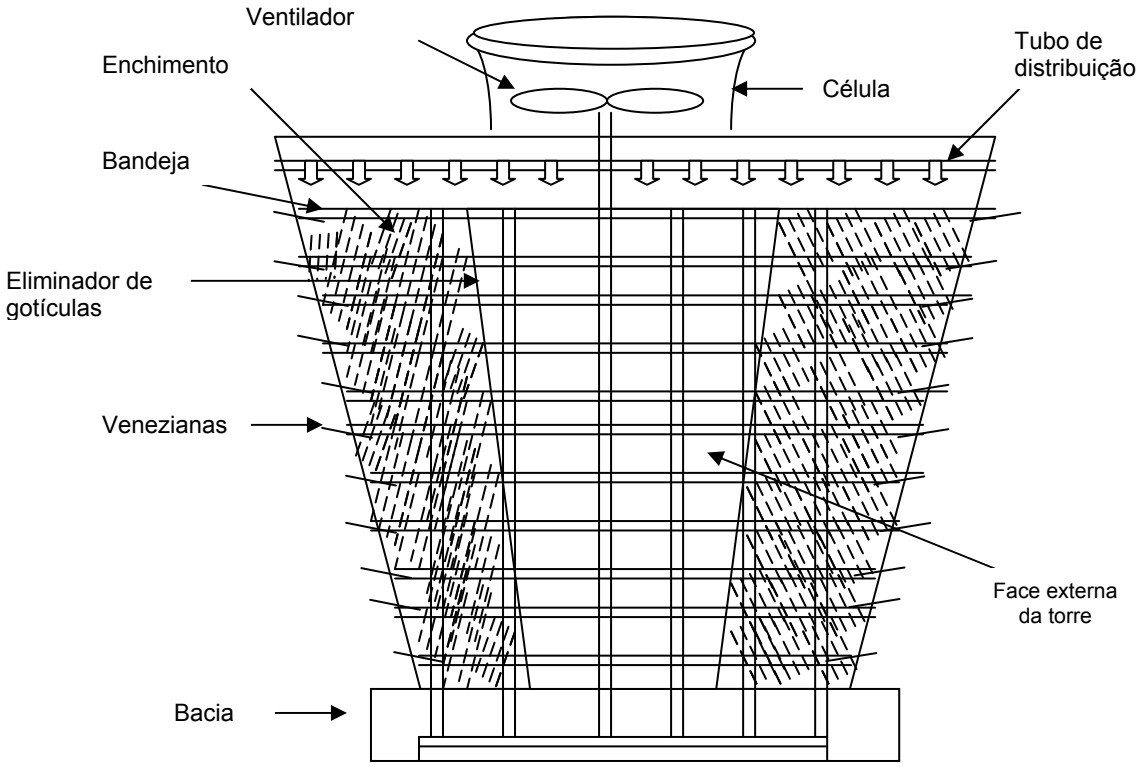


Figura 6.5 – Esquema geral de uma torre de resfriamento de fluxo cruzado e tiragem mecânica induzida

As torres de resfriamento recebem a água proveniente das diversas unidades de processo que, após retirar calor do óleo nos trocadores de calor, retorna aquecida, para então ser resfriada, por meio de um fluxo predeterminado de ar do ambiente, impelido por grandes ventiladores, após o qual é recirculada ao processo. Parte dessa água é perdida por evaporação, pela formação de névoas e ao seguir para o sistema de *blowdown* (purga contínua, também chamada de *bleed-off*), que a envia para a unidade de tratamento de efluentes. Essas perdas devem ser repostas (água de reposição ou de *make-up*), e representam, normalmente, cerca de 5% da recirculação (MARIANO, 2005, p. 51).

Devido às perdas por evaporação, ocorre concentração de sais na recirculação do sistema de resfriamento, até o limite de solubilidade, propiciando a formação de incrustações, que agem na diminuição da eficiência de troca térmica. Por essa razão, a água é constantemente purgada (*blowdown*) na torre, medida tomada para manter níveis adequados de concentração de sais (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, CO_3^{2-}, HCO_3^{-}, SO_4^{2-} , SiO_3^{2-} e Cl^{-}) na torre (MONTEIRO *et al*., 2004), desconcentrando a água de recirculação. Assim, com base em uma determinada espécie (normalmente sílica, cálcio ou magnésio), ao se relacionar a

água do sistema com a de reposição, estima-se o ciclo de concentração, importante parâmetro que define a quantidade de vezes que os sais são concentrados. Este parâmetro sofre influência de perdas e descargas da torre de resfriamento. Como consequência, a água de *make-up* deve possuir boa qualidade, com baixos níveis não somente de sais e material orgânico, como também de sólidos suspensos e microrganismos (TROVATI, 2007).

A Figura 6.6 ilustra o mecanismo de funcionamento de um sistema semi-aberto de resfriamento, para uma torre de tiragem mecânica induzida e fluxo cruzado.

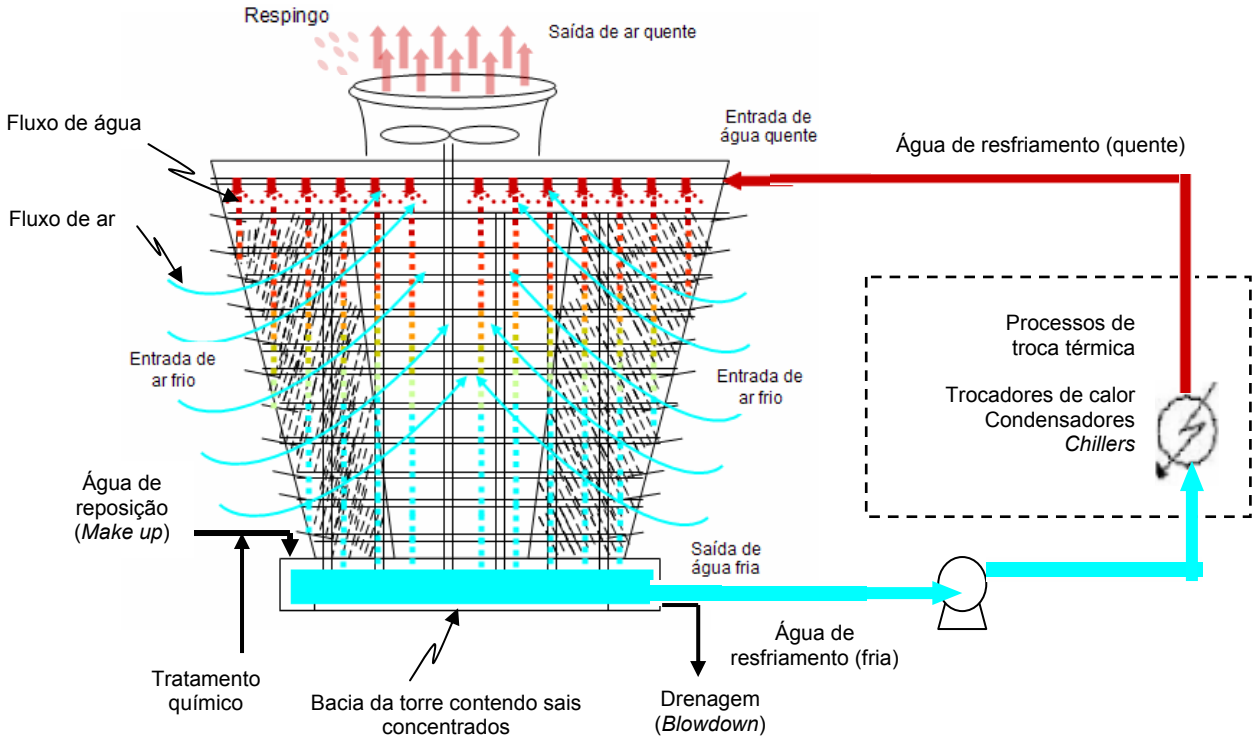


Figura 6.6 - Esquema do funcionamento da torre em circuito de resfriamento semi-aberto

As torres de resfriamento recebem, portanto, grande atenção quando se leva em conta a reutilização da água em uma refinaria, pelo enorme volume que consomem, viabilizando a redução na captação da água.

Considerando um típico sistema, que opera sob regime estacionário e sem acúmulo de material, o balanço material para a água origina-se da seguinte expressão (Equação 6.1):

$$R + F = E + A + D + I \qquad (6.1)$$

onde: R representa a vazão da água de reposição; F representa outras fontes de alimentação, tais como condensadores de contato ou água de chuva, por exemplo; E representa a vazão de evaporação; A é a vazão de perdas ocasionadas por arraste de gotículas; D é a vazão de descargas (purgas); e I representa perdas indeterminadas, dentre

as quais vazamentos, transbordamentos, infiltrações, drenos abertos, ou outros usos para a água de recirculação, por exemplo.

Assim, considerando a inexistência de outras fontes de alimentação e de outros tipos de perdas (F = 0 e I = 0), a expressão se reduz a (Equação 6.2):

$$R = E + A + D \tag{6.2}$$

A concentração de sais minerais dissolvidos na torre durante a evaporação está relacionada com o ciclo de concentração (CC). Assumindo-se que ocorra neste processo somente evaporação de água pura, o ciclo de concentração será dado pelas Equações 6.3, 6.4 e 6.5.

$$CC = \frac{E + A + D}{A + D} \tag{6.3}$$

$$CC = \frac{R}{A + D} \tag{6.4}$$

$$CC = \frac{E}{A + D} + 1 \tag{6.5}$$

A Equação 6.5 informa que o aumento da evaporação da água (E) induz ao aumento do ciclo de concentração (CC); no entanto, o aumento das descargas resulta em uma diminuição no ciclo, uma vez que as purgas são utilizadas para ajustar o nível de concentração de sais na água de resfriamento dentro da necessidade operacional (limites aceitáveis).

A partir da quantidade evaporada e do ciclo de concentração do sistema pode-se obter a quantidade de água de reposição, através das Equações 3.6 e 3.6, resultando na Equação 6.6.

$$R = E.\frac{CC}{CC - 1} \tag{6.6}$$

A quantidade de água evaporada e a quantidade perdida pelo arraste também são fatores importantes na determinação da vazão de purga do sistema de resfriamento. Para cada 10°C de resfriamento obtido, a vazão de evaporação equivale à cerca de 1,7% da vazão de recirculação; ou seja, a cada 5,8°C de resfriamento na água tem-se

aproximadamente 1% da vazão de recirculação (estimativa genérica) (TROVATI, 2007, p. 15). A precisão destes valores está relacionada à realização de balanços de massa e energia combinados. Já a perda por arraste considera as características construtivas da torre, como o tipo de tiragem, incluindo a localização do ventilador (quando presente). O arraste funciona como uma descarga, colaborando assim para a diminuição dos ciclos de concentração, e seu valor normalmente varia de 0,1 a 5,0% da vazão de recirculação, dependendo do tipo de equipamento utilizado. Na tiragem induzida, seu valor médio corresponde a 0,2% da vazão de recirculação (TROVATI, 2007, p. 16), conforme a Tabela 6.1, que relaciona valores empíricos de percentagem média da vazão de recirculação e sua faixa usual de arraste, em função do tipo de equipamento adotado pelo sistema.

Tabela 6.1 – Estimativas de arrastes em água de resfriamento, expressos como percentagem da vazão de recirculação, para cada tipo de equipamento (TROVATI, 2007, p. 16)

Equipamento	Valor médio de Arraste (%)	Faixa usual de Arraste (%)
Tiragem Induzida	0,2	0,1 – 0,3
Tiragem Forçada	0,2	0,1 – 0,3
Tiragem Natural	0,5	0,3 – 1,0
Spray-pond	2,5	1,0 – 5,0
Condensador Evaporativo	0,2	0,1 – 0,2

Nestes cálculos não se consideram as perdas indeterminadas ou mesmo outras fontes de reposição da água de resfriamento; no entanto, estas devem ser consideradas se estiverem presentes.

O tratamento de água dos sistemas de resfriamento é realizado mediante a adição de produtos químicos que atuam para minimizar a possibilidade de formação de corrosão dos materiais do circuito de refrigeração, evitar a formação de depósitos nas tubulações e equipamentos e controlar o crescimento microbiológico no sistema. Estes fatores diminuem a eficiência operacional e aumentam os custos de manutenção. Em vista disso, utilizam-se produtos como inibidores de corrosão, agentes floculantes ou dispersantes, e biocidas; sua concentração depende das características de qualidade da água de reposição e da composição dos produtos comerciais disponíveis no mercado (DREW, 1979, In: MIERZWA e HESPANHOL, 2005, p. 77). Uma expressão genérica utilizada para estimar a dosagem de determinado produto na água de resfriamento é dada pela Equação 6.7.

$$w = Cprod.\frac{(A+D)}{1000} \qquad (6.7)$$

E que é equivalente a (Equação 6.8):

$$w = Cprod.\frac{R}{(CC.1000)} \qquad (6.8)$$

onde: w é a quantidade de produtos (kg/h), Cprod a concentração desejada de produto (ppm), A é a vazão de perdas por arrastes (m^3/h), D a vazão de descarga (m^3/h), R a vazão de reposição (m^3/h), e CC é o ciclo de concentração.

Conforme destacado, o ciclo de concentração é um parâmetro importante, pois auxilia na determinação da quantidade de água a ser descartada do sistema de resfriamento a fim de aproximar a concentração de sais ao valor máximo permitido. Normalmente, os ciclos de concentração tornam-se mais fáceis de serem obtidos pelo quociente entre a concentração máxima de sais na água de resfriamento e a concentração de sais na água de reposição.

Assumindo que as perdas na fase líquida sejam dadas conforme as Equações 6.9 e 6.10, pode-se efetuar um balanço material para um componente solúvel e não volátil presente na água de reposição e de recirculação do sistema, de modo que (Equação 6.11):

$$L = A + D + I \qquad (6.9)$$

$$R = E + L \qquad (6.10)$$

$$Crep_i \,.\, R = Cevap_i \,.\, E + Crec_i \,.\, L \qquad (6.11)$$

onde: $Crep_i$ é a concentração da espécie i na água de reposição, $Cevap_i$ a concentração da espécie i na fase evaporada, e $Crec_i$ é a concentração da espécie i na fase líquida, ou seja, na água de recirculação.

Para um componente não volátil, Cevap = 0, e a Equação 6.12 representa o número de vezes em que a água de recirculação se concentra em relação à reposição, o que equivale ao ciclo de concentração do sistema.

$$\frac{Creci}{Crepi} = \frac{R}{L} \qquad (6.12)$$

Comumente estas relações são efetuadas com base nos valores de sílica, cálcio e/ou magnésio, ou outras espécies, como lítio, fluoreto, sólidos totais dissolvidos ou cloretos; no entanto, estes dois últimos podem sofrer interferências do meio externo, dos materiais do circuito ou dos insumos utilizados no tratamento. Estes cálculos são empregados somente quando certificado que a espécie não esteja se precipitando, ou estando incrustadas, não sejam dissolvidas (TROVATI, 2007, p. 17).

Reajustando a Equação 6.12, constata-se que a descarga (D) exerce relativo controle sobre o ciclo de concentração do sistema, conforme mostra a Equação 6.13.

$$D = \frac{E}{(CC - 1)} - A - I \tag{6.13}$$

Desconsiderando a existência de outros tipos de perdas (I = 0), a Equação 6.13 se reduz a Equação 6.14.

$$D = \frac{E}{(CC - 1)} - A \tag{6.14}$$

Com base nas condições operacionais, é possível determinar o valor máximo de operação para o ciclo, ao se considerar a descarga fechada (D = 0) e as outras perdas nulas (I = 0), embora não seja recomendável sem descarga de fundo (Equação 6.15). Os consumos de água de reposição e de produtos de tratamento dependem do ciclo de concentração (PEREIRA, 2001).

$$CC_{\max} = \frac{E + A}{A} \tag{6.15}$$

Com base nas espécies limitantes presentes, o ciclo máximo de concentração pode ser determinado através do componente sílica, em função da presença excessiva deste componente na água de recirculação, o que pode ocasionar a formação de depósitos silicatados de cálcio e/ou magnésio. Deste modo, como medida preventiva, o nível de sílica na água de circulação é mantido inferior a 180 ppm de SiO_2, e o ciclo máximo de concentração é dado pela Equação 6.16 (PEREIRA, 2001).

$$CC_{\mathrm{SiO2\,max}} = \frac{180}{\mathrm{CSiO2,\,rep}} \qquad (6.16)$$

Em termos gerais, quando se utiliza água superficial como fonte para a água de reposição em sistemas de resfriamento, o cálcio e a sílica são os compostos que normalmente limitam os ciclos de concentração máximos. A partir do ciclo definido para a operação do sistema de resfriamento e das características da água de reposição, obtém-se a composição do efluente gerado, multiplicando a concentração de cada composto presente na água de reposição pelo valor do ciclo de concentração utilizado (MIERZWA e HESPANHOL, 2005, p. 77).

O pH também exerce papel importante sobre o sistema de resfriamento; a faixa normal de pH para um sistema aberto é de 6,5 a 9,0; sistemas fechados operam entre 7,5 a 9,0 (SOUZA, 2007, p. 22). Em pH moderadamente ácido (pH 5,0), é predominante a ocorrência de corrosão uniforme, cujo efeito será maior com o decréscimo do pH. O aumento de pH em águas com níveis moderados de cálcio e alcalinidade pode levar à precipitação de carbonato de cálcio ($CaCO_3$). O efeito da temperatura também é muito importante nestes sistemas, pois seu aumento influencia no aumento da taxa de corrosão. Além disso, diminui a solubilidade de muitos sais inorgânicos solúveis como, por exemplo, do carbonato de cálcio e do sulfato de cálcio, levando à precipitação e à formação de uma barreira, que age como um isolante de depósito nas regiões mais quentes (SOUZA, 2007, p. 23).

As incrustações podem ser definidas como um crescimento cristalino de uma camada aderente (barreira) de sais insolúveis ou óxidos sobre a superfície do trocador de calor (SOUZA, 2007, p. 29). Sua formação depende de fatores como temperatura, concentração dos componentes presentes (sais insolúveis ou óxidos), pH, qualidade da água e condições hidrodinâmicas. A solubilidade destes depósitos normalmente aumenta com o aumento da temperatura.

Para avaliar especificamente a qualidade do meio aquoso nos processos industriais, foram propostos índices de estabilidade que permitem inferir a tendência incrustante ou corrosiva da água, diretamente ligados ao pH da água e a sua alcalinidade. O índice de saturação de Langelier (LSI) (LANGELIER, 1936, *apud* TROVATI, 2007, p. 18) é um dos mais empregados, sendo uma tentativa de prever a tendência solubilizante (ou corrosiva) e incrustante. Com base no sistema água e carbonato de cálcio, o cálculo é efetuado pela diferença entre o pH do meio e o pH de saturação (pH_S), onde a concentração de cálcio e a alcalinidade encontram-se em equilíbrio com o carbonato de cálcio. A Equação 6.17 apresenta a expressão para o cálculo do referido índice (válida para pH entre 6,5 e 9,5).

$LSI = pH - pH_S$ (6.17)

onde: $pH_S = pCa + pAlcalinidade + C$

$pCa = - \log [Ca]$

$pAlcalinidade = - \log [Alcalinidade]$

e C = constante dependente da concentração de sais dissolvidos na água, definida como a diferença entre pK_2 (K_2 é a segunda constante de dissociação do $CaCO_3$) e pKs (Ks é o produto de solubilidade do $CaCO_3$). As constantes K_2 e Ks são funções da temperatura.

Para valores maiores que zero ($pH > pH_S$), a tendência é incrustante (precipitante), dado que a água está supersaturada de $CaCO_3$); já para valores negativos ($pH < pH_S$), a tendência é corrosiva (dissolução de $CaCO_3$), sendo a água insaturada de $CaCO_3$. E caso o valor do índice coincida em zero, denota condição neutra pela saturação de $CaCO_3$. Este índice apenas indica a tendência, não sendo capaz de quantificar essa característica.

A obtenção de pH_S pode ser realizada graficamente por meio de cartas que associam a dureza de cálcio, a alcalinidade, e a temperatura do sistema. De outro modo, pode-se determinar seu valor através de constantes que relacionam, além dos parâmetros mencionados, a concentração de sólidos dissolvidos totais. A expressão é definida conforme a Equação 6.18 (PEREIRA, 2001).

$pH_S = 9,3 + A + B – C – D$ (6.18)

onde:

$$A = \frac{\log[SDT] - 1}{10}$$

$B = - 13,12 \times \log (T + 273) + 34,55$

$C = \log [Ca] – 0,4$

$D = \log [Alcalinidade\ total]$

SDT é a concentração de sólidos dissolvidos totais, em mg/L; T é a temperatura da água de retorno para a torre, em °C; Ca é a concentração que relaciona a dureza de cálcio como $CaCO_3$, em mg/L; e a alcalinidade total também é medida em mg $CaCO_3$ / L.

Outra aproximação para o cálculo de pH_S foi apresentada por Libânio (2010, p. 470), para valores de pH compreendidos entre 6,5 e 9,5 e concentração de sólidos totais dissolvidos (SDT) menor que 500 mg/L. As Equações 6.19 e 6.20 apresentam essas relações.

$$pH_s = \frac{0{,}0125 \times \sqrt{SDT}}{1 + 0{,}005 \times \sqrt{SDT}} + \frac{593}{273 + T} + 9{,}30 - \log(0{,}4 \times Ca) - \log Alc \quad (6.19)$$

$$SDT = 0{,}64 \times CE \quad (6.20)$$

onde: SDT é a concentração de sólidos totais dissolvidos, em mg/L; T é a temperatura da água, em °C; Ca é a concentração de cálcio, em mg/L $CaCO_3$; Alc é a alcalinidade total, em mg/L $CaCO_3$; e CE é a condutividade elétrica da água, em µS/cm.

O ajuste químico por meio do tratamento da água é realizado a partir do Índice de Langelier, tendo como meta um valor ligeiramente superior a zero, a fim de evitar problemas de corrosão, e que propicie a formação de uma fina camada de carbonato de cálcio que protege a tubulação (AZEVEDO NETO, 1987, *apud* MIERZWA e HESPANHOL, 2005).

Carrier (1965) apresentou uma classificação mais detalhada em relação às faixas que identificam as características de estabilidade pelo índice. Esta proposta é apresentada na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Características de estabilidade da água segundo Carrier (1965)

LSI	Característica
- 2,0 ≤ LSI < - 0,5	Corrosão severa: condição altamente insegura
- 0,5 ≤ LSI < 0	Corrosão leve, sem presença de incrustações: condição insegura
LSI = 0	Equilibrada, mas possibilidade de corrosão alveolar (*pitting*): condição segura
0 < LSI ≤ 0,5	Leve formação de incrustações e corrosiva: condição insegura
0,5 < LSI ≤ 2,0	Formação de incrustação, não corrosiva: condição altamente insegura

Como uma forma de estender a aplicabilidade e tentativa de estabelecer mecanismos quantitativos do índice de saturação de Langelier, Ryznar (1986, *apud* TROVATI, 2007, p. 19) propôs uma nova expressão a partir dos mesmos parâmetros utilizados para o cálculo daquele índice. Assim, o índice de estabilidade de Ryznar (RI)

também adota o pH de saturação (pH_S) e o pH da água para avaliação de suas características incrustantes e corrosivas, conforme mostra a Equação 6.21.

$$RI = 2 \cdot pH_S - pH \quad (6.21)$$

Para valores inferiores a 6,0, a água sem tratamento apresenta características incrustantes, enquanto que para valores superiores a 7,0 suas características tornam-se corrosivas. A praticidade do Índice de Ryznar é mais satisfatória em relação ao de Langelier; após o cálculo do índice, as características da água podem ser interpretadas graficamente. No entanto, a Tabela 6.3 compara a indicação destas características originalmente propostas por Ryznar (1944) com as de Carrier (1965).

Tabela 6.3 – Comparativo entre as indicações das características de estabilidade da água, segundo Ryznar e Carrier

RI	Indicação (RYZNAR, 1944)	RI	Indicação (CARRIER, 1965)
RI ≤ 5,5	Formação de depósito pesado	4,0 < RI ≤ 5,0	Formação de depósito pesado
5,5 < RI ≤ 6,2	Formação de depósito	5,0 < RI ≤ 6,0	Formação leve de depósito
6,2 < RI ≤ 6,8	Sem problemas	6,0 < RI ≤ 7,0	Pouco depósito ou corrosão
6,8 < RI ≤ 8,5	Agressiva	7,0 < RI ≤ 7,5	Corrosão significante
RI > 8,5	Muito agressiva	7,5 < RI ≤ 9,0	Corrosão pesada
		RI > 9,0	Corrosão intolerável

Enquanto Ryznar baseia suas indicações nas características de agressividade (corrosividade) da água, Carrier fornece indicações mais amplas em termos de depósito e potencial de corrosão da água.

Outro índice que pode ser utilizado para avaliar as características de estabilidade da água foi proposto por Puckorius (PI). Neste cálculo, é utilizado o pH equivalente (pHeq) em substituição ao pH do meio, conforme as Equações 6.22 e 6.23 (PUCKORIUS, 1983, *apud* PEREIRA, 2001).

$$PI = 2 \cdot pH_S - pHeq \quad (6.22)$$

$$pHeq = 1{,}47 \cdot \log AT + 4{,}54 \quad (6.23)$$

onde: AT é a alcalinidade total, em mg $CaCO_3$ / L

A interpretação do Índice de Puckorius é efetuada com o mesmo gráfico da avaliação do Índice de Ryznar, ou seja, a faixa de indicação para RI também é válida para PI.

Existem outros índices de estabilidade propostos, além dos aqui expostos, e que encontram-se disponíveis na literatura especializada, como os de Larson-Buswell, Stiff-Davis e Larson-Skold (TROVATI, 2007); no entanto, o índice mais amplamente adotado por empresas tratadoras de águas industriais é o de Langelier (VEIGA, 2010).

O ciclo de concentração também pode ser determinado com base no índice de estabilidade. O ciclo ideal é considerado como aquele que conduz a níveis de concentração de alcalinidade e dureza cálcica capazes de levar a um índice de Puckorius (PI) na faixa de 6,3 a 6,8 (PEREIRA, 2001, p. 90). Em relação ao sistema ferro / carbonato de cálcio, a água possuirá baixo potencial corrosivo e incrustante, nas condições deste meio. Uma forma de estimar o ciclo de concentração ideal (CC_{ideal}) pode ser dada pela Equação 6.24 (PEREIRA, 2001).

$$CC_{ideal} = 10^{\left(\frac{12{,}1 - 2.\log Ca - 3{,}5.\log AT}{5{,}5}\right)} \quad (6.24)$$

onde: Ca e AT são as concentrações de dureza cálcica e de alcalinidade, na água de reposição, em mg $CaCO_3$ / L.

6.5. PROCEDIMENTO PARA SELEÇÃO DE CENÁRIOS PROMISSORES DE REUTILIZAÇÃO HÍDRICA

Para a seleção de cenários com potencial para real implementação na planta é necessário seguir um procedimento que permita a identificação dos melhores candidatos em termos de custos, principalmente. A cada etapa da análise um conjunto de cenários é descartado, ao passo que os demais seguem para etapas posteriores, em processo eliminatório cujo objetivo é identificar e selecionar aquelas configurações hídricas mais promissoras à análise para implementação. Trata-se de um mecanismo que visa auxiliar a tomada de decisão quando diversas alternativas estão presentes como oportunidades de reúso. Identificar

aquela com maior potencial é uma decisão que envolve custos e tempo, de modo que um método orientado para seleção prévia torna-se uma ferramenta bastante útil em um primeiro momento. Como o modelo aqui proposto tem caráter eliminatório conforme avançam as etapas, é possível vislumbrá-lo à semelhança de um funil, no qual os melhores cenários são aqueles que após as etapas de análise, conseguem então atravessar o fundo vazado do "utensílio" cônico, enquanto os demais ficam retidos durante o processo. A Figura 6.7 ilustra o procedimento por meio de um conjunto de equações que auxiliam a análise em cada uma das seis etapas que deslizam pelo funil. O procedimento é descrito em detalhes a seguir.

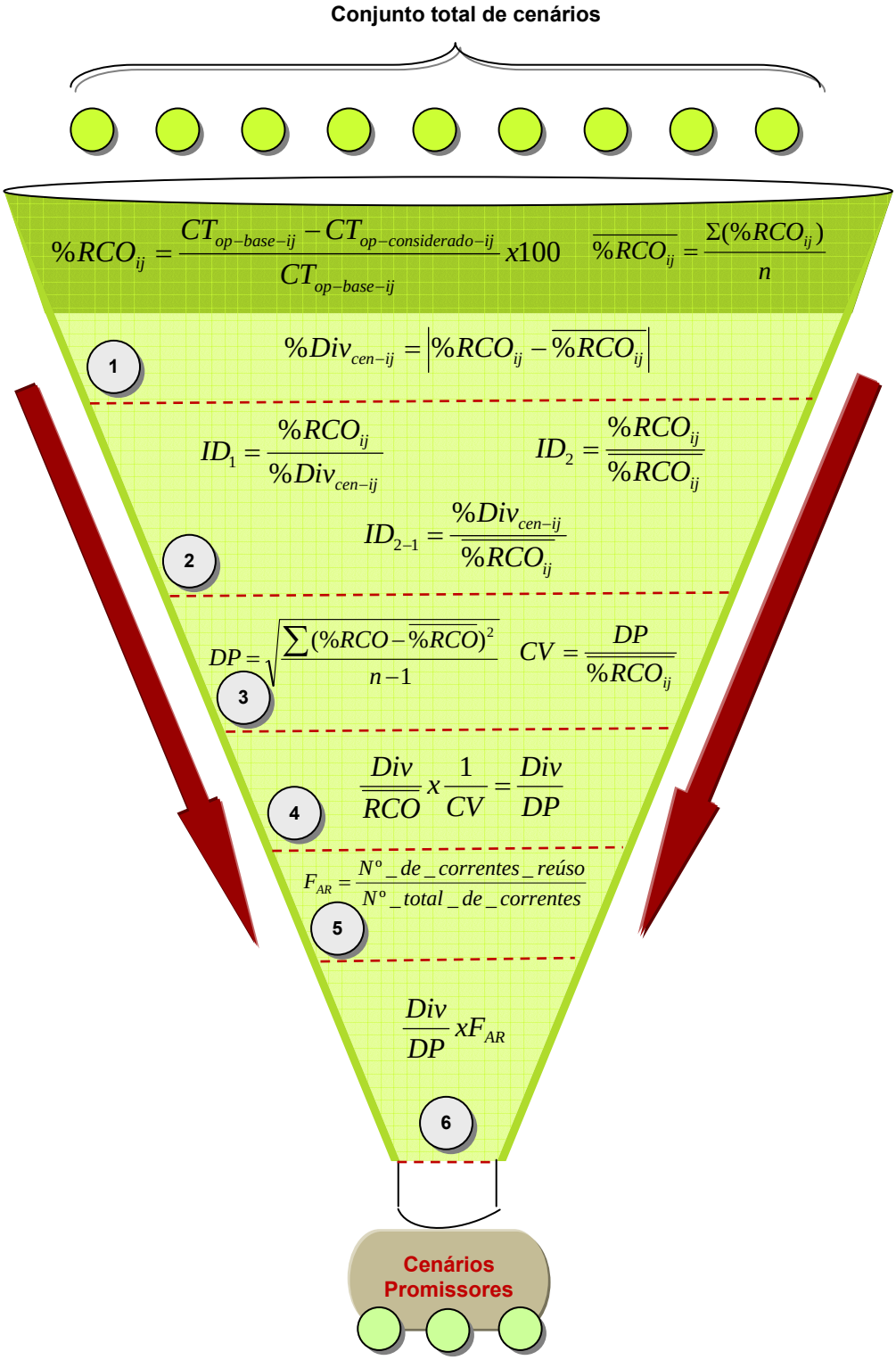


Figura 6.7 – Procedimento de cálculo para seleção de cenários com oportunidades de reúso

A Estatística é um ramo da Matemática Aplicada que lida com a coleta, a apresentação, a análise e o uso dos dados para tomar decisões, resolver problemas e planejar produtos e processos (BUSSAB e MORETTIN, 1987; MONTGOMERY e RUNGER, 2003). Tradicionalmente encontra-se dividida em Estatística Descritiva e Estatística Indutiva (Inferencial). A primeira constitui a etapa inicial de análise, na qual a observação e a coleta de dados de uma amostra são organizados e descritos por meio de gráficos, tabelas e parâmetros (medidas de posição e de dispersão). Já a Inferência Estatística utiliza técnicas que têm a finalidade de extrapolar dados restritos de uma amostra para um conjunto maior de informações, permitindo extrair conclusões acerca das características de uma população. Ela tem como base a distribuição normal de probabilidades de variáveis contínuas (modelo de "Curva Gaussiana") Uma amostra representa uma parcela do conjunto de todas as medidas de uma variável, chamada de população.

As técnicas estatísticas podem dispor um poderoso auxílio tanto no planejamento de novos produtos e sistemas como no aprimoramento dos projetos existentes, e ainda no desenvolvimento dos processos de produção. Os métodos estatísticos são usados para abordar a questão da variabilidade, conceito que reporta o fato de sucessivas observações de um sistema ou fenômeno não produzirem exatamente o mesmo resultado. Em controle estatístico de processo (CEP), os gráficos ou cartas de controle são utilizados para monitoramento, controle e melhoria do desempenho de um processo, avaliando a variabilidade dos dados ao longo do tempo. A variabilidade é inversamente proporcional à qualidade; quanto maior a ocorrência de não conformidades (resultados não desejados ou com características fora de especificação) em uma linha de produção, por exemplo, maior a variabilidade (flutuações) do processo e, portanto, menor a proximidade com o padrão de qualidade desejado; naturalmente isto compromete as oportunidades de melhoria e a estabilidade do processo.

Muitos problemas de engenharia apresentam formas potenciais de variabilidade no sistema, mas no mercado financeiro, por exemplo, têm grande importância na análise de decisões econômicas os conceitos de risco e retorno de ativos (títulos ou valores mobiliários que representam direitos sobre bens tangíveis ou intangíveis), principalmente acerca da teoria de carteiras de investimento. Risco e retorno não estão ligados ao fato de dar certo ou errado, ter prejuízo ou lucro, mas sim à probabilidade de se ter um resultado diferente do esperado (ABREU FILHO *et al*., 2007, p. 24). O retorno esperado é uma média dos retornos passados, onde cada valor é ponderado pela sua probabilidade; já o risco de um ativo é a variabilidade do retorno desse ativo. Do ponto de vista prático, o retorno esperado por um projeto de investimento está sempre sujeito a incertezas (p.ex. modificação tecnológica, panorama econômico nacional e internacional, custos de insumos, mudanças climáticas e

outras). Em situações de risco, nas quais se estimam probabilidades de ocorrências de um dado evento, projetos com retornos esperados similares podem ser selecionados com base na dispersão relativa dos fluxos de caixa em torno dos valores esperados. Assim, será escolhida a opção de investimento de menor risco, medido pelo desvio-padrão dos retornos do ativo no passado, em relação ao retorno esperado. Por outro lado, para um dado o desvio-padrão, será atraente a opção com a maior rentabilidade esperada. Segundo a teoria da carteira de investimentos desenvolvida por Markowitz (ABREU FILHO *et al*., 2007, p. 142; SAMANEZ, 2009, p. 167), cujo modelo de média-variância é considerado um dos pilares de finanças, quanto maior o retorno esperado de um ativo, maior será o seu risco.

É razoável alegar que o procedimento de cálculo para seleção de cenários de reúso deste trabalho possui semelhanças com a teoria financeira supracitada, naturalmente preservando as devidas peculiaridades. Por sua vez, esta análise sugere o uso de recursos estatísticos, tais como medidas de tendência central (média) e de dispersão (desvio médio, variância, desvio-padrão e coeficiente de variação) para encontrar alternativas de investimento em cenários com o maior retorno, ou seja, menor custo operacional, e ao menor risco, dado pela menor variabilidade em relação ao retorno esperado. As etapas deste processo são apresentadas a seguir:

1. Inicialmente, a análise requer o cálculo dos custos operacionais dos respectivos cenários. Com tais valores, efetua-se o cálculo da redução percentual nos custos operacionais ($\%RCO_{ij}$) do cenário i, na categoria j (a ou b), de acordo com a Equação 6.25.

$$\%RCO_{ij} = \frac{CT_{op-base-ij} - CT_{op-considerado-ij}}{CT_{op-base-ij}} x100 \qquad (6.25)$$

onde: $CT_{op\text{-}base}$ é o custo total operacional do cenário base, e $CT_{op\text{-}considerado}$ é o custo total operacional do cenário considerado.

Em seguida, calcula-se a média aritmética entre os percentuais de redução dos cenários ($\overline{\%RCO_{ij}}$), como mostra a Equação 6.26.

$$\overline{\%RCO_{ij}} = \frac{\Sigma(\%RCO_{ij})}{n} \qquad (6.26)$$

onde: n é o total de cenários envolvidos na análise.

Com a redução percentual operacional dos custos de operação e a média dos percentuais, obtém-se a divergência entre a média de cada cenário i, conforme a Equação 6.27.

$$\%Div_{cen-i} = \left| \%RCO_i - \overline{\%RCO_i} \right| \tag{6.27}$$

Critério: Para todos os cenários, relacionar a redução nos custos e a divergência entre a média. Selecionar as alternativas em duas vertentes: as de maior redução nos custos e as de menor divergência entre a média.

2. Após a análise preliminar, determina-se, dentre os cenários previamente selecionados, os seguintes índices de desempenho de divergência (ID_1) e de média (ID_2), como mostram as Equações 6.28 e 6.29.

$$ID_1 = \frac{\%RCO_{ij}}{\%Div_{cen-ij}} \tag{6.28}$$

$$ID_2 = \frac{\%RCO_{ij}}{\overline{\%RCO_{ij}}} \tag{6.29}$$

A partir dos índices de desempenho calculados, relacionam-se os índices ID_2 e ID_1, resultando na Equação 6.30.

$$ID_{2-1} = \frac{\%Div_{cen-ij}}{\overline{\%RCO_{ij}}} \tag{6.30}$$

As medidas de posição, tais como a média, a moda (valor mais frequente do conjunto analisado) e a mediana (valor central de um conjunto ordenado) não informam a respeito da variabilidade do conjunto de dados. São as medidas de dispersão que levam em conta esta característica. Normalmente o critério utilizado é a medida da concentração dos dados em torno de sua média. As medidas mais usadas são o desvio médio (média do desvio em valor absoluto), a variância, o desvio-padrão e o coeficiente de variação. A análise está voltada para o desvio das observações em relação à sua média. Assim, quanto maior a variância, mais heterogênea é o conjunto da amostra de dados. A variância expressa o desvio quadrático médio, tendo como unidade o quadrado dos dados originais, o

que pode levar a problemas de interpretação. Por essa razão, a medida mais utilizada é o desvio-padrão, definido como a raiz quadrada positiva da variância, e a unidade passa a ser a mesma dos valores do conjunto de dados.

3. A etapa seguinte requer o cálculo do desvio-padrão relativo à amostra de dados não agrupados (DP), de acordo com a Equação 6.31.

$$DP = \sqrt{\frac{\sum (\%RCO - \overline{\%RCO})^2}{n-1}} \tag{6.31}$$

Embora o desvio-padrão seja um parâmetro bastante empregado para avaliar a variabilidade dos dados, sua interpretação requer uma boa dose de bom senso. Valores médios relativamente altos para um desvio-padrão considerado baixo em uma série de dados podem limitar a eficácia da análise, ao contrário de um valor médio cuja ordem de grandeza tende à do próprio desvio-padrão. No mercado financeiro, normalmente se considera o desvio-padrão para representar a volatilidade de um ativo, principal parâmetro de risco utilizado para mostrar a intensidade e a frequência das oscilações de preços em uma série histórica de retornos (em determinado período). Da mesma forma, o fato de o desvio-padrão ser expresso na mesma unidade do conjunto de valores originais constitui uma vantagem sobre a variância, a qual tem sua unidade de medida elevada ao quadrado; no entanto, o desvio-padrão impede a comparação da variabilidade com outras séries de dados que representam grandezas diferentes. Para contornar essa restrição, o coeficiente de variação (CV) estende a análise do desvio-padrão, sendo empregado para comparar dispersões relativas de duas amostras, independente de suas médias ou grandezas serem diferentes. Trata-se de uma medida relativa, ao contrário do desvio-padrão (dispersão absoluta), sendo definida pela razão entre o desvio-padrão e a média aritmética. É usado para avaliar quão grande (ou quão pequeno) é a variância (ou o desvio-padrão dos dados), uma vez que um desvio grande não quer dizer que haja uma grande dispersão, mas porque são medidas de alta grandeza, assim como uma dispersão pequena, não porque seja de fato pequena, mas porque são medidas de pequena magnitude.

Assim, o coeficiente de variação ou de dispersão (CV), usado para avaliar o grau de dispersão dos dados, é aqui determinado de acordo com a Equação 6.32.

$$CV = \frac{DP}{\overline{\%RCO_{ij}}} \tag{6.32}$$

onde DP é o desvio-padrão amostral e a média entre os percentuais de redução nos custos operacionais ($\overline{\%RCO_{ij}}$) do cenário i, na categoria j.

4. Na próxima etapa deve-se calcular a divergência em relação à média ($Div/\overline{RCO}$), o qual se utiliza para determinar a divergência em relação ao desvio-padrão, parâmetro estabelecido pela Equação 6.33.

$$\frac{Div}{\overline{RCO}} x \frac{1}{CV} = \frac{Div}{DP} \qquad (6.33)$$

Critério: Selecionar os cenários que apresentem o menor valor da relação entre os índices de desempenho de divergência e média (ID_1 e ID_2, respectivamente), assim como os de menor valor da relação Média/Divergência.

Novamente recorrendo às finanças corporativas, um dos parâmetros mais utilizados para comparar alternativas de investimento de mesma categoria é o chamado índice de Sharpe (1964), proposto pelo economista norte-americano William F. Sharpe (Cambridge, 1934), laureado com o Prêmio Nobel de Economia de 1990. O índice expressa o retorno de títulos, cujas séries não se consideram correlacionadas entre si, em função do risco assumido por uma carteira ou ativo. Tal ideia baseia-se no fato de que o melhor investimento não corresponde necessariamente ao de maior retorno esperado. Segundo Oliveira e Pacheco (2011, p. 277-278), o índice mede a rentabilidade obtida por um investimento que ofereça uma remuneração acima de uma taxa livre de risco em relação ao risco (desvio-padrão) assumido pelo investidor, ou seja, mede simultaneamente risco e retorno. Portanto, quanto maior (e positivo) for o índice de Sharpe, melhor será o investimento.

Também conhecido como índice de recompensa por variabilidade é muito usado para avaliar o desempenho dos fundos de investimento, ajustando a rentabilidade pelo seu risco.

O índice de Sharpe (IS) é representado pela Equação 6.34, onde o rendimento de um dado ativo é descontado da remuneração de um título livre teoricamente de risco, ou com melhor qualidade de crédito, dividido pelo valor do parâmetro representativo do risco, o desvio-padrão dos retornos do investimento.

$$IS = \frac{\left(\mathrm{Re}torno_{fundo} - Taxa.sem.risco\right)}{Desvio - padrão_{fundo}} \quad (6.34)$$

Um exemplo de taxa com baixo grau de risco seriam as *treasury bills*, títulos da dívida pública do governo americano com prazo de maturação do investimento inferior a um ano, pois não é passível de risco de inadimplência do emissor e sua remuneração é prevista e garantida dentro do prazo. Segundo Leal (2002, *apud* BORDEAUX-RÊGO *et al*., 2010, p. 88), "as alternativas brasileiras como taxa de juros livre de risco, apesar das limitações, poderiam ser a Selic (Sistema Especial de Liquidação e Custódia – indexador de mais da metade da dívida do governo e adotada como taxa básica de juros da economia), a taxa da caderneta de poupança ou o rendimento esperado de um fundo DI para investidores individuais".

Oliveira e Pacheco (2011, p. 279-280) observam que as desvantagens do uso do índice de Sharpe como medida de desempenho estão na escolha de um indicador que melhor represente a taxa livre de risco, e também às divergências relativas à comparação do desempenho de um investimento quando o índice é negativo. Contudo, o índice de Sharpe constitui uma importante ferramenta na avaliação da eficiência de fundos de investimento de gestão ativa, sendo, atualmente, o modelo de análise mais utilizado pela indústria de fundos.

Estendendo o conceito do índice de Sharpe, pode-se adaptar sua aplicação para a avaliação de alternativas de cenários de reúso tratados neste trabalho. Com isso, um índice de Sharpe modificado (IS_{Reuso}), que indique a relação custo/risco, pode ser dado pela Equação 6.35, onde o custo percentual operacional de determinado cenário com reúso é subtraído do custo do cenário base. A diferença é então dividida pelo desvio-padrão do conjunto de cenários analisado. Neste caso, ao contrário do índice tradicional, que avalia o rendimento da aplicação, aqui a análise volta-se para o custo, e espera-se que o valor do custo do cenário com reúso apresente melhor relação com o risco, de modo que se os cenários possuírem o mesmo custo, então o menor valor de IS_{Reuso} será o de menor risco.

$$IS_{\mathrm{Re}uso} = \frac{\left(Custo.cenario_{com.reuso} - Custo.base_{sem.reuso}\right)}{Desvio.padrão} \quad (6.35)$$

Cabe observar aqui que a Equação 6.33 (divergência em relação ao desvio-padrão) constitui outra proposta derivada da visão conceitual do índice de Sharpe para avaliar cenários de reúso; no entanto, a análise é baseada na diferença do custo percentual operacional de um dado cenário pela média dos cenários que representam o espaço

amostral considerado. De qualquer forma, a Equação 6.35 pode ser empregada uma alternativa à Equação 6.33, uma vez que ambas apresentam critérios de julgamento adjacentes.

5. Esta etapa está ligada ao cálculo do aqui também proposto "Fator Adicional de Reúso" (F_{AR}), um índice que tem como objetivo ponderar o efeito das correntes que sofreram um novo direcionamento estrutural após a aplicação do DFA, em relação à configuração do cenário base.

Normalmente deseja-se que ocorra a máxima redução na vazão com a mínima mudança estrutural resultante da proposta de realinhamento de correntes. No entanto, deve-se considerar a hipótese de que há uma tendência de maior redução na vazão captada com o aumento do número de correntes realinhadas. Por outro lado, a busca de um realinhamento mínimo de correntes torna-se importante neste caso, pois a possibilidade de regeneração de correntes deve ser levantada, uma vez que há maior tendência a ocorrer violação de concentrações de contaminantes nas operações que envolvem a recepção de correntes de reúso.

O fator adicional de reúso é obtido pela razão entre o número de correntes que participam diretamente do reúso, com o novo alinhamento na entrada das operações receptoras, e o número total de correntes do processo hídrico considerado, como definido pela Equação 6.36.

$$F_{AR} = \frac{N^o_de_correntes_reúso}{N^o_total_de_correntes} \tag{6.36}$$

O parâmetro é calculado com o objetivo de comparar o potencial dos cenários analisados em função da necessidade de realinhamento de correntes para as propostas de reúso. Um maior valor encontrado para este parâmetro em um cenário, relativamente a outro cenário, sugere a maior organização física de correntes para o alcance da proposta de reúso e, consequentemente, uma possibilidade maior de aumento de custos totais, uma vez que haverá maior tendência de custos com tubulações, embora o critério aqui utilizado não inclua quantitativamente o efeito decorrente da distância entre unidades, e mesmo o comprimento de tubulações. Ainda assim, torna-se um importante mecanismo para avaliação seletiva de cenários, auxiliando no sentido de selecionar o mais conveniente dentre os inúmeros gerados, em termos de custos totais.

6. Na etapa final, a relação entre a divergência e o desvio-padrão é então ponderada pela multiplicação do valor correspondente ao fator adicional de reúso ($\frac{Div}{DP} xF_{AR}$) de cada alternativa de processo (cenário).

Critério: Selecionar o(s) cenário(s) de menor valor, para cada categoria levantada.

Um critério adicional de seleção deve ser realizado para processos cujo sistema de resfriamento (torre de resfriamento de água) é particularmente importante dentre das propostas de reúso levantadas. Este critério é definido com base no pH da corrente de purga da torre de resfriamento, e deve ser realizada após a seleção de cenários com base na maior redução de custos e menor divergência entre a média, ou seja, ao fim da primeira etapa do procedimento descrito.

Após definir a faixa aceitável de pH na corrente purga, calcula-se o índice de aceitabilidade superior na purga (IAS_P), conforme mostra a Equação 6.37.

$$IAS_P = \frac{pH.\lim.ac.purga - pH.purga}{pH.\lim.ac.purga} \quad (6.37)$$

onde: pH.*lim.ac.purga* corresponde ao valor limite aceitável de pH na purga, e pH.*purga* é o valor correspondente do pH na corrente de purga.

Valores negativos de IAS_P indicam violação (ou não conformidade). Quanto maior o seu valor melhor, pois indica afastamento positivo do limite superior.

Da mesma forma, pode-se calcular o índice de aceitabilidade inferior na purga (IAS_P), de definido pela Equação 6.38.

$$IAI_P = \frac{pH.\lim.ac.purga - pH.purga}{pH.\lim.ac.purga} \quad (6.38)$$

O procedimento descrito pode ser empregado para avaliar oportunidades promissoras de reúso identificadas por meio da aplicação do DFA, que tem a vantagem de indicar diferentes possibilidades de fluxogramas de processos hídricos. No entanto, pela base estatística que o constitui torna-se indicado apenas quando se tem um conjunto de cenários variado, onde a diversidade de alternativas necessita de uma sistemática que aponte para a seleção daqueles cenários mais promissores quanto à viabilidade de

implementação. De qualquer forma, é importante colocar que o processo de filtragem aqui proposto não tem por objetivo reduzir o numeroso conjunto de cenários inicialmente gerados a uma única alternativa; ao contrário, deve tão-somente limitar a sua quantidade a ser tratada nas etapas posteriores, uma vez que aqueles remanescentes deverão ser analisados quanto à possibilidade adicional de regeneração de correntes e sob a ótica da valoração de efeitos adversos sobre os recursos hídricos.

6.6. PROCEDIMENTO PARA ALOCAÇÃO DE PROCESSOS REGENERATIVOS EM CENÁRIOS DE REUTILIZAÇÃO HÍDRICA

Para a implementação de cenários promissores de reúso, deve-se optar por aqueles que não gerem influências indevidas ou que não comprometam os limites operacionais de equipamentos ou processos. Quando a concentração de um determinado contaminante é violada, ou seja, estendida para valores acima do permitido ou recomendado para as condições adequadas de operação, na maior parte dos casos torna-se necessário alocar um processo regenerativo que restaure a qualidade do efluente, principalmente quando provém de água de reúso.

A regeneração consiste no tratamento da corrente aquosa dentro do processo, utilizando uma ou mais técnicas de tratamento de modo a ajustar a concentração dos contaminantes no efluente e permitir seu reúso ou reciclo. Neste caso, após o tratamento, os contaminantes podem alcançar a mesma concentração; porém, dá-se o nome de regeneração diferenciada quando os valores de concentração alcançados são distintos após o tratamento (DELGADO, 2008).

Húngaro (2005) criou e testou um procedimento algorítmico-heurístico para a síntese de tratamento distribuído de efluentes no final dos processos, aplicado a um e/ou múltiplos contaminantes, de modo a reduzir a vazão total captada. A seleção de tratamentos é realizada com base nas maiores eficiências de remoção (e consideradas constantes) ou nas relações entre as cargas mássicas totais dos contaminantes, as quais determinam a quantidade de contaminantes que são removidos pelo tratamento considerado. As cargas mássicas a serem totalmente removidas com o procedimento devem se relacionar aos limites de concentração estabelecidos pela legislação vigente, tendo importante papel na escolha do contaminante preferencial para o envio de correntes para o tratamento, envolvendo múltiplos contaminantes; e, neste caso, é possível reduzir as vazões tratadas quando o atendimento de um dos contaminantes ao correspondente valor estabelecido pela legislação acarreta a eliminação de um outro além da quantidade necessária para tal finalidade. Embora o algoritmo apresente vantagens sobre métodos de programação

matemática para alguns casos, como sua aplicabilidade facilitada, os custos relacionados aos diferentes tratamentos para cada contaminante não são levados em conta, o que não garante a obtenção do menor custo total. Mirre *et al*. (2011) aplicou o procedimento para comparar o processo de tratamento distribuído de uma refinaria aos do processo centralizado tradicional, após a aplicação do método DFA. Constatou que embora o tratamento distribuído tivesse alcançado maior redução nos custos em relação ao centralizado, o grande número de equipamentos necessários para a remoção sequencial da configuração traz à tona o problema de disponibilidade de espaço físico para sua implementação, além de maior necessidade de controle operacional.

Para estender a aplicabilidade de um procedimento voltado para a síntese de sistemas de regeneração diferenciada e seleção de tratamento final distribuído de efluentes, Delgado (2008) desenvolveu dois algoritmos utilizando o método DFA: o primeiro tendo como tratamento de referência o que levasse a um fluxograma com mínimo custo anual total; já o segundo levou em conta a menor concentração de entrada das operações para obter a concentração de água regenerada. A opção por um dos métodos se dá pela disponibilidade de dados iniciais. Embora a síntese da regeneração diferenciada determina metas de eficiência de remoção, foi preciso desenvolver um procedimento para a seleção do sistema de tratamento (sequência), tendo como critério propriedades físicas, químicas e estruturais dos contaminantes, assim como as respectivas eficiências e o custo dos processos regenerativos. Um terceiro algoritmo, denominado Diagrama de Fontes de Rejeito (DFR), foi desenvolvido para a síntese do tratamento distribuído de efluentes no final da planta. O procedimento tomou como base regras heurísticas do trabalho de Húngaro (2005) e no próprio DFA, sendo adaptado para condições de múltiplos contaminantes, múltiplos tratamentos, tratamentos com concentração de entrada máxima, e tratamentos com vazão máxima de entrada. Foram obtidos cenários com custos similares ou inferiores aos dos exemplos aplicados a partir de dados da literatura.

Neste trabalho, pretende-se utilizar um procedimento mais prático e simples de ser aplicado para casos nos quais há necessidade de recuperar a qualidade de correntes nas operações receptoras de correntes de reúso. A regeneração, aplicada dentro da planta, torna-se diferenciada para os contaminantes cujas concentrações tiveram seus limites ultrapassados em função do redirecionamento para reúso. O uso de um procedimento que rapidamente defina o tipo de processo regenerativo a ser adotado torna-se um diferencial, pois permite avaliar os cenários promissores previamente selecionados com base nas características adequadas de implementação. Assim, o procedimento testado para este caso considera a análise da eficiência de remoção de contaminantes de acordo com os processos já existentes e disponíveis comercialmente, avaliando os custos totais para cada

cenário de reúso envolvido. O critério de desempenho do sistema de regeneração adotado é a taxa de remoção (RR) de um determinado contaminante, conforme definido pela Equação 6.39.

$$RR = \frac{f_i C_i - f_f C_f}{f_i C_i} \tag{6.39}$$

onde C_f é a concentração final do contaminante na corrente do respectivo intervalo; C_i é a concentração inicial do contaminante na corrente do respectivo intervalo; f_f é a vazão limite da corrente do respectivo intervalo; e f_i a vazão limite do contaminante na corrente do respectivo intervalo.

Considerando que a vazão tratada nos processos regenerativos deste estudo seja sempre constante, resulta a eficiência de remoção (R) do contaminante, conforme a Equação 6.40.

$$R = \frac{C_i - C_f}{C_i} \tag{6.40}$$

Como a análise deste procedimento se dá pela eficiência de remoção dos contaminantes, as vazões que entram no regenerador devem ser iguais às que saem do equipamento.

As etapas do procedimento são apresentadas como seguem:

(1) Identificar as correntes que eventualmente sofreram realinhamento após a aplicação do DFA.

(2) Reconhecer as operações cujas correntes de entrada sofreram modificações com o realinhamento.

(3) Comparar as concentrações dos contaminantes da corrente de entrada com as concentrações máximas permitidas nas operações (meta):

(3.1) As concentrações dos contaminantes da corrente de entrada excedem os valores máximos dos respectivos contaminantes permitidos nas operações (meta)?

Sim. Seguir para a Etapa 4.
Não. Seguir para a Etapa 8.

(4) Calcular as eficiências de remoção dos contaminantes necessárias ao cumprimento das metas de concentração de entrada de cada operação (Selecionar somente os contaminantes que ultrapassaram a concentração máxima permitida).

(5) Listar as técnicas de regeneração disponíveis para cada contaminante considerado.

(6) Comparar as eficiências calculadas na Etapa 4 com as eficiências das técnicas disponíveis para os respectivos contaminantes:

(6.1) Calcular as respectivas diferenças entre a eficiência de remoção do contaminante i pela técnica disponível j (ε_{Dij}) e a eficiência de remoção do contaminante i calculada na Etapa 4 (ε_{Cij}), para os respectivos contaminantes, definida pela Equação 6.41.

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{Dij} - \varepsilon_{Cij} \qquad (6.41)$$

(7) Avaliar quantitativamente o valor de $\Delta\varepsilon$:

(7.1) O(s) valor(es) de $\Delta\varepsilon$ é(são) igual(is) a zero?

Sim. Então adotar a técnica correspondente e proceder ao cálculo de custos. Seguir para a Etapa 8.
Não. Seguir para a Etapa 7.2.

(7.2) O(s) valor(es) de $\Delta\varepsilon$ é (são) positivo(s)?

Sim. Calcular os respectivos custos. Selecionar a técnica que apresente menor custo. Seguir para a Etapa 8.
Não. Então listar as possíveis combinações sequenciais de técnicas disponíveis para cada contaminante. E após isso, calcular o $\Delta\varepsilon$ de cada combinação. Voltar à Etapa 7.1.

(8) Encerrar a análise do cenário.

A Figura 6.8 esquematiza o algoritmo descrito para a alocação de processos regenerativos na planta.

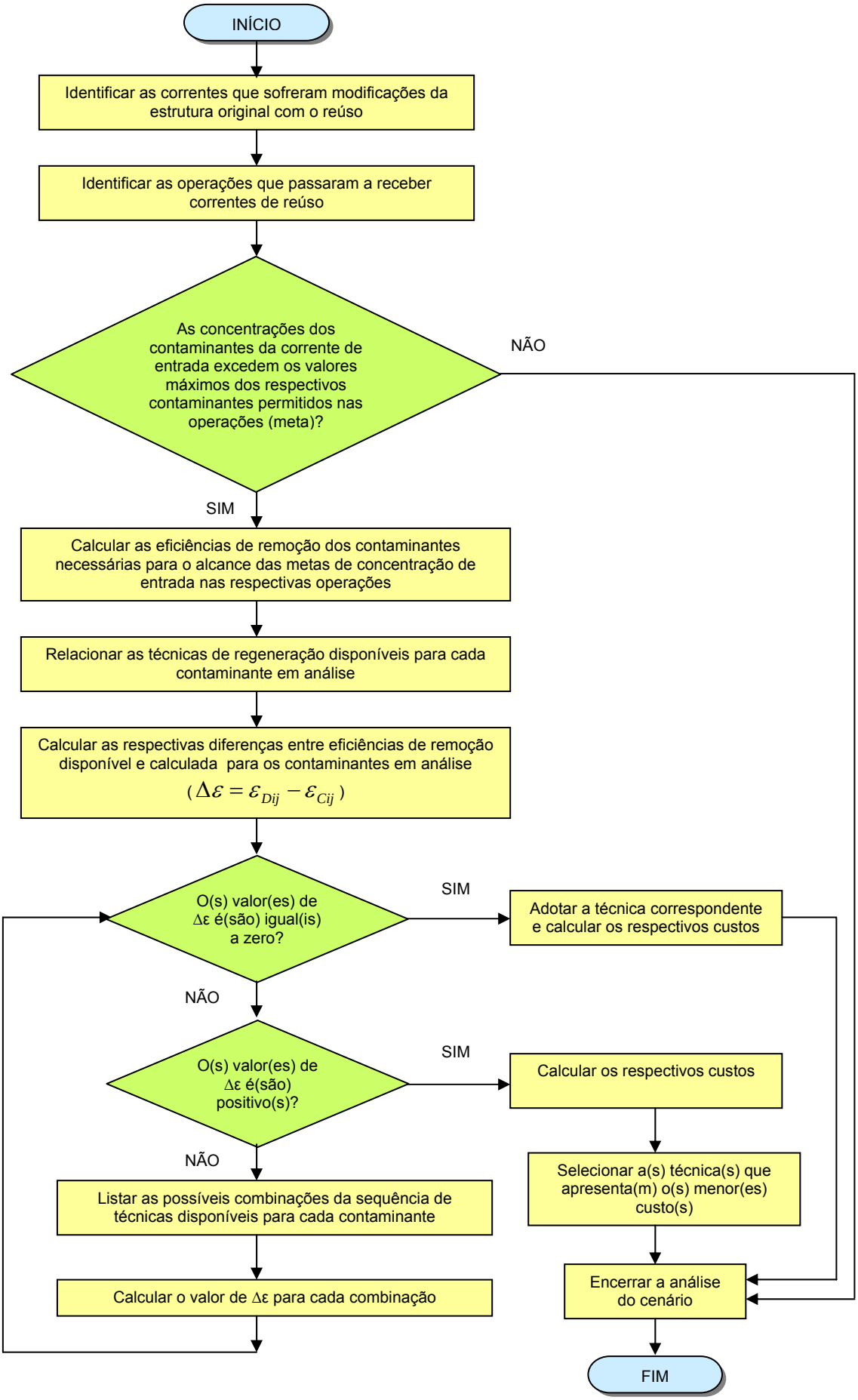


Figura 6.8 – Estrutura do procedimento para alocação de processos regenerativos

A inclusão de equipamentos regenerativos para adequação de correntes de reúso requer a estimativa de custos relativos ao investimento e à operação, os quais representam valores adicionais na determinação do custo total de um cenário de reúso proposto. Uma abordagem conceitual dos principais critérios econômicos para tomada de decisão utilizados neste estudo encontra-se descrita no Apêndice 2.

6.7. VALORAÇÃO DE QUALIDADE DOS RECURSOS HÍDRICOS E DANOS AMBIENTAIS

A análise de um projeto industrial pode ser realizada sob o ponto de vista privado (estudo de viabilidade econômica) ou social (internalização de externalidades). Esta etapa requer o desenvolvimento de uma proposta para a valoração das externalidades ambientais negativas decorrentes dos impactos do lançamento de carga de efluente sobre os recursos hídricos, como forma de validar a necessidade de se estabelecer um programa efetivo para o gerenciamento ambiental. O estudo incide sobre a avaliação das externalidades negativas, observada pelo aspecto da degradação ambiental; porém, o efeito positivo tem significativa importância, uma vez que a prática do reúso de águas e efluentes representa um benefício ao reduzir a captação de água de um rio, disponibilizando-a para o abastecimento público, além de diminuir a degradação ambiental por deixar de lançar um determinado volume de efluente industrial no mesmo rio. Vale destacar que esta proposta representa grande importância para este trabalho, uma vez que permite consolidar o modelo de gerenciamento de reúso sustentável aqui proposto.

A proposta tem como base a valoração econômica dos impactos positivos e negativos (direta ou indiretamente) dos processos sobre a qualidade dos recursos hídricos usados para uso industrial, como desmatamento, erosão/assoreamento, percolação, eutrofização, salinização, por exemplo. Rodrigues (2005) utilizou o Método Custo-Reposição (efeitos internos e efeitos externos) para valorar os impactos ambientais de tecnologias de plantio convencional e direto em culturas de milho e soja, em regiões de Cerrado, associadas com a redução do processo de erosão de solos e assoreamento dos recursos hídricos. O método Custo de Reposição (MCR) baseia-se na reparação de algum dano ao recurso ambiental e o custo de reposição pode ser entendido como uma medida do seu benefício. O estudo mostrou que a intensidade dos custos ambientais e sociais depende basicamente da técnica de plantio adotada. Essa constatação oferece suporte tanto à competitividade, pela maximização do lucro na propriedade rural no longo prazo, ocasionado pela contenção do processo erosivo, quanto à sustentabilidade, pelo uso de tecnologia que

reduz os impactos ambientais do processo erosivo, ao reduzir o nível de externalidades ambientais negativas.

A Figura 6.9 relaciona as etapas propostas para a valoração das externalidades ambientais sobre os recursos hídricos. A partir da caracterização do problema, com o (i) levantamento de informações acerca dos impactos ambientais e sociais causados, sugere-se (ii) selecionar o método de valoração econômica mais adequado para a abordagem. O (iii) estabelecimento dos principais indicadores, que influenciam diretamente o processo, torna-se uma importante etapa, e que servirá de base para a (iv) elaboração dos custos ambientais envolvidos. Procede-se então à (vi) análise da viabilidade de implementação da(s) alternativa(s) de reutilização.

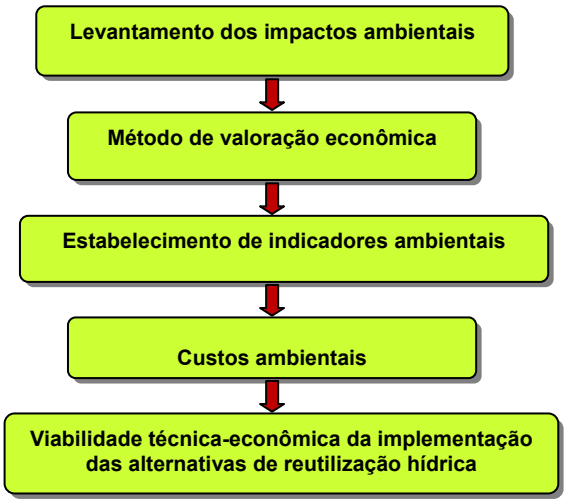


Figura 6.9 – Etapas representativas da valoração de danos ambientais com vista à seleção de cenário(s) promissor(es)

Silva (2008) estudou uma proposta para minimizar os impactos sobre a qualidade da água em uma ocupação urbana existente pela falta de infraestrutura na Bacia do Guarapiranga, que atende a Região Metropolitana de São Paulo. A degradação ambiental é causada principalmente pelo crescimento urbano associado à ocupação irregular do solo nas proximidades da represa. Foram apresentados monitoramentos em redes da Sabesp e da Cetesb para caracterização dos parâmetros para elaboração de índices de qualidade das águas como instrumentos de valoração. Os índices são utilizados pela Cetesb para representar os poluentes presentes nas águas superficiais, dentre os quais: Índice de Qualidade das Águas (IQA); Índice de Qualidade das Águas Brutas para fins de Abastecimento Público (IAP); Índice de Preservação da Vida Aquática (IVA); Índice de

Balneabilidade (IB); Índice de Substâncias Tóxicas e Organolépticas (ISTO); Índice de Variáveis Mínimas para a Preservação da Vida Aquática (IPMCA); e Índice do Estado Trófico (IET). A identificação de impactos sobre o recurso hídrico pela crescente ocupação das áreas no entorno da bacia foi estabelecida pela abordagem da chamada Matriz PEIR (Pressão – Estado – Impacto – Resposta), o qual permitiu selecionar uma variável adequada para a formulação do método de produtividade marginal; este método utiliza uma função dose-resposta para relacionar o nível de poluição ou degradação à resposta do ativo ambiental degradado na produção. Entretanto, dada a indisponibilidade de dados relativos a valores monetários para os custos de aplicação de insumos necessários ao tratamento da água, não foi possível comprovar numericamente a magnitude da função dose-resposta pelo método de valoração de externalidades ambientais. Além disso, a variedade de poluentes presentes na água e a interação entre eles dificultam a associação real dos seus efeitos, o que torna mais adequado analisar isoladamente o poluente de acordo com os efeitos provocados.

A relação de impactos e a consequente identificação de indicadores podem ser obtidas a partir da elaboração de uma matriz conhecida como PEIR, utilizada no projeto GEO Cidades (SVMA-PMSP/IPT, 2004, *apud* SILVA, 2008), e que objetiva realizar uma relação entre pressão, estado, impacto e resposta. Essa abordagem permite observar as possíveis ações estratégicas, visando à retificação do meio ambiente. A matriz procura estabelecer uma conexão lógica com o intuito de orientar uma análise do ecossistema, demonstrando as causas (PRESSÃO) dos danos ambientais, perpassando pelo estado atual do meio ambiente (ESTADO), pelos custos gerados ao meio ecológico e à sociedade (IMPACTO) e a medida de “contra-ataque” (RESPOSTA) proporcionada ao ambiente.

A Figura 6.10 indica a utilidade da função dose-resposta adotado para quantificar a resposta econômica a uma dose de alteração do meio ambiente (PAULA, 2008). Esta função mensura o impacto no sistema produtivo, dada uma variação marginal na provisão do bem ou serviço ambiental e, a partir desta variação, pode-se estimar o valor de uso do recurso ambiental. De acordo com SILVA (2008), a função exige a inclusão de múltiplas variáveis, bem como um estudo de campo bem detalhado para conhecimento de todos os agentes que participam do processo.

Figura 6.10 – Representação da Matriz PEIR para o caso estudado

Neste estudo, os custos relativos aos cenários de reúso levantados são equacionados de modo a facilitar a análise de efeitos provocados pelo lançamento de efluentes em rios e validar a necessidade de se estabelecer um reúso sustentável, que oriente a conservação de bens naturais em benefício da sociedade. Sendo assim, o custo total da água (CA) pode ser determinado conforme a Equação 6.42.

$$CA = C_{CAP} + C_{CON} + C_{TRATA} + C_{TRATE} + C_{DESCE} + TXO + C_{REUSO} \quad (6.42)$$

onde a C_{CAP} representa o custo de captação da água, C_{CON} é a parcela da captação que é consumida no processo, C_{TRATA} corresponde ao custo de tratamento da água para usos diversos, C_{TRATE} é o custo de tratamento de efluentes que em um primeiro momento tem a finalidade de adequação ao descarte (enquadramento legal Conama 357/2005 / Conama 430/2011) do efluente, mas que também pode ser uma fonte de reutilização nos processos (reciclo), C_{DESCE} é o custo com o descarte do efluente final, e refere-se à sua disposição na bacia hidrográfica. Este custo não leva em conta todas as variantes do impacto causado com a qualidade e a quantidade do efluente descartado. TXO representa a taxa de outorga (direito de uso) dos recursos hídricos, a cargo da Agência Nacional de Águas (ANA), C_{REUSO} é o custo de capital (investimento) e operacional referente ao tratamento da água dentro do processo (regeneração), voltado para o reúso. Quando se estabelecem novas formas de reúso, há uma diminuição nos gastos com o custo da água para a empresa. Neste caso, a

economia alcançada leva a um aumento da disponibilidade da água, minimiza os impactos da cobrança pelo uso da água e colabora para a responsabilidade social e ambiental nas empresas. O custo da regeneração correspondente ao custo do tratamento para o reúso, quando houver necessidade de investir em um novo equipamento ou processo para o enquadramento às características de qualidade da água nas operações. Essa variável está ligada à diminuição do tratamento de efluentes (C_{TRATE}) e do descarte da água no corpo hídrico (C_{DESCE}). No entanto, é importante lembrar que a regeneração também gera um efluente que necessitará de um tratamento, e que será destinado à própria estação de despejos industriais, para enquadramento ao padrão de descarte; este custo de tratamento do efluente do reúso irá impactar o sistema de tratamento final para descarte.

O lançamento dos efluentes indica a existência de um risco ambiental, que, mesmo tratado, provoca externalidades negativas ao meio ambiente. Uma proposta fundamental é provocar a conscientização industrial para os danos ambientais intrínsecos ao processo de descarte. A busca se dá pela mensuração dos custos das parcelas das externalidades negativas, e refere-se à compensação ao meio ambiente proveniente da indústria. Desse modo, após a seleção de cenários promissores pelo método apresentado neste trabalho, o critério de seleção deixa de ser exclusivamente o mínimo custo da água, acrescentando-se prioritariamente o custo ambiental dos danos relacionados ao descarte na tomada de decisão dos cenários. A premissa aqui apontada baseia-se na concessão do direito de compensação ambiental da organização, limitado pela análise preliminar de cenários julgados pelo benefício técnico-econômico dos cenários “filtrados” pelo método utilizado. A partir de um conjunto de melhores cenários, o procedimento de seleção cederia aos propósitos unilaterais de benefício-custo e atenderia à priorização de cenário de menor dano ambiental para sua implementação.

Para quantificar as externalidades negativas, causadas ao sistema ecológico, estimam-se primeiramente, os possíveis danos provocados ao meio e suas consequências. Um modelo de quantificação de impacto bastante empregado é o chamado de “Dose-Resposta” (“funções de danos”), mais utilizado para casos onde há impacto no bem ambiental (dose), causando uma perda de bem-estar ou outra externalidade qualquer que provoca perda econômica (PAULA, 2008). Essa ferramenta preconiza a composição dos custos sociais no limites físicos das empresas, de modo que uma tentativa de ressarcimento ao meio ambiente constitui o principal objetivo da valoração de impacto ambiental. O modelo dose-resposta é um método indireto de valoração, cuja atribuição é estimar o valor de um recurso ambiental diretamente por meio de uma função de produção. No entanto, não constitui apropriadamente uma técnica de valoração de custos ambientais, mas sim um mecanismo de relacionar dose (fonte causadora) e resposta (efeito ou mudança); após sua

medida é que se associa o valor de mercado do efeito. O método dose-resposta, também conhecido como método de produtividade marginal, determina o impacto de uma alteração marginal do recurso na atividade econômica, tendo como referência produtos no mercado que são afetados pela alteração de oferta do recurso ambiental (SILVA, 2008).

As funções dose-resposta buscam relacionar a variação de quantidade ou de qualidade do recurso com a extensão de danos físicos ambientais (concentração e tipo de poluente), identificando o efeito do dano relacionado com a diminuição do valor de uso do recurso ambiental, em um dado nível de produção Um exemplo de avaliação seria a dose de poluição representada pelo aumento do grau de contaminação, onde a queda na qualidade de um rio levaria à diminuição da produção pesqueira (SILVA, 2008). Outro exemplo seria o grau de utilização do solo, que ao afetar sua qualidade, ocasiona decréscimo na produção agrícola.

No método da produtividade marginal, um bem ou serviço ambiental gerado por um recurso ambiental utilizado gratuitamente (E), ou seja, com preço de mercado nulo, tem seu valor econômico de uso direto ou indireto utilizados na produção (VE_E) definido pela Equação 6.43 (SEROA DA MOTTA, 1997).

$$VE_E = p_Z \frac{\partial F}{\partial E} \qquad (6.43)$$

onde p_Z representa o preço de mercado de um produto Z, conhecido, e cuja função de produção é dada por Z = F (X, E), sendo X o conjunto de insumos formado por bens e serviços privados e E caracteriza o valor de uso para a produção de Z.

As relações de E em F são difíceis de serem obtidas diretamente, pois E geralmente refere-se a bens ou serviços de um recurso ambiental que depedem de seu nível de estoque ou de qualidade; a correlação de E em F são obtidas por meio de funções de dano ambiental ou funções dose-resposta (DR), como a Equação 6.44 (SEROA DA MOTTA, 1997).

$$E = DR\ (x1, x2, ..., Q) \qquad (6.44)$$

onde xi são as variáveis que afetam o nível de um bem ou serviço ambiental E, assim como o nível de estoque ou a qualidade do recurso (Q).

A Equação 6.45 expressa a variação do valor do recurso ambiental (∂ E) em função da variação do nível quantitativo ou qualitativo da produção (∂Q_E). A variação da função

dano ambiental ou função dose-resposta (∂ DR) relacionam a variação do nível de qualidade (grau de poluição) com o nível de dano físico provocado, para então estabelecer o efeito do dano em dado nível de produção (SILVA, 2008).

$$\partial E = \frac{\partial DR}{\partial Q_E} \tag{6.45}$$

A função dose-resposta é obtida relacionando uma função de danos físicos, que inclua a dose de degradação do recurso ambiental degradado na produção, e a formulação de um modelo que avalie o impacto econômico das variações na produção. Esse método considera a qualidade ambiental como um fator de produção e o valor de uso dos recursos ambientais, não incluindo o valor de existência, como a preservação das espécies, por exemplo, sendo que as estimativas tendem a serem subvalorizadas, até porque apenas uma parcela dos benefícios ambientais é avaliada. Funções de dano são mecanismos de relação normalmente complexos e difícies de serem estimados, pois as funções ecológicas exigem estudos de campo mais detalhados e um número maior de variáveis a serem consideradas. Apesar disso, trata-se de um método importante para avaliar o efeito do dano de um recurso ambiental.

Em relação à proposta deste estudo, a qualidade do efluente imediatamente a jusante do ponto de descarga no corpo hídrico pode ser tratada como um produto (Z), onde há um valor econômico associado ao potencial de degradação do meio. Como exemplos de externalidades negativas geradas sobre o recurso hídrico têm-se: a erosão, o assoreamento, o aumento de turbidez, a menor recarga de aquífero, a menor disponibilidade de água, a menor vida útil de reservatórios, e o aumento do custo de tratamento da água para abastecimento doméstico. As descargas de efluentes nos rios também levam a variações de vazão de descarga/consumo e aumento da carga orgânica.

Quando um efluente contendo matéria orgânica biodegradável é despejado no corpo hídrico ocorrem processos de natureza física, química e biológica que naturalmente tendem a recuperar sua qualidade original a jusante do ponto de lançamento. Esse fenômeno é denominado autodepuração, e alguns dos principais fatores que exercem influência neste processo são a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e a concentração de oxigênio dissolvido. Entretanto, compostos orgânicos resistentes biologicamente e compostos inorgânicos, como os metais pesados, por exemplo, não influenciam no processo de autodepuração.

Um importante fator na autodepuração é a chamada vazão de diluição (BRAGA *et al*., 2005, p. 92), cujo mecanismo está ilustrado na Figura 6.11.

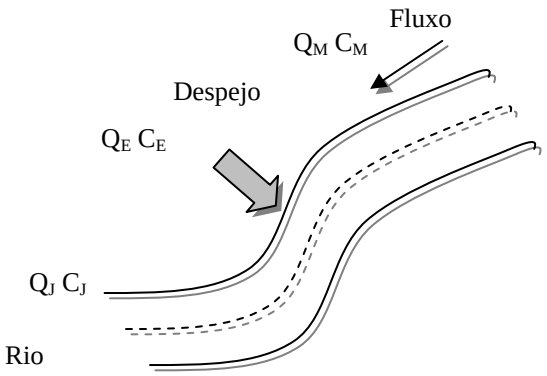


Figura 6.11 – Esquema da diluição de efluentes em um rio

Conforme a Figura 6.11, ao ser lançado no rio um efluente de qualquer natureza (degradável ou conservativo), a concentração imediatamente a jusante do ponto de descarga é menor que a do próprio efluente. A Equação 6.46 define a equação da continuidade para um volume de controle desprezível e considerando mistura completa do poluente na seção transversal no qual ocorre o despejo.

$$C_J = \frac{Q_M C_M + Q_E C_E}{Q_E + Q_M} \tag{6.46}$$

onde Q_E e C_E são a vazão do despejo e a concentração do contaminante no despejo, respectivamente.

Quanto maior a vazão do rio (Q_M), menor o impacto (C_J) do poluente considerado, desde que a concentração do poluente a montante do ponto de lançamento seja relativamente pequena. Mecanismos químicos e biológicos afetam os processos de recuperação da qualidade do corpo hídrico. Existem reações químicas no meio hídrico em função das substâncias presentes ou nele depositado, e que também são influenciados por fatores como temperatura, radiação solar, pH e outros. Da mesma forma, torna-se difícil prever o impacto ambiental resultante do despejo de certas substâncias no meio hídrico em função da ocorrência de processos sinérgicos (BRAGA *et al*., 2005, p. 93).

O sistema de cobrança pelo uso da água para o Estado de São Paulo considera a cobrança por captação (R$/$m^3$ de água captada), por consumo (R$/$m^3$ de água captada e não retornada ao corpo hídrico), e por carga de poluente lançada (R$/kg de poluente lançado no corpo hídrico); neste caso, consideram-se como fatores de poluição a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), a Demanda Química de Oxigênio (DQO), resíduo Sedimentável, e carga inorgânica, especificamente metais, cianetos e fluoretos (SEIFFERT, 2011, p. 140).

O modelo de valoração adotado neste trabalho incorpora, em uma proposta preliminar e não exaustiva, a relação entre índices de qualidade das águas e os possíveis danos provocados pelas variáveis que os compõem. Tais danos decorrem da descarga exacerbada de efluentes nos corpos hídricos. A Figura 6.12 apresenta uma proposição da abordagem, no qual o mecanismo de avaliação pode ser utilizado de acordo com a finalidade prioritária do corpo hídrico, seja para abastecimento público e/ou para a proteção da vida áquática.

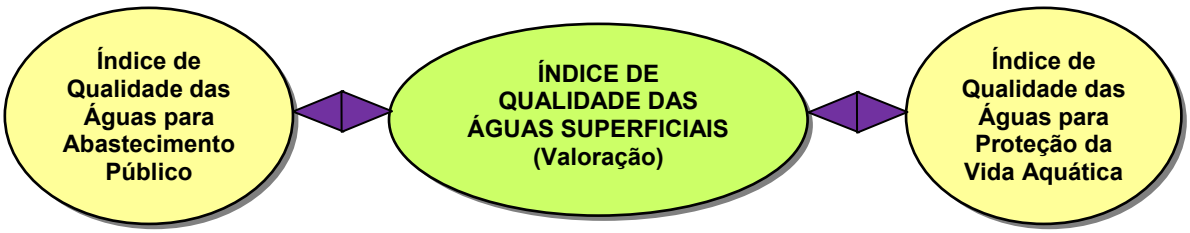


Figura 6.12 – Representação dos componentes de mensuração de danos pela qualidade do corpo hídrico

Índice de qualidade das águas (IQA)

A qualidade da água é influenciada por fatores naturais e ação antrópica que ocorrem na superfície da bacia hidrográfica. Existem metodologias que permitem avaliar as condições de qualidade da água por meio de indicadores que se correlacionam com as alterações ocorridas na bacia. Os Índices de Qualidade da Água (IQA) procuram reunir um conjunto de parâmetros considerados relevantes utilizando escala cuja faixa de ponderação permite avaliar as condições da água. Representam um dos mais simples instrumentos de tomada de decisão para avaliar o processo de degradação da qualidade das águas em uma bacia hidrográfica.

Existem diversas metodologias de IQA, tanto para águas superficiais, incluindo para abastecimento público, como também para águas subterrâneas. Santos (2009) apresenta e

discute a aplicação destes índices, além de desenvolver um índice de qualidade de águas subterrâneas para consumo humano ($IQAS_{CH}$) voltado para aplicação em áreas de aquíferos cristalinos sob uso agrícola, a partir de monitoramento realizado na bacia hidrográfica do Rio São Domingos, no noroeste do estado do Rio de Janeiro. A elaboração e aplicação do $IQAS_{CH}$ são precedidas por uma "Análise Dinâmica do Ambiente das Águas", realizada por meio do método de melhoria contínua denominado ciclo PDCA (*Planejar-Executar-Verificar-Agir*) – ciclo de Shewhart ou ciclo de Deming –, tendo como objetivo caracterizar e monitorar os recursos hídricos subterrâneos da bacia; esta etapa torna-se útil para escolha dos parâmetros que devem compor o $IQAS_{CH}$ e a comparação dos resultados obtidos com outros índices. Apesar da boa representatividade do índice, a sua categorização necessita levar em conta o número de parâmetros tóxicos acima do valor máximo permitido, e não apenas sua presença. Além disso, a aplicação do índice deve ser estendida e/ou adaptada para regiões com outros tipos de aquíferos e diferentes usos de solo, de modo a restringir adequadamente as características da metodologia.

Brown *et al*. (1970) propouseram um IQA para a *National Sanitation Foundation* (NSF) - IQA_{NSF}. Este índice é calculado pela soma dos subíndices ou qualidade do i-ésimo parâmetros ponderados entre 0 e 100, obtido de uma curva média de variação de qualidade, elaborada a partir de pesquisa de opinião a especialistas ("painel de especialistas"), os quais sugeriram os parâmetros a serem analisados, o peso e o respectivo valor de cada um deles, de acordo com sua condição ou estado. Assim, foram selecionadas nove variáveis consideradas relevantes: temperatura, pH, OD, Demanda Bioquímica de Oxigênio ($DBO_{5,20}$ – 5 dias, 20°C), coliformes termotolerantes (denominação mais apropriada para "coliformes fecais"), nitrogênio total, fósforo total, resíduo total e turbidez. A Equação 6.47 mostra o formato original do cálculo do IQA.

$$IQA_{NSF} = \sum_{i=1}^{n} w_i q_i \qquad (6.47)$$

onde: w_i corresponde ao peso do i-ésimo parâmetro, compreendido entre 0 e 1, e atribuído pela importância para a conformação total de qualidade; e q_i é o subíndice ou a qualidade do i-ésimo parâmetro, compreendido entre 0 e 100; e n é o número de parâmetros considerados no cálculo.

A Figura 6.13 demonstra a curva média de variação de qualidade do parâmetro $DBO_{5,20}$, enquanto que a Tabela 6.4 apresenta os pesos segundo a importância relativa a cada uma das variáveis que compõem o índice.

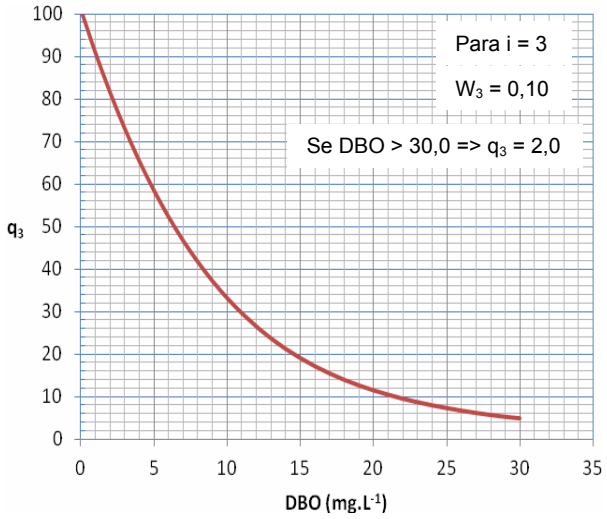


Figura 6.13 – Curva média de variação de qualidade da água para o parâmetro $DBO_{5,20}$ (CETESB, 2011a)

Tabela 6.4 – Ponderação dos parâmetros de qualidade da água para cálculo do IQA

Parâmetro	Peso (w)
Oxigênio dissolvido (% OD)	0,17
Coliformes termotolerantes (NMP/100mL)	0,15
pH	0,12
$DBO_{5,20}$ ($mg.L^{-1}$)	0,10
Nitrogênio total (nitratos) ($mg.L^{-1}$ NO_3)	0,10
Fósforo total (fosfatos) ($mg.L^{-1}$ PO_4)	0,10
Variação na temperatura de equilíbrio (°C)	0,10
Turbidez (UNT)	0,08
Resíduo total ($mg.L^{-1}$)	0,08

Em 1976, Landwehr e Deininger propuseram uma melhoria no cálculo do IQA, que ao contrário do formato aditivo original, passou a ser estabelecido como um produtório ponderado das qualidades de água de cada parâmetro, conforme definido pela Equação 6.48. Esta nova representação de um IQA multiplicativo atenuaria distorções passíveis de ocorrerem na forma aditiva do índice; resultados atribuídos ao chamado “efeito eclipse”, no qual a prática de agregação de parâmetros ambientais em um único número pode encobrir ou atenuar o impacto negativo de um deles em relação aos demais. Por outro lado, o fato de se ter pesos pequenos pode acentuar a não linearidade do índice.

$$IQA_{NSF} = \prod_{i=1}^{n} q_i^{w_i} \quad (6.48)$$

onde: q_i é o subíndice ou a qualidade do i-ésimo parâmetro, compreendido entre 0 e 100; e n é o número de parâmetros considerados no cálculo.
w_i é o peso do i-ésimo parâmetro, compreendido entre 0 e 1, e de acordo com a Equação 6.49:

$$\sum_{i=1}^{n} w_i = 1 \quad (6.49)$$

O cálculo do IQA traz como resultado um número entre 0 e 1, no qual 0 corresponde à péssima qualidade, e 1 à ótima qualidade, avaliado dentro de uma escala de categorias de qualidade. Desse modo, a ponderação convenciona que: qualidade ótima (79 < IQA ≤ 100); qualidade boa (51 < IQA ≤ 79); qualidade regular (36 < IQA ≤ 51); qualidade ruim (19 < IQA ≤ 36); e péssima qualidade (0 ≤ IQA ≤ 19) (CETESB, 2011a). Nota-se que esta faixa de classificação varia de acordo com o estado na qual é aplicado o índice.

O IQA é utilizado para avaliar a qualidade da água do Estado de São Paulo, e além de ser adotado desde a década de 1970 pela Cetesb, constitui atualmente o índice do gênero mais difundido e aplicado no país (SANTOS, 2009). Embora tenha sido desenvolvido para avaliar a qualidade da água bruta para abastecimento público, após tratamento, uma vez que os parâmetros que o compõem são tipicamente relacionados ao lançamento de esgotos domésticos, também pode ser aplicada para uso industrial. Apesar disso, o índice deixa de incluir diversos outros parâmetros importantes para fins de abastecimento público, como metais pesados e organismos patogênicos. A ausência de um parâmetro dificulta ou mesmo inviabiliza sua aplicação, uma vez que a inclusão de novos parâmetros não é simples (SANTOS, 2009). Almeida e Lima (2008) avaliaram a eficácia do IQA_{NSF} na ausência de um parâmetro utilizando um fator de correção, obtido da seguinte forma: calcula-se o IQA é considerando os oito parâmetros presentes (no caso de um parâmetro ausente), desconta-se o peso do parâmetro ausente (somatório dos pesos igual a 1) e toma-se o inverso deste número, que é então multiplicado pelo valor do IQA calculado para oito parâmetros. O resultado é um valor superestimado, efeito que distorce o comportamento real na descrição do estado de qualidade do corpo hídrico.

Índice de qualidade de água bruta para fins de abastecimento público (IAP)

Este índice foi desenvolvido em parceira com Cetesb, Sabesp, institutos de pesquisa e universidades, é resultado da incorporação de três grupos de variáveis: o próprio IQA, parâmetros que avaliam a presença de substâncias tóxicas (ST), e variáveis que afetam as características organolépticas da água (SO). O grupo ST inclui testes de genotoxicidade, potencial de formação de trihalometanos, número de células de cianobactérias, cádmio, chumbo, cromo total, mercúrio e níquel; já o grupo SO requer a caracterização de ferro dissolvido, cobre dissolvido, alumínio dissolvido, manganês e zinco. Tanto o ST quanto o SO integram o índice de substâncias tóxicas e organolépticas (ISTO). Sua determinação é dada pelo produto da ponderação do IQA e do ISTO, segundo a Equação 6.50.

IAP = IQA x ISTO (6.50)

Com exceção dos parâmetros “teste de genotoxicidade” e do “número de células de cianobactérias”, o índice de substâncias tóxicas e organolépticas (ISTO) incluem faixas de variação de qualidade e representadas em uma curva padrão que indicam os valores medidos para limites inferior (LI) e superior (LS). Estes limites correspondem aos valores numéricos 1,0 e 0,5, para os limites inferior e superior, respectivamente, conforme exemplificados pela Figura 6.14 (CETESB, 2011b). Assim, o limite inferior é definido pelo padrão de potabilidade da Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde; já o limite superior é estabelecido pelo padrão de qualidade da água doce, classe 3, da Conama 357/2005.

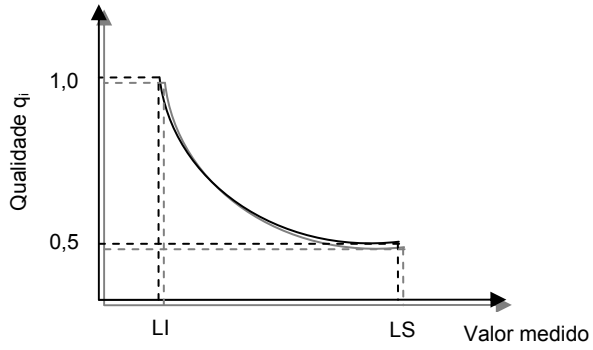


Figura 6.14 – Curva de qualidade padrão para os parâmetros que compõem o ISTO. Se valor medido ≤ LI, então q = 1; senão, $q = 0{,}5^{\frac{(valor_medido - LI)}{(LS - LI)}}$ (CETESB, 2011b)

Os valores de q_i obtidos das curvas de qualidade encontram-se normalizados (entre 0 e 1), para cada uma das variáveis que compõem o ISTO. O grupo ST de susbstâncias tóxicas é ponderado pela multiplicação de dois valores mínimos mais críticos do grupo de

variáveis que indicam a presença de tais substâncias na água. Já o grupo de substâncias organolépticas SO é ponderado pela média aritmética das qualidades padronizadas das variáveis deste grupo. O ISTO é então obtido pelo produto dos grupos ST e SO, conforme a Equação 6.51 (CETESB, 2011b).

$$ISTO = ST \times SO \quad (6.51)$$

As categorias de qualidade do IAP de acordo com a faixa de ponderação definem-se como: qualidade ótima ($79 < IAP \leq 100$); boa ($51 < IAP \leq 79$); regular ($36 < IAP \leq 51$); ruim ($19 < IAP \leq 36$); e péssima ($IAP \leq 19$).

Índices de qualidade das águas para proteção da vida aquática e de comunidades aquáticas (IVA)

Este índice também é utilizado pela Cetesb para avaliar a qualidade das águas como mecanismos de proteção da fauna e da flora aquáticas (ZAGATTO *et al*., 1999). É composto pelo Índice de Variáveis Mínimas para a Preservação da Vida Aquática (IPMCA) e pelo Índice de Estado Trófico de Carlson (1977), este último originalmente proposto para climas temperados, sendo então adaptado para ambientes tropicais por Toledo *et al*. (1983). O primeiro incorpora parâmetros cujos contaminantes exercem efeitos tóxicos sobre as espécies aquáticas (toxicidade), além do pH e do oxigênio dissolvido. O segundo sub-índice avalia os corpos hídricos em termos de graus de trofia, caracterizado pelo enriquecimento de nutrientes que provocam crescimento exagerado de algas.

O IVA é determinado de acordo com a Equação 6.52 (CESTESB, 2011c).

$$IVA = (IPMCA \times 1{,}2) + IET \quad (6.52)$$

Na indisponibilidade do valor de IET, assume-se o valor igual a 1. As categorias de valores do índice são atribuídas como: ótima qualidade ($IVA \leq 2{,}2$); boa ($2{,}3 \leq IVA \leq 3{,}2$); regular ($3{,}4 \leq IVA \leq 4{,}4$); ruim ($4{,}6 \leq IVA \leq 6{,}8$); e péssima ($IVA > 7{,}6$).

O IPMCA é determinado pela contribuição da maior ponderação do grupo de variáveis essenciais (VE) (oxigênio dissolvido, pH e toxicidade) multiplicado pelo valor médio das três maiores ponderações do grupo de substâncias tóxicas (ST), como mostrado na Equação 6.53; este último grupo corresponde a um valor inteiro, o qual deve ser

arredondado para baixo, para valores menores que 0,5, e para cima, quando se obtém um valor maior ou igual a 0,5.

IPMCA = VE x ST (6.53)

O valor do índice varia entre 1 e 9, onde as categorias são atribuídas de acordo com os seguintes critérios: boa qualidade (IPMCA = 1); regular (2); ruim (3 e 4); e péssima (≥ 6).

O Índice de Estado Trófico (IET) resulta na classificação do grau de trofia dos corpos hídricos, o que é medido pela concentração de nutrientes, dentre os quais clorofila-a e fósforo total, os quais proporcionam crescimento excessivo de algas ou de populações de macrófitas aquáticas. Representa um indicativo do potencial de eutrofização do ecossistema aquático. Seu conceito é de natureza multidimensional, influenciado por diversos parâmetros que necessitam de medição e que, portanto, gerariam diferentes índices. Para tanto, foram criados índices que simplificam a abordagem ao incorporarem um número menor de variáveis representativas na identificação do estado trófico de um corpo hídrico; o Índice de Carlson modificado por Toledo *et al*. (1983) é bastante usado para regiões de clima tropical.

A eutrofização é um fenômeno relativamente comum em corpos hídricos de todo o mundo, sendo um dos principais fatores de comprometimento da qualidade de águas superficiais. O aporte e acúmulo de matéria orgânica e outras substâncias em sistemas aquáticos desperta o aumento da produtividade biológica, induzindo a proliferação de algas e/ou macrófitas aquáticas no meio. Substâncias que contêm fósforo, nitrogênio, potássio, enxofre, carbono, oxigênio, cálcio, ferro e outros atuam como nutrientes essenciais para o fitoplâncton e vegetais aquáticos superiores (principalmente os flutuantes), e sua decomposição consome grandes quantidades de oxigênio (BRAGA *et al*., 2005).

A eutrofização natural ocorre em qualquer sistema aquático continental ou de águas costeiras (estuários) e caracteriza um processo de envelhecimento natural e lento, no qual ocorre a transformação de um ecossistema lacustre em terrestre, utilizando a interação do lago com o meio terrestre que o circunda (TUNDISI, 1986, p. 53; BRAGA *et al*., 2005, p. 96). Sua ocorrência é mais comum em ambientes lênticos, ou seja, em lagoas, lagos e represas, com fluxo lento e baixo tempo de residência, o que permite elevada taxa de reprodução do plâncton; entretanto, também podem ocorrer em ambientes lóticos (rios), embora as condições sejam relativamente insuscetíveis ao crescimento de organismos fotossintetizantes e material autóctone, dadas as condições de turbidez e fluxo elevado.

O lançamento de esgotos domésticos, efluentes industriais, a poluição do ar, com a consequente precipitação pluviométrica e de partículas, além da drenagem de áreas

cultivadas com agrotóxicos e fertilizantes sintéticos eleva a concentração de nitrogênio (nitratos) e fósforo (presente na forma de fosfatos) no sistema, principalmente. Erosão hídrica dos solos, aplicação de fertilizantes agrígolas, ou ainda a decomposição natural de matéria orgânica biodegradável são fatores que condicionam o carreamento de nutrientes para o corpo hídrico. Braga *et al*. (2005, p. 97) mencionam que a maioria dos ecossistemas aquáticos tem o fósforo como nutriente limitante, e embora os seres fotossintetizantes aquáticos necessitem de nitrato dissolvido na água, há aqueles que o utilizam na forma gasosa. Assim, a eutrofização é acelerada pelo acúmulo de fósforo proveniente da descarga de efluentes e fertilizantes. A intervenção humana, com o desenvolvimento de atividades agrícolas e o crescimento populacional, acelera a ocorrência deste fenômeno (eutrofização artificial, cultural ou acelerada), sendo sua observação mais frequente uma consequência da ação antrópica.

O nitrogênio amoniacal presente em efluentes domésticos e industriais é convertido em nitrito por ação de bactérias quimiossintetizantes do gênero *Nitrosonomas*; em seguida, o nitrito é convertido em nitrato por ação de bactérias do gênero *Nitrobacter* (processo de nitrificação) (BRAGA *et al*., 2005, p. 31). Concentrações elevadas de NH_4 e NO_2 em uma amostra de um ponto de monitoramento do corpo hídrico normalmente sugere a proximidade a jusante de lançamento de efluentes, pois a predominância de nitrogênio na forma orgânica ou amoniacal evidencia um estágio inicial de poluição, não tendo sido ainda alcançado o estágio final da oxidação, na forma de nitrato.

Na eutrofização, a proliferação de algas e plantas aquáticas superiores ocasiona a formação de uma densa camada flutuante na superfíce aquosa, o que impede a penetração de luz solar e consequentemente afeta o mecanismo fotossintético nas regiões inferiores. Com isto, há um decaimento na concentração de oxigênio, levando à insuficiência para o metabolismo de organismos aeróbios (peixes e mamíferos aquáticos); como tais seres não conseguem sobreviver, aumenta a quantidade de matéria orgânica no meio, e consequentemente a sua demanda bioquímica de oxigênio (DBO); e para decompor os detritos orgânicos (restos de matéria morta), há um aumento de bactérias anaeróbicas facultativas no fundo, liberando gases como sulfídrico e metano, venenosos para os organismos aquáticos, e acentuam o desequilíbrio ecológico. A morte da flora aquática e sua decantação para o fundo do corpo hídrico reduz a concentração de oxigênio dissolvido, o que normalmente leva à mortandade de peixes.

Conforme Esteves e Barbosa (1986, p. 59), embora as transformações decorrentes da eutrofização artificial sejam comumente provocadas por algum tipo de poluição, seus efeitos podem manifestar-se somente após vários anos, ao contrário da poluição, cujos efeitos negativos quase sempre são imediatos sobre os organismos aquáticos e o meio

ambiente. Além disso, traz como consequência alterações físico-químicas do meio (aumento da concentração de nutrientes, alterações significativas no pH em curto período de tempo, aumento da concentração de gases, como metano e gás sulfídrico, diminuição da concentração de oxigênio dissolvido, o que favorece a liberação de íons depositados no sedimento) e biológicas (diminuição na diversidade de espécies e aumento do florescimento de cianofíceas). Documento da Organização Mundial de Saúde (CHORUS e BARTRAM, 1999, *apud* LAMPARELLI, 2004, p. 2-3) relata episódios de prejuízos à saúde humana provocados por florações de cianobactérias, seja por uso de água para abastecimento ou por inalação em exposição direta em atividades como natação, incluindo relatos de mortes de animais que ingeriram água desta fonte. Esteves e Barbosa (1986, p. 57) ressaltam ainda que a eutrofização artificial destroi áreas de lazer e torna a água imprópria para consumo; além disso, afeta o turismo e desvaloriza propriedades nas adjacências destes ecossistemas degradados, e torna o custo de tratamento de água para abastecimento público mais elevado.

As principais técnicas utilizadas para a correção dos efeitos da eutrofização envolvem os seguintes processos (TUNDISI, 1986, p. 53): (i) diminuição da entrada de nitrogênio e fósforo; (ii) renovação do hipolímnio (camada inferior próxima ao fundo do reservatório, com temperaturas mais baixas que nas camadas superiores – epilímnio e metalímnio –, mais densa e com baixa turbulência); (iii) renovação periódica das macrófitas aquáticas; renovação do sedimento do fundo; (iv) diminuição do tempo de residência; (v) isolamento químico do sedimento; e (vi) técnicas de biomanipulação, com o uso de predadores seletivos, os quais permitem a renovação do fitoplâncton.

De acordo com a produtividade dos lagos, estes podem ser classificados em (BRAGA *et al*., 2005, p. 97):

► oligotróficos: baixa produtividade biológica e baixa concentração e reciclagem de nutrientes, principalmente nitrogênio, fósforo e sílica;

► eutróficos: produção vegetal excessiva e alta concentração de nutrientes;

► mesotróficos: características intermediárias entre oligotrófico e eutrófico.

Retornando ao conceito de Índice do Estado Trófico, o indicativo do grau de eutrofização é dado pela contribuição de fósforo total (IET (PT)), o qual atua como agente causador do processo, enquanto que a clorofila-a (IET (CLa)) mede a resposta do corpo hídrico ao agente causador, indicando o nível de concentração do fitoplâncton (crescimento de algas). Assim, o índice médio que representa o estado trófico incorpora a causa e o efeito do processo.

Os componentes do IET, modificados por Lamparelli (2004), e estabelecidos para ambientes lóticos, como os rios, são dados pelas Equações 6.54 e 6.55, para o fósforo e a clorofila-a, respectivamente.

$$IET(CLa) = 10\left[6 - \left(\frac{-0,7 - 0,6\ln(CL)}{\ln 2}\right)\right] - 20 \quad (6.54)$$

$$IET(PT) = 10\left[6 - \left(\frac{0,42 - 0,36\ln(PT)}{\ln 2}\right)\right] - 20 \quad (6.55)$$

onde: PT é a concentração de fósforo total medida à superfície da água [em $\mu g.L^{-1}$]; e CL é a concentração de clorofila-a medida à superfície da água [em $\mu g.L^{-1}$].

O IET final constitui a média aritmética dos índices anuais referentes ao fósforo total e à clorofila-a, conforme a Equação 6.56.

$$IET = \frac{IET(PT) + IET(CLa)}{2} \quad (6.56)$$

A classificação dos corpos hídricos para rios correspondem aos limites estabelecidos segundo o Índice de Carlson modificado, com a proposta de introdução do estado ultraoligotrófico por Lamparelli (2004): ultraoligotrófico (IET ≤ 47), oligotrófico (47 < IET ≤ 52), mesotrófico (52 < IET ≤ 59), eutrófico (59 < IET ≤ 63), supereutrófico (63 < IET ≤ 67) e hipereutrófico (IET> 67).

Segundo FIA *et al*. (2009, p. 134), o IET sinaliza o efeito de atividades humanas nas bacias hidrográficas, além de fundamentar ações de manejo e gestão de ecossistemas aquáticos, permitindo adotar estratégias voltadas para a sustentabilidade dos recursos hídricos e que assegurem os usos múltiplos da água, em médio e longo prazo.

Silva e Jardim (2006) propuseram um novo formato para avaliar a qualidade das águas para proteção de vida aquática (IQA_{PVA}). O estudo foi conduzido a partir de dados de monitoramento do rio Atibaia, localizado na região de Campinas (SP). O modelo proposto agrupou dois parâmetros que melhor pudessem representar os impactos ambientais da matéria orgânica na qualidade das águas: a concentração normalizada de amônia total (Amônia $total_n$) e a concentração normalizada de oxigênio dissolvido (OD_n). O menor valor normalizado dos parâmetros ambientais amônia total e oxigênio dissolvido é considerado

como o valor numérico do índice (IQA_{PVA}). O uso do operador mínimo corresponde ao parâmetro ambiental mais degradado e tem a finalidade de evitar o efeito eclipse.

A normalização consiste em equiparar o valor numérico das concentrações dos parâmetros em uma escala de 0 a 100, em nível crescente de qualidade ambiental; assim, utilizam-se curvas de normalização que relacionam faixas de concentração de amônia e OD com o estado de qualidade do fator de normalização na escala (ótima, boa, regular, ruim e péssima). As faixas de concentrações de amônia e OD, bem como os fatores de normalização, são obtidos com o uso das curvas de Coneza (PESCE e WUNDERLIN, 2000, *apud* SILVA e JARDIM, 2006). As faixas de qualidade seguem a ponderação estabelecida pela Cestesb para o IQA: ótima ($79 < IQA_{PVA} \leq 100$); boa ($51 < IQA_{PVA} \leq 79$); regular ($36 < IQA_{PVA} \leq 51$); ruim ($19 < IQA_{PVA} \leq 36$); e péssima ($IQA_{PVA} \leq 19$).

O valor mínimo normalizado pelo índice proposto dispensa o uso de pesos normalmente exponenciais (de 0 a 1) que relacionam os níveis de importância das variáveis ambientais normalizadas na composição do índice. Além disso, o índice proposto permite a inclusão de outras variáveis críticas ou mesmo a substituição de uma delas, dadas as características de poluição do ecossistema estudado. Apesar da boa representatividade em comparação com os índices utilizados pela Cetesb (IQA e IVA), o grau de poluição do sistema aquático testado é reflexo da contaminação por esgoto doméstico. Em casos de avaliação direta de efluentes industriais, podem ser adotados ou agregados outros contaminantes para melhor atender às especificidades dos processos da indústria responsável pelo despejo, tornando mais flexível o uso da ferramenta em um sistema de gestão de bacias hidrográficas; e mesmo neste caso, a variável a ser introduzida deve apresentar uma curva de normalização definida.

Abordagem simplificada para avaliação de custo de impacto de qualidade do corpo hídrico com o descarte de efluentes

A partir do valor do índice de qualidade empregado, pode-se estabelecer uma estimativa do custo associado à perda do grau de qualidade do corpo hídrico. Este custo, a ser acrescentado à avaliação final das alternativas técnicas de reúso é denominado de custo adicional de impacto de qualidade da água, e corresponde ao somatório dos custos anuais relativos ao tratamento de efluente e de descarte final para os cenários selecionados, descontado o efeito de não qualidade do índice considerado, cujo valor é ponderado de 0 a 100. O custo adicional de impacto (C_{AIQA}) é representado pela Equação 6.57, e é apropriado apenas para o índice de qualidade de águas para fins de abastecimento público (IAP).

$$C_{AIQA} = (custo_tratamento + custo_descarte)x\left(1 - \frac{IQA}{100}\right) \quad (6.57)$$

Quando se utiliza o índice para proteção de vida aquática, pode-se adotar uma expressão que relaciona o potencial de qualidade medido pelo IVA, pois quanto menor seu valor numérico, melhor a indicação de qualidade da água. Neste caso, quando o valor do IVA for inferior ou igual a 2,2, o custo adicional de impacto torna-se potencialmente menor, frente a valores superiores, os quais apontariam para um impacto maior em função da menor qualidade do corpo hídrico. A Equação 6.58 propõe a opção de cálculo de C_{AIQA} subsequente à avaliação do IVA.

$$C_{AIQA} = (custo_tratamento + custo_descarte)x(IVA) \quad (6.58)$$

Os valores de C_{AIQA} podem ser obtidos simultaneamente, tanto em relação ao IQA, quanto ao próprio IVA, isto quando a disponibilidade de informações for suficiente para os cálculos. Com isso, seria um suporte diferencial na tomada de decisão quanto às alternativas de cenários de reúso a serem adotadas.

Outro referencial de análise importante seria verificar a opção que garanta o menor consumo hídrico do processo, o que revela um melhor aproveitamento da água captada e devolvida ao manacial, sem comprometer usos prioritários destinados ao abastecimento público.

A proposta apresentada considera a aplicação do método de Produtividade Marginal para avaliação da qualidade da água como um produto, após o recurso natural passar por um processo de tratamento de efluentes. Os parâmetros de qualidade da água atribuem às variáveis ambientais relações causa para a correção dos efeitos (impactos). O custo de produção varia de acordo com o grau de tratamento exigido. O uso de uma função dose-resposta permite estabelecer uma relação entre a concentração dos poluentes presentes na água antes de submetida a tratamento final, de acordo com a legislação, e os efeitos sobre a qualidade da água a ser descartada após tratamento. A variação do custo dos insumos para o tratamento do efluente a ser descartado corresponde ao valor do impacto ambiental associado a uma variação do índice de qualidade considerado.

6.8. COMENTÁRIOS GERAIS

Este capítulo apresentou uma nova abordagem para o gerenciamento sustentável do reúso de águas e efluentes industriais. A metodologia, denominada de P+ÁGUA, inclui o uso de

um procedimento algorítmico (DFA), ferramenta da Integração de Processos, para estabelecer novas oportunidades de reúso de correntes hídricas em processos industriais, dentro da abordagem do modelo tradicional de Produção mais Limpa.

É importante lembrar que a análise deste trabalho considera que o DFA é utilizado como ferramenta sustentável, e de modo simultâneo à identificação das oportunidades de melhorias de processos durante a aplicação da P+L. A valoração de impactos ambientais sobre os recursos hídricos torna-se um complemento importante, à medida que auxilia na comprovação da necessidade de se estabelecer o reúso, combinado ou não a técnicas de tratamento para recuperação de qualidade da água.

O capítulo seguinte apresenta os resultados da aplicação da metodologia proposta neste trabalho, e está estruturado dentro de uma abordagem modular, na qual se procura aprimorar o mecanismo de análise do DFA, integrando-o à valoração de impactos sobre a qualidade dos recursos hídricos. A análise individualizada por meio de um estudo de caso favorece o entendimento e a aplicação do DFA, uma vez que a segmentação de temas amplia a discussão sobre a importância de se praticar o reúso industrial por meio de um procedimento sistemático, além de observar simultaneamente critérios de valoração ambiental.

CAPÍTULO 7

RESULTADOS E DISCUSSÃO

"O refino de petróleo é um tema instigante para qualquer engenheiro químico. Está na base e, mesmo, na justificativa de boa parte dos esforços desta carreira, nos últimos cem anos"

(Szklo, 2005)

Resumo – Este Capítulo apresenta os resultados da aplicação do modelo P+ÁGUA a um estudo de caso de uma refinaria de petróleo, elaborado a partir de dados que caracterizam a realidade dos processos hídricos. A etapa inicial refere-se à obtenção de dados para elaboração do balanço hídrico dos processos, necessário para a aplicação direta da ferramenta Diagrama de Fontes de Água. A análise é realizada tanto considerando um sistema unicomponente quanto para múltiplos componentes, visando estabelecer cenários que contemplem redução de consumo de água e da geração de efluentes. São gerados diferentes cenários que eventualmente possam indicar potencial viabilidade para implementação de práticas de reaproveitamento hídrico. Em uma refinaria, o sistema de resfriamento tem importância na convergência de correntes de reúso, particularmente na qualidade de água de reposição; neste sentido, realiza-se uma análise criteriosa do sistema de resfriamento, incluindo a relaxação dos ciclos de concentração, buscando identificar e consolidar propostas de reúso, tendo como base as características da água de reposição. Como a maior demanda de água em uma refinaria é no sistema de resfriamento, foram realizadas simulações de índices de estabilidade, como os de Langelier, Ryznar e Puckorius, visando avaliar a tendência inscrustante ou corrosiva da água. Pode-se constatar a redução de consumo de água e da geração de efluentes a serem lançados no corpo hídrico. Um procedimento de seleção de cenários aqui proposto é aplicado, assim como a inclusão de processos regenerativos e seu impacto na avaliação de custos. Em seguida, estende-se a necessidade de identificar e avaliar os impactos causados pelo descarte de efluentes industriais, integrando a metodologia desenvolvida para o gerenciamento do reúso sustentável.

Palavras-chave: reúso de efluentes, refinaria de petróleo, externalidades, impacto ambiental.

7.1. DEFINIÇÃO DO ESTUDO DE CASO: OBTENÇÃO DE DADOS E BALANÇO HÍDRICO DO CENÁRIO BASE

A metodologia apresentada neste trabalho segue as etapas descritas na Figura 6.4, que incorporam um formato prático ao modelo de gestão P+ÁGUA, visando a aplicação industrial do Diagrama de Fontes de Água como ferramenta sustentável para tomada de decisão em processos, partindo do pressuposto de que medidas de *housekeeping* já tenham sido tomadas.

Um caso real envolvendo dados representativos de uma refinaria de petróleo é apresentado neste trabalho. A planta de refino inclui diversas unidades operacionais, as quais se encontram agrupadas em blocos, sem necessidade de detalhamento interno para a aplicação do procedimento DFA (O Apêndice 3 apresenta uma descrição dos principais processos hídricos relacionados ao sistema de refino). No entanto, dispõem-se do mapeamento de entradas e saídas de água em cada bloco representativo da operação ou do processo, definidos como prioritários para o sistema hídrico, com potencial para eventuais reutilizações de correntes. As vazões e concentrações de todos os contaminantes relevantes também são apresentadas, bem como os respectivos valores de pH. Os contaminantes são limitados ao menor número possível, dentre aqueles que efetivamente concorrem para a importância do processo, considerando-se os que aparecem com restrições de entrada, partindo da análise com um único contaminante. Em relação às condições limites do processo, estas são determinadas mediante julgamento e experiência, limites para a corrosão, incrustação ou depósitos, solubilidade máxima, análise de sensibilidade, e mesmo simulações.

A etapa de levantamento de dados de consumo de água e geração de efluentes é considerada crítica na aplicação da metodologia, tanto pela dificuldade inerente à coleta de informações de um trabalho de campo quanto pelo próprio esforço dispendido em consultas com profissionais representantes dos diferentes setores que compõem a refinaria. A dificuldade de obtenção de dados de correntes hídricas na indústria reside no fato de a água ser considerada uma fonte barata e sempre disponível. Embora a legislação atual esteja induzindo a mudanças nessa percepção, atribuindo à água o *status* de bem econômico, a quantidade de medidores de correntes hídricas instalados ainda não se mostra suficiente para auxiliar o fechamento do balanço hídrico. Quando disponível, os dados podem ser obtidos a partir de um sistema informatizado para monitoramento real de determinados componentes considerados relevantes para um dado processo. Como há heterogeneidade de componentes relevantes em cada operação, a composição do banco de dados de acordo

com o fluxograma de processos hídricos pode deixar lacunas (valores não identificados inicialmente) a serem posteriormente preenchidas por meio de balanço hídrico ou estimativas de especialistas.

Os dados presentes neste estudo de caso foram obtidos por meio de análises ou medições em períodos não necessariamente coincidentes. As informações foram então agrupadas e dispostas em uma planilha eletrônica, por um período de um ano (no caso de dados obtidos mediante monitoramento real), por exemplo, relacionando a vazão e a composição de cada corrente. As flutuações de valores decorrentes das características operacionais levam à necessidade de um adequado tratamento estatístico dos dados, eventualmente excluindo do cálculo dos respectivos valores médios alguns pontos que estejam muito dispersos e cuja experiência sugere que não representam a realidade da operação.

A Figura 7.1 apresenta o diagrama de blocos do sistema hídrico dos processos da refinaria analisada neste trabalho. Nesta configuração, tratada como cenário base para a aplicação do DFA, cada corrente recebe numeração (interior de losangos) que leva à identificação de suas características no balanço material.

A água captada de uma fonte superficial (rio) é direcionada para tratamento e produção de água industrial (Estação de Tratamento de Água – ETA), normalmente por meio de processos como pré-cloração, clarificação convencional (coagulação, floculação e decantação), filtração, e outros, como cloração (água potável, sistemas de resfriamento ou água de processo) e troca iônica (água de reposição de caldeiras, água de processo). Neste processo, a qualidade de água bruta é empregada para alimentar as torres de resfriamento (TR01 e TR02), bem como a rede de água para incêndio e outros usos gerais, como limpeza, por exemplo.

As purgas da ETA são destinadas ao tratamento final de efluentes. No caso da água desmineralizada, sua nobre qualidade destina-se basicamente à alimentação de caldeiras, cujo vapor será destinado às unidades de destilação (atmosférica e a vácuo), craqueamento catalítico (FCC), hidrotratamento (HDT) e unidade de desasfaltação (UDASF). No balanço hídrico considerado, 26,51% da entrada de água desmineralizada na caldeira (= (70 t/h / 264 t/h) x 100) saem como vapor de processo, enquanto que 24,24% (= (64 t/h / 264 t/h) x 100) correspondem à fração relativa à perda de vapor na caldeira.

Os efluentes das unidades de destilação atmosférica, hidrotratamento e craqueamento catalítico, geram água ácida para ser retificada na *Stripper* I, sendo posteriormente encaminhado ao *Stripper* II, cujo efluente é aproveitado na dessalgadora. As correntes de saída de todos os processos são unificadas e canalizadas para a estação de

tratamento de efluentes (ETDI), com a finalidade de lançamento posterior ao corpo hídrico (rio), atendendo aos padrões de descarte da legislação.

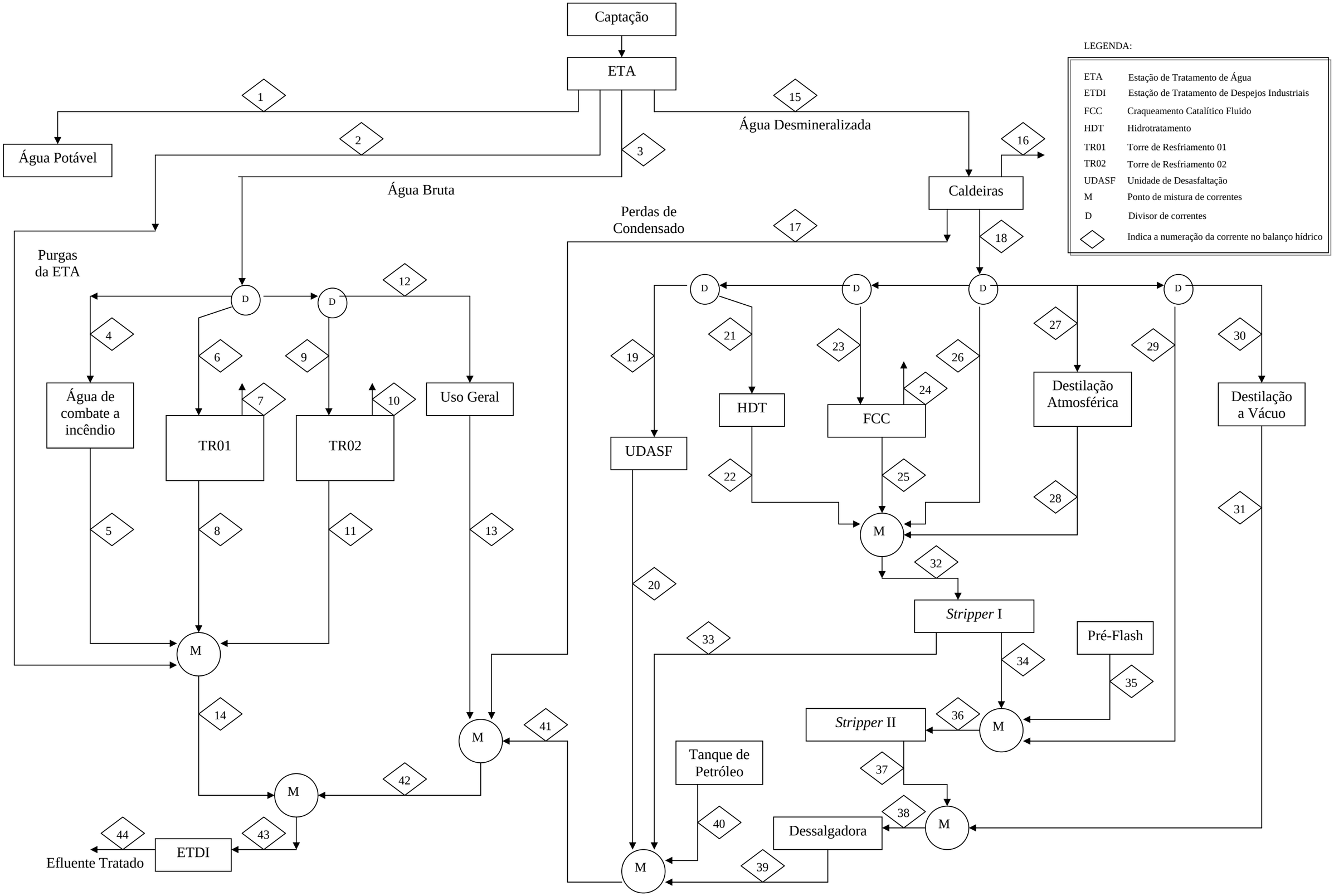


Figura 7.1 – Diagrama de blocos do processo hídrico da refinaria em estudo – Cenário base

Após a definição do fluxograma representativo do processo hídrico, segue-se a elaboração de seu balanço material. A Tabela 7.1 relaciona as características qualitativas e quantitativas dos parâmetros e contaminantes considerados no sistema, associando cada número da corrente à respectiva identificação no fluxograma original. A captação de água do sistema corresponde a 815 t/h (somatório das correntes 1, 2, 3 e 15), enquanto que o descarte equivale a 414 t/h (corrente 44), o que caracteriza o uso consuntivo (parcela da captação que é consumida no processo) de água de 401 t/h pela refinaria.

Tabela 7.1 – Balanço hídrico do processo da refinaria

Número da corrente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nome da corrente	Água Potável	Purga da ETA	Água Bruta	Entrada (Pressurização) da água de combate a incêndios	Saída da água de combate a incêndios	Reposição da TR01	Perda da TR01	Purga da TR01	Reposição da TR02	Perda da TR02
Vazão (t/h)	21	13	517	100	100	42	37	5	325	285
pH	7,50	5,40	6,90	6,90	6,90	6,90		8,00	6,90	
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	14,8	8,6	8,6	8,6	8,6	55,90	55,90	8,6	66,22
Sílica	0	15,6	9,4	9,4	9,4	9,4	61,10	61,10	9,4	72,38
Amônia	0	0,36	0,07	0,07	50,07	0,07	0,57	0,57	0,07	0,57
Sulfeto	0	0,32	0,1	0,1	10,10	0,1	0,06	0,06	0,1	0,06
Cloreto	0	170	9,7	9,7	109,7	9,7	163,05	163,05	9,7	204,69
Cianeto	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0
Fenol	0	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,13	0,13	0,05	0,06

Número da corrente	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Nome da corrente	Purga da TR02	Entrada para Uso Geral	Saída do Uso Geral	Junção (2 + 5 + 8 + 11)	Água Desmineralizada (Entrada da Caldeira)	Perda de vapor (Caldeira)	Perda de condensado (Caldeira)	Vapor de processo (Caldeira)	Entrada da UDASF	Saída da UDASF
Vazão (t/h)	40	50	50	158	264	64	70	130	6	6
pH	7,30	6,90	6,90	6,38	7,00		7,00	7,00	7,00	5,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	66,22	8,6	8,6	25,19	0	0	1	0	0	9,8
Sílica	72,38	9,4	9,4	27,49	0	0	1	0	0	4,6
Amônia	0,57	0,07	10,07	31,88	0	0	10	0	0	3,1
Sulfeto	0,06	0,1	1,10	6,44	0	0	10	0	0	6,3
Cloreto	204,69	9,7	109,7	140,40	0	0	10	0	0	3,7
Cianeto	0	0	0	0,06	0	0	0	0	0	0,1
Fenol	0,06	0,05	0,05	0,06	0	0	0	0	0	39,3

Tabela 7.1 – Balanço hídrico do processo da refinaria (continuação)

Número da corrente	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Nome da corrente	Entrada da HDT	Saída da HDT	Entrada da FCC	Perda de vapor (FCC)	Saída da FCC	Vapor de processo (para *Stripper* I)	Entrada da Destila-ção Atmosféri ca	Saída da Destilação Atmosférica	Vapor de processo (para *Stripper* II)	Entrada da Destilação a Vácuo
Vazão (t/h)	6	6	50	10	40	10	21	21	10	27
pH	7,00	7,70	7,00		8,90	7,00	7,00	6,90	7,00	7,00
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	10,7	0	0	8,4	0	0	4,1	0	0
Sílica	0	1,3	0	0	3,5	0	0	8,4	0	0
Amônia	0	7708	0	0	13300,4	0	0	191,2	0	0
Sulfeto	0	22838,3	0	0	10374,4	0	0	268,3	0	0
Cloreto	0	75,4	0	0	51,5	0	0	132,7	0	0
Cianeto	0	33,8	0	0	67,4	0	0	3,3	0	0
Fenol	0	54,7	0	0	193,2	0	0	113,8	0	0

Número da corrente	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Nome da corrente	Saída da Destilação a Vácuo (para a entrada da Dessalgadora)	Afluente da *Stripper* I	Excedente (saída) da *Stripper* I	Saída da *Stripper* I (para *Stripper* II)	Saída do Vaso de Pré-flash	Afluente da *Stripper* II	Saída da *Stripper* II	Entrada da Dessalgadora (31+37)	Saída da Dessalga-dora	Dreno do Tanque de Petróleo
Vazão (t/h)	27	77	10	67	8	85	85	112	112	8
pH	6,80	7,31	10,31	10,31	7,50	7,83	5,83	5,94	5,94	7,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	8,6	6,32	6,32	6,32	3,6	5,32	5,32	6,11	51,11	225
Sílica	42,5	4,21	4,21	4,21	1,7	3,48	3,48	12,89	17,89	25
Amônia	144,1	7562,07	831,83	831,83	774	728,52	269,55	239,31	95,72	68,8
Sulfeto	140,7	7242,08	14,48	14,48	1092,2	114,21	0,34	34,18	3,42	970,82
Cloreto	75,4	68,82	68,82	68,82	28,6	56,94	56,94	61,39	1361,39	6500
Cianeto	1,8	38,55	0,27	0,27	41,1	4,08	2,04	1,98	3,98	36,512
Fenol	23,6	135,66	108,53	108,53	44,8	89,76	89,76	73,81	7,38	39,8

Tabela 7.1 – Balanço hídrico do processo da refinaria (continuação)

Número da corrente	41	42	43	44
Nome da corrente	Junção (20 +33+39+40)	Junção (13+17+41)	Junção (14+42) / Entrada da ETDI	Saída da ETDI
Vazão (t/h)	136	256	414	414
pH	5,96	6,20	6,26	6,26
Concentração (mg/L)				
Cálcio	56,22	31,82	29,29	79,29
Sílica	16,71	10,99	17,29	17,29
Amônia	144,18	81,30	62,44	1,56
Sulfeto	61,26	35,50	24,41	0,24
Cloreto	1508,72	825,67	564,14	56,41
Cianeto	5,45	2,90	1,82	0,18
Fenol	18,13	9,64	5,98	0,30

Relativamente à estação de tratamento final de efluentes (ETDI), a eficiência de remoção é aplicada aos contaminantes amônia, sulfeto, cloreto, cianeto e fenol, conforme mostrado na Tabela 7.2. Há um acréscimo em torno de 50 mg/L de cálcio na saída da ETDI, enquanto que a sílica não sofre qualquer alteração em seu valor de entrada; neste último caso, o valor de saída é considerado igual ao de entrada. As características de qualidade do efluente da ETDI encontram-se dentro das concentrações permitidas pela legislação para o despejo no corpo receptor, de acordo com a Conama 357/2005 (classificação água doce). Embora as concentrações de cálcio e sílica não sejam disponibilizadas pela legislação quanto ao descarte, é certo que valores crescentes ou elevados destes componentes têm a capacidade de suscitar impactos significativos sobre a qualidade do corpo hídrico; tal fato interfere nas características deste corpo receptor, alterando-as de modo a facilitar a formação de dureza (no caso do cálcio), por exemplo, mediante o lançamento indiscriminado do efluente. Assim, deve-se ter um controle sobre tais parâmetros, de maneira a reajustar a possibilidade de ocorrência de desequilíbrios no meio, sem afetar a classificação do corpo receptor.

Tabela 7.2 – Eficiência de remoção de contaminantes da estação de tratamento de despejos industriais e padrão de lançamento da Conama 357/2005

Número da corrente	43	44		
Nome da corrente	Junção (14+42) / Entrada da ETDI	Saída da ETDI	Eficiência de remoção (%)	Padrão de Lançamento Conama 357 (água doce – classe 2)
Vazão (t/h)	414	414		
pH	6,26	6,26		
Concentração (mg/L)				
Cálcio	29,29	79,29	$\Delta C = Cout - Cin = 50$ mg/L	NF
Sílica	17,29	17,29	0	NF
Amônia	62,44	1,56	97,5	20
Sulfeto	24,41	0,24	99	1
Cloreto	564,14	56,41	90	250
Cianeto	1,82	0,18	90	0,2
Fenol	5,98	0,3	95	0,5

Notas: NF: valor não fixado; Remoção de Fenol – Técnica empregada: Ozônio / Oxidação Química – Eficiência: 95% (DELGADO, 2008, p.112); Remoção de Cloretos – Técnica empregada: Troca Iônica – Eficiência: ≥ 90% (DELGADO, 2008, p.112)

É válido mencionar que não se avalia aqui a contribuição de precipitações pluviométricas na vazão e na característica do efluente destinado à ETDI, sendo necessário o levantamento de índices pluviométricos dentro de um período estipulado, e considerar uma folga de capacidade de tratamento da ETDI. No entanto, ao reduzir a geração de

efluentes nos processos, os custos com tratamento também seriam reduzidos, ratificando a adoção de medidas de racionalização do consumo hídrico.

A Tabela 7.3 representa uma plataforma de identificação de oportunidades para a aplicação direta do procedimento DFA neste trabalho, elaborada a partir de dados do balanço material do fluxograma base. São listadas as fontes de água bruta e desmineralizada, a água potável para consumo humano, e, para cada operação do sistema, relacionadas as vazões limites e as concentrações de entrada e saída consideradas máximas. O pH dos contaminantes também é um parâmetro inserido na análise, e o balanço é obtido proporcionalmente pela concentração de íons hidrogênio (H^+) livres na solução. A carga mássica de transferência de cada contaminante (Δm) também é calculada, pois seu valor é sempre considerado fixo. Também são listados os aqui denominados parâmetros variacionais, ou seja, as eficiências de processos regenerativos (%R), os fatores de concentração (f_C) e as variações (aumentos ou diminuições) de concentração (ΔC) para determinados tipos de contaminantes em relação ao seu valor de entrada na operação (Cin), os quais foram utilizados na elaboração do balanço material.

Tabela 7.3 – Dados de vazão e concentração de contaminantes dos processos da refinaria

Operação	Componente	Vazão limite (t/h)	Concentração máxima de entrada (mg/L)
Água Potável	Cálcio	21	0
	Sílica		0
	Amônia		0
	Sulfeto		0
	Cloreto		0
	Cianeto		0
	Fenol		0
Água Bruta	Cálcio	517	8,6
	Sílica		9,4
	Amônia		0,07
	Sulfeto		0,1
	Cloreto		9,7
	Cianeto		0
	Fenol		0,05
Água Desmineralizada	Cálcio	264	0
	Sílica		0
	Amônia		0
	Sulfeto		0
	Cloreto		0
	Cianeto		0
	Fenol		0

Tabela 7.3 – Dados de vazão e concentração de contaminantes dos processos da refinaria (continuação)

Operação	Componente	Parâmetro variacional	Vazão limite (t/h)	Concentração máxima de entrada (mg/L)	Concentração máxima de saída (mg/L)
ETA (Purga)	Cálcio	-	13	-	8,6
	Sílica	-		-	9,4
	Amônia	-		-	0,07
	Sulfeto	-		-	0,1
	Cloreto	-		-	9,7
	Cianeto	-		-	0
	Fenol	-		-	0,05
Água de Combate a Incêndios	Cálcio	-	100	8,6	8,6
	Sílica	-		9,4	9,4
	Amônia	$\Delta C = Cin+50$		0,07	50,07
	Sulfeto	$\Delta C = Cin+10$		0,1	10,10
	Cloreto	$\Delta C = Cin+100$		9,7	109,7
	Cianeto	-		0	0
	Fenol	-		0,05	0,05
Purga de Água Industrial para Uso Geral	Cálcio	-	50	8,6	8,6
	Sílica	-		9,4	9,4
	Amônia	$\Delta C = Cin+10$		0,07	10,07
	Sulfeto	$\Delta C = Cin+1$		0,1	1,10
	Cloreto	$\Delta C = Cin+100$		9,7	109,7
	Cianeto	-		0	0
	Fenol	-		0,05	0,05
Torre de Resfriamento I (TR01) (Make up / Purga)	Cálcio	$f_C = Cin*6,5$	Reposição: 42 Purga: 5	8,6	55,72
	Sílica	$f_C = Cin*6,5$		9,4	61,10
	Amônia	$\Delta C = Cin+0,5$		0,07	0,57
	Sulfeto	$\Delta C = Cin*0,065+0,05$		0,1	0,06
	Cloreto	$\Delta C = Cin*6,5+100$		9,7	163,05
	Cianeto	$\Delta C = Cin+2$		0	2
	Fenol	$f_C = Cin*2,6$		0,05	0,12
Torre de Resfriamento I (Perda)	Cálcio	$f_C = Cin*6,5$	37	-	55,72
	Sílica	$f_C = Cin*6,5$		-	61,10
	Amônia	$\Delta C = Cin+0,5$		-	0,57
	Sulfeto	$\Delta C = Cin*0,065+0,05$		-	0,06
	Cloreto	$\Delta C = Cin*6,5+100$		-	163,05
	Cianeto	$\Delta C = Cin+2$		-	2
	Fenol	$f_C = Cin*2,6$		-	0,12

Tabela 7.3 – Dados de vazão e concentração de contaminantes dos processos da refinaria (continuação)

Operação	Componente	Parâmetro variacional	Vazão limite (t/h)	Concentração máxima de entrada (mg/L)	Concentração máxima de saída (mg/L)
Torre de Resfriamento II (TR02) (Make up / Purga)	Cálcio	f_C = Cin*7,7	Reposição: 325 Purga: 40	8,6	66,22
	Sílica	f_C = Cin*7,7		9,4	72,38
	Amônia	ΔC = Cin+0,5		0,07	0,57
	Sulfeto	ΔC = Cin*0,077+0,05		0,1	0,06
	Cloreto	ΔC = Cin*7,7+130		9,7	204,69
	Cianeto	f_C =Cin*1,155		0	0
	Fenol	-		0,05	0,05
Torre de Resfriamento II (Perda)	Cálcio	f_C =Cin*7,7	285	-	66,22
	Sílica	f_C =Cin*7,7		-	72,38
	Amônia	ΔC = Cin+0,5		-	0,57
	Sulfeto	ΔC = Cin*0,077+0,05		-	0,06
	Cloreto	ΔC = Cin*7,7+130		-	204,69
	Cianeto			-	0
	Fenol	f_C = Cin*1,155		-	0,05
Caldeiras	Cálcio	-	264	0	0
	Sílica	-		0	0
	Amônia	-		0	0
	Sulfeto	-		0	0
	Cloreto	-		0	0
	Cianeto	-		0	0
	Fenol	-		0	0
Caldeiras (Perda de condensado)	Cálcio	-	70	-	1
	Sílica	-		-	1
	Amônia	-		-	10
	Sulfeto	-		-	10
	Cloreto	-		-	10
	Cianeto	-		-	0
	Fenol	-		-	0
Caldeiras (Perda de Vapor)	Cálcio	-	64	-	0
	Sílica	-		-	0
	Amônia	-		-	0
	Sulfeto	-		-	0
	Cloreto	-		-	0
	Cianeto	-		-	0
	Fenol	-		-	0

Tabela 7.3 – Dados de vazão e concentração de contaminantes dos processos da refinaria (continuação)

Operação	Componente	Parâmetro variacional	Vazão limite (t/h)	Concentração máxima de entrada (mg/L)	Concentração máxima de saída (mg/L)
UDASF	Cálcio	$\Delta m = 58,8$ g/h	6	0	9,8 ((58,8 / 6) + Cin)
	Sílica	$\Delta m = 27,6$ g/h		0	4,6 ((27,6 / 6) + Cin)
	Amônia	$\Delta m = 18,6$ g/h		0	3,1 ((18,6 / 6) + Cin)
	Sulfeto	$\Delta m = 37,8$ g/h		0	6,3 ((37,8 / 6) + Cin)
	Cloreto	$\Delta m = 22,2$ g/h		0	3,7 ((22,2 / 6) + Cin)
	Cianeto	$\Delta m = 0,6$ g/h		0	0,1 ((0,6 / 6) + Cin)
	Fenol	$\Delta m = 235,8$ g/h		0	39,3 ((235,8 / 6) + Cin)
HDT	Cálcio	$\Delta m = 64,2$ g/h	6	0	10,7 ((64,2 / 6) + Cin)
	Sílica	$\Delta m = 7,8$ g/h		0	1,3 ((7,8 / 6) + Cin)
	Amônia	$\Delta m = 46248$ g/h		0	7708 ((46248 / 6) + Cin)
	Sulfeto	$\Delta m = 137029,8$ g/h		0	22838,3 ((137029,8 / 6) + Cin)
	Cloreto	$\Delta m = 452,4$ g/h		0	75,4 ((452,4 / 6) + Cin)
	Cianeto	$\Delta m = 202,8$ g/h		0	33,8 ((202,8 / 6) + Cin)
	Fenol	$\Delta m = 328,2$ g/h		0	54,7 ((328,2 / 6) + Cin)
FCC	Cálcio	$\Delta m = 336$ g/h	Entrada: 50 Saída: 40	0	8,4 ((336 / 40) + Cin)
	Sílica	$\Delta m = 140$ g/h		0	3,5 ((140 / 40) + Cin)
	Amônia	$\Delta m = 532016$ g/h		0	13300,4 ((532016 / 40) + Cin)
	Sulfeto	$\Delta m = 414976$ g/h		0	10374,4 ((414976 / 40) + Cin)
	Cloreto	$\Delta m = 2060$ g/h		0	51,5 ((2060 / 40) + Cin)
	Cianeto	$\Delta m = 2696$ g/h		0	67,4 ((2696 / 40) + Cin)
	Fenol	$\Delta m = 7728$ g/h		0	193,2 ((7728 / 40) + Cin)
FCC (Perda)	Cálcio	-	10	0	0
	Sílica	-		0	0
	Amônia	-		0	0
	Sulfeto	-		0	0
	Cloreto	-		0	0
	Cianeto	-		0	0
	Fenol	-		0	0

Tabela 7.3 – Dados de vazão e concentração de contaminantes dos processos da refinaria (continuação)

Operação	Componente	Parâmetro variacional	Vazão limite (t/h)	Concentração máxima de entrada (mg/L)	Concentração máxima de saída (mg/L)
Destilação Atmosférica	Cálcio	∆m = 86,1 g/h	21	0	4,1 ((86,1 / 21) + Cin)
	Sílica	∆m = 176,4 g/h		0	8,4 ((176,4 / 21) + Cin)
	Amônia	∆m = 4015,2 g/h		0	191,2 ((4015,2 / 21) + Cin)
	Sulfeto	∆m = 5634,3 g/h		0	268,3 ((5634,3 / 21) + Cin)
	Cloreto	∆m = 2786,7 g/h		0	132,7 ((2786,7 / 21) + Cin)
	Cianeto	∆m = 69,3 g/h		0	3,3 ((69,3 / 21) + Cin)
	Fenol	∆m = 2389,8 g/h		0	113,8 ((2389,8 / 21) + Cin)
Destilação a Vácuo	Cálcio	∆m = 232,2 g/h	27	0	8,6 ((232,2 / 27) + Cin)
	Sílica	∆m = 1147,5 g/h		0	42,5 ((1147,5 / 27) + Cin)
	Amônia	∆m = 3890,7 g/h		0	144,1 ((3890,7 / 27) + Cin)
	Sulfeto	∆m = 3798,9 g/h		0	140,7 ((3798,9 / 27) + Cin)
	Cloreto	∆m = 2035,8 g/h		0	75,4 ((2035,8 / 27) + Cin)
	Cianeto	∆m = 48,6 g/h		0	1,8 ((48,6 / 27) + Cin)
	Fenol	∆m = 637,2 g/h		0	23,6 ((637,2 / 27) + Cin)
Stripper I	Cálcio	0	77 Injeção de vapor: 10	6,32	6,32
	Sílica	%R = 0		4,21	4,21
	Amônia	%R = 89		7562,07	831,83
	Sulfeto	%R = 99,8		7242,08	14,48
	Cloreto	%R = 0		68,82	68,82
	Cianeto	%R = 99,3		38,55	0,27
	Fenol	%R = 20		135,66	108,53
Stripper II	Cálcio	%R = 0	85 Injeção de vapor: 10	5,32	5,32
	Sílica	%R = 0		3,48	3,48
	Amônia	%R = 63		728,52	269,55
	Sulfeto	%R = 99,7		114,21	0,34
	Cloreto	%R = 0		56,94	56,94
	Cianeto	%R = 50		4,08	2,04
	Fenol	%R = 0		89,76	89,76

Tabela 7.3 – Dados de vazão e concentração de contaminantes dos processos da refinaria (continuação)

Operação	Componente	Parâmetro variacional	Vazão limite (t/h)	Concentração máxima de entrada (mg/L)	Concentração máxima de saída (mg/L)
Drenagem do Tanque de Petróleo	Cálcio	-	8	-	225
	Sílica	-		-	25
	Amônia	-		-	68,80
	Sulfeto	-		-	970,82
	Cloreto	-		-	6500
	Cianeto	-		-	36,51
	Fenol	-		-	39,8
Dessalgadora	Cálcio	-	112	6,11	51,11 (Cin+45)
	Sílica	-		12,89	17,89 (Cin+5)
	Amônia	%R = 60		239,31	95,72
	Sulfeto	%R = 90		34,18	3,42
	Cloreto	-		61,39	1361,39 (Cin+1300)
	Cianeto	-		1,98	3,98 (Cin+2)
	Fenol	%R = 90		73,81	7,38
Pré-Flash	Cálcio	-	8	-	3,6
	Sílica	-		-	1,7
	Amônia	-		-	774
	Sulfeto	-		-	1092,2
	Cloreto	-		-	28,6
	Cianeto	-		-	41,1
	Fenol	-		-	44,8
ETDI	Cálcio	-	414	29,29	79,29 (Cin+50)
	Sílica	%R = 0		17,29	17,29
	Amônia	%R = 97,5		62,44	1,56
	Sulfeto	%R = 99		24,41	0,24
	Cloreto	%R = 90		564,14	56,41
	Cianeto	%R = 90		1,82	0,18
	Fenol	%R = 95		5,98	0,30

Após a consolidação e validação dos valores das correntes definidas no diagrama de blocos através de balanço hídrico, tem início o procedimento para aplicação do DFA visando a geração de cenários para identificação de oportunidades de reutilização de correntes hídricas em operações receptoras de água, em qualidade tolerável para o sistema. Os resultados são obtidos com o auxílio do programa computacional MINEA (SANTOS, 2007; MIRRE, 2007), planilha eletrônica (Microsoft Excel®) na qual o algoritmo DFA encontra-se

implementado; esta plataforma torna a inclusão do procedimento automático mais adequada para processos reais, onde há grande quantidade de dados e a necessidade de agilizar os cálculos.

A seguir, são apresentados e discutidos os resultados obtidos para cada contaminante estudado, atribuindo o julgamento sob a forma de cenários. A Figura 7.2 esquematiza o formato de aplicação da metodologia de busca orientada por filtragem de cenários (já apresentada na Figura 6.4), e voltada para o estudo de caso em análise. Para a análise unicomponente, são adotados os representantes dos componentes de cálcio, sílica, cloretos, cianetos, amônia, sulfetos e fenol. Posteriormente, realiza-se a análise da possibilidade de cenários gerados pela abordagem simultânea de múltiplos contaminantes; desse modo, procura-se complementar o conjunto de oportunidades a serem avaliadas pelo critério que auxilia a tomada de decisão com base na viabilidade técnica e econômica para implementação de cenários promissores.

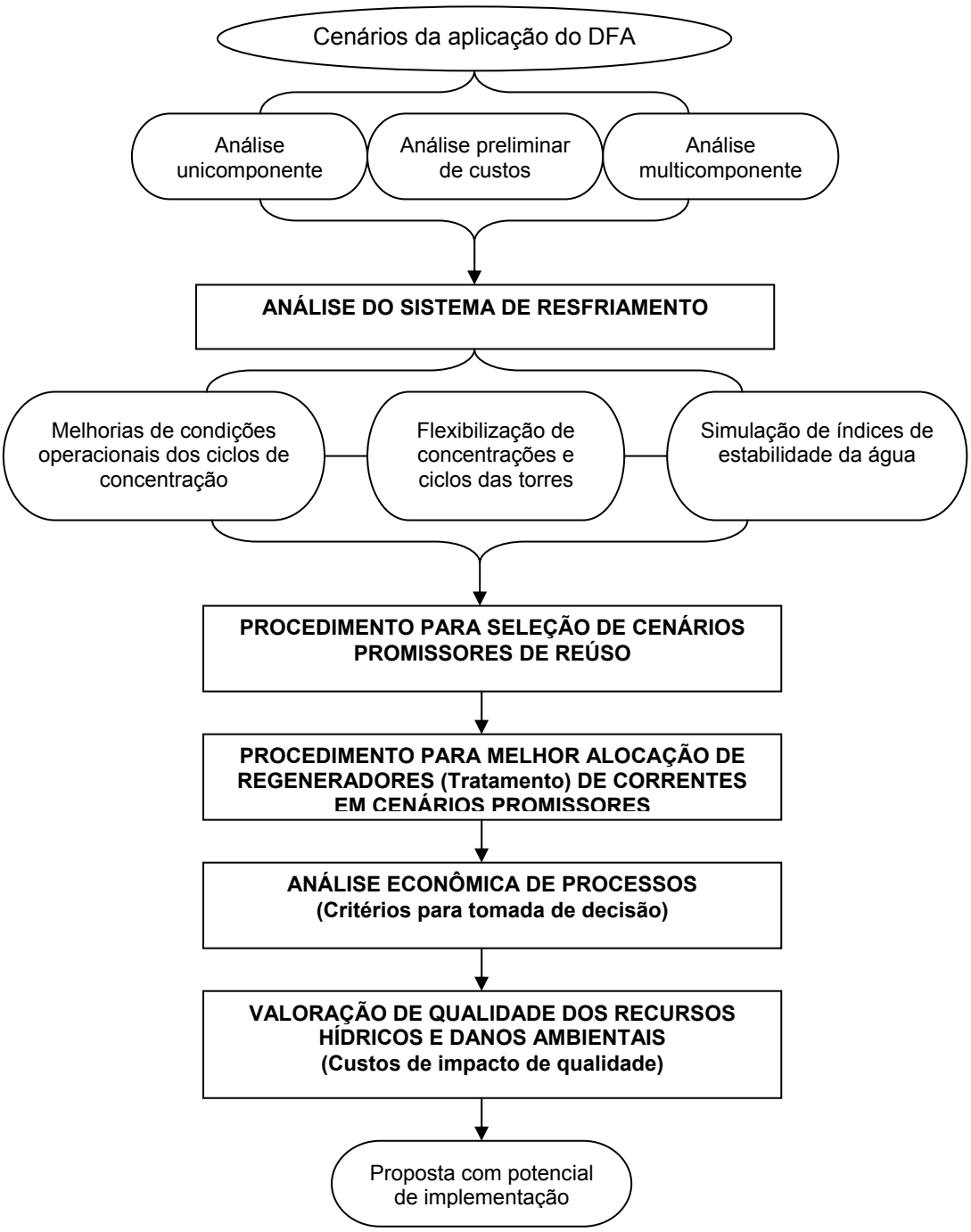


Figura 7.2 – Síntese do esquema relativo à metodologia de busca orientada por filtragem de cenários de reúso, base do modelo P+ÁGUA, voltado para aplicação ao estudo de caso da refinaria

7.2. GERAÇÃO DE CENÁRIOS DE REUTILIZAÇÃO DE CORRENTES PARA MÁXIMO REÚSO – UM CONTAMINANTE

Cenário 1

Neste primeiro cenário, são utilizadas as informações definidas na Tabela 7.3 para preencher os dados necessários de cada operação numerada para a inserção no programa MINEA, para o contaminante representativo de Cálcio, de acordo com a Tabela 7.4, com as fontes externas atribuídas às qualidades de água bruta e desmineralizada. Após inserir as vazões e concentrações de entrada (Cin) e saída (Cout) de cada operação para o referido componente, o programa calcula os valores de carga mássica, de modo a mantê-los fixos para a aplicação do método DFA.

Dentre as operações analisadas, a dessalgadora tem sua fonte resultante dos efluentes da *Stripper* II e da destilação a vácuo, sendo tratada como uma (pseudo-)operação que inicialmente direciona a corrente como afluente da dessalgadora. Para os componentes amônia e sulfeto, que têm seus valores de concentração na saída da operação inferiores aos da entrada (ocorre transferência para a corrente produto), a análise é realizada decompondo a operação em duas: dessalgadora operação e dessalgadora reuso. A primeira tem a concentração de entrada da operação original, enquanto que a concentração de saída foi colocada em valor que inviabilizasse o reúso (acima da maior concentração de saída das demais operações). A segunda tem concentração de entrada nula, enquanto que a saída foi mantida no valor original da operação. Estas medidas garantem que não se tenha um valor negativo relativo à massa do contaminante transferido para o efluente aquoso (Δm), o que compromete a análise do procedimento DFA.

Tabela 7.4 – Dados de entrada para a aplicação do DFA (componente Cálcio)

Operação	Vazão (t/h)	Cin (mg/L)	Cout (mg/L)	Δm (g/h)
OP1 (TR01)	42,00	8,60	55,90	1986,60
OP2 (TR02)	325,00	8,60	66,22	18726,50
OP3 (Purga da ETA)	13,00	14,80	14,80	0,00
OP4 (Uso Geral)	50,00	8,60	8,60	0,00
OP5 (Udasf)	6,00	0,00	9,80	58,80
OP6 (Destilação Atmosférica)	21,00	0,00	4,10	86,10
OP7 (Destilação a Vácuo)	27,00	0,00	8,60	232,20
OP8 (*Stripper* I)	10,00	6,32	6,32	0,00
OP9 (*Stripper* II)	85,00	5,32	5,32	0,00
OP10 (Dessalgadora)	112,00	6,11	51,11	5040,00
OP11 (Fonte Dessalgadora)	112,00	0,00	6,11	684,32
OP12 (Pré-Flash)	8,00	0,00	3,60	28,80
OP13 (Tanque de Petróleo)	8,00	0,00	225,00	1800,00
OP14 (ETDI)	414,00	29,29	79,29	20700,00
Fonte externa				
1 – Água Desmineralizada	264,00	0,00		
2 – Água Bruta	517,00	8,60		

Com os dados da Tabela 7.4, gera-se então o diagrama da rede de transferência de massa pelo método DFA, com as indicações das oportunidades de reúsos de correntes, considerando máximo reúso e análise unicomponente (Cálcio). A estrutura do diagrama elaborado com o auxílio do programa MINEA é apresentada no Apêndice 4. Embora o método aponte para o uso de água desmineralizada (coloração verde) como uma das fontes de reposição na TR02, esta opção não será adotada, preferindo-se manter a fonte de água bruta (coloração rosa) da configuração original, uma vez que tal medida aumentaria o consumo e, consequentemente, o custo relativo à água desmineralizada. Em relação a isso, é oportuno salientar que possa haver casos em que o realinhamento de correntes sugeridas pelo uso do DFA não se torne vantajoso, como na situação mencionada; para o método, pode ser mais cômodo utilizar a corrente de qualidade mais nobre para aplicações menos nobres, de modo a atender aos limites de concentração de contaminantes de modo geral, embora esta premissa não se alinhe aos objetivos do máximo reúso. Assim, a decisão de assumir ou não a mudança estrutural em uma dada corrente de reúso será atribuição do bom senso e da experiência do engenheiro de processo. Embora tal decisão seja condizente com o objetivo do método de não priorizar mudanças fundamentais no processo,

pode levar a violações de máxima concentração de entrada em determinadas operações, quando da realização do balanço hídrico do cenário.

A Figura 7.3 apresenta a nova configuração em relação ao fluxograma inicial, elaborado a partir do diagrama mostrado no Apêndice 4. É importante mencionar que as duas torres de resfriamento (TR01 e TR02) devem ter sua água de reposição mantidas fixas (restrição de vazão), para compensar as perdas existentes, tendo como fonte inicial a de água bruta. A reutilização de correntes para vazões inferiores a 1 t/h é mantida neste trabalho, seguindo o direcionamento inicial sugerido pelo método, sem questionar em um primeiro momento sua viabilidade econômica. Além disso, a análise inicial procura considerar a possibilidade de reciclo proveniente da ETDI. Entretanto, o reciclo de corrente da ETDI deve ser analisado com a devida cautela, uma vez que possui a tendência de concentrar contaminantes que eventualmente podem impactar negativamente a operação, principalmente as bacias das torres de resfriamento. Neste estudo de caso, ressalta-se que o cálcio é concentrado na saída da ETDI; por essa razão, o reúso do efluente da ETDI levaria à necessidade de alocar um processo regenerativo subsequente para o referido componente, mesmo porque nenhuma das operações para as quais são destinadas as correntes provenientes da ETDI atuam na remoção total ou parcial do cálcio. Ainda que o reciclo da ETDI possa proporcionar reduções bastante significativas na captação de água e descarte de efluente, este também poderia acarretar aumento da concentração de cálcio na saída da ETDI, fato que comprometeria a qualidade da água do corpo receptor, com o lançamento do efluente.

Diante disso, este trabalho focaliza tanto a regeneração de correntes dentro do processo hídrico como aquelas oriundas de reciclo da ETDI sobre as demais operações. Assim, é importante salientar que todos os cenários gerados a partir dos diagramas de fontes de água aplicados neste trabalho consideram a possibilidade de utilizar a ETDI como fonte de reciclo, embora o fluxograma das propostas e seus respectivos balanços hídricos sejam apresentados para os cenários em que não se incorpora essa oportunidade na análise (Apêndice 4). Deste modo, todas as propostas levantadas serão qualificadas tanto em termos de redução na vazão quanto em relação aos respectivos custos de captação e descarte.

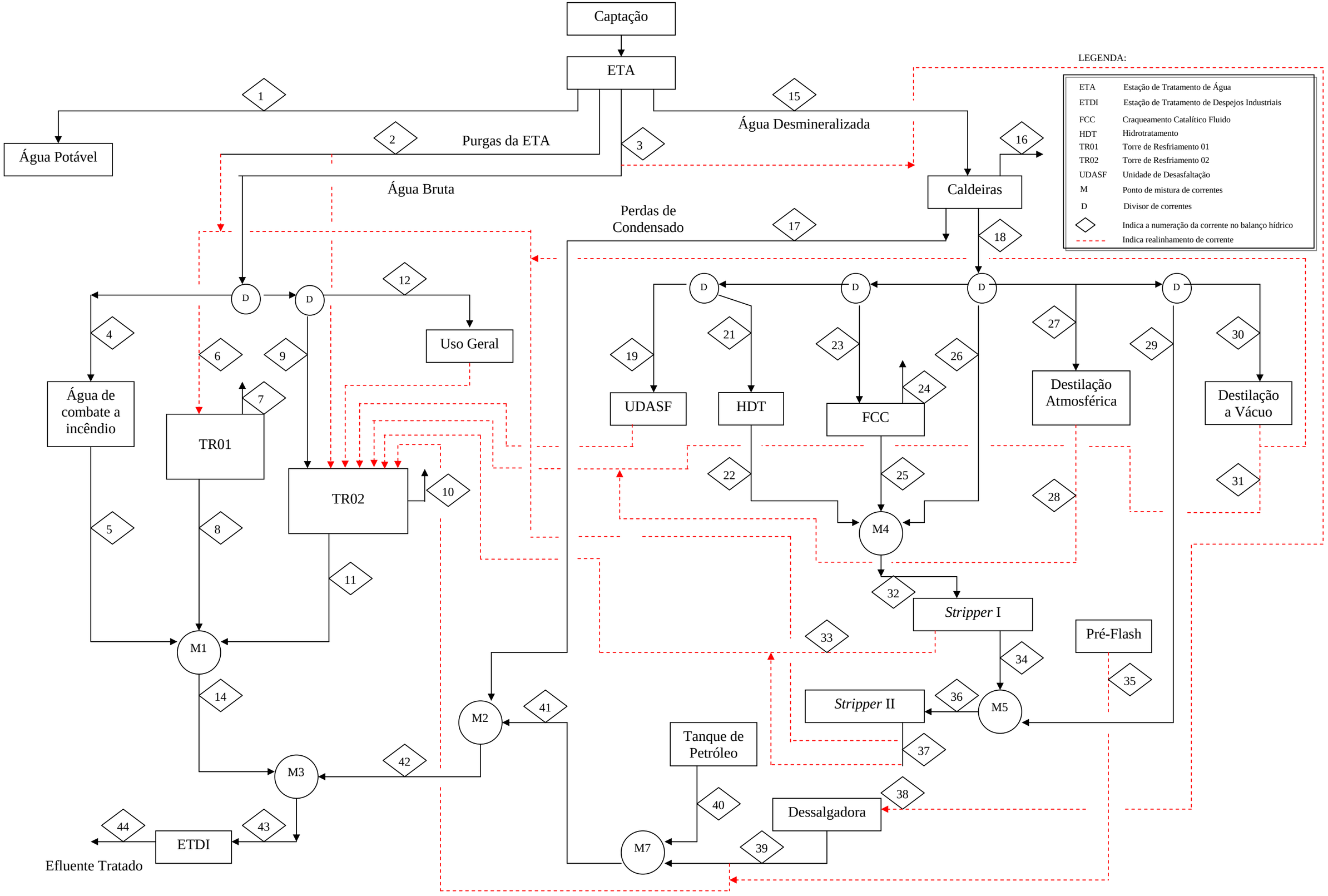


Figura 7.3 – Diagrama de blocos do processo hídrico da refinaria em estudo – Cenário 1: contaminante Cálcio

É bastante oportuno destacar que a metodologia do DFA apresenta como resultado uma configuração inicial das alternativas de reutilização das correntes; a partir desse resultado, pode-se partir para uma evolução da estrutura proposta em função da análise de processos, focada no conhecimento e experiência na planta. Em linhas gerais, o DFA indica um dos caminhos a serem tomados, mas o percurso ideal para cada caso pode ser encontrado através da análise do processo. A sua vantagem está na flexibilidade de cálculos, quanto à economia de tempo e esforço computacional; no entanto, constitui uma valiosa alternativa (e mesmo um suporte inicial) ao uso de métodos de programação matemática, com importante papel na otimização do processo hídrico.

Dentre as proposições estabelecidas para este cenário, tem-se a reutilização de efluentes provenientes da purga da ETA, destilação a vácuo e *Stripper* II, complementando a reposição na TR01; na TR02, provêm os efluentes de purga da ETA, uso geral, Udasf, destilação atmosférica, destilação a vácuo, excedente da *Stripper* I (rejeito de regeneração), *Stripper* II, dessalgadora e pré-flash. Embora oportuno, o uso de água retificada (proveniente da *Stripper* I) pode influenciar na concentração de amônia na torre de resfriamento, o que exigirá um maior consumo de produtos químicos e maior custo de tratamento da água de resfriamento. Apesar disso, a captação total de água, inicialmente de 815 t/h, alcançou, com estas propostas, um valor de 734,32 t/h, o que representa uma redução de 9,90%. O balanço hídrico relativo aos componentes em cada operação do processo, e para cada cenário da categoria b, encontra-se ao final deste trabalho, no Apêndice 4.

Ao se efetuar o balanço material incluindo os demais contaminantes, nota-se que determinados valores de concentrações são ultrapassados para alguns contaminantes nas operações; em um primeiro momento, este fato torna inviável tecnicamente as propostas de reúso apresentadas; no entanto, caso as concentrações do balanço original não sejam expressas como seus valores máximos nas respectivas correntes, pode-se verificar até que ponto os valores excedidos são toleráveis para que se considerem as propostas apresentadas. As violações destes valores que excedem as concentrações tratadas como "limites" na entrada e na saída de cada operação, são sinalizadas em negrito no balanço de contaminantes apresentado no Apêndice 4.

Neste trabalho, as propostas cujas operações ultrapassaram o limite estabelecido pelo balanço original serão julgadas com base nas respectivas eficiências de remoção, utilizando para tanto processos regenerativos, visando a recuperação da qualidade inicial. Este estudo será conduzido de acordo com a metodologia aqui empregada, que selecionará

aquelas propostas inicialmente mais promissoras segundo os critérios preliminares de custos.

Cenário 2

Neste segundo cenário, o componente representativo de sílica é utilizado como base para a geração do DFA. Trata-se de uma proposição alternativa, influenciada pelas características das correntes a partir das concentrações do componente sílica. Os dados de entrada para a aplicação do DFA encontram-se relacionados na Tabela 7.5, tendo como resultados a configuração estrutural do processo hídrico da Figura 7.4. O diagrama de concentrações proveniente da aplicação do DFA encontra-se no Apêndice 4, ao final deste trabalho.

Tabela 7.5 – Dados de entrada para a aplicação do DFA (componente Sílica)

Operação	Vazão (t/h)	Cin (mg/L)	Cout (mg/L)	Δm (g/h)
OP1 (TR01)	42,00	9,40	61,10	2171,40
OP2 (TR02)	325,00	9,40	72,38	20468,50
OP3 (Purga da ETA)	13,00	15,60	15,60	0,00
OP4 (Uso Geral)	50,00	9,40	9,40	0,00
OP5 (Udasf)	6,00	0,00	4,60	27,60
OP6 (Destilação Atmosférica)	21,00	0,00	8,40	176,40
OP7 (Destilação a Vácuo)	27,00	0,00	42,50	1147,50
OP8 (*Stripper* I)	10,00	4,21	4,21	0,00
OP9 (*Stripper* II)	85,00	3,48	3,48	0,00
OP10 (Dessalgadora)	112,00	12,89	17,89	560,00
OP11 (Fonte Dessalgadora)	112,00	0,00	12,89	1443,68
OP12 (Pré-Flash)	8,00	0,00	1,70	13,60
OP13 (Tanque de Petróleo)	8,00	0,00	25,00	200,00
OP14 (ETDI)	414,00	17,29	17,29	0,00
Fonte externa				
1 – Água Desmineralizada	264,00	0,00		
2 – Água Bruta	517,00	9,40		

Para que sejam amplamente testadas as possibilidades que mais se ajustam à típica realidade dos processos, leva-se em conta na análise a oportunidade de inclusão do efluente da ETDI como fonte de reúso para as demais operações. Assim, as configurações que incluem essa possibilidade são divididas neste trabalho em cenários a e b. O cenário a (Figura 7.4) é realizado considerando as correntes provenientes da ETDI, original e

ocasionalmente apontadas pelo DFA, enquanto que o cenário b não inclui tais propostas. O Apêndice 4 apresenta os balanços hídricos dos cenários da categoria b, sem reciclo da ETDI; no entanto, os resultados do balanço global da categoria a são executados a fim de se identificar a captação de água e o descarte de efluente dos respectivos cenários.

Na Figura 7.4, constata-se que a reposição das TR01 e TR02, assim como o afluente da dessalgadora, são os maiores candidatos a receptores de correntes de reúso e/ou reciclo de correntes. Com isso, os efluentes do *Stripper* II, e da destilação a vácuo, são aproveitados para alimentar completamente a reposição da TR01, que deixa de utilizar água bruta; já na TR02, além de água bruta, também são utilizadas as correntes de purgas da ETA (total), uso geral (total), parte do *Stripper* II, da destilação a vácuo, *Stripper* I, pré-flash, destilação atmosférica, e ETDI. Na dessalgadora é destinada água bruta e outra parcela do pré-flash, além do efluente da Udasf (total) e parte da ETDI.

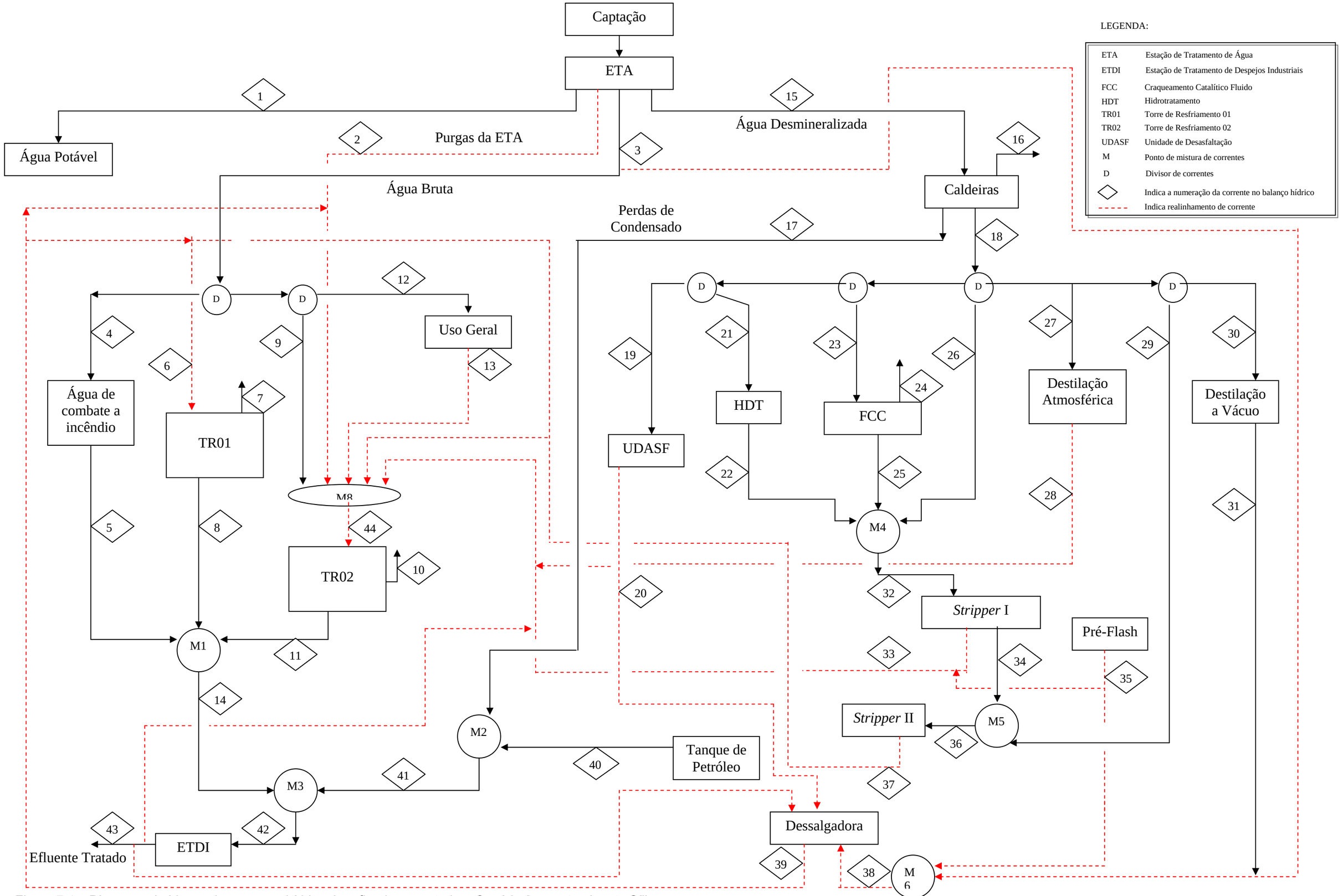


Figura 7.4 – Diagrama de blocos do processo hídrico da refinaria em estudo – Cenário 2a: contaminante Sílica

Com as proposições estabelecidas, tem-se um consumo de 525,39 t/h, o que significa uma redução de 35,53% em relação ao cenário base; a vazão descartada é de 319,06t/h, uma redução alcançada da ordem de 22,93%.

A Figura 7.5 apresenta o fluxograma (diagrama de blocos) do cenário 2b, onde as correntes de reciclo da ETDI são excluídas da análise. Nota-se que neste caso a quantidade de água captada é maior, ou seja, de 653,87 t/h, uma vez que a recirculação de correntes da ETDI, que deixou de ser considerada, provoca menor necessidade de captação; assim, esta redução equivale a 19,77%. Da mesma forma, a vazão de descarte no corpo receptor também é maior que no cenário 2a, passando a ser de 238,61 t/h, uma redução de 42,36%.

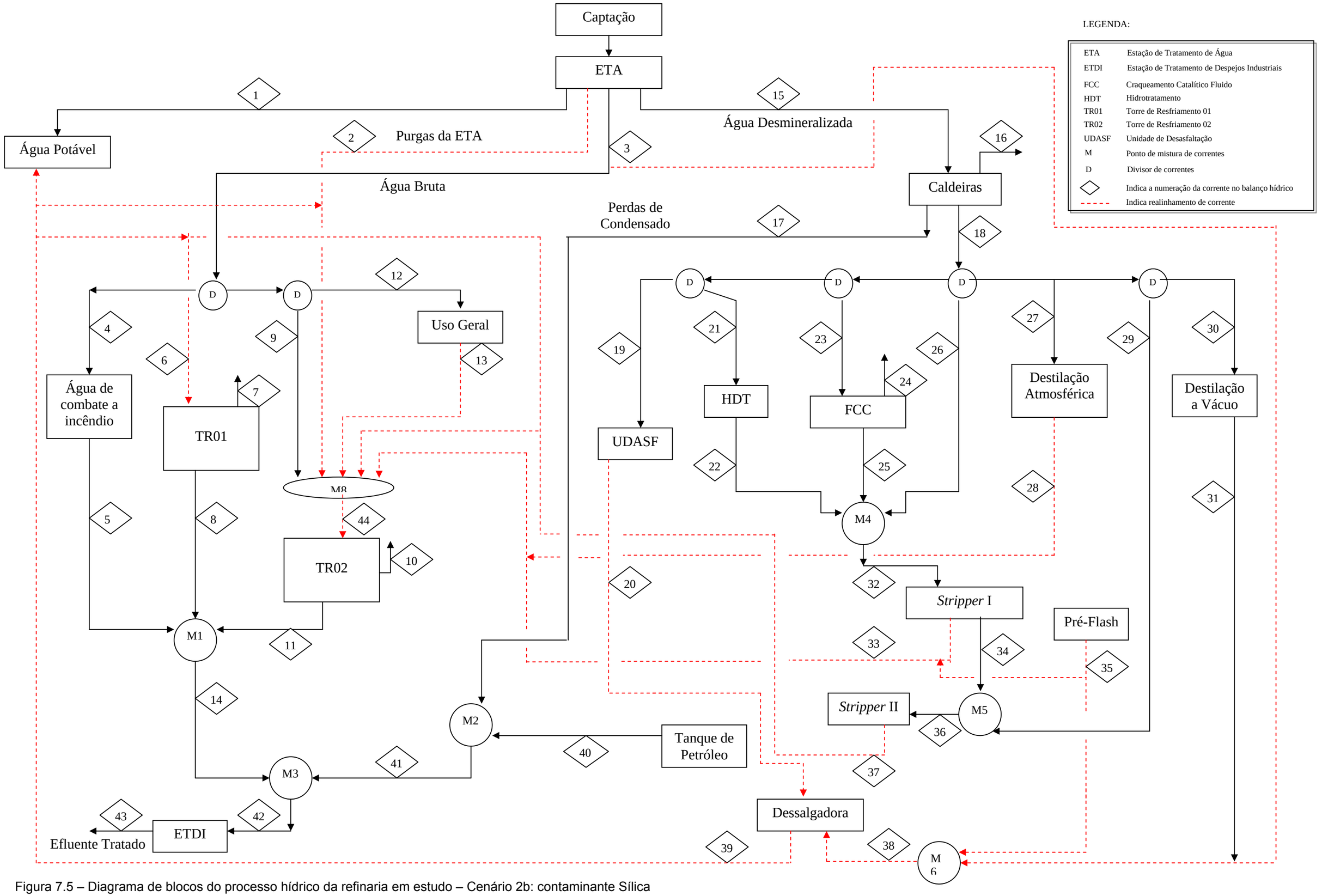


Figura 7.5 – Diagrama de blocos do processo hídrico da refinaria em estudo – Cenário 2b: contaminante Sílica

Cenário 3

Os cenários 3 (a e b) são realizados com base no componente representativo Amônia. A Tabela 7.6 apresenta os dados de entrada para a aplicação do DFA com o auxílio do programa MINEA. Cumpre ressaltar que, nesta análise, a concentração de saída da amônia na dessalgadora sofre decréscimo em relação ao seu valor de entrada, fato que influencia diretamente na inversão da carga mássica de transferência ($\Delta m < 0$). Desse modo, como artifício para a solução deste problema, o qual destitui o sentido conceitual para aplicação do método, opta-se por dividir a operação dessalgadora em três seções: as operações OP10 e OP11, da análise inicial, e OP15, como base alternativa para viabilização do reúso; esta última possui a concentração de entrada igual a zero, e a de saída com o valor efluente da dessalgadora (95,72 mg/L), conforme definido pelo balanço hídrico do processo (Tabela 7.1). Além disso, para evitar uma possível destinação da OP10 como reúso, a concentração de saída nesta operação é levada a um valor alto, como por exemplo, 10.000 mg/L, de modo que sua função se restrinja a assimilar a concentração de entrada na dessalgadora, para este componente.

Tabela 7.6 – Dados de entrada para a aplicação do DFA (componente Amônia)

Operação	Vazão (t/h)	Cin (mg/L)	Cout (mg/L)	Δm (g/h)
OP1 (TR01)	42,00	0,07	61,10	21,00
OP2 (TR02)	325,00	0,07	72,38	162,50
OP3 (Purga da ETA)	13,00	0,36	15,60	0,00
OP4 (Uso Geral)	50,00	0,07	9,40	500,00
OP5 (Udasf)	6,00	0,00	4,60	18,60
OP6 (Destilacão Atmosférica)	21,00	0,00	8,40	4015,20
OP7 (Destilacão a Vácuo)	27,00	0,00	42,50	3890,70
OP8 (*Stripper* I)	10,00	831,83	4,21	0,00
OP9 (*Stripper* II)	85,00	269,55	3,48	0,00
OP10 (Dessalgadora)	112,00	239,31	10000	1093197,28
OP11 (Fonte Dessalgadora)	112,00	0,00	12,89	26802,72
OP12 (Pré-Flash)	8,00	0,00	1,70	6192,00
OP13 (Tanque de Petróleo)	8,00	0,00	25,00	550,40
OP14 (ETDI)	414,00	1,56	17,29	0,00
OP15 (Dessalgadora Reúso)	112,00	0,00	95,72	10720,64
Fonte externa				
1 – Água Desmineralizada	264,00	0,00		
2 – Água Bruta	517,00	0,07		

Com os dados da Tabela 7.6, o método é aplicado para a síntese do fluxograma correspondente às propostas apresentadas para este caso (Figura 7.6). O diagrama de fontes de água que originou esta configuração é apresentado no Apêndice 4.

Como proposições estabelecidas (Figura 7.6), as purgas da ETA podem ser parcialmente destinadas como água de reposição nas torres TR01 e TR02, bem como parte da purga da TR02 pode ser utilizada nas operações de uso geral; além disso, a corrente da ETDI pode ser reciclada para a entrada da dessalgadora, dispensando sua fonte original, que é então encaminhada para o tratamento final (ETDI).

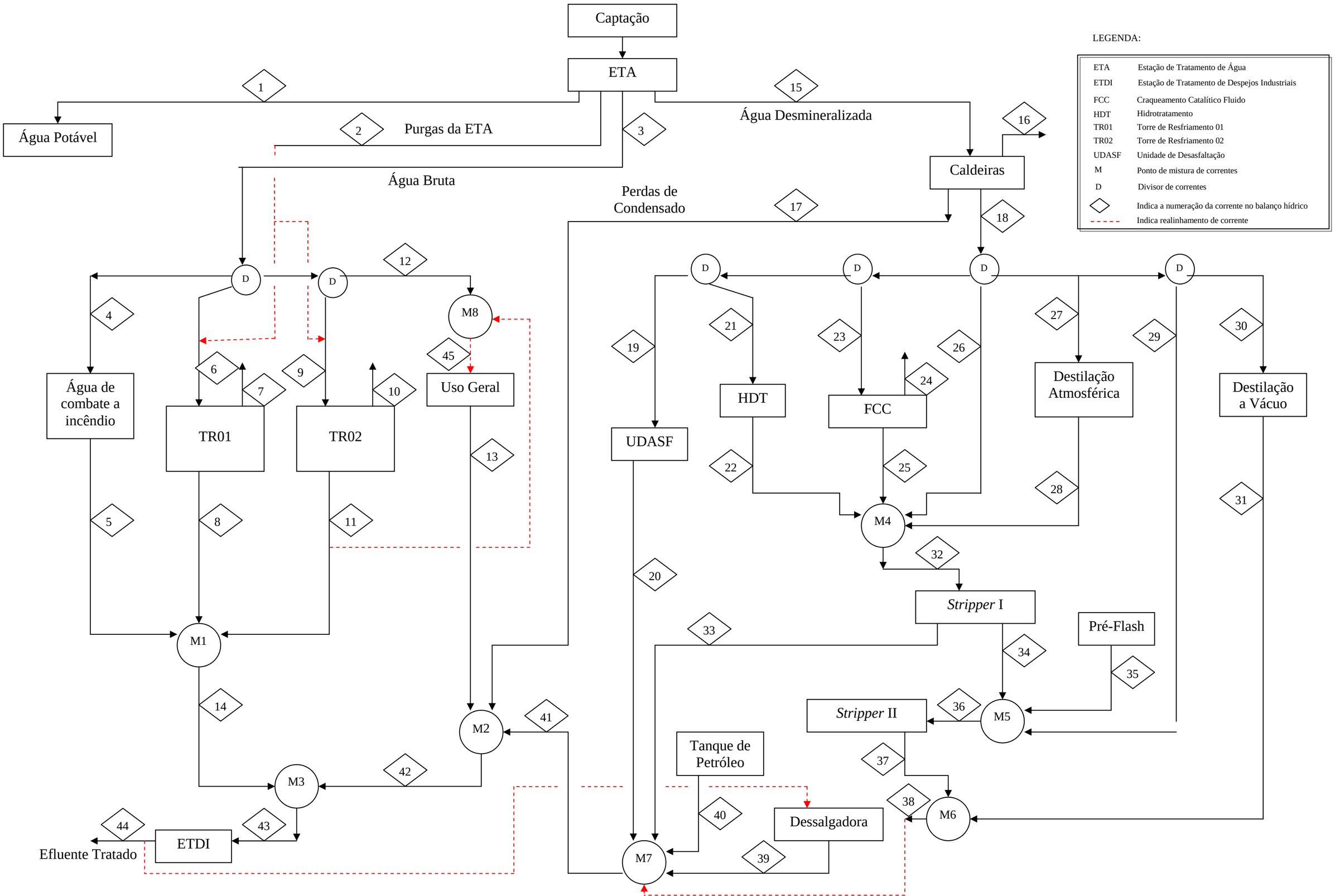


Figura 7.6 – Diagrama de blocos do processo hídrico da refinaria em estudo – Cenário 3a: contaminante Amônia

O cenário 3a indica que a captação de água para o consumo nos processos é de 686,56 t/h, o que equivale a 15,76% de redução em relação à quantidade inicial; já o descarte diminui de 414 t/h para 285,56 t/h, uma redução de 31,02%.

Para o cenário 3b, em que todas as oportunidades de redirecionamento de correntes para reúso são mantidas, com exceção das que envolvem o reciclo parcial ou total da ETDI (Figura 7.7), a captação passa a ser de 795,90 t/h, e o descarte de 394,90 t/h; isto equivale a uma redução de 2,34% na captação, e de 4,61% no descarte, respectivamente.

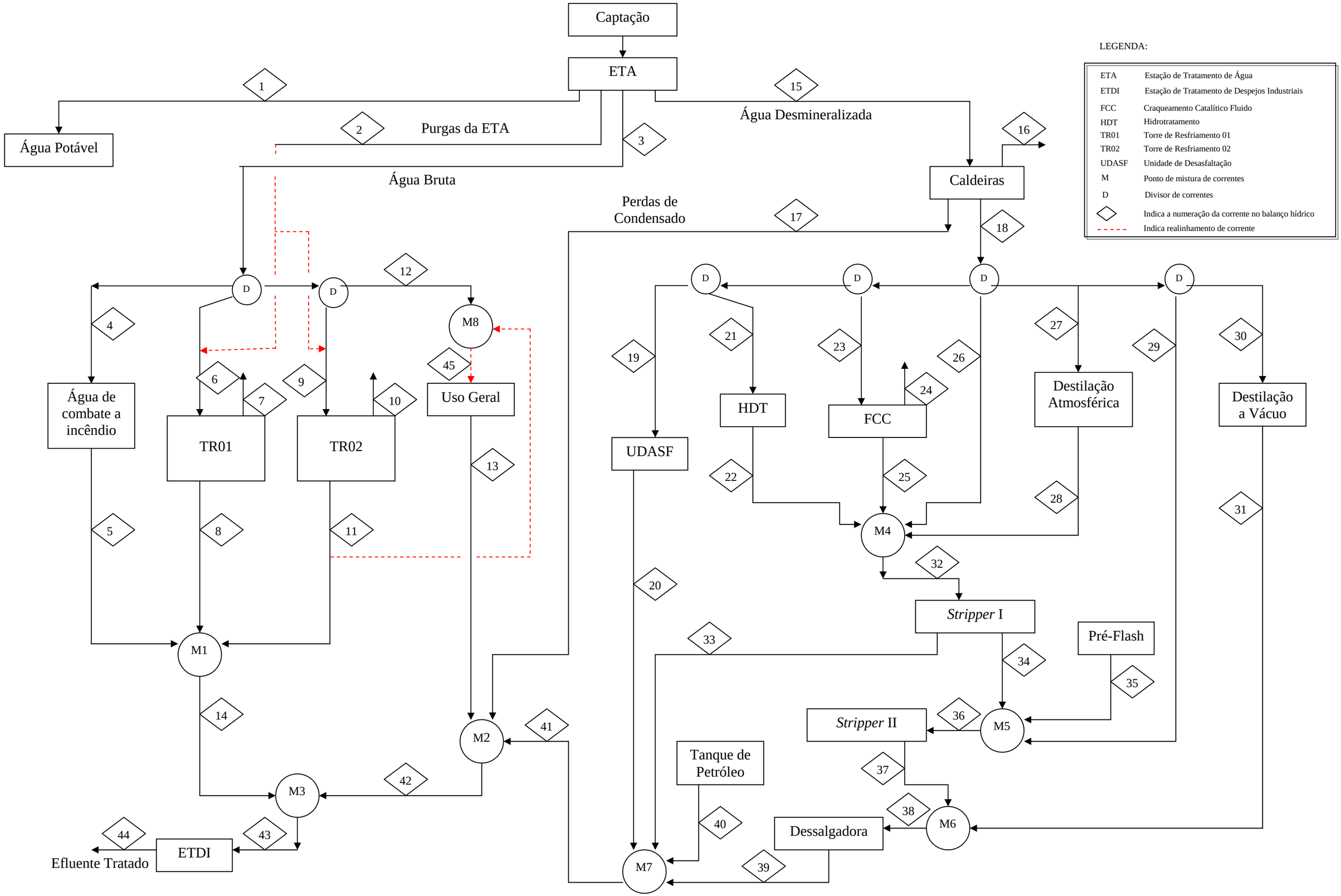


Figura 7.7 – Diagrama de blocos do processo hídrico da refinaria em estudo – Cenário 3b: contaminante Amônia

Cenário 4

Nestes cenários (a e b), procede-se à aplicação do método tendo como base o componente Sulfeto (reportado como H_2S). A Tabela 7.7 relaciona os dados necessários para esta análise. Este componente apresenta sensível decréscimo de concentração na saída das torres de resfriamento, o que, a princípio, estaria relacionado à ocorrência de fenômenos incrustantes no interior do sistema. Analogamente ao componente anterior (Amônia), o sulfeto também tem sua concentração de saída reduzida na dessalgadora, o qual passa da corrente de processo para a corrente de água; por essa razão, a análise é efetuada de modo similar, ou seja, a OP15 corresponde às características da operação que viabiliza o seu reúso, com sua concentração de saída igual a 3,42 mg/L, conforme valor determinado pelo balanço hídrico da Tabela 7.1.

Tabela 7.7 – Dados de entrada para a aplicação do DFA (componente Sulfeto como H_2S)

Operação	Vazão (t/h)	Cin (mg/L)	Cout (mg/L)	Δm (g/h)
OP1 (TR01)	42,00	0,06	0,06	0,00
OP2 (TR02)	325,00	0,06	0,06	0,00
OP3 (Purga da ETA)	13,00	0,32	0,32	0,00
OP4 (Uso Geral)	50,00	0,10	1,10	50,00
OP5 (Udasf)	6,00	0,00	6,30	37,80
OP6 (Destilacão Atmosférica)	21,00	0,00	268,30	5634,30
OP7 (Destilacão a Vácuo)	27,00	0,00	140,70	3798,90
OP8 (*Stripper* I)	10,00	14,48	14,48	0,00
OP9 (*Stripper* II)	85,00	0,34	0,34	0,00
OP10 (Dessalgadora)	112,00	34,18	10000	1116171,84
OP11 (Fonte Dessalgadora)	112,00	0,00	34,18	3828,16
OP12 (Pré-Flash)	8,00	0,00	1092,20	8737,60
OP13 (Tanque de Petróleo)	8,00	0,00	970,82	7766,56
OP14 (ETDI)	414,00	0,24	0,24	0,00
OP15 (Dessalgadora Reúso)	112,00	0,00	3,42	383,04
Fonte externa				
1 – Água Desmineralizada	264,00	0,00		
2 – Água Bruta	517,00	0,10		

A partir da Tabela 7.7, o DFA é então gerado para o componente Sulfeto, sendo o fluxograma correspondente dado pela Figura 7.8. O diagrama de fontes de água é indicado no Apêndice 4.

Dentre as oportunidades identificadas (Figura 7.8), tem-se a purga da TR02 e parte da ETDI sendo destinadas como uso geral, e outra parcela da ETDI reciclada para a entrada da dessalgadora, cuja fonte original deixa de ser utilizada e segue então para a entrada do tratamento final.

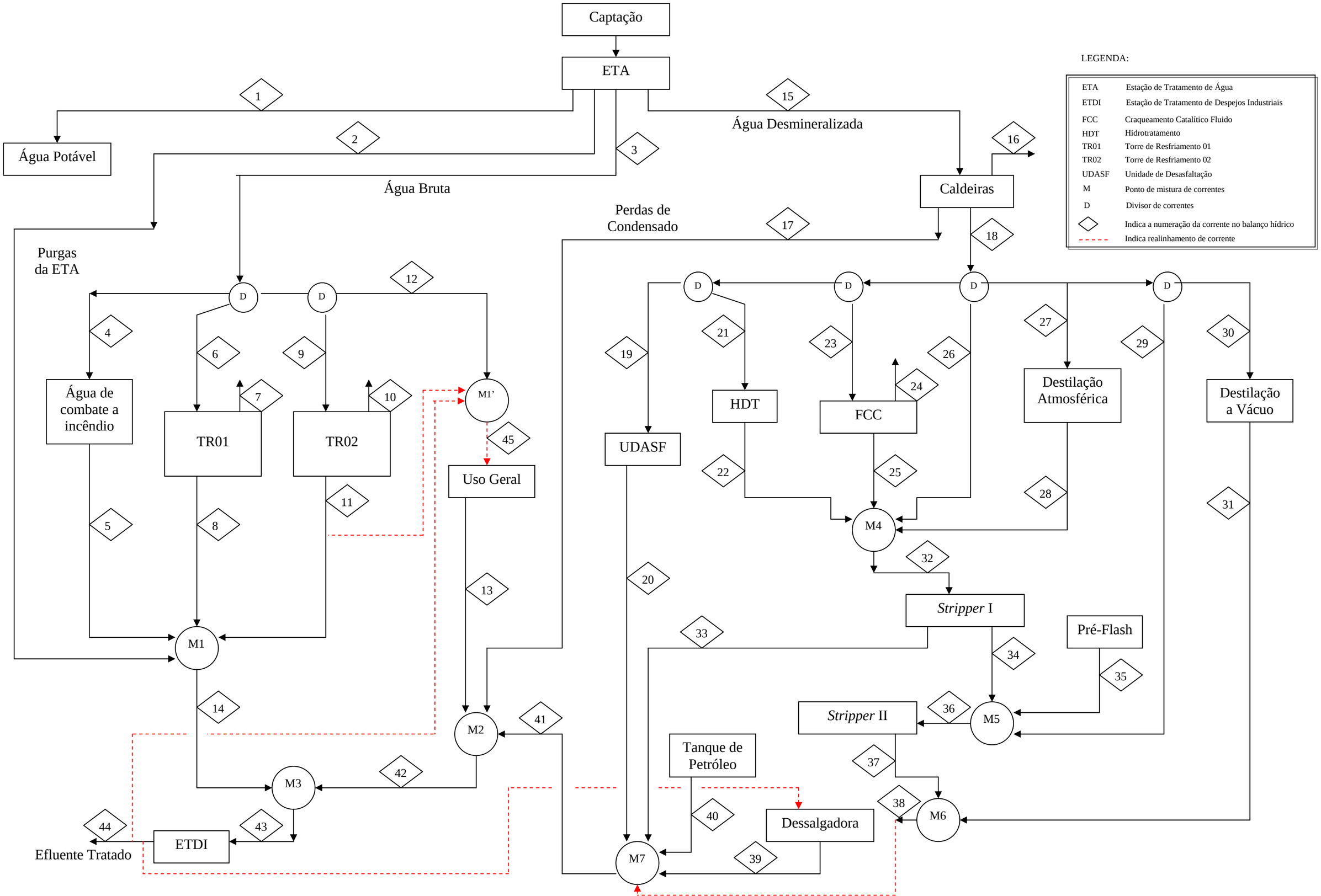


Figura 7.8 – Diagrama de blocos do processo hídrico da refinaria em estudo – Cenário 4a: contaminante Sulfeto

O cenário 4a torna a captação de água equivalente a 653,37 t/h (19,83% de redução), enquanto que o descarte passa a ser de 252,37 t/h (redução de 39,04%). Já para o cenário 4b (Figura 7.9), desconsiderando as parcelas de contribuição da ETDI, a captação passa a ser de 776,10 t/h (4,77% de redução), e o descarte de 375,10 t/h (9,40% de redução).

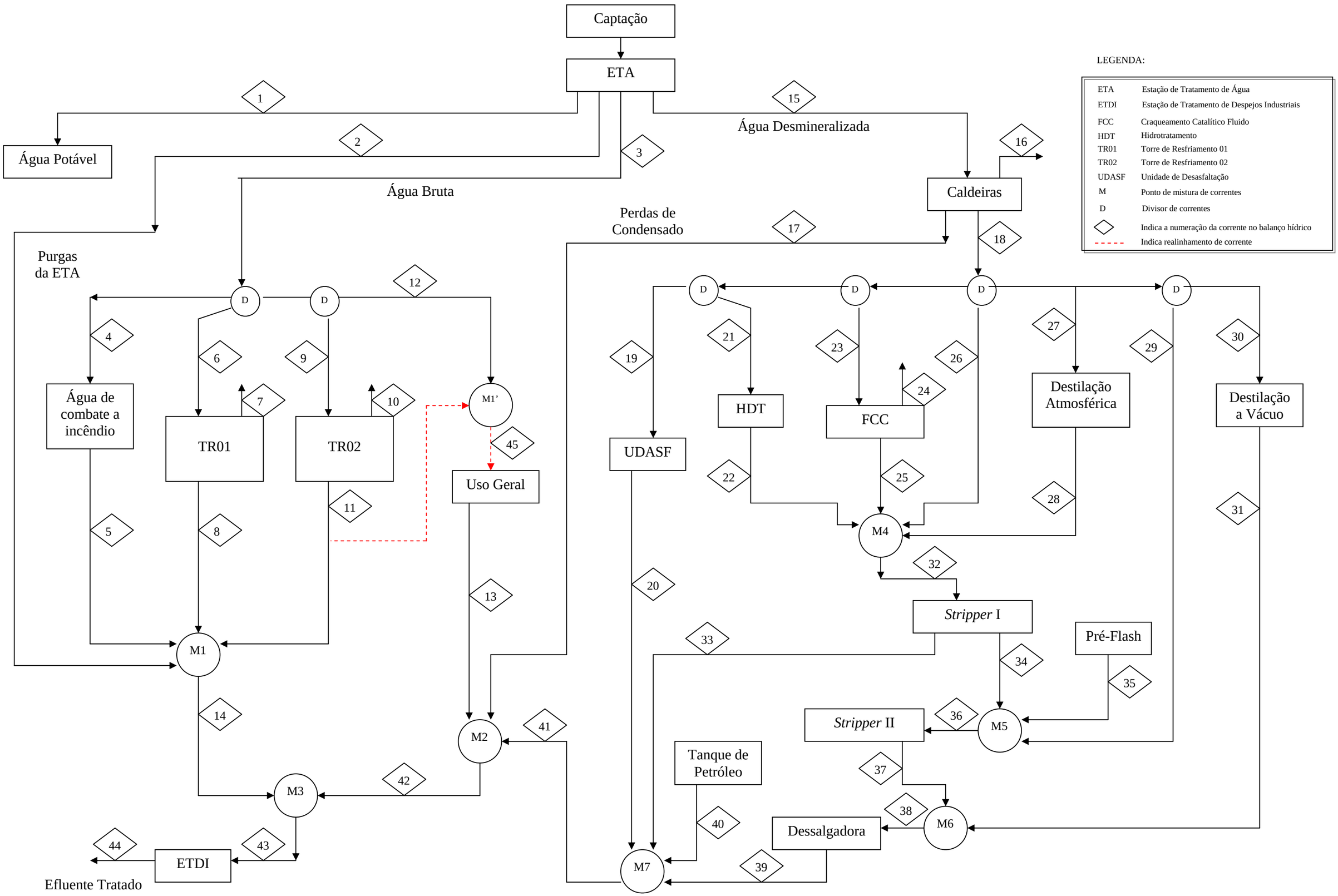


Figura 7.9 – Diagrama de blocos do processo hídrico da refinaria em estudo – Cenário 4b: contaminante Sulfeto

Cenário 5

Os cenários referentes ao componente representativo de Cloreto são realizados com base nos dados da Tabela 7.8. A análise deste cenário é realizada do mesmo modo para o cálcio e a sílica, uma vez que sua concentração não sofre decréscimo em uma dada operação, como a dessalgadora (amônia e sulfeto). Sendo assim, a Figura 7.10 representa a distribuição estrutural (diagrama de blocos) da aplicação do método, para o cenário 5a. O diagrama correspondente encontra-se no Apêndice 4.

Tabela 7.8 – Dados de entrada para a aplicação do DFA (componente Cloreto)

Operação	Vazão (t/h)	Cin (mg/L)	Cout (mg/L)	Δm (g/h)
OP1 (TR01)	42,00	9,70	163,05	6440,70
OP2 (TR02)	325,00	9,70	204,69	63371,75
OP3 (Purga da ETA)	13,00	170,00	170,00	0,00
OP4 (Uso Geral)	50,00	9,70	109,70	5000,00
OP5 (Udasf)	6,00	0,00	3,70	22,20
OP6 (Destilacão Atmosférica)	21,00	0,00	132,70	2786,70
OP7 (Destilacão a Vácuo)	27,00	0,00	75,40	2035,80
OP8 (*Stripper* I)	10,00	68,82	68,82	0,00
OP9 (*Stripper* II)	85,00	56,94	56,94	0,00
OP10 (Dessalgadora)	112,00	61,39	1361,39	145600,00
OP11 (Fonte Dessalgadora)	112,00	0,00	61,39	6875,68
OP12 (Pré-Flash)	8,00	0,00	28,60	228,80
OP13 (Tanque de Petróleo)	8,00	0,00	6500,00	52000,00
OP14 (ETDI)	414,00	56,41	56,41	0,00
Fonte externa				
1 – Água Desmineralizada	264,00	0,00		
2 – Água Bruta	517,00	9,70		

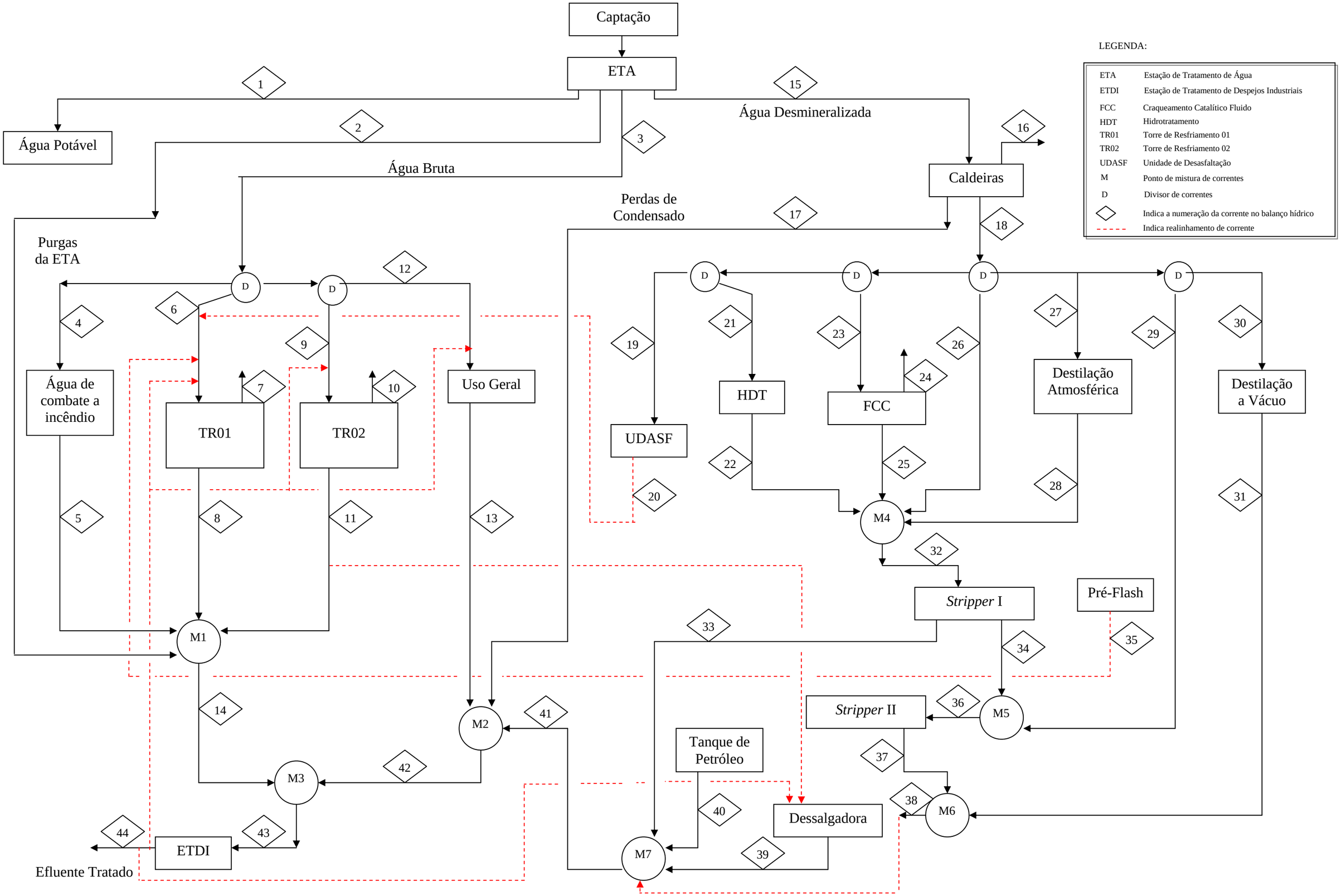


Figura 7.10 – Diagrama de blocos do processo hídrico da refinaria em estudo – Cenário 5a: contaminante Cloreto

Na proposta apresentada pela Figura 7.10 (cenário 5a), a qualidade de água de reposição da TR01, além da água bruta, é constituída pelas correntes oriundas das operações Udasf (total), Pré-flash (total) e ETDI (parcial); já a água de reposição da TR02 compõe-se, além da água bruta, de parte da ETDI. Para uso geral, tem-se água bruta e ETDI (parcial). A purga da TR02 (parte) é encaminhada para a entrada da dessalgadora, em conjunto com uma parcela proveniente da ETDI; com isso, a fonte original da dessalgadora passa a ser enviada para o tratamento final.

A quantidade de água captada neste cenário é de 625,5 t/h, uma redução de 23,25%, para um descarte de 224,5 t/h (45,77% de redução). Em relação ao cenário 5b (Figura 7.11), o consumo passa a ser de 801 t/h (redução de 1,72%), enquanto que o descarte corresponde a 400 t/h (3,38% de redução).

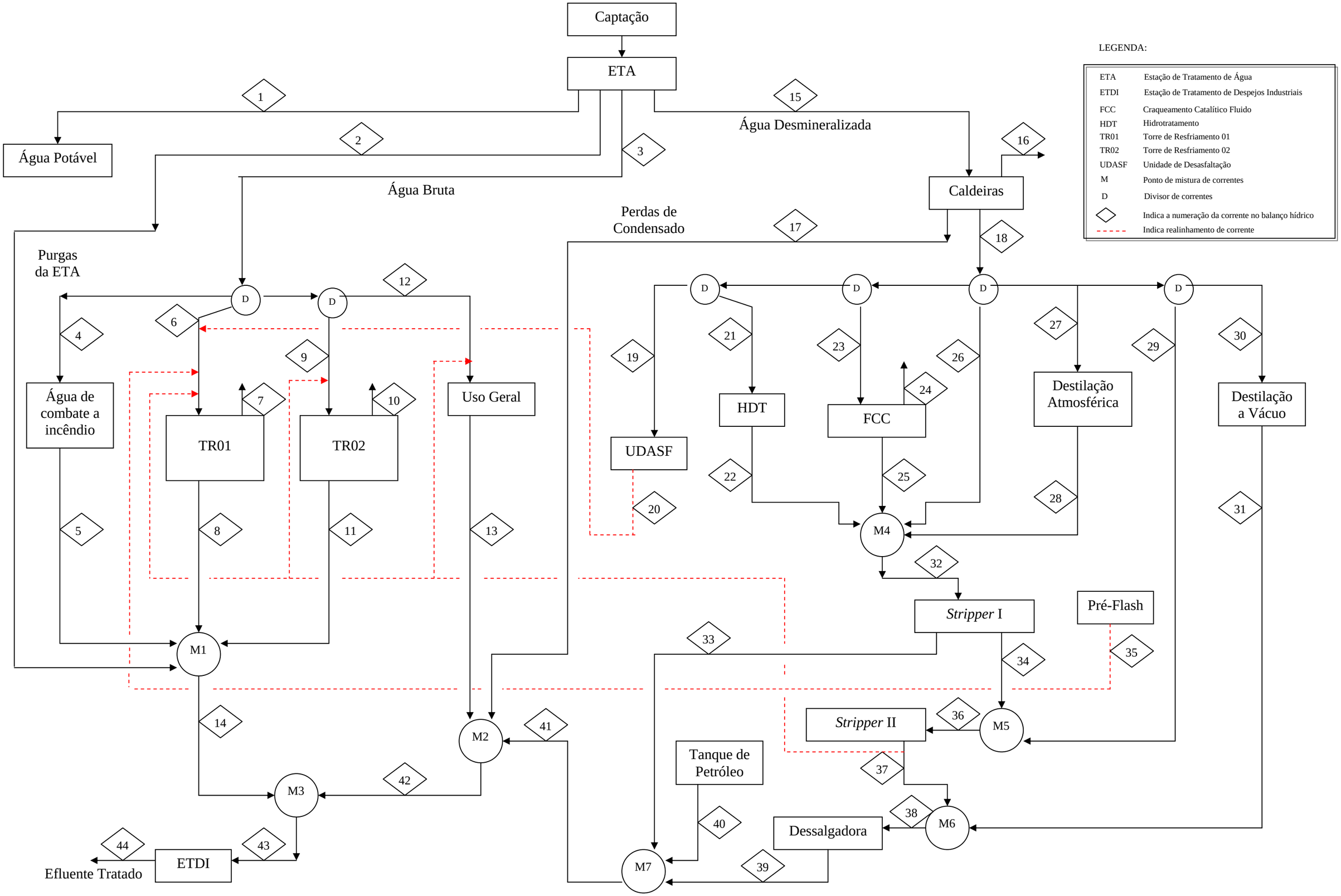


Figura 7.11 – Diagrama de blocos do processo hídrico da refinaria em estudo – Cenário 5b: contaminante Cloreto

Cenário 6

As oportunidades levantadas neste cenário de aplicação do método DFA são realizadas sob a mesma ótica do cenário anterior; assim, os dados relativos ao componente representativo de cianetos são mostrados na Tabela 7.9.

Tabela 7.9 – Dados de entrada para a aplicação do DFA (componente Cianeto)

Operação	Vazão (t/h)	Cin (mg/L)	Cout (mg/L)	Δm (g/h)
OP1 (TR01)	42,00	0,00	2,00	84,00
OP2 (TR02)	325,00	0,00	0,00	0,00
OP3 (Purga da ETA)	13,00	0,00	0,00	0,00
OP4 (Uso Geral)	50,00	0,00	0,00	0,00
OP5 (Udasf)	6,00	0,00	0,10	0,60
OP6 (Destilacão Atmosférica)	21,00	0,00	3,30	69,30
OP7 (Destilacão a Vácuo)	27,00	0,00	1,80	48,60
OP8 (*Stripper* I)	10,00	0,27	0,27	0,00
OP9 (*Stripper* II)	85,00	2,04	2,04	0,00
OP10 (Dessalgadora)	112,00	1,98	3,98	224,00
OP11 (Fonte Dessalgadora)	112,00	0,00	1,98	221,76
OP12 (Pré-Flash)	8,00	0,00	41,10	328,80
OP13 (Tanque de Petróleo)	8,00	0,00	36,51	292,08
OP14 (ETDI)	414,00	0,18	0,18	0,00
Fonte externa				
1 – Água Desmineralizada	264,00	0,00		
2 – Água Bruta	517,00	0,00		

Com a aplicação do DFA, tem-se o fluxograma sintetizado mediante as eventuais oportunidades de realinhamento de correntes sugeridas (Figura 7.12). O esquema em intervalos de concentrações encontra-se no Apêndice 4.

Por ser um componente cujas concentrações são mais restritivas que as dos demais, o cenário 6a apenas indica que parte do efluente tratado da ETDI seja recirculado como afluente total na dessalgadora, cuja corrente de entrada original é canalizada para posterior tratamento na própria ETDI. Esta configuração aponta para um consumo de 756,05 t/h de água captada (redução de 7,23%), e um descarte de 355,05 t/h (14,24% de redução). Por outro lado, como a redestinação de correntes provêm do efluente do tratamento final na

ETDI, o cenário 6b não indica qualquer modificação sobre a estrutura inicial dos processos, não tendo, portanto, redução de consumo e descarte (Figura 7.13).

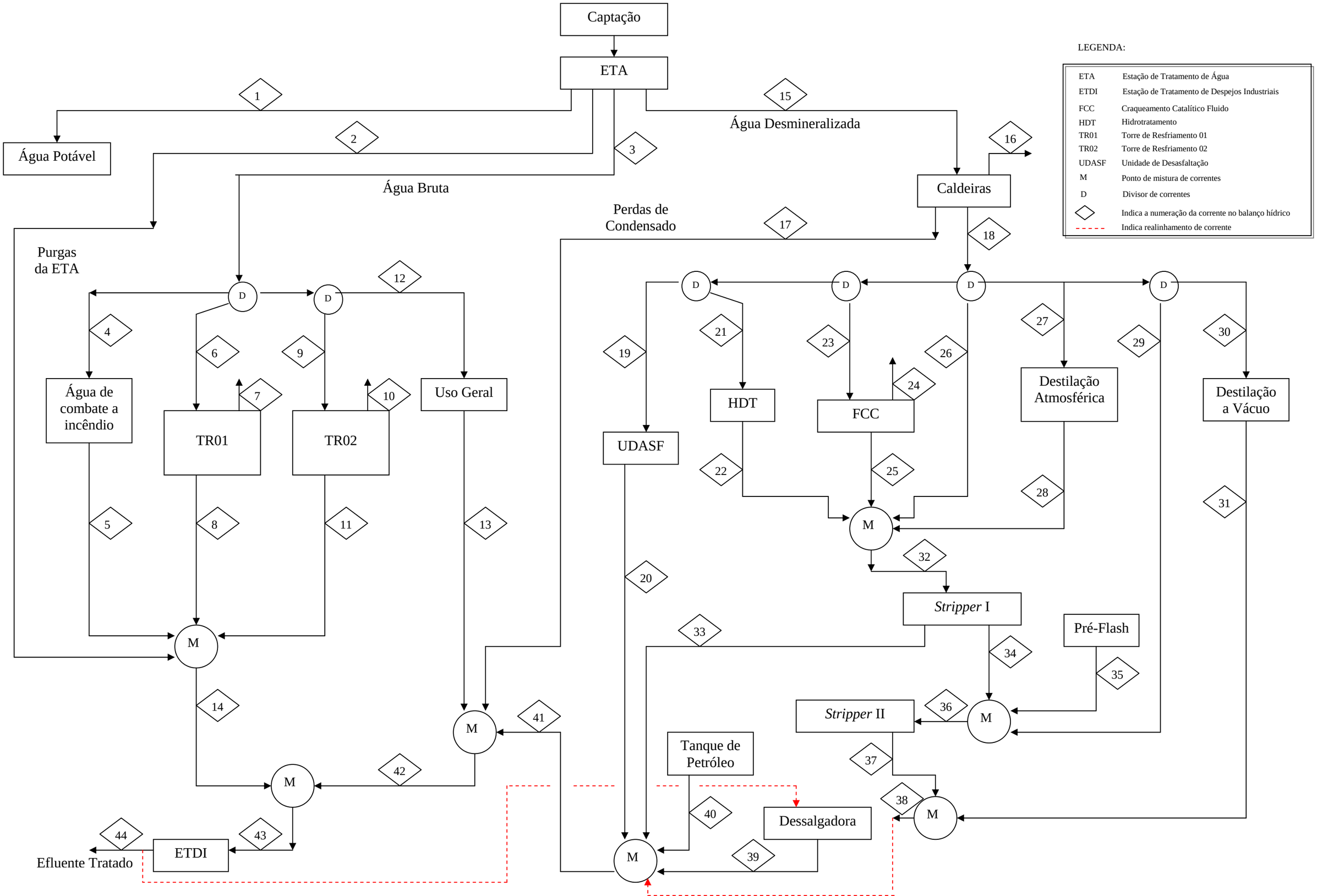


Figura 7.12 – Diagrama de blocos do processo hídrico da refinaria em estudo – Cenário 6a: contaminante Cianeto

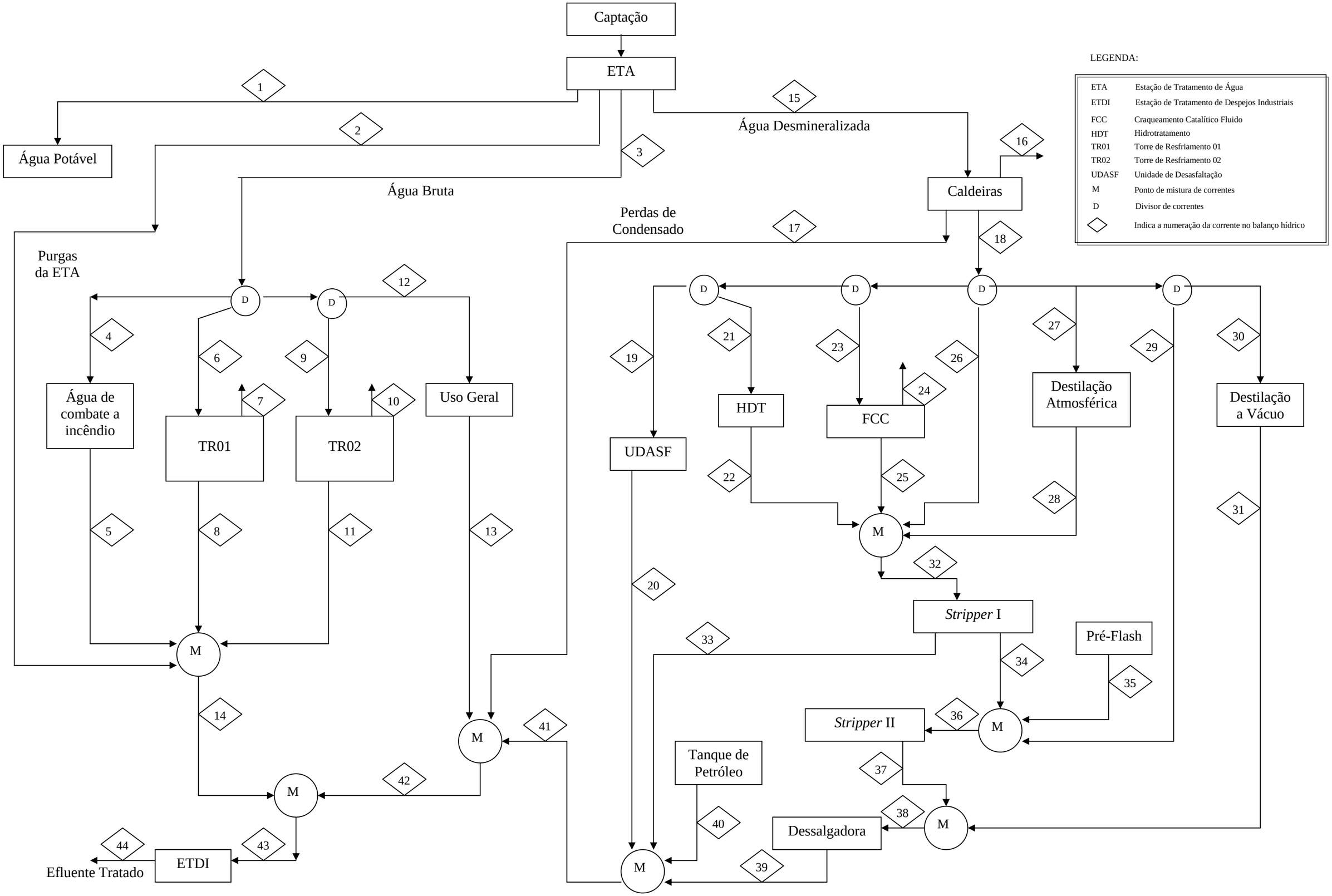


Figura 7.13 – Diagrama de blocos do processo hídrico da refinaria em estudo – Cenário 6b: contaminante Cianeto

Cenário 7

A análise unicomponente é concluída com o levantamento de eventuais oportunidades dirigidas por este cenário, tendo o Fenol como componente representativo. Neste caso, a concentração de saída do fenol na dessalgadora também é reduzida, a exemplo do que ocorre com os componentes Amônia e Sulfeto, sendo necessária a inclusão da operação OP15, que assumirá o valor da concentração de saída (7,38 mg/L) segundo o balanço hídrico dos processos da Tabela 7.1.

Tabela 7.10 – Dados de entrada para a aplicação do DFA (componente Fenol)

Operação	Vazão (t/h)	Cin (mg/L)	Cout (mg/L)	Δm (g/h)
OP1 (TR01)	42,00	0,05	0,13	3,36
OP2 (TR02)	325,00	0,05	0,06	3,25
OP3 (Purga da ETA)	13,00	0,06	0,06	0,00
OP4 (Uso Geral)	50,00	0,05	0,05	0,00
OP5 (Udasf)	6,00	0,00	39,30	235,80
OP6 (Destilacão Atmosférica)	21,00	0,00	113,80	2389,80
OP7 (Destilacão a Vácuo)	27,00	0,00	23,60	637,20
OP8 (*Stripper* I)	10,00	108,53	108,53	0,00
OP9 (*Stripper* II)	85,00	89,76	89,76	0,00
OP10 (Dessalgadora)	112,00	73,81	10000	1111733,28
OP11 (Fonte Dessalgadora)	112,00	0,00	73,81	8266,72
OP12 (Pré-Flash)	8,00	0,00	44,80	358,40
OP13 (Tanque de Petróleo)	8,00	0,00	39,80	318,40
OP14 (ETDI)	414,00	0,30	0,30	0,00
OP15 (Dessalgadora Reúso)	112,00	0,00	7,38	826,56
Fonte externa				
1 – Água Desmineralizada	264,00	0,00		
2 – Água Bruta	517,00	0,05		

Ao se aplicar o procedimento DFA, têm-se as propostas representadas pelo fluxograma elaborado na Figura 7.14. O respectivo diagrama encontra-se no Apêndice 4. Assim, parte do efluente de uso geral é enviado para a reposição da TR01, em complemento à água bruta utilizada, e o restante da vazão é destinado como reposição da TR02, em complemento à água bruta. Além disso, parte do efluente tratado da ETDI é

encaminhada como reciclo como afluente total na dessalgadora, que deixa de utilizar sua fonte original, direcionada para posterior tratamento na própria ETDI.

A configuração do cenário 7a revela um consumo de 653,82 t/h de água captada (redução de 19,77%), e um descarte de 252,82 t/h (38,93% de redução). Em relação ao cenário 7b (Figura 7.15), o consumo de água captada passa a ser de 765 t/h (6,14% de redução), enquanto que o descarte fica em 364 t/h (12,08% de redução).

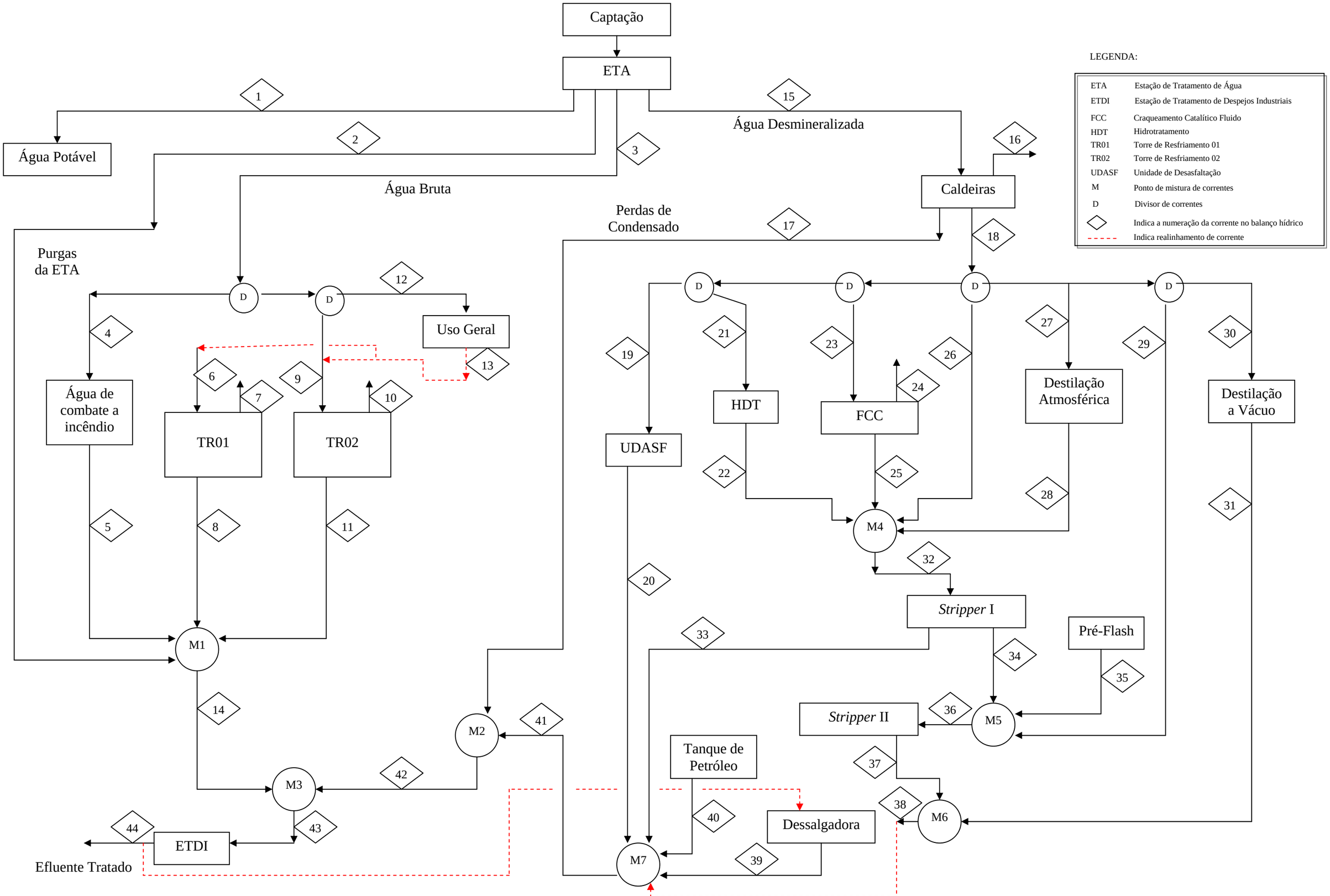


Figura 7.14 – Diagrama de blocos do processo hídrico da refinaria em estudo – Cenário 7a: contaminante Fenol

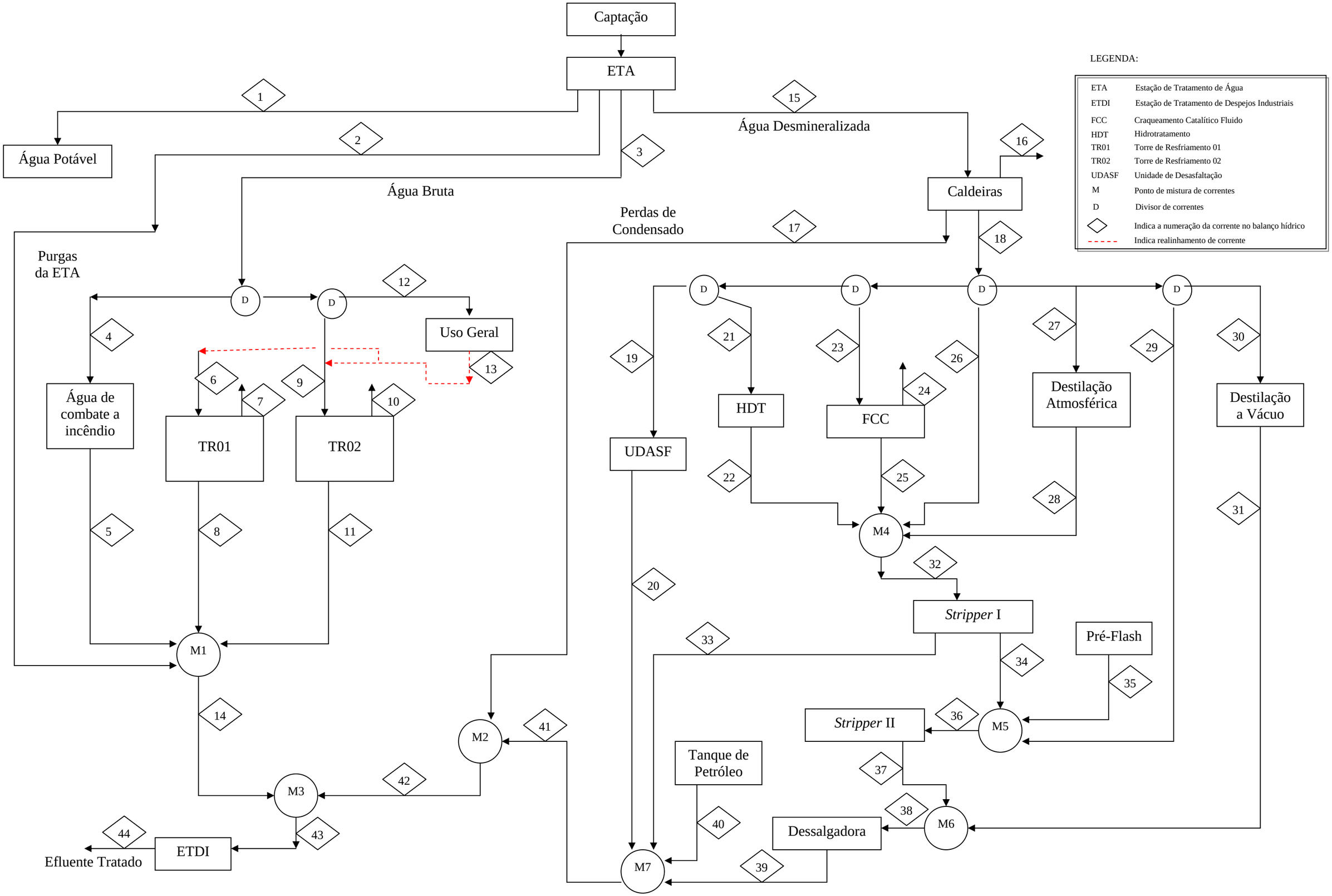


Figura 7.15 – Diagrama de blocos do processo hídrico da refinaria em estudo – Cenário 7b: contaminante Fenol

Custos para cenários de reutilização de correntes – sistemas unicomponentes

Em problemas que envolvem sistemas hídricos é bastante comum avaliar o desempenho dos processos com base em critérios como a minimização da captação de água limpa (na qualidade de água bruta), de descarte de efluentes, da carga de contaminantes do efluente final, ou a minimização do efluente destinado ao tratamento. Paralelamente, os critérios econômicos assumem, em muitos casos, a importante tarefa de selecionar a melhor (ou talvez, a mais adequada) alternativa, dentre um número enorme de possibilidades. Neste sentido, a atratividade econômica proporcionada por um empreendimento é um fator que seguramente contribui para nortear a seleção técnica ou mesmo decidir sobre a continuidade das análises subsequentes de uma determinada proposta.

Com a finalidade de mensurar o desempenho das redes propostas com o procedimento DFA, são utilizados dois índices de mérito: a minimização do consumo de água e a redução nos custos totais, em base anual, para cada cenário de reutilização. Aos cenários obtidos para sistemas unicomponentes são aplicadas à quantificação dos custos relativos à água utilizada nos processos, em relação ao cenário base (processo original). A formulação dos custos segue a estrutura definida pela Equação 6.42, conforme apresentada pelo Quadro 7.1. A parcela referente ao custo de regeneração para reúso ainda não é acrescentada, uma vez que sua necessidade será avaliada em etapas posteriores de refinamento dos cenários promissores.

Quadro 7.1 – Formulação dos componentes dos custos da água para avaliação dos cenários de reúso

CUSTOS	TARIFA (US$/m³)	FORMULAÇÃO
(1) CUSTOS COM CAPTAÇÃO (C_{CAP}) E CONSUMO (C_{CON})		
Custo de captação de água bruta (US$/h)	T1 = 0,03	T1 *x* vazão de água bruta (m³/h)
Custo de consumo de água (US$/h)	T2 = 0,06	T2 *x* (vazão de água captada – vazão de efluente final descartado)
(2) CUSTOS COM TRATAMENTO DE ÁGUA (C_{TRATA})		
Custo de tratamento para obtenção de água bruta (US$/h)	T3 = 0,29	T3 *x* vazão de água bruta
Custo de tratamento para obtenção de água desmineralizada (US$/h)	T4 = 0,35	T4 *x* vazão de água desmineralizada
(3) CUSTOS COM TRATAMENTO DE EFLUENTES (C_{TRATE})		
Custo de tratamento de efluentes (US$/h)	T5 = 0,60	T5 *x* vazão de efluente para a ETDI
Custo de descarte de efluente final (C_{DESCE}) (US$/h)	T6 = 0,01	T6 *x* vazão de descarte do efluente final
(4) TAXA DE OUTORGA DA ANA (TXO)	T7 = 0,25 (R$/ m³)	T7 *x* vazão de água captada
(5) CUSTO TOTAL DA ÁGUA (CA) (R$/ano)		{[(1)+(2)+(3)] *x* 8600 h/ano} *x* 1,5985 R$/US$ + [(4) *x* 8600 h/ano]

O custo operacional de tratamento da água (ETA) corresponde a 0,67 US$/m³, sendo composto pelas parcelas referentes à: (i) captação/adução de água bruta (0,03 US$/m³), (ii) clarificação de água bruta (0,04 US$/m³), (iii) filtração em filtro de areia (0,04 US$/m³), (iv) filtração em carvão ativado (0,04 US$/m³), (v) potabilização (0,02 US$/m³), (vi) desmineralização (0,35 US$/m³) e (vii) polimento de condensado (0,15 US$/m³) (AZEVEDO *et al.*, 1999). Para efeito de cálculo dos cenários e pela natureza do fluxograma original, considera-se que o custo de tratamento para obtenção da corrente de "água bruta" utilizada nas TR's, água de incêndio e uso geral seja dado pelo somatório das contribuições dos itens (ii), (iii), (iv), (v) e (vii), ou seja, 0,29 US$/m³. O custo operacional para o tratamento de efluentes (ETDI) corresponde a 0,60 US$/m³ (AZEVEDO *et al.*, 1999), enquanto que o valor relativo ao descarte do efluente final no corpo receptor é de 0,01 US$/$m^3$. Admite-se ainda que o sistema opere durante 8.600h ao longo do ano. O consumo de água também é um parâmetro a ser incorporado no custo, cuja tarifa adotada neste trabalho é de 0,06 US$/$m^3$.

Além disso, sobre a quantidade captada de água incide a taxa de outorga (direito de uso) praticada pela Agência Nacional de Águas (ANA), cujo valor aqui considerado é de (0,25 R$/m^3) (TEIXEIRA, 2006).

A conversão de valores monetários utiliza a equivalência de US$ 1,00 a R$ 1,5985, obtida pela média histórica do câmbio entre os valores de compra e venda do dólar comercial, no período de 30/03/2011 a 30/05/2011 (BM&FBOVESPA, 2011). Embora não tenha sido adotada aqui, a teoria da paridade relativa do poder de compra pode ser considerada na determinação da taxa de câmbio real no Brasil por meio da correção pelas taxas de inflação brasileira e norte-americana (OLIVEIRA e PACHECO, 2011, p. 73).

Os valores para cada cenário levantado encontram-se relacionados na Tabela 7.11.

Tabela 7.11 – Síntese da redução na captação de água bruta e geração de efluente, com as respectivas estimativas de custos para cada cenário, em relação ao cenário base

Cenário	Captação total (t/h)	Água bruta (t/h)	Água Desmine-ralizada (t/h)	Descarte total (t/h)	Captação reduzida (%)	Custo total operacional ($/ano)	Redução nos custos (%)
Base	815	517	264	414	-	9.222.149,20	-
(1)	734,32	377,45	322,87	319,06	9,90	7.957.948,29	13,71
(2a)	525,39	250,41	240,98	110,13	35,53	5.829.811,35	36,78
(2b)	653,87	297	322,87	238,61	19,77	6.756.443,39	26,74
(3a)	686,56	497,9	154,66	282,9	15,76	8.117.429,74	11,98
(3b)	795,9	497,9	264	394,9	2,34	8.936.894,46	3,09
(4a)	653,37	466,99	152,38	252,37	19,83	7.728.478,86	16,20
(4b)	776,1	478,1	264	375,1	4,77	8.641.185,36	6,30
(5a)	625,5	435,74	155,76	224,5	23,25	7.750.294,49	15,96
(5b)	801	503	264	400	1,72	9.013.061,96	2,27
(6a)	756,05	517	205,05	355,05	7,23	8.779.354,00	4,80
(6b)	815	517	264	414	0	9.222.149,20	0
(7a)	653,82	467	264	252,82	19,77	8.175.235,94	11,35
(7b)	765	467	264	364	6,14	8.475.409,05	8,10

É importante salientar que a possibilidade de mudança de realinhamento do processo, e custos adicionais com tubulações e sistema de bombeamento exerce grande influência na seleção das alternativas promissoras, principalmente quando se pretende uma análise detalhada para posterior implementação. Diante disso, não se pode afirmar que estes apresentam custo-benefício vantajoso; ao invés disso, sugerem que a queda dos custos anuais com a água na indústria vem acompanhada de ganhos ambientais notáveis. A Tabela 7.11 também revela a diminuição da quantidade da vazão do descarte da água

devido à sua reutilização; isso contribui para salientar que o reúso, ao provocar uma queda direta no descarte, ameniza os impactos sobre o corpo receptor. Naturalmente, os impactos ambientais são inerentes ao processo de descarte, embora o consumo de água também esteja ligado aos aspectos de disponibilidade hídrica para usos mais prioritários, como o abastecimento público.

7.3. ESTUDO DE MELHORIAS DE CONDIÇÕES OPERACIONAIS DOS CICLOS DE CONCENTRAÇÃO DAS TORRES DE RESFRIAMENTO

O bom desempenho das torres de resfriamento está intimamente ligado a critérios de segurança operacional, os quais são influenciados pelo ciclo de concentração. Em virtude disso, é recomendável operar com ciclos menores que os permitidos pelos sistemas de tratamento. Como a concentração de sais na torre deve ter seus limites máximos definidos, é possível avaliar o número de ciclos de concentração com base na qualidade da água de reposição. Com isso, pode-se realizar um estudo mais detalhado das condições operacionais dos ciclos de concentração, possibilitando identificar limites para os quais o DFA pode ser aplicado, em situações de máximo reúso. Esta análise é importante na medida em que se torna necessário conhecer convenientemente as características de operabilidade do sistema de resfriamento, pois sendo este um grande consumidor de água nos processos da refinaria também se coloca como candidato imprescindível à recepção de correntes de reúso. Assim, a análise deste sistema é realizada com base no trabalho de Azevedo *et al.* (1999).

A Tabela 7.12 relaciona os limites teóricos de contaminantes nas torres de resfriamento TR01 e TR02, em função da qualidade de reposição. Os valores das correntes são dados a partir do cenário base dos processos da refinaria; os limites são obtidos do estudo de Azevedo *et al.* (1999). Neste caso, pode-se calcular o aumento no número de ciclos, ou seja, o número de vezes que ocorre a recirculação da água através do sistema, em relação ao valor atual, como uma razão entre o limite máximo teórico e o valor máximo atual. Para um limite máximo de 150 mg/L de sílica (valor limite recomendado para a operação na torre), o aumento permitido fica em torno de 16 ciclos.

Tabela 7.12 – Limites teóricos de contaminantes nas torres de resfriamento, a partir do cenário base

TAG	TR01		TR02			TR01	TR02
Número da corrente	6	8	9	11			
Qualidade da corrente	Reposição	Purga	Reposição	Purga	Limites para TR (AZEVEDO *et al.*, 1999)	Aumento no número de ciclos (n° de vezes em relação ao atual)	
Vazão (t/h)	42	5	325	40			
Concentração (mg/L)							
Cálcio	8,6	55,90	8,6	66,22	1500 50 (recomendado)	174,4 5,8	174,4 5,8
Sílica	9,4	61,10	9,4	72,38	150 (recomendado) 300 (máximo)	16 31,9	16 31,9
Amônia	0,07	0,57	0,07	0,57	10-25 (Aminas) 1,0 (máximo recomendado N-NH_3)	142,9-357 (máximo) 14,3	142,9-357 (máximo) 14,3
Sulfeto	0,1	0,06	0,1	0,06	10	100	100
Cloreto	9,7	163,05	9,7	204,69	5000 300 (máximo recomendado)	515,5 30,9	515,5 30,9
Cianeto	0	2	0	0	10	-	-
Fenol	0,05	0,13	0,05	0,06	5-20	100-400	100-400

O cálculo do ciclo de concentração atual (CC_{atual}) pode ser obtido com base no componente representativo de sílica (SiO_2), para as TR01 e TR02, e definido como a razão entre a concentração de sílica na água da torre (purga) (Cp_{Si}) e a concentração de sílica na água de reposição (Cr_{Si}), conforme a Equação 7.1. Assim, para a TR01, o ciclo atual é de 6,5 ((61,10 mg/L) / (9,4 mg/L)), enquanto a TR02 apresenta o parâmetro correspondente a 7,7 ((72,38 mg/L / 9,4 mg/L)).

$$CC_{atual} = \frac{Cp_{Si}}{Cr_{Si}} \tag{7.1}$$

Com o valor do ciclo de concentração atual, pode-se estimar a concentração de um dado componente i na água de reposição (Cr_i), por meio da razão entre a concentração do

componente i na purga (Cp_i) e o ciclo de concentração atual, para cada torre de resfriamento, conforme mostrado na Equação 7.2.

$$Cr_i = \frac{Cp_i}{CC_{atual}} \tag{7.2}$$

O valor da concentração estimada do componente i pode ser limitado pelo ciclo máximo permitido. Neste caso, embora o ciclo máximo encontrado seja de 16, considerado elevado para operações em sistemas de resfriamento de refinarias, este valor será adotado como forma de avaliar a faixa de aplicabilidade das propostas de reúso estabelecidas pela ferramenta DFA (Equação 7.3).

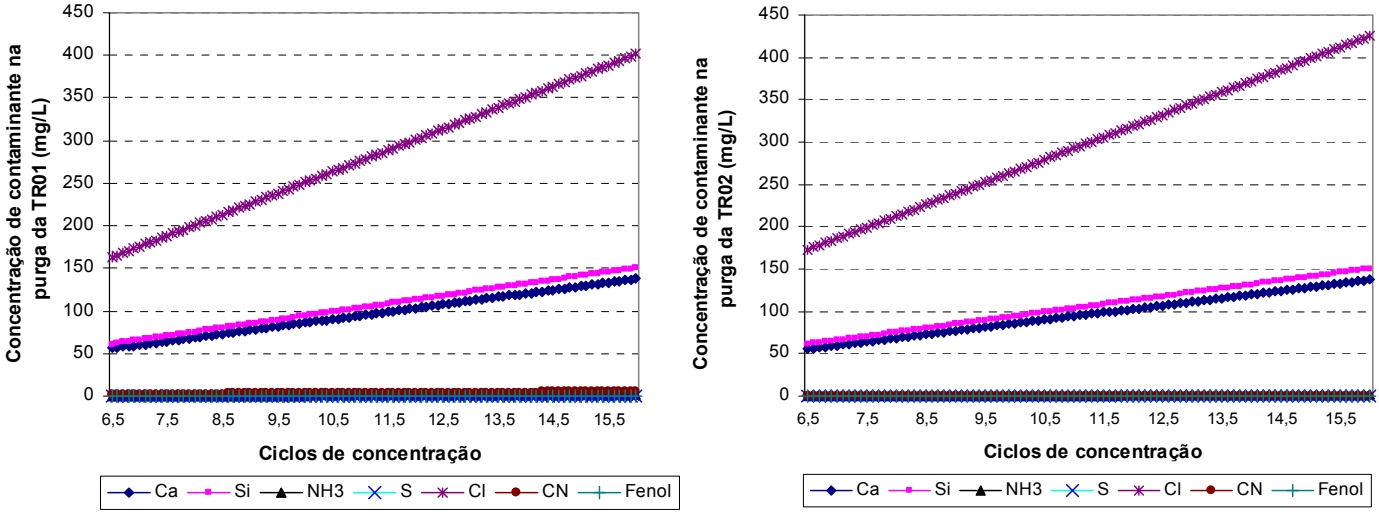
$$Cp_{16} = Cr_i * 16 \tag{7.3}$$

A Tabela 7.13 mostra os valores estimados de concentração de cada componente no ciclo máximo permitido (16 ciclos), obtidos a partir da Equação 7.3. Com os valores de concentração da água de reposição, realizou-se a variação de ciclos de 6,5 a 16, de maneira a verificar o perfil de concentração do componente na purga, em cada torre de resfriamento, conforme ilustrado pela Figura 7.16. Nota-se que o componente cloreto é mais sensível ao aumento do ciclo em ambas as torres, onde sua concentração acompanha proporcionalmente esta tendência, dado ser este o componente-chave do processo; da mesma forma, cálcio e sílica também apresentam variação para ciclos maiores, em relação aos demais, pois também são componentes que influenciam a qualidade da água no processo. Cabe mencionar que estes resultados mostram-se parte de um comportamento definido a uma dada temperatura, mas que não é identificada no conjunto de dados originais da refinaria.

Tabela 7.13 – Valores de concentração da reposição atual e da purga, considerando ciclo máximo permitido, para as torres de resfriamento TR01 e TR02

TAG da torre de resfriamento			TR01		
Número da corrente	6	8			
Qualidade da corrente	Reposição atual	Purga atual	Ciclo atual	Reposição atual calculada	Purga (16 ciclos)
Vazão (t/h)	42	5			
Concentração (mg/L)					
Cálcio	8,6	55,90	6,5	8,6	137,6
Sílica	9,4	61,10	6,5	9,4	150,4
Amônia	0,07	0,57	6,5	0,088	1,41
Sulfeto	0,1	0,06	6,5	0,009	0,144
Cloreto	9,7	163,05	6,5	25,08	401,3
Cianeto	0	2	6,5	0,31	4,96
Fenol	0,05	0,13	6,5	0,02	0,32

TAG da torre de resfriamento			TR02		
Número da corrente	9	11			
Qualidade da corrente	Reposição atual	Purga atual	Ciclo atual	Reposição atual calculada	Purga (16 ciclos)
Vazão (t/h)	325	40			
Concentração (mg/L)					
Cálcio	8,6	66,22	7,7	8,6	137,6
Sílica	9,4	72,38	7,7	9,4	150,4
Amônia	0,07	0,57	7,7	0,088	1,18
Sulfeto	0,1	0,06	7,7	0,009	0,13
Cloreto	9,7	204,69	7,7	25,08	425,3
Cianeto	0	0	7,7	0,31	0
Fenol	0,05	0,06	7,7	0,02	0,13



(a) (b)

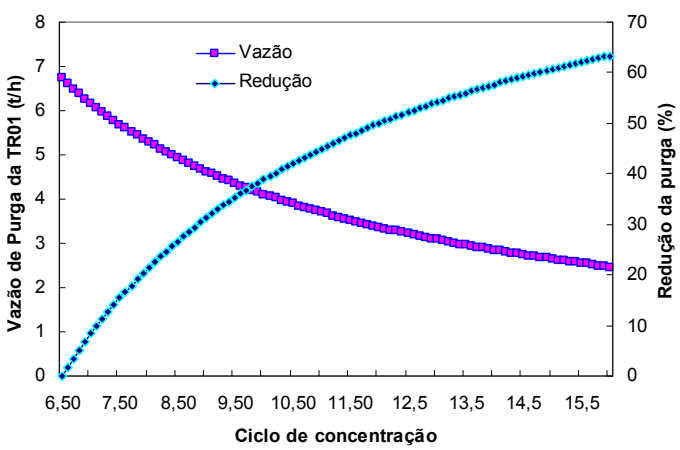
Figura 7.16 – Variação de concentração na purga das torres de resfriamento (a) TR01 e (b) TR02, em função dos ciclos de concentração (para uma dada temperatura)

A Tabela 7.14 simplifica as informações relativas aos dados apresentados na Tabela 7.13, ressaltando as correntes de reposição e purga permitidas, para 16 ciclos de concentração, as quais serão utilizadas para nova avaliação de cenários com o método DFA.

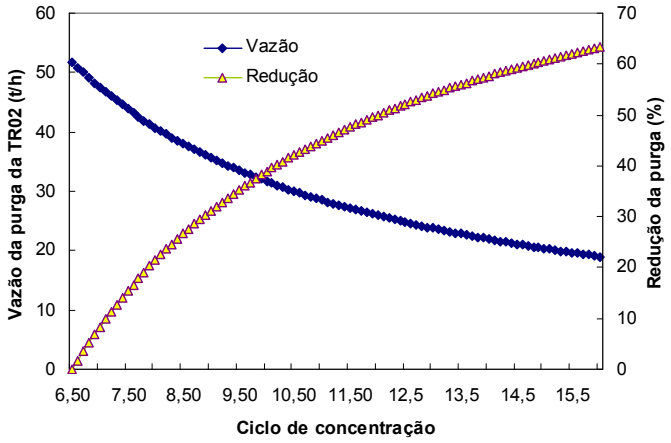
Tabela 7.14 – Concentração de componentes nas correntes das torres de resfriamento, com a reposição e a purga permitidas

TAG da Torre de Resfriamento	TR01		TR02	
Número da corrente	6	8	9	11
Nome da corrente	Reposição permitida	Purga permitida	Reposição permitida	Purga permitida
Vazão (t/h)	42	5	325	40
Concentração (mg/L)				
Cálcio	21,17	137,6	17,81	137,12
Sílica	23,14	150,4	23,14	150,4
Amônia	0,908	1,408	0,684	1,184
Sulfeto	1,446	0,144	1,013	0,128
Cloreto	46,35	401,28	38,34	425,28
Cianeto	2,96	4,96	0	0
Fenol	0,12	0,32	0,111	0,128
Óleos e Graxas	60,96	100,96	29,08	54,08

Uma análise da vazão das purgas das torres em função dos ciclos de concentração também foi conduzida, de modo a verificar os respectivos perfis no sistema de resfriamento em estudo. Na Figura 7.17, o comportamento típico deste sistema é constatado na medida em que a vazão de purga diminui com o aumento do ciclo de concentração, tendo como consequência o respectivo aumento na redução da purga da TR01; esta variação também é demonstrada para a torre TR02.



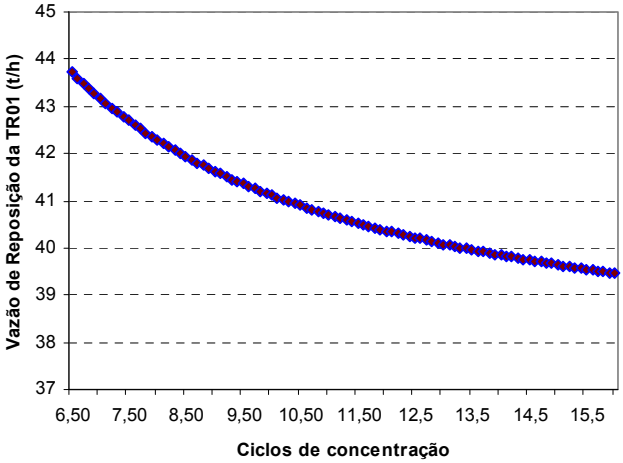
(a)



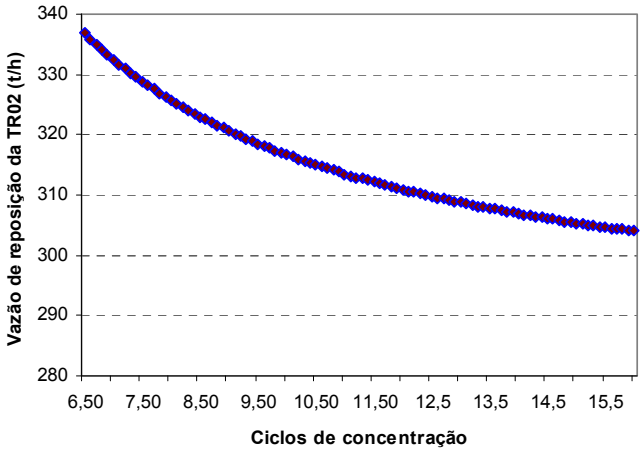
(b)

Figura 7.17 – Vazão e redução percentual da purga das torres de resfriamento (a) TR01 e (b) TR02

O perfil decrescente de vazão de reposição de ambas as torres também é verificado na Figura 7.18, dentro da faixa de ciclo estabelecida para este estudo de caso da refinaria. Neste caso, considera-se constante a perda por evaporação (mesma carga térmica).



(a)



(b)

Figura 7.18 – Vazão de reposição da (a) TR01 e da (b) TR02

A partir destes resultados, pode-se conhecer mais apropriadamente o sistema de resfriamento dos processos da refinaria, permitindo verificar não somente a qualidade da purga como eventual fonte de reúso, mas ainda estabelecer configurações mais flexíveis, com a máxima relaxação dos ciclos de concentração; com isso, reafirma-se o objetivo de potencializar a reutilização de correntes na reposição da torre.

Simulações de índices de estabilidade da água

Com o objetivo de avaliar a tendência à corrosão e incrustações nos sistemas de resfriamento deste estudo, foram realizadas simulações envolvendo os índices de estabilidade de Langelier, Ryznar e Puckorius, em ambas as torres.

A simulação do índice de Langelier foi realizada a partir da Equação 6.18, considerando que o valor do parâmetro condutividade elétrica seja de 15.000 mhos (sólidos dissolvidos totais (SDT) = 9.600 mg/L – Equação 6.20), a alcalinidade total seja de 130 mg $CaCO_3$ / L, e 40°C de temperatura (T). A concentração de cálcio (Ca) é obtida em função do valor do ciclo de concentração (CC), sendo também utilizada para compor a determinação do pH de saturação (pH_S). O índice de Langelier é obtido pela diferença entre o pH (na faixa compreendida entre os valores mínimos e máximos da respectiva torre de resfriamento – TR01: 6,12 – 8,61; TR02: 6,55 – 7,67) e o valor de pH_S (Equação 6.17). Assim, mantendo-se a temperatura da água de circulação em 40°C e variando-se o ciclo de concentração e o pH desta qualidade de água, tem-se o perfil do índice de estabilidade de Langelier estimado para as condições da TR01, conforme apresentada na Figura 7.19. O perfil obtido é similar àquele apresentado no estudo de Veiga (2010), que empregou um *software* comercial para simular o índice de Langelier em possíveis águas de reúso para reposição de perdas da torre de resfriamento de uma Unidade de Coque de refinaria. Porém, neste trabalho, os cálculos foram realizados por meio de planilha eletrônica e, adicionalmente, foram obtidas simulações para os índices de estabilidade de Ryznar e Puckorius.

A classificação de acordo com a tendência à corrosão e incrustação é indicada pela coloração diferenciada do perfil, cuja faixa de valores segue aquela estabelecida por Carrier (1965) (Tabela 6.2). A coloração associada varia conforme as seguintes características: - 2,0 ≤ LSI < - 0,5 (verde) => Corrosão severa (condição altamente insegura); - 0,5 ≤ LSI < 0 (azul) => Corrosão leve, sem incrustações (condição insegura); LSI ≈ 0 (branco) => condição segura; 0 < LSI ≤ 0,5 (amarelo) => Leve formação de incrustações e corrosiva (condição insegura); 0,5 < LSI ≤ 2,0 (vermelho) => Formação de incrustação, não corrosiva (condição altamente insegura). É possível atuar com segurança na região de fronteira entre a coloração azul e amarela (coloração branca na Figura 7.19 - pH em torno de 7,5, e até

cerca de 14 ciclos de concentração), pois alcançaria uma condição de segurança em relação ao índice (LSI tendendo a zero). A Figura 7.20 apresenta a simulação do índice de saturação de Langelier em função de variações de pH e ciclo de concentração (na temperatura de 40°C), considerando as condições da TR02. A condição mais propícia para atuar também seria em torno de 7,5, nas proximidades da fronteira entre a coloração azul e amarela (coloração branca na Figura 7.20 => LSI tendendo a zero).

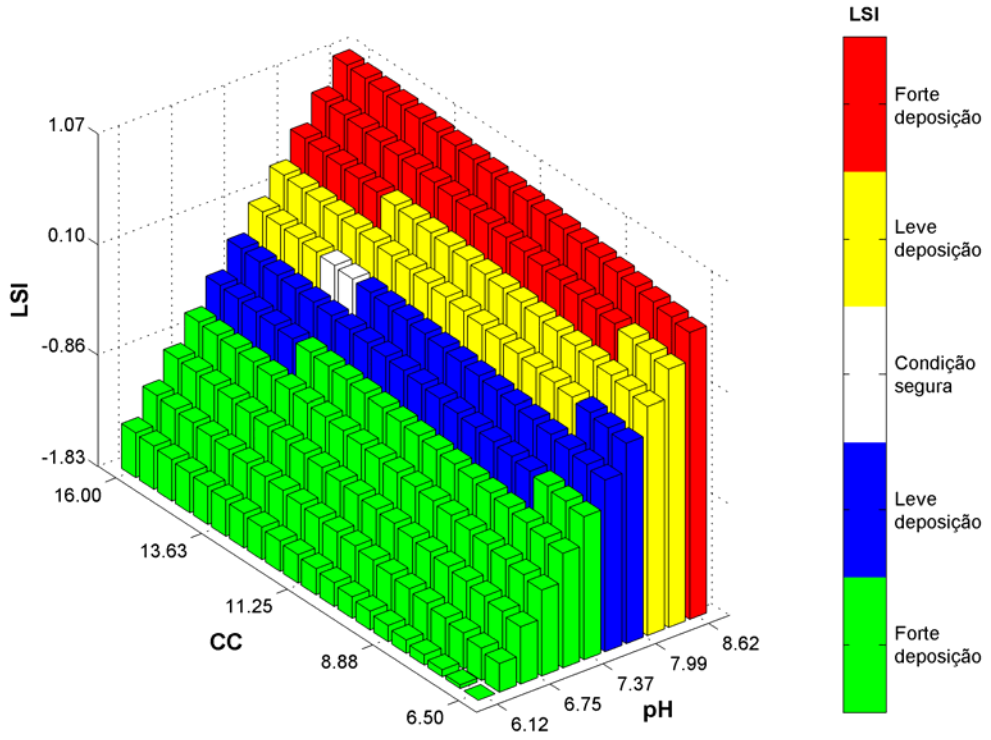


Figura 7.19 – Perfil do índice de saturação de Langelier (LSI) em função de variações de pH e ciclo de concentração, para as condições de análise da torre de resfriamento TR01

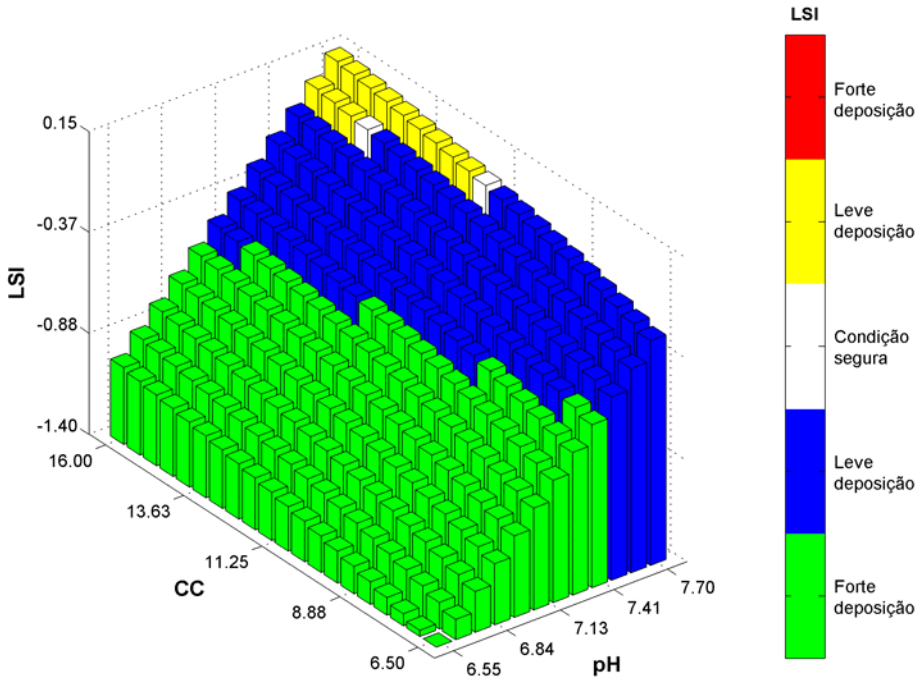


Figura 7.20 – Perfil do índice de saturação de Langelier (LSI) em função de variações de pH e ciclo de concentração, para as condições de análise da torre de resfriamento TR02

É perfeitamente oportuno salientar que as simulações também podem ser realizadas para avaliar não somente o efeito do ciclo de concentração (a temperatura constante), mas a variação de temperatura da água de recirculação do sistema (para um dado ciclo de concentração), embora não tenha sido aqui abordada em virtude da indisponibilidade de informações do estudo de caso. Deste modo, assume-se que o valor de 40°C refira-se à característica do sistema de resfriamento do processo hídrico atual, o que permite a simulação somente com base nestas condições estabelecidas.

As Figuras 7.21 e 7.22 ilustram o perfil da variação do índice de Ryznar (RI) em função do pH e do ciclo de concentração (CC). O índice de Ryznar é obtido conforme a Equação 6.21, determinado pela diferença entre o dobro do pH de saturação e o pH do meio. A coloração associada varia conforme as características de Carrier (1965) para este índice: 4,0 < RI ≤ 5,0 (magenta) => forte deposição; 5,0 < RI ≤ 6,0 (branco) => leve deposição; 6,0 < RI ≤ 7,0 (verde) => pouco depósito ou corrosão; 7,0 < RI ≤ 7,5 (azul) => corrosão significante; 7,5 < RI ≤ 9,0 (amarelo) => corrosão pesada; RI > 9,0 (vermelho) => corrosão intolerável. Observa-se que tanto o perfil da TR01 quanto o da TR02 possuem maior tendência à corrosão pesada, pois sua faixa de variação do índice encontra-se restrita à região amarela. O mais recomendado neste caso seria trabalhar na faixa de coloração verde, com pouca deposição e baixa característica corrosiva.

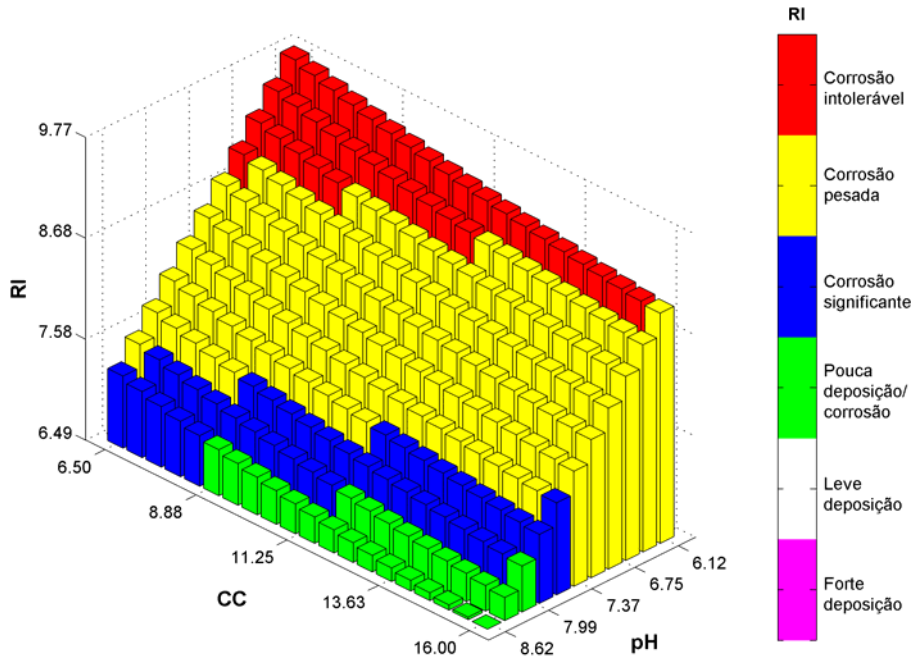


Figura 7.21 – Perfil do índice de Ryznar em função de variações de pH e ciclo de concentração, para as condições de análise da torre de resfriamento TR01

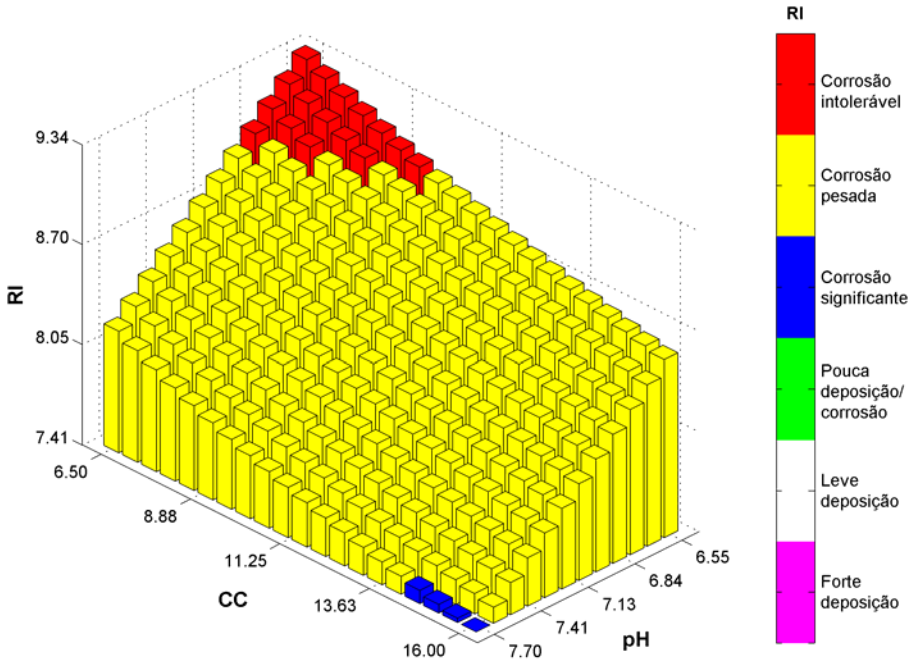


Figura 7.22 – Perfil do índice de Ryznar em função de variações de pH e ciclo de concentração, para as condições de análise da torre de resfriamento TR02

O perfil de variação do índice de Puckorius (PI) encontra-se representado na Figura 7.23, para a TR01, onde a variação do pH do meio é substituída pela variação do pH equivalente (pHeq) (Equação 6.22). Nesta análise, o pHeq é determinado em função de valores de alcalinidade total; assim, o valor de alcalinidade total deve ser obtido a partir de uma faixa que inclua o valor atribuído anteriormente para o cálculo dos índices de Langelier e Ryznar (neste caso, a variação estabelecida é de 50 a 250 mg $CaCO_3$ / L, para a mesma temperatura de 40°C. A faixa de classificação do índice de Puckorius é a mesma do índice de Ryznar, seguindo portanto sua relação de tonalidades. Nota-se que no caso da TR01 (Figura 7.23) a faixa do índice de Puckorius está entre 7,0 e 9,0, indicando a tendência à corrosão.

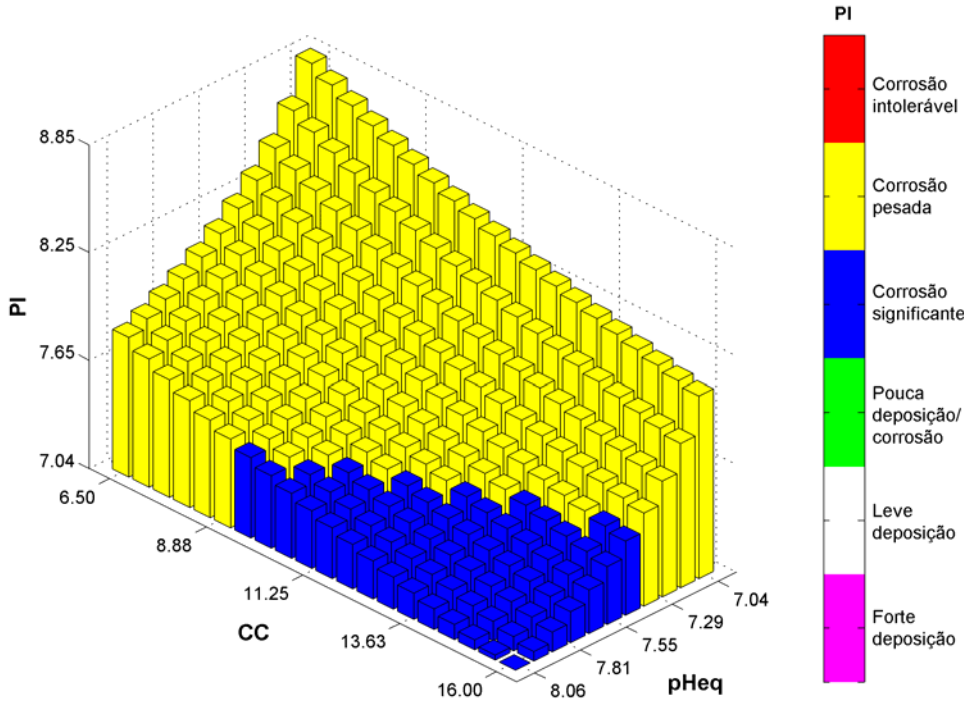


Figura 7.23 – Perfil do índice de Puckorius em função de variações de pHeq e ciclo de concentração, para as condições de análise da torre de resfriamento TR01

O perfil do índice de estabilidade de Puckorius para a TR02 é semelhante ao comportamento da TR01 (Figura 7.23), uma vez que a variação de pHeq torna-se idêntica em função da variação de alcalinidade total.

7.4. APLICAÇÃO DO DFA: FLEXIBILIZAÇÃO PARA AUMENTO DE 20% NAS CONCENTRAÇÕES DE ENTRADA DOS CONTAMINANTES

Um novo conjunto de cenários deve ser revelado tendo como meta a flexibilização em 20% das concentrações permitidas na entrada das torres de resfriamento. Isto significa uma perturbação na entrada das torres especificamente para cada componente, acrescentando seus valores originais em 20%. Esta medida visa avaliar a influência de sobrecarga na reposição das torres mediante a relaxação dos ciclos de concentração, facilitando assim a operação do sistema em condições menos restritivas ao processo. Diante disso, espera-se que a quantidade de efluentes reutilizados nas operações receptoras (por exemplo, sistema de resfriamento) aumente, influenciando diretamente na redução de água total captada.

Assim, para cada cenário está associado a respectiva redução nos custos operacionais, conforme apresentado na Tabela 7.15. Neste conjunto, não foi realizada a flexibilização para o componente representativo de cianetos, uma vez que seu pequeno valor de concentração na entrada nas torres não sensibiliza o seu valor original. Além disso, cabe colocar que os custos aqui apresentados não levam em conta a parcela correspondente ao tratamento químico, necessidade que decorre do aumento do número de ciclos.

Tabela 7.15 – Captação de água e descarte de efluentes, com as estimativas de custos para cada cenário de reutilização levantado, em relação ao cenário base

Cenário	Captação total (t/h)	Água bruta (t/h)	Água Desmine-ralizada (t/h)	Descarte total (t/h)	Captação reduzida (%)	Custo total anual ($/ano)	Redução nos custos (%)
Base	815	517	264	414	-	9.222.149,20	-
(8)	692,1	365,1	293	291,1	15,08	7.410.581,86	19,64
(9a)	605,66	248,79	322,87	190,4	25,68	6.434.085,15	30,23
(9b)	653,87	297	322,87	238,61	19,77	6.756.443,39	26,74
(10a)	686,66	498	154,66	285,66	15,74	8.117.094,85	11,98
(10b)	796	498	264	395	2,33	8.938.387,94	3,08
(11a)	653,37	466,99	152,38	252,37	19,83	7.729.833,76	16,18
(11b)	776,1	478,1	264	375,1	4,77	8.641.185,36	6,30
(12a)	612,66	423,35	155,31	311,66	24,83	7.595.332,61	17,64
(12b)	801	503	264	400	1,72	9.013.061,96	2,27
(13a)	619,82	433	152,82	218,82	23,9	7.132.511,74	22,66
(13b)	731	433	264	330	10,31	7.967.625,75	13,60

7.5. FLEXIBILIZAÇÃO PARA LIMITE DE 16 CICLOS DE CONCENTRAÇÃO NA OPERAÇÃO DAS TORRES DE RESFRIAMENTO

Após a obtenção de cenários analisados pela relaxação dos ciclos de concentração, realizou-se uma nova proposta, desta vez permitindo o alcance de condições de reposição nas torres de modo mais estendido. Assim, as concentrações referentes ao limite estabelecido de 16 ciclos foram utilizadas para mais uma bateria de geração de cenários. A Tabela 7.16 relaciona os custos e suas respectivas reduções percentuais, com base nesta nova análise. Da mesma forma que no caso anterior, não são levados em conta os custos decorrentes da possibilidade de tratamento da água na torre, em função do ciclo empregado.

Cumpre salientar que, na prática, a faixa de adoção de ciclos de concentração em escala industrial é bastante estreita, cujos valores normalmente aceitáveis são compreendidos entre 5 e 8 ciclos. Assim, neste estudo, a flexibilização para 16 ciclos é válida na medida em que se deseja compreender o comportamento do sistema submetido a uma faixa ampla de valores de ciclos, não sendo recomendável assumir condições extremas de operação.

Tabela 7.16 – Captação de água e descarte de efluentes, com as estimativas de custos para cada cenário de reutilização levantado, em relação ao cenário base

Cenário	Captação total (t/h)	Água bruta (t/h)	Água Desmine-ralizada (t/h)	Descarte total (t/h)	Captação reduzida (%)	Custo total anual ($/ano)	Redução nos custos (%)
Base	815	517	264	414	-	9.222.149,20	-
(14)	647,84	320,84	293	246,84	20,51	6.749.567,48	26,81
(15a)	448	150	264	85,74	45,03	5.949.644,34	35,49
(15b)	680,25	382,25	264	317,99	16,53	7.502.593,95	18,65
(16a)	660,34	471,68	154,66	272,34	18,98	7.822.302,60	15,18
(16b)	769,68	471,68	264	381,68	5,56	8.643.595,69	6,27
(17a)	664,88	478,5	152,38	263,88	18,42	7.808.740,27	15,33
(17b)	776,5	478,5	264	375,5	4,72	8.647.159,28	6,23
(18a)	454,4	251,39	169,01	49,47	44,24	6.020.208,73	34,72
(18b)	732,23	418	280,23	327,30	10,15	7.969.668,12	13,58
(19a)	738,29	499,39	204,9	337,29	9,41	8.660.477,27	6,09
(19b)	815	517	264	414	-	9.222.149,20	0,00
(20a)	604,82	418	152,82	266,82	25,78	7.384.826,71	19,92
(20b)	716	418	264	378	12,15	8.219.940,72	10,87

A adição de produtos químicos para o tratamento da água na torre de resfriamento leva à correção de pH da purga da torre, com a finalidade de evitar a formação de incrustações durante o processo de resfriamento. Quando se opera dentro dos limites estabelecidos para o sistema, o aumento no ciclo normalmente não implica no aumento de custos operacionais, embora aumente a concentração de contaminantes na purga (descarga) da torre. O consumo de produtos de tratamento diminui significativamente com o aumento do ciclo. No entanto, ciclos maiores elevam os custos de tratamento, inviabilizando economicamente a manutenção do sistema. Por outro lado, a vazão de água de reposição diminui com o aumento do ciclo; além disso, a diminuição da vazão de reposição é mais sensível a variações em ciclo menores.

Embora não seja incorporado numericamente no cálculo de custos deste estudo, o custo adicional com tratamento químico da água de resfriamento em função do aumento do ciclo de concentração deve ser levado em conta quando se avaliam alternativas de relaxação de ciclos nestes sistemas. A Figura 7.24 destaca o perfil de dosagem contínua de produtos químicos não voláteis, tais como inibidores de corrosão e de formação de depósitos (polifosfato combinado com zinco ou poliacrilatos, por exemplo), bem como agentes dispersantes (poliacrilatos, por exemplo) e microbiocidas (cloro gás, hipocloritos ou sais de amônio quaternário, por exemplo), necessários para o condicionamento da água, dependente de parâmetros como ciclo de concentração, vazão de reposição e concentração desejada de produto na água de circulação (ver Equação 6.8). Para fins de análise, consideram-se os seguintes valores de concentração de produto desejado, para as torres TR01 e TR02: 100 mg/L, 200 mg/L, 400 mg/L, 600 mg/L, 800 mg/L, 1000 mg/L, 1500 mg/L e 2000 mg/L. Esta ampla faixa de valores é praticada com a finalidade de demonstrar o perfil de dosagem em cada torre. O ciclo de concentração é controlado pela execução das descargas de fundo. O aumento da descarga eleva a quantidade de produto a ser dosado, mas o aumento do ciclo diminui a necessidade de dosagem, visto que há diminuição na descarga; e quanto maior a quantidade final desejada (ou admissível) de produto químico, maior a necessidade ao longo dos ciclos, em relação a outras dosagens finais permitidas. Tal comportamento é observado na Figura 7.24, cuja análise foi realizada variando o ciclo de 6,5 a 16, no limite para a purga de ambas as torres.

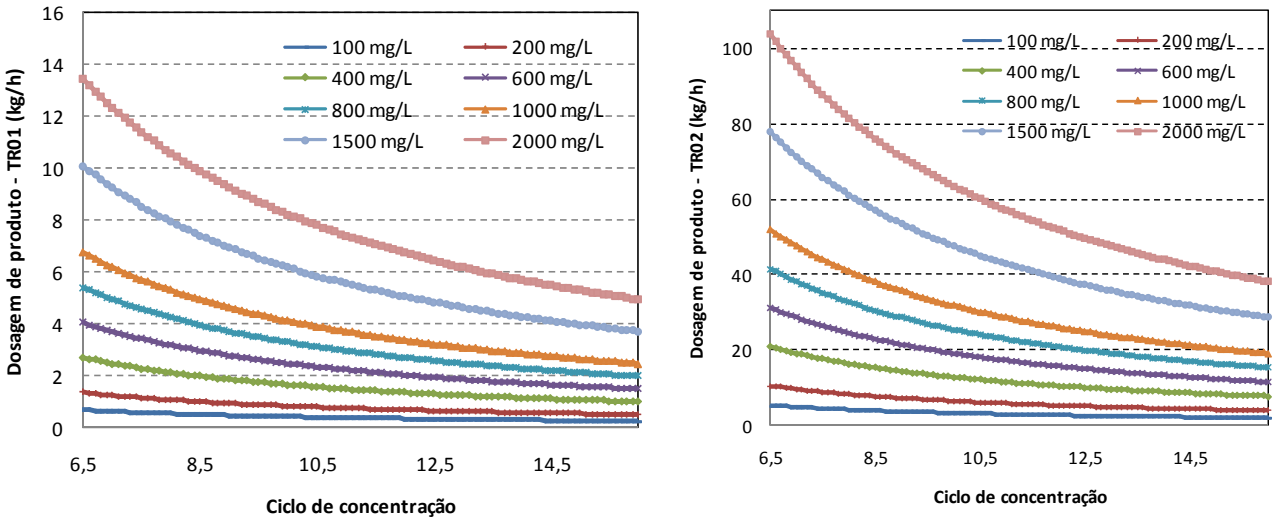


Figura 7.24 – Dosagem de produto químico em função do ciclo de concentração: (a) TR01 e (b) TR02

Os resultados que permitiram estabelecer os distintos perfis para análise tanto do sistema de resfriamento quanto dos índices de estabilidade da água encontram-se integralmente disponibilizados no Apêndice 5 deste trabalho.

7.6. GERAÇÃO DE CENÁRIOS DE REUTILIZAÇÃO DE CORRENTES PARA MÁXIMO REÚSO – MÚLTIPLOS CONTAMINANTES

Após aplicar o procedimento para cada componente cuja presença nas correntes é considerada de forma isolada, a seqüência natural seria estabelecer a abordagem de transferência simultânea de múltiplos componentes, observando a proporcionalidade de relação para cada componente. Neste caso, diante das características de reutilização de correntes observadas até então, optou-se por analisar as operações que mais se relacionam com as oportunidades de reúso, dentre as quais: TR01 e TR02 e Uso Geral. Atuando sob esta perspectiva, pode-se materializar o potencial das correntes mais adequadas para as propostas de reúso/reciclo. Assim, para as operações mencionadas, tem-se o conjunto de dados apresentados na Tabela 7.17.

Tabela 7.17 – Dados de vazão e concentração de componentes para as operações candidatas ao reúso

Operação / Equipamento	Vazão (t/h)	Componente	Cin (mg/L)	Cout (mg/L)	∆m (kg/h)
TR01	Reposição: 42 Perda: 37	Cálcio	8,6	55,9	1,99
		Sílica	9,4	61,1	2,17
		Amônia	0,07	0,57	0,021
		Sulfeto	0,1	0,06	-40%
		Cloreto	9,7	163,05	6,44
		Cianeto	0	2	0,084
		Fenol	0,05	0,13	0,0034
TR02	Reposição: 325 Perda: 285	Cálcio	8,6	66,22	18,73
		Sílica	9,4	72,38	20,47
		Amônia	0,07	0,57	0,1625
		Sulfeto	0,1	0,06	-40%
		Cloreto	9,7	204,69	63,37
		Cianeto	0	0	0
		Fenol	0,05	0,06	0,0033
Uso Geral	50	Cálcio	8,6	8,6	0
		Sílica	9,4	9,4	0
		Amônia	0,07	10,07	0,50
		Sulfeto	0,1	1,1	0,05
		Cloreto	9,7	109,7	5
		Cianeto	0	0	0
		Fenol	0,05	0,05	0

Para selecionar o componente de referência, pode-se estabelecer que a diferença entre as concentrações de saída e entrada das operações relacionadas permite apontar o componente Cloreto como o diferencial de maior valor (conforme a Tabela 7.18), tornando-o o componente menos restritivo. Este critério pode ser utilizado como uma das formas de justificar a escolha do componente de referência, embora não seja o objetivo deste trabalho discutir suas distintas abordagens.

Tabela 7.18 – Diferencial de concentração de componentes para as operações candidatas ao reúso

Operação / Equipamento	Vazão (t/h)	Componente	Cin (mg/L)	Cout (mg/L)	ΔC (mg/L)
TR01	Reposição: 42 Perda: 37	Cálcio	8,6	55,9	47,3
		Sílica	9,4	61,1	51,7
		Amônia	0,07	0,57	0,50
		Sulfeto	0,1	0,06	-0,04
		Cloreto	9,7	163,05	**153,35**
		Cianeto	0	2	2
		Fenol	0,05	0,13	0,08
TR02	Reposição: 325 Perda: 285	Cálcio	8,6	66,22	57,62
		Sílica	9,4	72,38	62,98
		Amônia	0,07	0,57	0,50
		Sulfeto	0,1	0,06	-0,04
		Cloreto	9,7	204,69	**194,99**
		Cianeto	0	0	0
		Fenol	0,05	0,06	0,01
Uso Geral	50	Cálcio	8,6	8,6	0
		Sílica	9,4	9,4	0
		Amônia	0,07	10,07	10
		Sulfeto	0,1	1,1	1
		Cloreto	9,7	109,7	**100**
		Cianeto	0	0	0
		Fenol	0,05	0,05	0

Com relação às operações que podem ser tratadas como fontes externas, tem-se como exemplo: a corrente de saída do misturador M1 (corrente 14), a saída do misturador M2 (corrente 42), a saída do misturador M7 (corrente 41), a corrente de saída do *Stripper* I (excedente, corrente 33), a saída da dessalgadora (corrente 39), e a saída da ETDI (corrente 44). No entanto, dada a extensa quantidade de cenários já levantados neste trabalho, suficientes para demonstrar a aplicação da metodologia aqui proposta, optou-se por avaliar exclusivamente utilizando a dessalgadora, uma vez que constitui operação bastante envolvida nas proposições de reúso para sistemas unicomponentes. Esse conjunto de dados encontra-se listado na Tabela 7.19.

Tabela 7.19 – Dados de vazão e concentração de componentes da operação Dessalgadora como referência na análise multicomponente

Operação / Equipamento	Vazão (t/h)	Componente	C (mg/L)
Dessalgadora (corrente 39)	112	Cálcio	51,11
		Sílica	17,89
		Amônia	95,72
		Sulfeto	3,42
		Cloreto	1361,39
		Cianeto	3,98
		Fenol	7,38

A análise multicomponente aqui tratada considera o Cloreto como componente de referência; já a operação de referência será aquela listada como fonte externa (dessalgadora). A análise da possibilidade de reúso por meio de deslocamento de concentrações é realizada com o auxílio do programa computacional MINEA. Em etapa anterior a esta análise, a Tabela 7.20 mostra a concentração dos componentes para o componente de referência Cloreto, e operação de referência Dessalgadora. o ajuste de concentrações resultante da análise de verificação é realizado pelo *software* MINEA, conforme apresentado na Tabela 7.21, e as concentrações deslocadas são então dispostas na Tabela 7.22. Como a concentração de entrada dos componentes nas operações TR01, TR02 e Uso Geral são menores que a qualidade de água bruta (valores proporcionalmente inferiores a 9,7 mg/L para o Cloreto, que passa a 1,0 mg/L), constata-se que seria necessário somente água desmineralizada para estas operações, o que tornaria desaconselhável o reúso.

Tabela 7.20 – Concentração de componentes antes da análise da possibilidade de deslocamento

		Concentração (mg/L)						
Contaminante Referência	Cloreto	0	9,7	61,39	109,7	163,05	204,69	1361,39
Dessalgadora	Cálcio	0						51,11
	Sílica	0						17,89
	Amônia	0						95,72
	Sulfeto	0						3,42
	Cianeto	0						3,98
	Fenol	0						7,38
TR01	Cálcio		8,6			55,9		
	Sílica		9,4			61,1		
	Amônia		0,07			0,57		
	Sulfeto		0,1			0,06		
	Cianeto		0			2		
	Fenol		0,05			0,13		
TR02	Cálcio		8,6				66,22	
	Sílica		9,4				72,38	
	Amônia		0,07				0,57	
	Sulfeto		0,1				0,06	
	Cianeto		0				0	
	Fenol		0,05				0,06	
Uso Geral	Cálcio		8,6		8,6			
	Sílica		9,4		9,4			
	Amônia		0,07		10,07			
	Sulfeto		0,1		1,1			
	Cianeto		0		0			
	Fenol		0,05		0,05			

Tabela 7.21 – Ajuste de concentrações para a análise multicomponente – Contaminante de referência: cloreto; operação de referência: dessalgadora

Operação	Vazão (t/h)	Cin (mg/L)	Cout (mg/L)
OP1 (Dessalgadora)	112	0	1361,39
OP2 (TR01)	42,00	1,00	154,35
OP3 (TR02)	325,00	1,00	195,99
OP4 (Uso geral)	50,00	1,00	101,00

Tabela 7.22 – Concentração de componentes após a análise da possibilidade de deslocamento

		Concentração (mg/L)					
Contaminante Referência	Cloreto	0	1,0	101	154,35	195,99	1361,39
Dessalgadora	Cálcio	0					51,11
	Sílica	0					17,89
	Amônia	0					95,72
	Sulfeto	0					3,42
	Cianeto	0					3,98
	Fenol	0					7,38
TR01	Cálcio		8,6		55,9		
	Sílica		9,4		61,1		
	Amônia		0,07		0,57		
	Sulfeto		0,1		0,06		
	Cianeto		0		2		
	Fenol		0,05		0,13		
TR02	Cálcio		8,6			66,22	
	Sílica		9,4			72,38	
	Amônia		0,07			0,57	
	Sulfeto		0,1			0,06	
	Cianeto		0			0	
	Fenol		0,05			0,06	
Uso Geral	Cálcio		8,6	8,6			
	Sílica		9,4	9,4			
	Amônia		0,07	10,07			
	Sulfeto		0,1	1,1			
	Cianeto		0	0			
	Fenol		0,05	0,05			

A análise multicomponente pode ser estendida para o conjunto de dados deste estudo, testando as demais possibilidades de fontes externas como referência. No entanto, é de se esperar que um problema em que haja número considerável de componentes, as oportunidades de reutilização sem que ocorram violações de concentrações tornam-se bastante restritas, de tal foma que fica evidente as características de reduzida flexibilidade de um problema real. Como alternativa, pode-se utilizar o artifício de inclusão gradativa de componentes representativos na análise, até que se alcance um conjunto mínimo de componentes considerados efetivamente importantes para os processos. Uma proposta bastante oportuna foi apresentada no estudo de Calixto (2011), ao considerar o enfoque macro-estrutural de *Total Site*, permitindo identificar adequadamente o componente e a operação de referência para cada um dos blocos que formam a superestrutura, sem violar os limites máximos de entrada e saída dos contaminantes nas operações. Outra possibilidade seria considerar as oportunidades identificadas para cada componente

isoladamente, e prosseguir com os critérios descritos pela metodologia proposta neste trabalho, a qual permite incorporar a necessidade de processos regenerativos adequados e estabelecer sistemática comparativa quanto à viabilidade econômica dos cenários.

7.7. APLICAÇÃO DE PROCEDIMENTO PARA SELEÇÃO DE CENÁRIOS PROMISSORES

Uma das vantagens da aplicação do método DFA é a geração de diferentes fluxogramas ou propostas de cenários com oportunidades de reúso e/ou reciclo, onde a utilização de processos regenerativos e/ou mudanças fundamentais não sejam prioridades na reorganização física do sistema voltado para o reúso máximo nas operações. Quanto mais contaminantes relevantes estiverem sendo analisados, mais próximo da realidade do sistema hídrico, porém mais complexo e mais cenários deverão ser gerados com o método. A diversidade de cenários torna flexível a análise pela Engenharia de Processos, mas induz à necessidade de encontrar os cenários mais adequados para o sistema em estudo. Nestes casos, nem sempre o melhor cenário será aquele que apresentar a maior redução de vazão e/ou o menor custo operacional; a tomada de decisão deve ser guiada para a observação dos *trade-offs* entre redução de vazão e custo (dilema cuja tomada de decisão leva a abrir mão das vantagens da opção excluída – “conflito de oportunidades”).

Há fatores que também influenciam no mecanismo de seleção de alternativas de reúso, dentre os quais: investimento ocasional em processos regenerativos, investimento adicional em tubulações e sistemas de bombeamento; além disso, deve-se levar em conta a distância entre unidades envolvidas na configuração sugerida de reúso, e mesmo o impacto dos efluentes sobre o funcionamento adequado de unidades operacionais, bem como o impacto econômico, ambiental e social decorrente do despejo e devolução da água captada e utilizada nos processos sobre o curso hídrico. As condições de incerteza do ambiente externo que invariavelmente compõem estes sistemas também afetam a qualidade da tomada de decisão. Por esses aspectos, a restrição do número de cenários potenciais torna-se um mecanismo favorável ao processo de tomada de decisão, onde a busca da “melhor solução” pode ser substituída pela escolha da alternativa mais adequada dentre um grupo restrito de oportunidades, para as condições atuais do sistema.

Como forma de auxiliar na tarefa de seleção de oportunidades promissoras de reúso e estabelecer uma sistemática para o processo de implementação, a Figura 7.25 esquematiza a aplicação do mecanismo proposto para orientação prévia de seleção de múltiplos cenários do estudo de caso deste trabalho.

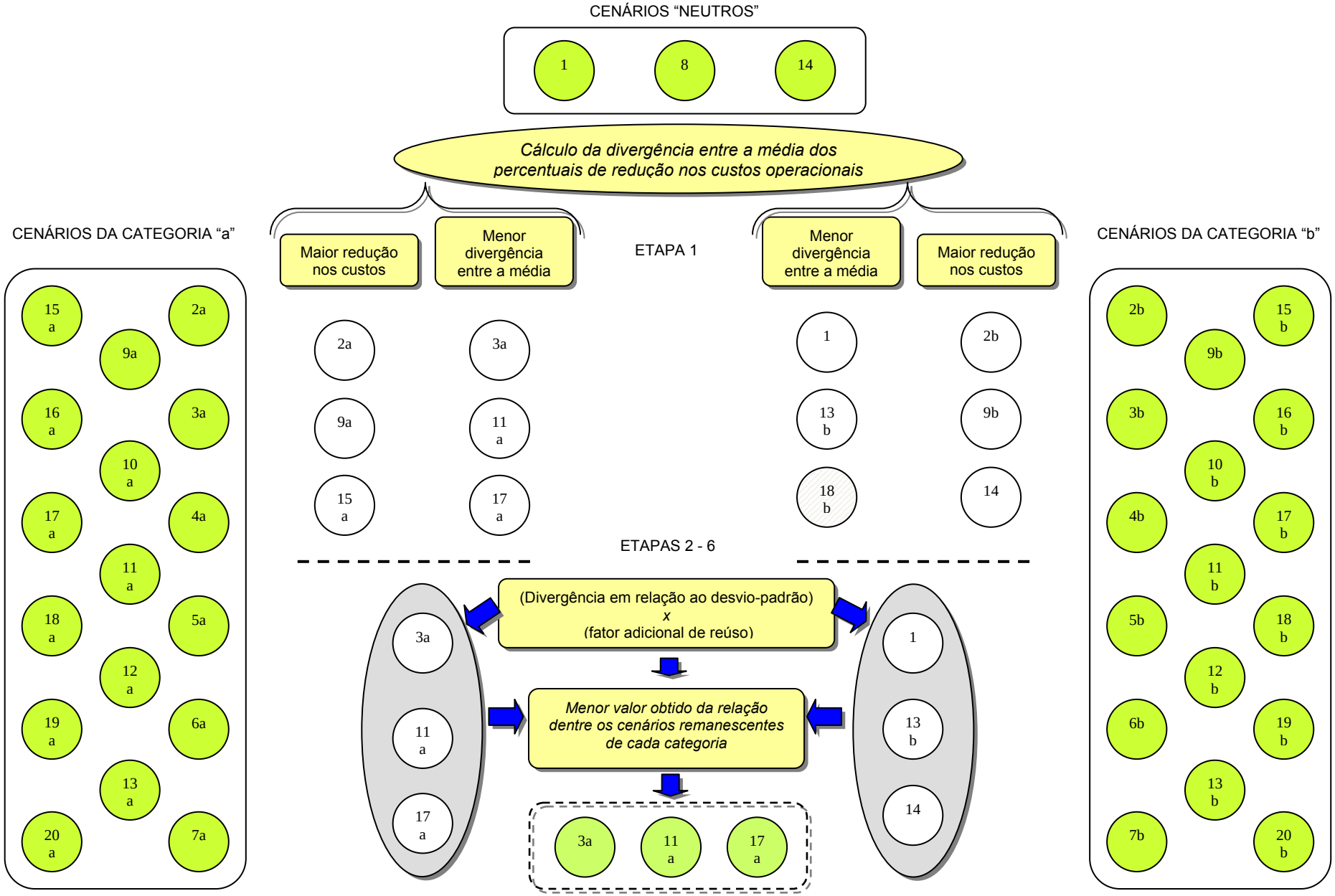


Figura 7.25 – Esquema ilustrativo do procedimento de seleção de cenários aplicado ao estudo de caso

A aplicação do procedimento divide os cenários por categorias (neste caso, categorias “a” e “b”), conforme já apresentadas, além de um cenário “neutros”, que eventualmente pode ser alocado na classe “b”. Para cada categoria, selecionam-se cenários que apresentem isoladamente a maior redução nos custos ditos operacionais e aqueles com a menor divergência entre a média dos percentuais de redução nos custos operacionais. Estas medidas correspondem à realização da etapa 1 do procedimento descrito no item 6.5 (“funil de seleção de cenários” da Figura 6.7). Pela seleção “a”, têm-se os cenários 2a, 9a e 15a (maior redução nos custos), e 3a, 11a e 17a (menor divergência entre a média); da seleção “b”, têm-se os cenários 1, 13b, 18b (menor divergência entre a média), e 2b, 9b e 14 (maior redução nos custos). A partir desta seleção, pode-se determinar os índices de aceitabilidade superior da purga das torres de resfriamento (critério adicional), conforme mostrados na Tabela 7.23, sendo mais bem ressaltados nas Figuras 7.26 e 7.27, para as torres de resfriamento TR01 e TR02, respectivamente. Os valores positivos para os índices de cada cenário indicam que não há violação de pH no sistema das torres, habilitando os cenários previamente selecionados para a avaliação posterior da possibilidade de alocação de processos regenerativos.

Tabela 7.23 – Análise de pH dos cenários considerados, com base no índice de aceitabilidade superior da purga

	TR01			TR02		
Cenário	pH na reposição	pH na purga	Índice de Aceitabilidade Superior (Purga)	pH na reposição	pH na purga	Índice de Aceitabilidade Superior (Purga)
(Base)	6,9	8,0	0,1111	6,9	7,3	0,1889
(1)	5,91	7,01	0,2211	6,15	6,55	0,2722
(2a)						
(2b)	6,01	7,11	0,2100	6,13	6,53	0,2744
(3a)	6,06	7,16	0,2044	6,74	7,14	0,2067
(3b)	6,06	7,16	0,2044	6,74	7,14	0,2067
(4a)						
(4b)	6,9	8,0	0,1111	6,9	7,3	0,1889
(5a)						
(5b)	6,27	7,37	0,1811	6,9	7,3	0,1889
(6a)						
(6b)	6,9	8,0	0,1111	6,9	7,3	0,1889
(7a)						
(7b)	6,9	8,0	0,1111	6,9	7,3	0,1889
(8)	5,97	7,07	0,2144	6,14	6,54	0,2733
(9a)						
(9b)	6,27	7,37	0,1811	6,10	6,50	0,2778
(10a)						
(10b)	5,99	7,09	0,2122	6,79	7,19	0,2011
(11a)	6,9	8,0	0,1111	6,9	7,3	0,1889
(11b)	6,9	8,0	0,1111	6,9	7,3	0,1889
(12a)						
(12b)	6,97	8,07	0,1033	6,9	7,3	0,1889
(13a)						
(13b)	6,93	8,03	0,1078	6,55	6,95	0,2278
(14)	6,40	7,50	0,1667	6,12	6,52	0,2756
(15a)						
(15b)	6,39	7,49	0,1678	6,39	6,79	0,2456
(16a)						
(16b)	7,16	8,26	0,0822	6,78	7,18	0,2022
(17a)	6,9	8,0	0,1111	6,9	7,3	0,1889
(17b)	6,9	8,0	0,1111	6,9	7,3	0,1889
(18a)						
(18b)	5,76	6,66	0,2378	6,36	6,76	0,2489
(19a)						
(19b)	6,9	8,0	0,1111	6,9	7,3	0,1889
(20a)						
(20b)	6,19	7,29	0,1900	6,68	7,08	0,2133

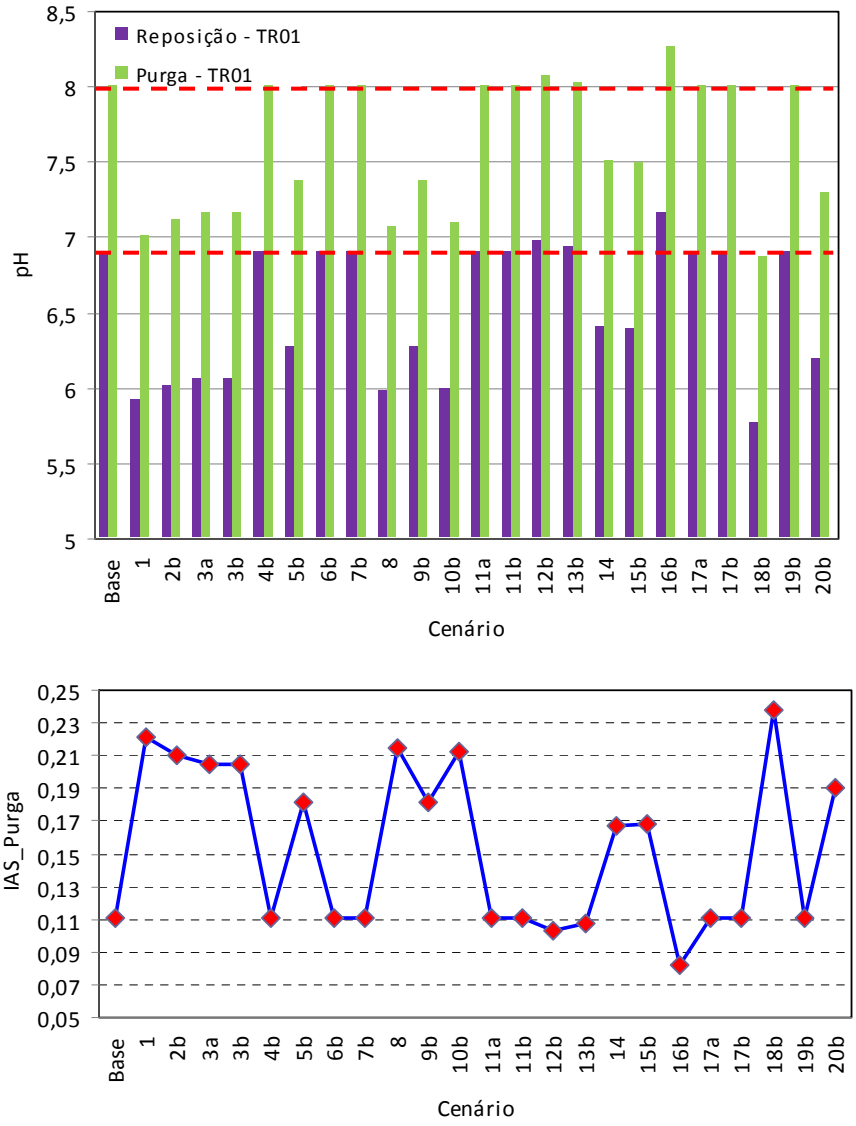


Figura 7.26 – Faixa de valores de pH na reposição e na purga da TR01, associado ao índice de aceitabilidade superior da purga

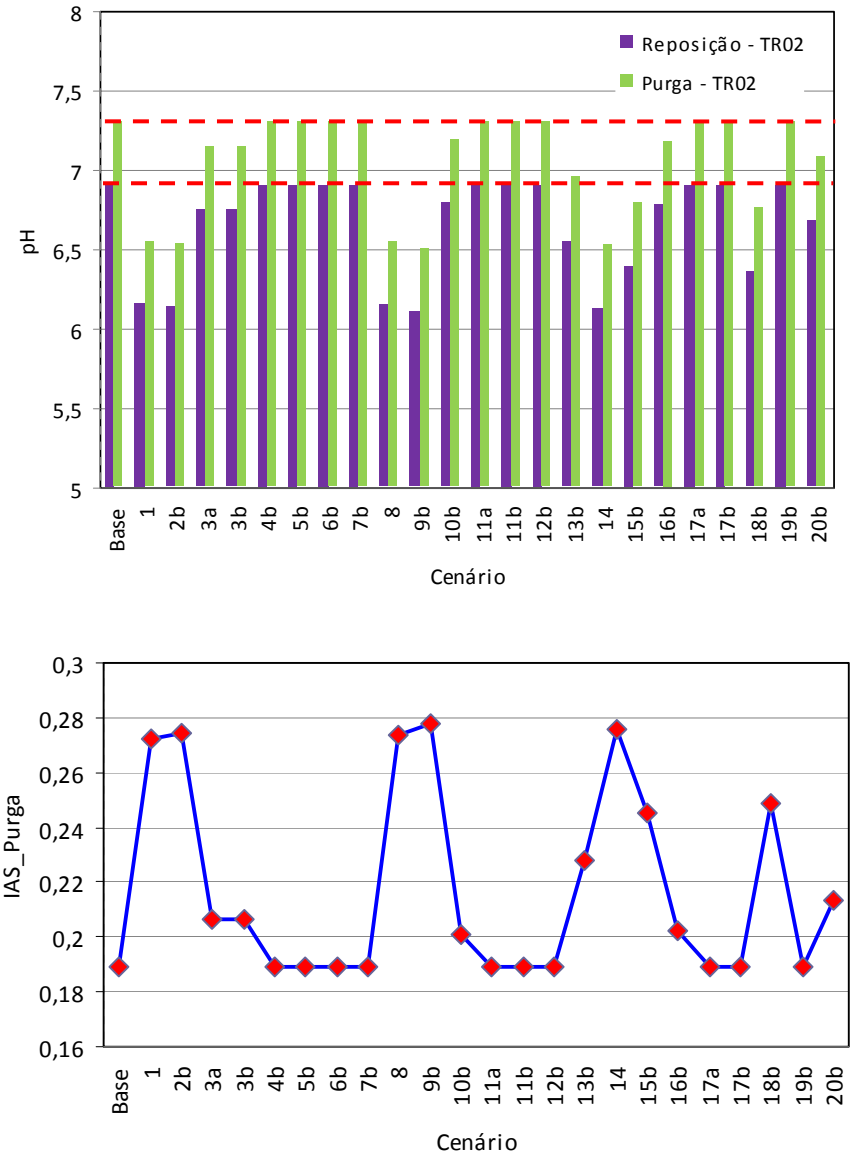


Figura 7.27 – Faixa de valores de pH na reposição e na purga da TR02, associado ao índice de aceitabilidade superior da purga

A partir dos cenários remanescentes do critério anterior, efetua-se o produto dos respectivos valores de divergência em relação ao desvio-padrão pelo fator adicional de reúso (F_{AR}) dos cenários, este último determinado conforme os valores da Tabela 7.24. Por este critério, são contabilizadas as correntes adicionais de reúso (exceto a contribuição da corrente original) que são direcionadas para a operação receptora, inclusive para misturadores; caso existam correntes que cheguem a outras ao longo de uma linha direcionada para a operação, elas também devem ser consideradas na contagem. Como exemplo, o cenário 1 (Diagrama de blocos para máximo reúso do componente Cálcio)

apresenta nove correntes adicionais como reúso que são destinadas à TR02, três novas correntes destinadas à reposição da TR01 (as quais substituíram a corrente original de água bruta), e uma corrente nova destinada à dessalgadora, totalizando treze correntes adicionais de reúso na entrada das operações receptoras, em um total de quarenta e quatro correntes do processo. Assim, o valor de F_{AR} para este cenário corresponde a 0,2954 (=13/44), como colocado na Tabela 7.24. A determinação do F_{AR} corresponde à etapa 5 do procedimento de seleção apresentado no item 6.5.

Tabela 7.24 – Fator adicional de reúso calculado para os cenários considerados após seleção prévia

Cenário	Nº de correntes de reúso	Nº total de correntes do sistema	Fator adicional de reúso (F_{AR})
1	13	44	0,2954
2a	14	44	0,3182
2b	12	44	0,2727
3a	3	44	0,0682
9a	13	44	0,2954
9b	12	44	0,2727
11a	1	44	0,0227
13b	4	44	0,0909
14	11	44	0,2500
15a	6	44	0,1364
17a	2	44	0,0454
19b	9	44	0,2045

A seleção dos cenários é realizada com base nos menores valores resultantes do produto da divergência em relação ao desvio-padrão pelo fator adicional de reúso, dentro de cada abordagem (máximo reúso, flexibilização 20% e flexibilização ciclo de concentração máximo) definida para os cenários remanescentes. A Tabela 7.25 mostra os valores obtidos pelo critério de análise sequencial de cenários deste estudo, tendo sido apontados os seguintes cenários candidatos a detalhamento técnico para fins de implementação: 3a, 11a e 17a. Os resultados listados na Tabela 7.25 exprimem implícita ou explicitamente a realização das etapas 2, 3, 4 e 6 do procedimento de seleção.

Tabela 7.25 – Determinação de cenários potenciais com base no critério de análise sequencial

Cenário	Redução nos custos (%)	Média de redução (%)	Divergência entre a média (%)	Desvio médio (DM)	Desvio padrão (DP)	Coeficiente de variação (CV)	Redução / Divergência	Redução / Média	(Divergência em relação ao DP) * F_{AR}
(Base)									
(1)	13,71		**1,61**				8,52	1,13	**0,0458**
(2a)	36,78		**24,69**				1,49	3,04	0,7589
(2b)	26,74		**14,64**				1,83	2,21	0,3849
(3a)	11,98		**0,12**				100,51	0,99	**0,0008**
(3b)	3,09		9,01						
(4a)	16,20		4,10						
(4b)	6,30	12,10	5,80	7,52	10,35	0,86			
(5a)	15,96		3,86						
(5b)	2,27		9,83						
(6a)	4,80		7,30						
(6b)	0		12,10						
(7a)	11,35		0,75						
(7b)	8,10		4,00						
(8)	19,64		4,16						
(9a)	30,23		**14,75**				2,05	1,95	0,4734
(9b)	26,74		**11,25**				2,38	1,73	0,3335
(10a)	11,98		3,50						
(10b)	3,08		12,41						
(11a)	16,18	15,48	**0,70**	7,31	9,20	0,59	23,19	1,05	**0,0017**
(11b)	6,30		9,18						
(12a)	17,64		2,16						
(12b)	2,27		13,22						
(13a)	22,66		7,17						
(13b)	13,60		**1,88**				7,23	0,88	**0,0186**
(14)	26,81		**10,72**				2,50	1,67	**0,2447**
(15a)	35,49		**19,40**				1,83	2,21	0,2410
(15b)	18,65		2,56						
(16a)	15,18		0,91						
(16b)	6,27		9,81						
(17a)	15,33		**0,76**				20,13	0,95	**0,0031**
(17b)	6,23	16,09	9,85	8,48	10,98	0,68			
(18a)	34,72		18,63						
(18b)	13,58		**2,51**				0,18	0,84	1,3706
(19a)	6,09		10,00						
(19b)	0,00		16,09						
(20a)	19,92		3,84						
(20b)	10,87		5,22						

A identificação de cenários potenciais pode ser notabilizada como uma etapa importante à medida que permite constatar que o fato de um cenário apresentar baixa divergência entre a média, como por exemplo o cenário 18b (2,51%) não significa necessariamente que seja mais promissor, isto porque seu fator adicional de reúso (F_{AR}) relativamente alto induz a um aumento do indicador final da análise sequencial (1,3706). Por outro lado, o cenário 3a, tendo maior relação redução / divergência (100,51) e baixo F_{AR} possui indicador final mais promissor dentre os cenários avaliados segundo esse critério.

A Figura 7.28 ilustra o formato de seleção pelo critério multiplicativo de divergência e fator adicional de reúso, mencionado anteriormente.

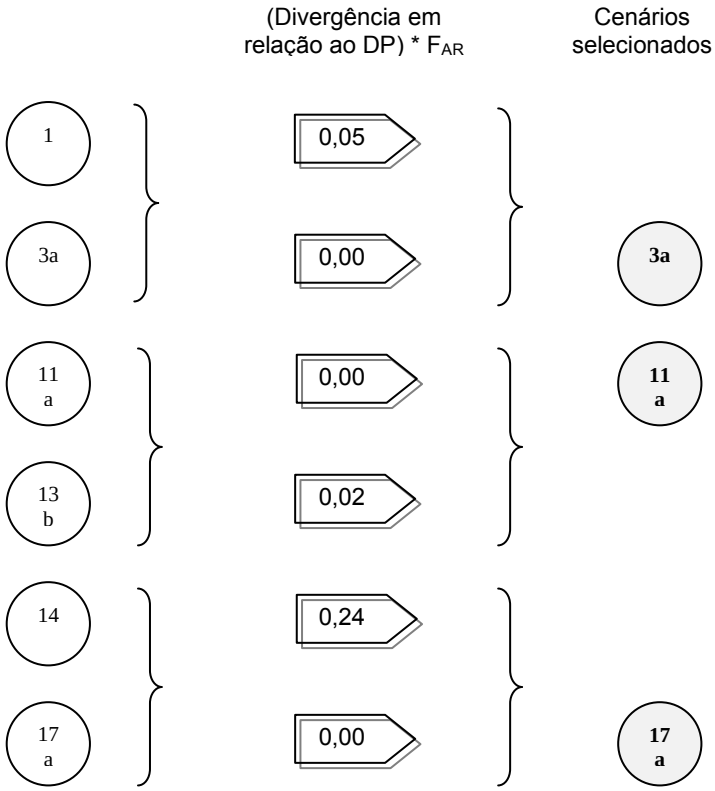


Figura 7.28 – Esquema da etapa de seleção de cenários com base no critério multiplicativo de divergência e fator adicional de reúso

Com os cenários selecionados, torna-se importante identificar a necessidade de sistemas de regeneração de correntes, em caso de violação de limites de concentração de contaminantes nas operações envolvidas no realinhamento para reúso sugerido pela aplicação do método DFA.

7.8. APLICAÇÃO DE PROCEDIMENTO PARA ALOCAÇÃO DE SISTEMAS DE REGENERAÇÃO DE CORRENTES

O realinhamento de correntes estabelecidos pelos cenários de reúso induz à posssibilidade de alterações de limites de concentrações relativos aos contaminantes nas correntes envolvidas. A análise considera que os contaminantes sejam restabelecidos na concentração máxima de saída da operação, de modo que se tenha máxima eficiência de remoção e o emprego de um processo regenerativo adequado. O ponto de estrangulamento, ou ponto *pinch*, determinado para máximo reúso, ocorre quando a curva de condições limites de água coincide com a curva composta das operações (MIERZWA e HESPANHOL, 2005, p. 127), e, além de definir o ponto de mínimo consumo de água, é importante para avaliar as operações e correntes cuja precisão de dados são adotadas na inclusão de eventuais processos regenerativos. Nas redes de diagramas de massa, o ponto *pinch* refere-se à concentração na qual ocorre o primeiro decréscimo do somatório de vazões alocadas para as operações em cada intervalo, e para cada cenário de DFA gerado. A concentração no ponto *pinch* indica as correntes e operações que necessitam de dados precisos, tendo ainda papel importante na análise e alocação de processos regenerativos. Segundo Delgado (2008, p. 38), “a corrente a ser regenerada deve ter concentração de saída igual ou menor que a concentração *pinch*, ou então iniciar com 0 ppm (concentração da fonte externa de água), podendo ter concentração de saída menor que a concentração *pinch”*; além disso, após a regeneração, a concentração de saída do regenerador deve ser menor que a concentração *pinch*, garantindo que o processo de regeneração reduza o consumo de água limpa. Por outro lado, a precisão dos dados nas proximidades do *pinch* está ligada à sensibilidade das metas estabelecidas. As correntes que antecedem o *pinch* requerem informações mais precisas, enquanto que as operações que incluem o *pinch* também precisam de atenção, pois se tornam relevantes em um estudo de otimização.

A Tabela 7.26 indica a localização do *pinch* para os cenários selecionados, informando as correntes e as operações presentes na concentração igual ou inferior ao referido ponto.

Tabela 7.26 – Identificação do ponto *pinch* com a inclusão de correntes e operações que o incorporam, para os respectivos cenários selecionados

Cenário	Concentração no *pinch* (mg/L)	Correntes	Operações
3a	1,56	Água Bruta (corrente 3); efluente TR02 (11); Uso Geral (13); efluente Udasf (20); Fonte Dessalgadora (38); Dessalgadora Reúso (39); efluente Destilação Atmosférica (28); Destilação a Vácuo (31); Pré-flash (35); Tanque de Petróleo (40)	TR02; Uso Geral; Udasf; Destilação Atmosférica; Destilação a Vácuo; Dessalgadora; Pré-flash; Tanque de Petróleo
11a	0,10	Água Bruta (3); efluente TR01 (8); efluente TR02 (11); Uso Geral (13); efluente Udasf (20); Fonte Dessalgadora (38); Dessalgadora Reúso (39); Efluente Destilação Atmosférica (28); Destilação a Vácuo (31); Pré-flash (35); Tanque de Petróleo (40)	TR01; TR02; Uso Geral; Udasf; Destilação Atmosférica; Destilação a Vácuo; Dessalgadora; Pré-flash; Tanque de Petróleo
17a	0,14	Água Bruta (3); efluente TR01 (8); efluente TR02 (11); Uso Geral (13); efluente UDASF (20); Fonte Dessalgadora (38); Dessalgadora Reúso (39); Efluente Destilação Atmosférica (28); Destilação a Vácuo (31); Pré-flash (35); Tanque de Petróleo (40)	TR01; TR02; Uso Geral; Udasf; Destilação Atmosférica; Destilação a Vácuo; Dessalgadora; Pré-flash; Tanque de Petróleo

Na Tabela 7.26, observa-se a influência de correntes e operações comuns entre os cenários analisados, tendo localização pontual ou anterior ao ponto *pinch*. Em sua maioria, as correntes atravessam o *pinch*, sendo comuns: Água Bruta; efluente TR01; efluente TR02; Uso Geral; efluente Udasf; Fonte Dessalgadora; Dessalgadora Reúso; efluente Destilação Atmosférica; Destilação a Vácuo; Pré-flash; e Tanque de Petróleo. Já as operações comuns

são: TR01; TR02; Uso Geral; Udasf; Destilação Atmosférica; Destilação a Vácuo; Dessalgadora; Pré-flash; e Tanque de Petróleo.

O procedimento para alocação de processos regenerativos consiste inicialmente em identificar as correntes envolvidas na violação de concentração máxima de contaminantes, a partir da realização do balanço hídrico dos cenários selecionados. Esta é uma etapa inicial e importante para esta proposta; diante disso, a Tabela 7.27 relaciona as correntes aos respectivos cenários.

Tabela 7.27 – Cenários selecionados para análise subsequente relativa às correntes que apresentam violação de concentração máxima de contaminantes no balanço hídrico

Cenário	Correntes envolvidas
3a	2+6 (TR01), 2+9 (TR02), 11+12 (45 – uso geral), 44 (dessalgadora)
11a	11+44 (uso geral), 44 (dessalgadora)
17a	11+12 (uso geral), 44 (dessalgadora)

Após a identificação das correntes, segue-se o reconhecimento das operações associadas às suas correntes de entrada. A violação de concentração é caracterizada pela concentração de contaminante cujo valor de entrada excede o seu equivalente original considerado máximo para as condições operacionais. Assim, um ou mais contaminantes podem ter seus limites (aqui denominadas concentrações meta) excedidos com o provável realinhamento físico das tubulações destinadas ao reúso.

A Figura 7.29 exibe a configuração atualizada do diagrama de blocos do cenário 3a, alocando blocos representativos de processos de regeneração a serem definidos conforme a aplicação do procedimento de interposição e a partir das informações disponíveis com relação às técnicas adequadas.

O reúso nas torres TR01 e TR02 no cenário 3a da Figura 7.29 traz como benefício o aproveitamento da purga da ETA, originalmente enviada para a ETDI, com a consequente redução de água bruta; apesar disso, tal benefício neste caso não é repassado como redução total na captação, já que as torres necessitam de vazão fixa para sua operação, e a purga da ETA constitui um efluente direto da captação de água, após passar por tratamento. Nesta condição, pode-se pensar em não acatar estas opções de reúsos, pois não seria atrativo investir em realinhamento de correntes e com o inconveniente eventual de adicionar custo de capital relativo a regeneradores a montante das torres. Cabe salientar, no entanto, que tais opções podem se tornar interessantes caso a necessidade de incluir regeneradores seja descartada, pois o reúso da purga da ETA diminuiria a vazão de sobrecarga desta fonte para a ETDI. Por outro lado, o reúso da purga da TR02 como complemento para uso geral é

uma alternativa oportunamente desejável, pois destina e aproveita um efluente (purga da TR02) que já seria enviado para tratamento final na ETDI. Além disso, a operação uso geral pode ter uma vazão menor que o seu limite (vazão não fixa), ao contrário das águas de reposição das torres, fato que contribui para reduzir o consumo de água bruta (corrente 12).

Adicionalmente, o reúso da ETDI na dessalgadora também seria interessante, pois como as suas correntes afluentes (efluentes *Stripper* II e destilação a vácuo) podem ter vazões menores (embora seu limite inferior não seja aqui considerado), isto contribui para diminuir a vazão e o investimento na geração de água desmineralizada. Embora o DFA gerado pelo MINEA tivesse sugerido empregar 109,3 t/h do efluente da ETDI, e com isso reduzir a parcela do afluente original da dessalgadora (corrente 38) para 2,7 t/h, optou-se aqui por destinar todo o complemento da ETDI de 112 t/h na dessalgadora. A observação de limites mínimos de vazão para essas operações (dessalgadora, por exemplo), permitiria reduzir a captação de água desmineralizada, tornando o reúso uma alternativa atrativa não somente pela redução do efluente final a ser descartado no corpo hídrico, mas também refletindo essa redução no menor custo de tratamento da água (ETA).

Deste modo, o cenário que considera as correntes de reúso para uso geral e dessalgadora apenas, sem reutilização nas torres de resfriamento, tem-se uma redução de 6,1 t/h de água bruta, uma vez que é a própria parcela destinada ao complemento como reúso da purga da TR02 para uso geral. Porém, como a dessalgadora neste caso utiliza 112 t/h (mantém-se o limite superior, pois não se identifica o limite inferior de vazão nesta operação) de efluente da ETDI, isto não representa especificamente uma redução na captação de água desmineralizada, já que não houve diminuição no consumo da operação receptora de corrente de reúso. Assim, neste cenário a redução na captação é de apenas 6,1 t/h, mas a diminuição de efluente a ser descartado no corpo hídrico é sensivelmente reduzida para 295,9 t/h (414 t/h – 6,1 t/h – 112 t/h), levando à possibilidade de redução de impacto ambiental negativo sobre o corpo hídrico. Na Figura 7.29, desconsiderando preliminarmente a presença do regenerador (REG), observa-se o ciclo formado pelas correntes 44, 39, 41, 42 e 43, envolvendo a ETDI e a dessalgadora; o reciclo é resolvido pelo balanço hídrico do cenário, realizado pelo recurso denominado *Solver* do *Software* Microsoft® Excel; neste caso, utiliza-se o método numérico de substituição sucessiva para promover a convergência dos parâmetros envolvidos (pH e concentração dos componentes). A Figura 7.30 apresenta a nova configuração do cenário 3a adotando as modificações resultantes da análise supracitada, com reúso para uso geral e dessalgadora.

As observações relativas ao cenário 3a podem ser estendidas para os cenários 11a e 17a, uma vez que apresentam similaridades estruturais quanto ao aproveitamento hídrico sugerido. Na Figura 7.31 (Cenário 11a) são utilizadas 38,9 t/h da corrente de purga da TR02

e 11,1 t/h de efluente da ETDI para compor a vazão destinada para uso geral, o que leva à redução de 50 t/h na captação total, e vazão de descarte final de efluente de 252 t/h (414 t/h – 112 t/h – 38,9 t/h – 11,1 t/h). Inicialmente sem levar em conta a necessidade de regenerador (já representado na Figura 7.31), observa-se um reciclo envolvendo as correntes 44, 13, 42 e 43 (entre as operações ETDI e Uso Geral); à semelhança do cenário 3a, há também o reciclo estabelecido pelas correntes 44, 39, 41, 42 e 43 (ETDI e Dessalgadora). O reciclo de parte da ETDI para compor a totalidade do afluente da dessalgadora (112 t/h) eventualmente irá requerer um investimento em sistema de regeneração a montante que poderia ser evitado se tal proposta de reúso não fosse adotada. No entanto, a longo prazo, do mesmo modo que o reciclo permitiria o acúmulo de componentes no sistema e levar à sobrecarga de tratamento, esta medida poderia trazer o benefício de redução da carga de contaminantes lançada no corpo hídrico. Por outro lado, é possível ainda que a sobrecarga do sistema de tratamento ocasione não somente aumento de custos operacionais associados a esta medida, mas também o aumento de resíduos sólidos provenientes deste processo. Sendo assim, a adoção de técnicas de reciclo neste tipo de sistema hídrico nem sempre é uma boa opção, e uma análise criteriosa que envolva referenciais técnicos e econômicos deve sustentar a tomada de decisão para implementar a proposta. Diante das evidências da análise, é possível inferir que o sistema já se encontre operando nas proximidades do nível ótimo, dispensando o emprego de outros recursos para sustentar ações diversas de reúso no sistema. De qualquer forma, para análise da demonstração sequencial de processos regenerativos, optou-se por atender à substituição do afluente original da dessalgadora pelo efluente da ETDI (reciclo estabelecido pelas correntes 44, 39, 41, 42 e 43, sem incluir nesta análise a possibilidade de regeneração, pois levará à adição de corrente regenerada), incorporando a bonificação da redução de despejo final de efluentes. O mesmo comportamento é observado na Figura 7.32 (Cenário 17a), o qual destina 38,5 t/h da purga da TR02 e 11,5 t/h da fonte original de água bruta para uso geral, e 112 t/h de efluente da ETDI para a dessalgadora. A redução na captação total é de 38,5 t/h, enquanto que a vazão de efluente final descartado corresponde a 263,5 t/h (414 t/h – 38,5 t/h – 112 t/h).

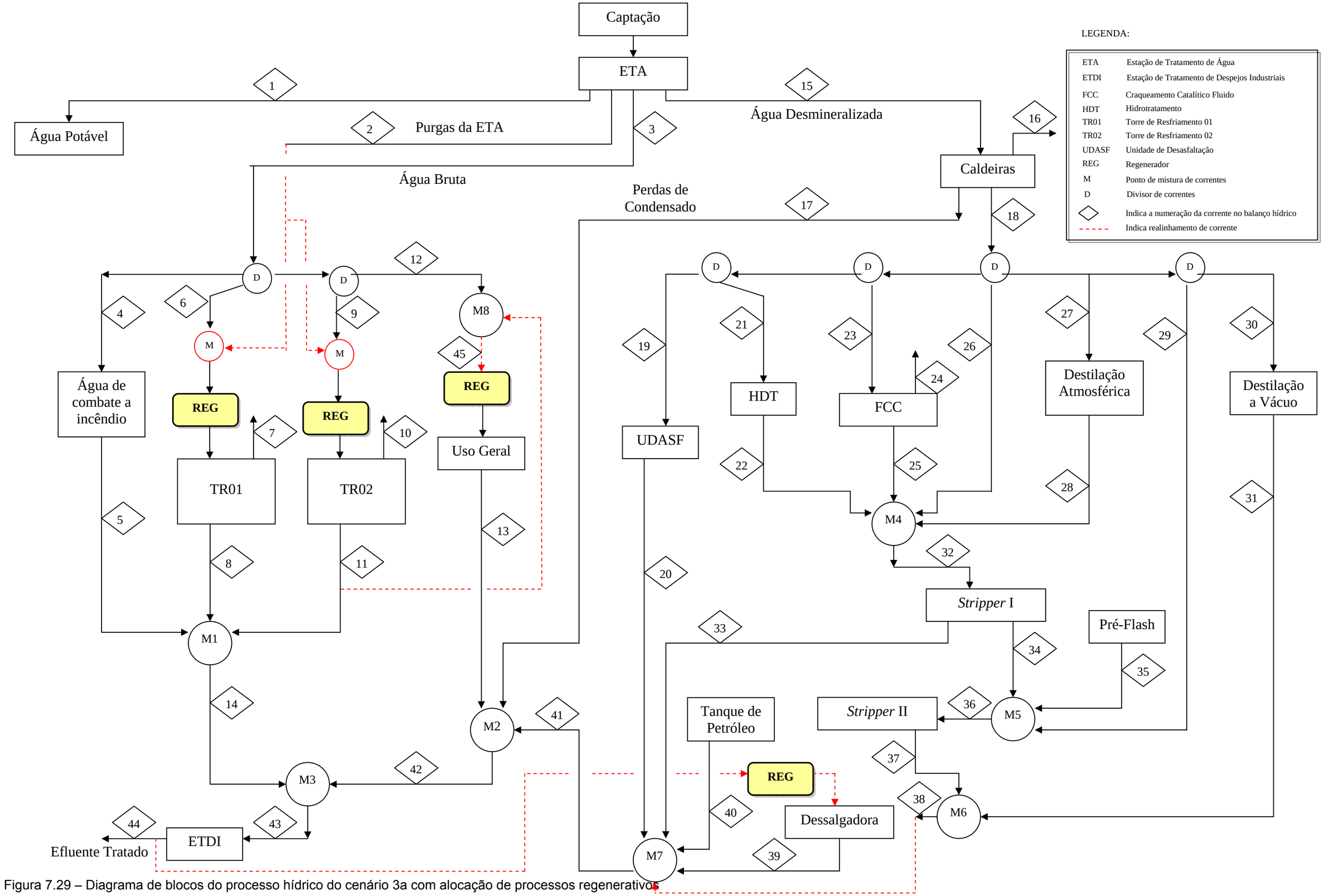


Figura 7.29 – Diagrama de blocos do processo hídrico do cenário 3a com alocação de processos regenerativos

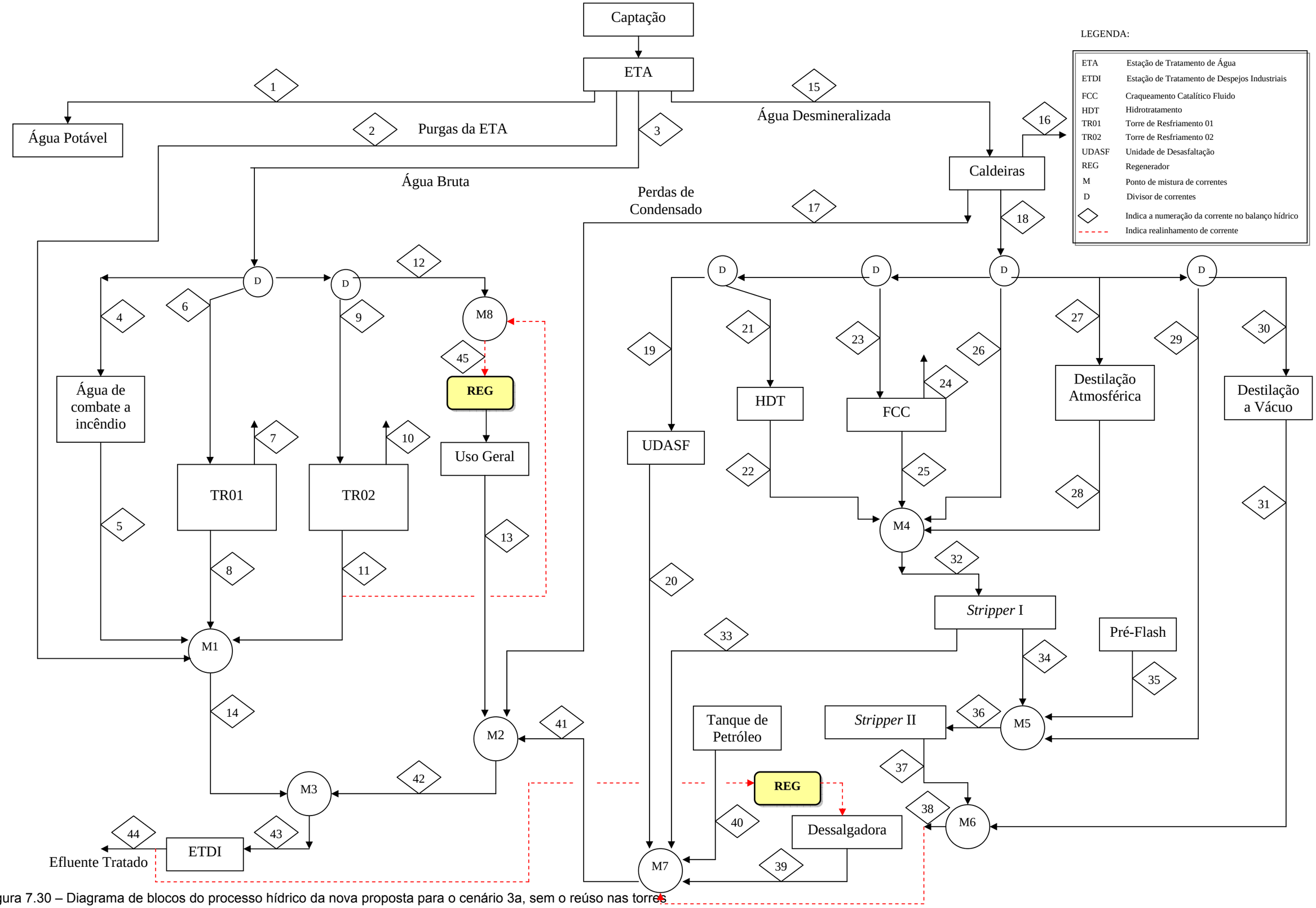


Figura 7.30 – Diagrama de blocos do processo hídrico da nova proposta para o cenário 3a, sem o reúso nas torres

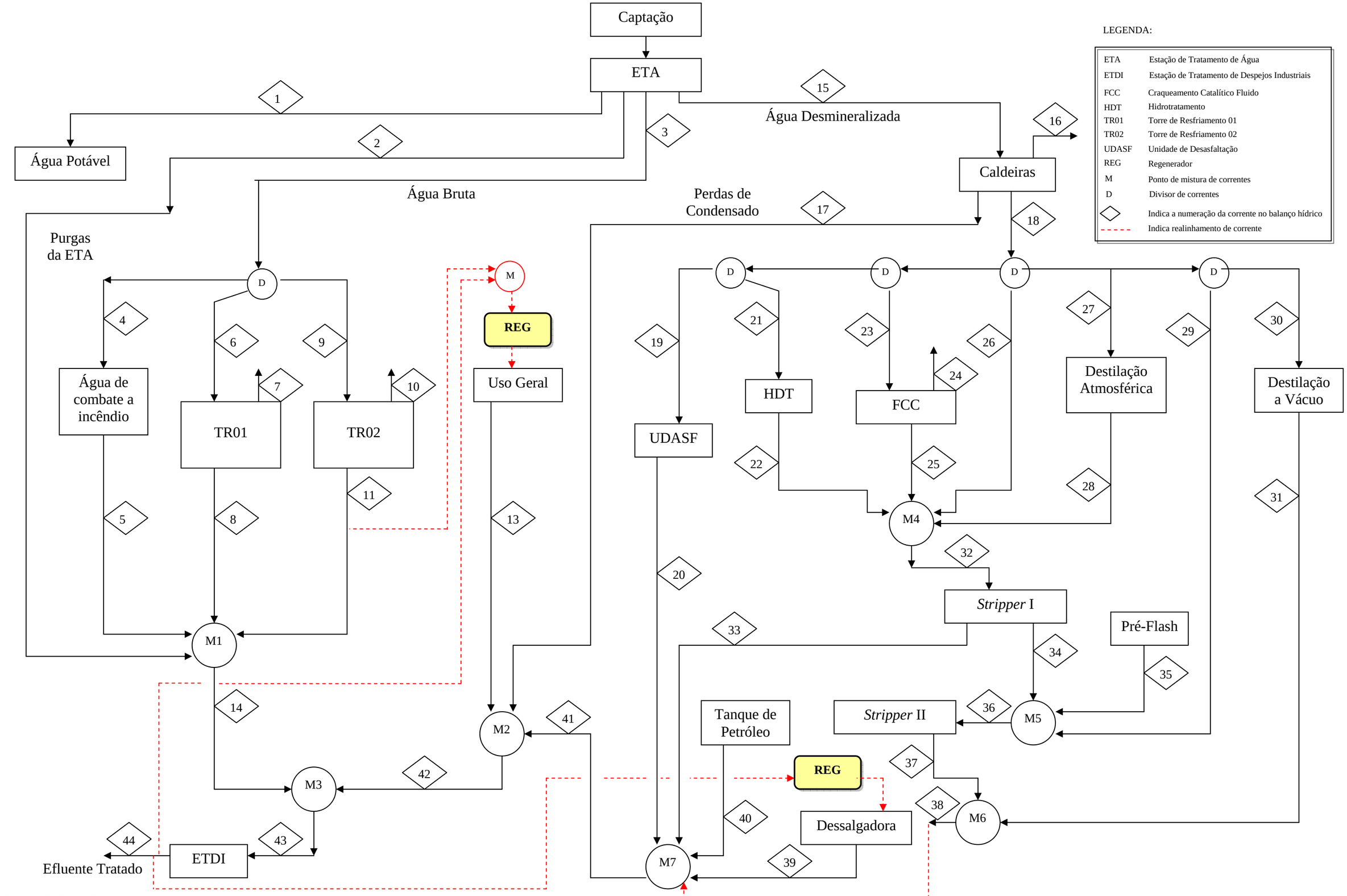


Figura 7.31 – Diagrama de blocos do processo hídrico do cenário 11a com alocação de processos regenerativos

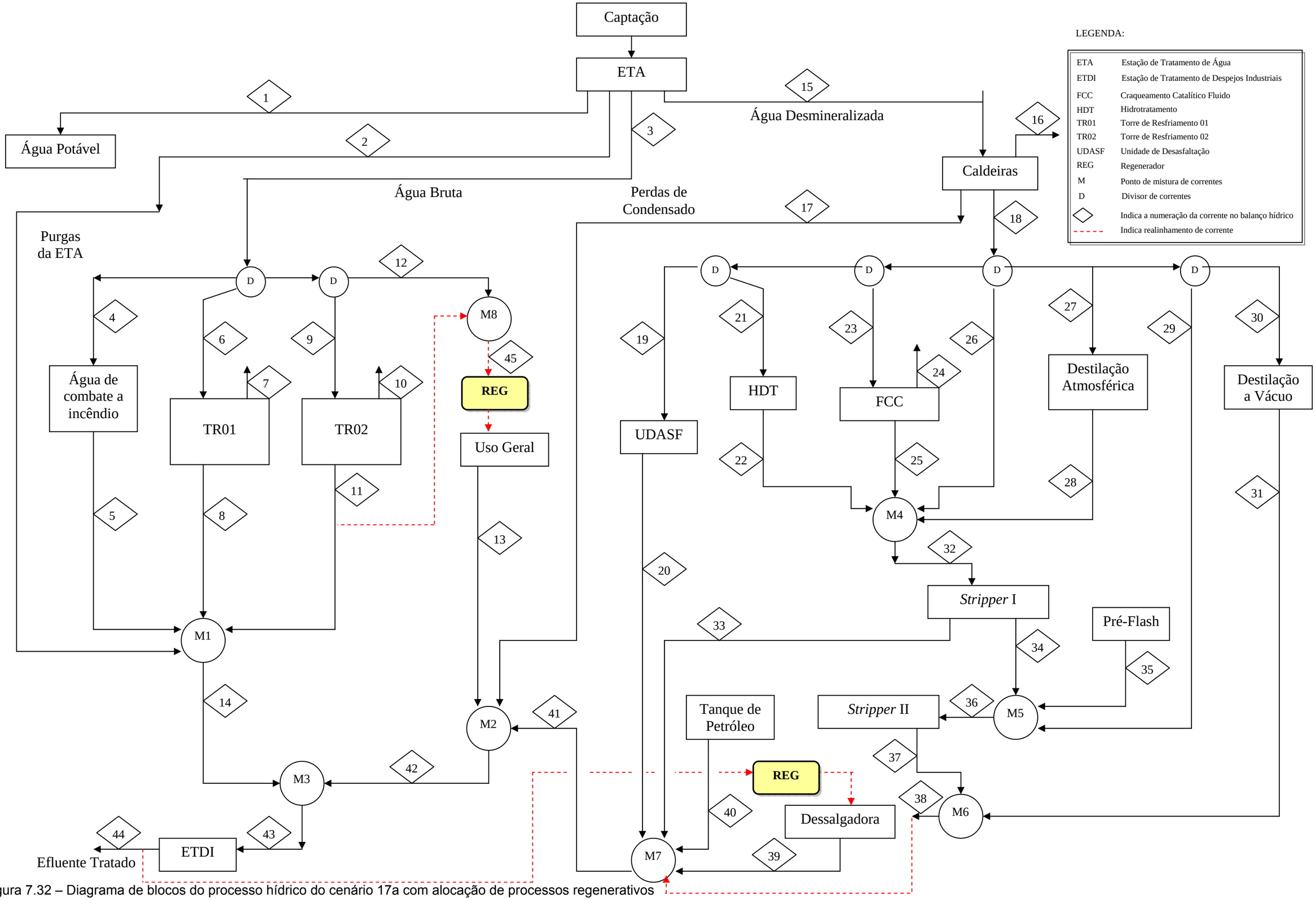


Figura 7.32 – Diagrama de blocos do processo hídrico do cenário 17a com alocação de processos regenerativos

A Figura 7.33 sintetiza as informações relativas à vazão reduzida de água bruta e de efluente final para descarte, incluindo seus respectivos valores de redução percentual. A maior economia corresponde ao cenário 11a, embora seja necessário estudar a influência dos demais cenários quanto aos custos de processos regenerativos. Esta avaliação aprofunda a tendência seletiva dos cenários, pois mesmo que o indicador do critério de análise sequencial revele que o cenário 11a é 62% menos robusto que o cenário 3a (porém 5,98 pontos percentuais a frente do cenário 3a, em termos de redução de vazão de água bruta, e 10,60 pontos percentuais superior, em termos de redução de efluente final – Figura 7.32), que por sua vez é cerca de 50% mais robusto que o cenário 17a, a inclusão de eventuais regeneradores na análise estabelece o real efeito do investimento para a implementação do cenário adequado.

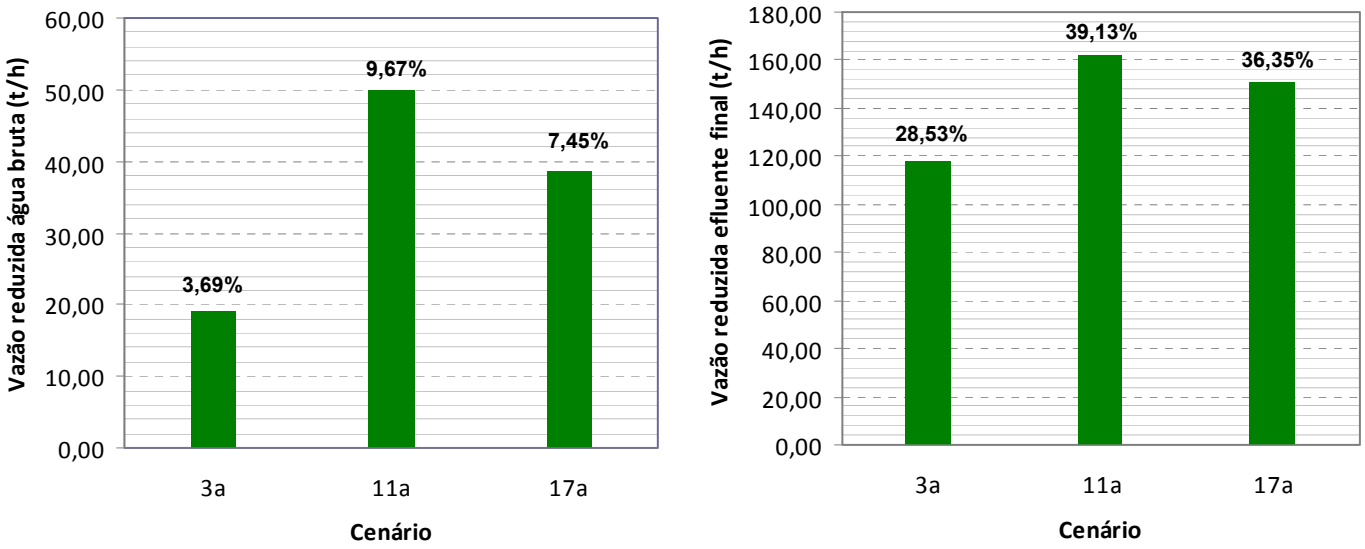


Figura 7.33 – Vazão e percentual de redução de água bruta e de efluente final para os respectivos cenários

Para aplicar o procedimento de alocação de regeneradores de componentes avulsos em cada cenário torna-se imprescindível estabelecer uma comparação entre as correntes de reúso e a meta de concentração de entrada dos componentes nas operações receptoras, provenientes dos respectivos balanços hídricos para cada cenário. As Tabelas 7.28, 7.29 e 7.30 realiza esta comparação, que envolve particularmente as operações Uso Geral de Dessalgadora, para os cenários 3a, 11a e 17a, respectivamente. As concentrações de componentes que apresentam valores maiores que as respectivas metas e que, portanto,

necessitam de um regenerador específico para tal componente, a montante da operação, são indicadas em negrito.

Tabela 7.28 – Comparação entre as correntes de reúso e a meta de concentração de entrada dos componentes nas operações receptoras, provenientes dos respectivos balanços hídricos, para o cenário 3a

Operação	Uso Geral		Dessalgadora	
Corrente	45	Meta: 12	44	Meta: 38
Componentes	Concentração (mg/L)			
Cálcio	**15,63**	8,6	**94,44**	6,11
Sílica	**17,08**	9,4	**17,63**	12,89
Amônia	**0,13**	0,07	2,07	239,31
Sulfeto	0,09	0,1	0,27	34,18
Cloreto	**33,49**	9,7	47,01	61,39
Cianeto	0	0	0,15	1,98
Fenol	0,05	0,05	0,98	73,81

Tabela 7.29 – Comparação entre as correntes de reúso e a meta de concentração de entrada dos componentes nas operações receptoras, provenientes dos respectivos balanços hídricos, para o cenário 11a

Operação	Uso Geral		Dessalgadora	
Corrente	11+12	Meta: 12	44	Meta: 38
Componentes	Concentração (mg/L)			
Cálcio	**66,22**	8,6	**85,14**	6,11
Sílica	**72,38**	9,4	**17,00**	12,89
Amônia	**0,57**	0,07	2,17	239,31
Sulfeto	0,06	0,1	0,28	34,18
Cloreto	**204,69**	9,7	18,47	61,39
Cianeto	0	0	0,11	1,98
Fenol	**0,06**	0,05	1,03	73,81

Tabela 7.30 – Comparação entre as correntes de reúso e a meta de concentração de entrada dos componentes nas operações receptoras, provenientes dos respectivos balanços hídricos, para o cenário 17a

Operação	Uso Geral		Dessalgadora	
Corrente	45	Meta: 12	44	Meta: 38
Componentes	Concentração (mg/L)			
Cálcio	**52,97**	8,6	**96,33**	6,11
Sílica	**57,89**	9,4	**18,09**	12,89
Amônia	**0,46**	0,07	2,16	239,31
Sulfeto	0,07	0,1	0,28	34,18
Cloreto	**159,84**	9,7	48,96	61,39
Cianeto	0	0	0,16	1,98
Fenol	**0,06**	0,05	1,02	73,81

Para cada contaminante excedido foi calculada a eficiência de remoção do contaminante i pela técnica j (ε_{Cij}) necessária ao atendimento das concentrações meta de entrada (Cin, concentração meta do contaminante, a ser alcançada por meio do processo regenerativo), em cada operação, para cada cenário selecionado. A Tabela 7.31 relaciona os valores de eficiências (em base não percentual) dos contaminantes que necessitam de ajuste de concentração, para cada cenário, referentes às operações Uso Geral e Dessalgadora, receptoras de correntes de reuso.

Tabela 7.31 – Eficiências de remoção requeridas para enquadramento de concentrações meta de entrada nas operações receptoras de correntes de reúso

Cenário	3a		11a		17a	
Operação	Uso geral	Dessalgadora	Uso geral	Dessalgadora	Uso geral	Dessalgadora
Componentes	Eficiência de remoção requerida (ε_{cij})					
Cálcio	0,4498	0,9353	0,8701	0,9282	0,8376	0,9366
Sílica	0,4496	0,2689	0,8701	0,2418	0,8376	0,2875
Amônia	0,4615		0,8772		0,8478	
Sulfeto						
Cloreto	0,7104		0,9526		0,9393	
Cianeto						
Fenol			0,1667		0,1667	

A Tabela 7.32 relaciona as técnicas disponíveis associadas às respectivas eficiências de remoção do contaminante i pela técnica j (ε_{Dij}). Também são mostrados os respectivos custos ou faixas de custos operacionais encontrados para as respectivas técnicas. A disponibilidade de informações relativas a custos normalmente compõe um empecilho técnico para a realização da análise econômica em sistemas de regeneração e tratamento de efluentes, o que pode levar à adoção de valores pouco atualizados ou mesmo com características de baixa precisão e confiabilidade. No entanto, as poucas informações disponíveis não devem ser preteridas por este aspecto, pois não invalidam a utilidade da análise. Para fins de cálculo e comparação de alternativas, os custos relativos à adsorção, oxidação química e troca iônica na Tabela 7.32 são tratados como se fossem do tipo operacional, embora sejam originalmente referenciados como de investimento (sem levar em conta o efeito da economia de escala), situação aqui encontrada para contornar a falta de dados. Neste caso, os valores de custo (ZINKUS *et al*., 1998) incluem capital de investimento do equipamento instalado, produtos químicos para tratamento e energia, conforme reportados por Delgado (2008).

Tabela 7.32 – Relação de técnicas disponíveis para o processo de regeneração dos contaminantes indicados

Componente	Técnica recomendada	Eficiência (%)	Custo operacional	Referência
Cálcio	Osmose inversa	96 – 98	0,177 $/m³	Azevedo *et al*. (1999) – base 1998
Sílica	Osmose inversa	95	0,177 $/m³	Azevedo *et al*. (1999) – base 1998
Amônia	Tratamento biológico	90	0,0067 $/m³	Gunaratnam *et al*. (2005) – base: 1997
	Adsorção	90	0,0185 – 0,2642 $/m³ (médio: 0,1414 $/m³)	Zinkus *et al*. (1998) – base 1997
	Stripping	95	1,0000 $/m³ efluente tratado	Gunaratnam *et al*. (2005) – base: 1997
	Troca iônica	20 – 80	0,00021136 $/m³	Becvar *et al*. (2002), (In: Delgado, 2008) – base: 2001
	Oxidação química (ozônio)	>80	0,0528 – 2,6417 $/m³ (médio: 1,3472 $/m³)	Zinkus *et al*. (1998) – base 1997
Sulfeto	Oxidação química	>75	0,0528 – 2,6417 $/m³ (médio: 1,3472 $/m³)	Zinkus *et al*. (1998) – base 1997
	Tratamento biológico	90	0,0067 $/m³	Gunaratnam *et al*. (2005) – base: 1997
	Stripping	95	1,0000 $/m³ efluente tratado	Gunaratnam *et al*. (2005) – base: 1997
Cloreto	Troca iônica	≥90	0,00021136 $/m³	Becvar *et al*. (2002), (In: Delgado, 2008) – base: 2001
Cianeto	*Stripping*	95	1,0000 $/m³ efluente tratado	Gunaratnam *et al*. (2005) – base: 1997
	Oxidação química	>80	0,0528 – 2,6417 $/m³ (médio: 1,3472 $/m³)	Zinkus *et al*. (1998) – base 1997
	Troca iônica	≥90	0,00021136 $/m³	Becvar *et al*. (2002), (In: Delgado, 2008) – base: 2001
Fenol	Oxidação química	95	0,0528 – 2,6417 $/m³ (médio: 1,3472 $/m³)	Zinkus *et al*. (1998) – base 1997

A Tabela 7.33 apresenta correlações da literatura para a estimativa de custos de investimento das técnicas de regeneração consideradas na resolução dos cenários. Estas estimativas não incluem os respectivos custos de importação. A atualização por índice de custos é efetuada com base nos valores do *Chemical Engineering Plant Cost Index* (CE *Index*), para o ano de 2010, em relação ao ano-base considerado na correlação divulgada. De acordo com o CE *Index*, o valor atualizado para o ano de 2010 equivale a 550,8; já as correlações utilizadas neste trabalho (Tabela 7.29) reportam aos anos de 1997 (387), 1998 (390), 2001 (394,3) e 2007 (525,4) (LOZOWSKI, 2011). Para publicações que não referenciam o ano de obtenção da correlação, optou-se por considerar o valor do índice referente ao ano anterior à sua publicação. Para efeito de cálculo, as correlações para *stripping* e tratamento biológico, adotadas por Gunaratnam *et al*. (2005), são referenciadas para o ano de 1997, conforme sua adoção, embora as correlações sejam originadas em anos anteriores a essa recomendação. Já para Zinkus *et al*. (1998), Azevedo *et al*. (1999), Becvar *et al*. (2002, apud DELGADO, 2008) e McGivney (2008), são referenciados os anos de 1997, 1998, 2001 e 2007, respectivamente.

Tabela 7.33 – Correlações da literatura para estimativa de custo de investimento em processos regenerativos

Processo	Correlação (C_p)	Ano base	Referência
Osmose inversa	$41616 \times Q\ (t/h)^{0,7}$	1998	Azevedo *et al*. (1999)
Adsorção (carvão ativado)	$87420 \times Q\ (t/h)^{0,2028}$	2007	McGivney (2008)
Stripping com vapor (Coluna)	$16800 \times Q\ (t/h)^{0,7}$	1997	Gunaratnam *et al*. (2005)
Tratamento biológico	$12600 \times Q\ (t/h)^{0,7}$	1997	Gunaratnam *et al*. (2005)
Troca iônica (leito fixo)	$0,2642 \times Q\ (t/h)^{0,7}$	1997	Zinkus *et al*. (1998)
Oxidação química (ozonizador)	$405150 \times Q\ (t/h)^{0,6475}$	2007	McGivney (2008)

A diferença entre eficiências de remoção ($\Delta\varepsilon_{ij}$) na etapa de definição de processos regenerativos é calculada para os respectivos cenários nas Tabelas 7.34, 7.35 e 7.36. Encontram-se grifados em negrito nas Tabelas 7.35 e 7.36 os valores de $\Delta\varepsilon_{ij}$ cujas concentrações meta de determinados componentes ainda não foram alcançadas, e que, portanto, necessitam de uma etapa sequencial de tratamento para enquadramento (valor negativo de $\Delta\varepsilon_{ij}$).

Tabela 7.34 – Diferença entre eficiências de remoção na etapa de avaliação de processos regenerativos (Cenário 3a)

Cenário	3a				
Operação	Uso geral				
Componente	Eficiência de remoção requerida (ε_{cij}) (%)	Técnica disponível (selecionada)	Eficiência da técnica disponível (ε_{Dij}) (%)	C_{rem} (mg/L) (meta)	$\Delta\varepsilon_{ij}$ (ε_{Dij} – ε_{cij}) (%)
Cálcio	44,98	Osmose inversa	97 (média)	0,4689 (8,6)	52,02
Sílica	44,96	Osmose inversa	95	0,8540 (9,4)	50,44
Amônia	46,15	Tratamento biológico	90	0,0130 (0,07)	43,85
		Troca iônica	50	0,0650 (0,07)	3,85
		Oxidação química	80	0,0260 (0,07)	33,85
		Adsorção	90	0,0130 (0,07)	18,96
		Stripping	95	0,0065 (0,07)	23,96
Cloreto	71,04	Troca iônica	90	3,3490 (9,7)	18,96
		Osmose inversa	96 (média)	1,3396 (9,7)	24,96
Operação	Dessalgadora				
Componente	Eficiência de remoção requerida (ε_{cij}) (%)	Técnica disponível (selecionada)	Eficiência da técnica disponível (ε_{Dij}) (%)	C_{rem} (mg/L) (meta)	$\Delta\varepsilon_{ij}$ (ε_{Dij} – ε_{cij}) (%)
Cálcio	93,53	Osmose inversa	97 (média)	2,8332 (6,11)	3,47
Sílica	26,89	Osmose inversa	95	0,8815 (12,89)	68,11

Tabela 7.35 – Diferença entre eficiências de remoção na etapa de avaliação de processos regenerativos (Cenário 11a)

Cenário	11a				
Operação	Uso geral				
Componente	Eficiência de remoção requerida (ε_{cij}) (%)	Técnica disponível (selecionada)	Eficiência da técnica disponível (ε_{Dij}) (%)	C_{rem} (mg/L) (meta)	$\Delta\varepsilon_{ij}$ (ε_{Dij} – ε_{cij}) (%)
Cálcio	87,01	Osmose inversa	97 (média)	1,9866 (8,6)	9,99
Sílica	87,01	Osmose inversa	95	3,6190 (9,4)	7,99
Amônia	87,72	Tratamento biológico	90	0,0570 (0,07)	2,28
		Troca iônica	50	**0,2850** (0,07)	**-37,72**
		Oxidação química	80	**0,1140** (0,07)	**-7,72**
		Adsorção	90	0,0570 (0,07)	2,28
		Stripping	95	0,0285 (0,07)	7,28
Cloreto	95,26	Troca iônica	90	**20,4690** (9,7)	**-5,26**
		Osmose inversa	96 (média)	8,1876 (9,7)	0,74
Fenol	16,67	Oxidação química	95	0,0030 (0,05)	78,33
Operação	Dessalgadora				
Componente	Eficiência de remoção requerida (ε_{cij}) (%)	Técnica disponível (selecionada)	Eficiência da técnica disponível (ε_{Dij}) (%)	C_{rem} (mg/L) (meta)	$\Delta\varepsilon ij$ (ε_{Dij} – ε_{cij}) (%)
Cálcio	92,82	Osmose inversa	97 (média)	2,5542 (6,11)	4,18
Sílica	24,18	Osmose inversa	95	0,8500 (12,89)	70,82

Tabela 7.36 – Diferença entre eficiências de remoção na etapa de avaliação de processos regenerativos (Cenário 17a)

Cenário	17a				
Operação	Uso geral				
Componente	Eficiência de remoção requerida (ε_{cij}) (%)	Técnica disponível (selecionada)	Eficiência da técnica disponível (ε_{Dij}) (%)	C_{rem} (mg/L) (meta)	$\Delta\varepsilon_{ij}$ (ε_{Dij} – ε_{cij}) (%)
Cálcio	83,76	Osmose inversa	97 (média)	1,5891 (8,6)	13,24
Sílica	83,76	Osmose inversa	95	2,8945 (9,4)	11,24
Amônia	84,78	Tratamento biológico	90	0,0460 (0,07)	5,22
		Troca iônica	50	**0,2300** (0,07)	**-34,78**
		Oxidação química	80	**0,0920** (0,07)	**-4,78**
		Adsorção	90	0,0460 (0,07)	5,22
		Stripping	95	0,0230 (0,07)	10,22
Cloreto	93,93	Troca iônica	90	**15,9840** (9,7)	**-3,93**
		Osmose inversa	96 (média)	6,3936 (9,7)	2,07
Fenol	16,67	Oxidação química	95	0,0030 (0,05)	78,33
Operação	Dessalgadora				
Componente	Eficiência de remoção requerida (ε_{cij}) (%)	Técnica disponível (selecionada)	Eficiência da técnica disponível (ε_{Dij}) (%)	C_{rem} (mg/L) (meta)	$\Delta\varepsilon_{ij}$ (ε_{Dij} – ε_{cij}) (%)
Cálcio	93,66	Osmose inversa	97 (média)	2,8899 (6,11)	3,34
Sílica	28,75	Osmose inversa	95	0,9045 (12,89)	66,25

Uma segunda etapa deve ser então realizada, visando restabelecer a qualidade de componentes não alinhados aos valores meta. Após a realização da segunda etapa para aqueles processos regenerativos que não foram capazes de restabelecer a concentração do componente ao seu valor meta, identifica-se na Tabela 7.37 a necessidade de uma terceira etapa ou sequência de regeneração para alcançar este objetivo. Considera-se aqui, por simplificação, que seja utilizada a mesma técnica regenerativa empregada na etapa anterior, de modo que as sequências sejam constituídas pelos mesmos processos. No entanto, o estudo da combinação de técnicas similares ou não para compor uma necessária seqüência de processos regenerativos constitui uma abordagem importante a ser testada posteriormente, uma vez que permite aproveitar o potencial regenerativo de acordo com a necessidade de remoção; como exemplo, quando houver uma quantidade pequena a ser regenerada e o uso de técnica "menos eficiente" pode levar à incorporação de custos menores ($\Delta\varepsilon_{ij}$ igual ou ligeiramente superior a zero), em relação a outras técnicas, inclusive aquela anteriormente empregada, no caso desta apresentar maior eficiência de remoção para o componente considerado. Para tanto, deve-se dispor de informações mais abrangentes acerca do conjunto de técnicas possíveis e adequadas para cada componente, englobando sua eficiência e custos de investimento e de operação. A ordem do tratamento é outro fator importante a ser considerado na síntese de sistemas de regeneração, priorizando a remoção de determinado componente em relação a outro, conforme estudado por Delgado (2008).

Tabela 7.37 – Diferença entre eficiências de remoção na etapa de alocação aditiva de processos regenerativos – segunda etapa

Cenário	11a				
Operação	Uso geral				
Componente	Eficiência de remoção requerida (ε_{cij}) (%)	Técnica disponível (selecionada)	Eficiência da técnica disponível (ε_{Dij}) (%)	C_{rem} (mg/L) (meta)	$\Delta\varepsilon_{ij}$ (ε_{Dij} – ε_{cij}) (%)
Amônia	75,43	Troca iônica	50	**0,1425** (0,07)	**-25,43**
	38,60	Oxidação química	80	0,0228 (0,07)	41,40
Cloreto	52,61	Troca iônica	90	2,0469 (9,7)	37,39
Cenário	17a				
Operação	Uso geral				
Componentes	Eficiência de remoção requerida (ε_{cij}) (%)	Técnica disponível (selecionada)	Eficiência da técnica disponível (ε_{Dij}) (%)	C_{rem} (mg/L) (meta)	$\Delta\varepsilon_{ij}$ (ε_{Dij} – ε_{cij}) (%)
Amônia	69,57	Troca iônica	50	**0,1150** (0,07)	**-19,57**
	23,92	Oxidação química	80	0,0184 (0,07)	56,08
Cloreto	39,32	Troca iônica	90	1,5984 (9,7)	50,68

A Tabela 7.38 apresenta os resultados para a etapa adicional, onde o cenário 17a tem a remoção completa do componente amônia abaixo de sua concentração meta na operação Uso Geral ($\Delta\varepsilon_{ij}$ positivo); entretanto, observa-se a insuficiência na remoção do mesmo componente, na mesma operação, referentes ao cenário 11a, indicando a necessidade de uma etapa posterior para sua completa remoção.

Tabela 7.38 – Diferença entre eficiências de remoção na etapa de alocação aditiva de processos regenerativos – terceira etapa

Cenário	11a				
Operação	Uso geral				
Componente	Eficiência de remoção requerida (ε_{cij}) (%)	Técnica disponível (selecionada)	Eficiência da técnica disponível (ε_{Dij}) (%)	C_{rem} (mg/L) (meta)	$\Delta\varepsilon_{ij}$ (ε_{Dij} – ε_{cij}) (%)
Amônia	50,88	Troca iônica	50	**0,0712** (0,07)	**-0,88**
Cenário	17a				
Operação	Uso geral				
Componentes	Eficiência de remoção requerida (ε_{cij}) (%)	Técnica disponível (selecionada)	Eficiência da técnica disponível (ε_{Dij}) (%)	C_{rem} (mg/L) (meta)	$\Delta\varepsilon_{ij}$ (ε_{Dij} – ε_{cij}) (%)
Amônia	39,13	Troca iônica	50	0,0575 (0,07)	10,87

Neste sentido, a Tabela 7.39 apresenta o resultado da aplicação do processo regenerativo adicional de troca iônica, para remover o componente remanescente em patamar inferior à concentração meta ($\Delta\varepsilon_{ij}$ positivo).

Tabela 7.39 – Diferença entre eficiências de remoção na etapa de alocação aditiva de processos regenerativos – quarta etapa

Cenário	11a				
Operação	Uso geral				
Componente	Eficiência de remoção requerida (ε_{cij}) (%)	Técnica disponível (selecionada)	Eficiência da técnica disponível (ε_{Dij}) (%)	C_{rem} (mg/L) (meta)	$\Delta\varepsilon_{ij}$ (ε_{Dij} – ε_{cij}) (%)
Amônia	1,69	Troca iônica	50	0,0356 (0,07)	48,31

A partir da identificação das possíveis sequências de processos regenerativos, com base no diferencial de eficiências de remoção, procede-se ao cálculo dos custos anuais totais, os quais representam a soma das parcelas referentes ao custo operacional anual e ao custo de investimento anualizado. Tais valores foram ajustados para o ano de 2010. As Tabelas 7.40, 7.41 e 7.42 demonstram os resultados relativos ao custo total dos cenários 3a, 11a e 17a, respectivamente, indicando o critério de menor custo para a seleção da técnica a ser adotada. Estes valores também representam a soma dos processos alocados em sequência, conforme estabelecidos na etapa anterior referente à análise de diferenciais de eficiência (Tabelas 7.34, 7.35, 7.36, 7.37, 7.38 e 7.39). Admite-se que o sistema opere durante 8.600h por ano, e o fator de anualização para o custo de investimento é de 0,1.

Tabela 7.40 – Custo total anual para o conjunto de técnicas a serem adotadas no cenário 3a

Cenário	3a			
Operação	Uso geral			
Componente	Técnica disponível	Custo operacional anual ($/a)	Custo de investimento anualizado ($/a)	Custo total anual ($/a)
Cálcio	Osmose inversa	107.490,74	90.880,07	198.370,81
Sílica	Osmose inversa	107.490,74	90.880,07	198.370,81
Amônia	Troca iônica	126,96	0,5814	127,54
	Tratamento biológico	4.100,40	27.728,89	31.829,29
	Oxidação química	824486,40	534.814,02	1.359.300,42
	Adsorção	86.536,80	20.261,23	106.798,03
	Stripping	612.000	36.971,86	648.971,86
Cloreto	Troca iônica	126,96	0,5814	127,54
	Osmose inversa	107.490,74	90.880,07	198.370,81
Operação	Dessalgadora			
Componente	Técnica disponível	Custo operacional anual ($/a)	Custo de investimento anualizado ($/a)	Custo total anual ($/a)
Cálcio	Osmose inversa	240.779,25	159.824,10	400.603,35
Sílica	Osmose inversa	240.779,25	159.824,10	400.603,35

O sistema de regeneração por osmose inversa é indicado para a remoção de cálcio e sílica, tanto para Uso Geral como na Dessalgadora. Desse modo, o sistema de osmose inversa é unificado de forma a atender simultaneamente a recuperação da qualidade hídrica para o reúso. Com isso, os custos totais deste sistema referem-se aos de um único módulo (neste caso, 198.370,81 $/a para Uso Geral e 400.603,35 $/a para Dessalgadora), totalizando 598.974,16 $/a para este cenário. É interessante observar que os custos da regeneração por troca iônica são muito inferiores aos demais, sendo indicada para a regeneração a montante do Uso Geral, totalizando ínfimos 127,54 $/a.

Tabela 7.41 – Custo total anual para o conjunto de técnicas a serem adotadas no cenário 11a

Cenário	11a			
Operação	Uso geral			
Componente	Técnica disponível	Custo operacional anual ($/a)	Custo de investimento anualizado ($/a)	Custo total anual ($/a)
Cálcio	Osmose inversa	107.490,74	90.880,07	198.370.81
Sílica	Osmose inversa	107.490,74	90.880,07	198.370.81
Amônia	Troca iônica	126,96	0,5814	127,54
	Tratamento biológico	4.100,40	27.728,89	31.829,29
	Oxidação química	824486,40	534.814,02	1.359.300,42
	Adsorção	86.536,80	20.261,23	106.798,03
	Stripping	612.000	36.971,86	648.971,86
Cloreto	Troca iônica	126,96	0,5814	127,54
	Osmose inversa	107.490,74	90.880,07	198.370,81
Fenol	Oxidação química	824.486,40	534.814,02	1.359.300,42
Operação	Dessalgadora			
Componente	Técnica disponível	Custo operacional anual ($/a)	Custo de investimento anualizado ($/a)	Custo total anual ($/a)
Cálcio	Osmose inversa	240.779,25	159.824,10	400.603,35
Sílica	Osmose inversa	240.779,25	159.824,10	400.603,35

Tabela 7.42 – Custo total anual para o conjunto de técnicas a serem adotadas no cenário 17a

Cenário	17a			
Operação	Uso geral			
Componente	Técnica disponível	Custo operacional anual ($/a)	Custo de investimento anualizado ($/a)	Custo total anual ($/a)
Cálcio	Osmose inversa	107.490,74	90.880,07	198.370.81
Sílica	Osmose inversa	107.490,74	90.880,07	198.370.81
Amônia	Troca iônica	126,96	0,5814	127,54
	Tratamento biológico	4.100,40	27.728,89	31.829,29
	Oxidação química	824.486,40	534.814,02	1.359.300,42
	Adsorção	86.536,80	20.261,23	106.798,03
	Stripping	612.000	36.971,86	648.971,86
Cloreto	Troca iônica	126,96	0,5814	127,54
	Osmose inversa	107.490,74	90.880,07	198.370,81
Fenol	Oxidação química	824.486,40	534.814,02	1.359.300,42
Operação	Dessalgadora			
Componente	Técnica disponível	Custo operacional anual ($/a)	Custo de investimento anualizado ($/a)	Custo total anual ($/a)
Cálcio	Osmose inversa	240.779,25	159.824,10	400.603,35
Sílica	Osmose inversa	240.779,25	159.824,10	400.603,35

A seleção da técnica é realizada pelo critério de menor custo total relativo às demais, para um dado componente, conforme mostram os resultados das Tabelas 7.43, 7.44 e 7.45, para os cenários 3a, 11a e 17a, respectivamente. Há técnicas que devido ao grau de eficiência de remoção, impõem a necessidade de mais de uma unidade sequencial, embora haja simultaneidade de recuperação de qualidade hídrica em relação aos componentes.

Tabela 7.43 – Seleção da técnica regenerativa com base no custo total anual para o cenário 3a

Cenário	3a				
Operação	Uso geral				
Componente	Técnica disponível	Unidades sequenciais requeridas	Custo total anual (unidade) ($/a)	Custo total anual ($/a)	Técnica selecionada
Cálcio	Osmose inversa	1	198.370,81	198.370,81	Osmose inversa
Sílica	Osmose inversa	1	198.370,81	198.370,81	Osmose inversa
Amônia	Troca iônica Tratamento biológico Oxidação química Adsorção *Stripping*	1 1 1 1 1	127,54 31.829,29 1.359.300,42 106.798,03 648.971,86	127,54 31.829,29 1.359.300,42 106.798,03 648.971,86	Troca iônica
Cloreto	Troca iônica Osmose inversa	1 1	127,54 198.370,81	127,54 198.370,81	Troca iônica
Operação	Dessalgadora				
Componente	Técnica disponível	Unidades sequenciais requeridas	Custo total anual (unidade) ($/a)	Custo total anual ($/a)	Técnica selecionada
Cálcio	Osmose inversa	1	400.603,35	400.603,35	Osmose inversa
Sílica	Osmose inversa	1	400.603,35	400.603,35	Osmose inversa

Tabela 7.44 – Seleção da técnica regenerativa com base no custo total anual para o cenário 11a

Cenário	11a				
Operação	Uso geral				
Componente	Técnica disponível	Unidades sequenciais requeridas	Custo total anual (unidade) ($/a)	Custo total anual ($/a)	Técnica selecionada
Cálcio	Osmose inversa	1	198.370.81	198.370.81	Osmose inversa
Sílica	Osmose inversa	1	198.370.81	198.370.81	Osmose inversa
Amônia	Troca iônica	4	127,54	510,16	Troca iônica
	Tratamento biológico	1	31.829,29	31.829,29	
	Oxidação química	2	1.359.300,42	2.718.600,84	
	Adsorção	1	106.798,03	106.798,03	
	Stripping	1	648.971,86	648.971,86	
Cloreto	Troca iônica	2	127,54	255,08	Troca iônica
	Osmose inversa	1	198.370,81	198.370,81	
Fenol	Oxidação química	1	1.359.300,42	1.359.300,42	Oxidação química
Operação	Dessalgadora				
Componente	Técnica disponível	Unidades sequenciais requeridas	Custo total anual (unidade) ($/a)	Custo total anual ($/a)	Técnica selecionada
Cálcio	Osmose inversa	1	400.603,35	400.603,35	Osmose inversa
Sílica	Osmose inversa	1	400.603,35	400.603,35	Osmose inversa

Tabela 7.45 – Seleção da técnica regenerativa com base no custo total anual para o cenário 17a

Cenário	17a				
Operação	Uso geral				
Componente	Técnica disponível	Unidades sequenciais requeridas	Custo total anual (unidade) ($/a)	Custo total anual ($/a)	Técnica selecionada
Cálcio	Osmose inversa	1	198.370.81	198.370.81	Osmose inversa
Sílica	Osmose inversa	1	198.370.81	198.370.81	Osmose inversa
Amônia	Troca iônica	3	127,54	382,62	Troca iônica
	Tratamento biológico	1	31.829,29	31.829,29	
	Oxidação química	2	1.359.300,42	2.718.600,84	
	Adsorção	1	106.798,03	106.798,03	
	Stripping	1	648.971,86	648.971,86	
Cloreto	Troca iônica	2	127,54	255,08	Troca iônica
	Osmose inversa	1	198.370,81	198.370,81	
Fenol	Oxidação química	1	1.359.300,42	1.359.300,42	Oxidação química
Operação	Dessalgadora				
Componente	Técnica disponível		Custo total anual (unidade) ($/a)	Custo total anual ($/a)	Técnica selecionada
Cálcio	Osmose inversa	1	400.603,35	400.603,35	Osmose inversa
Sílica	Osmose inversa	1	400.603,35	400.603,35	Osmose inversa

O custo total anual referente ao investimento nas unidades regenerativas sequenciais, de acordo com a técnica selecionada, encontra-se relacionado nas Tabelas 7.46, 7.47 e 7.48, para os cenários 3a, 11a e 17a, respectivamente. Para os casos em que há mais de uma unidade sequencial regenerativa, o custo total é a soma da quantidade do módulo unitário. Para tanto, utiliza-se a máxima unidade sequencial para a remoção dos

componentes, uma vez que o processo regenerativo objetiva alcançar a concentração meta do último componente a ser removido.

Tabela 7.46 – Custo total anual do cenário 3a

Cenário	3a				
Operação	Uso geral				
Componente	Técnica selecionada	Unidades sequenciais requeridas (máximas)	Custo total anual (unidade) ($/a)	Custo total anual ($/a)	Custo total anual (cenário) ($/a)
Cálcio / Sílica	Osmose inversa	1	198.370,81	198.370,81	599.101,70 (957.664,07 R$/ano)*
Amônia / Cloreto	Troca iônica	1	127,54	127,54	
Operação	Dessalgadora				
Componente	Técnica selecionada	Unidades sequenciais requeridas (máximas)	Custo total anual (unidade) ($/a)	Custo total anual ($/a)	
Cálcio / Sílica	Osmose inversa	1	400.603,35	400.603,35	

* 1 US$ = R$ 1,5985

Tabela 7.47 – Custo total anual do cenário 11a

Cenário	11a				
Operação	Uso geral				
Componente	Técnica selecionada	Unidades sequenciais requeridas (máximas)	Custo total anual (unidade) ($/a)	Custo total anual ($/a)	Custo total anual (cenário) ($/a)
Cálcio / Sílica	Osmose inversa	1	198.370.81	198.370.81	1.958.784,74 (3.131.117,41 R$/ano)*
Amônia / Cloreto	Troca iônica	4	127,54	510,16	
Fenol	Oxidação química	1	1.359.300,42	1.359.300,42	
Operação	Dessalgadora				
Componente	Técnica selecionada	Unidades sequenciais requeridas (máximas)	Custo total anual (unidade) ($/a)	Custo total anual ($/a)	
Cálcio / Sílica	Osmose inversa	1	400.603,35	400.603,35	

* 1 US$ = R$ 1,5985

Tabela 7.48 – Custo total anual do cenário 17a

Cenário	17a				
Operação	Uso geral				
Componente	Técnica selecionada	Unidades sequenciais requeridas (máximas)	Custo total anual (unidade) ($/a)	Custo total anual ($/a)	Custo total anual (cenário) ($/a)
Cálcio / Sílica	Osmose inversa	1	198.370.81	198.370.81	1.958.657,20 (3.130.913,53 R$/ano)*
Amônia / Cloreto	Troca iônica	3	127,54	382,62	
Fenol	Oxidação química	1	1.359.300,42	1.359.300,42	
Operação	Dessalgadora				
Componente	Técnica selecionada	Unidades sequenciais requeridas (máximas)	Custo total anual (unidade) ($/a)	Custo total anual ($/a)	
Cálcio / Sílica	Osmose inversa	1	400.603,35	400.603,35	

* 1 US$ = R$ 1,5985

Após os processos regenerativos selecionados, as correntes apresentam concentrações de componentes de acordo com as eficiências das unidades sequenciais máximas utilizadas. Como a remoção ocorre até que o último componente consiga no mínimo chegar ao seu valor meta, pode haver componentes que já tiveram sua remoção alcançada, mas que continuarão a ser removidos conforme a sequência de regeneração requerida para os demais que ainda não atingiram a meta. Comparando os valores a montante e a jusante dos processos regenerativos, as Tabelas 7.49, 7.50 e 7.51 contrastam os valores dos componentes nos cenários 3 a, 11 a e 17 a, respectivamente, relativos às operações Uso Geral e Dessalgadora.

Tabela 7.49 – Comparação entre as correntes a montante e a jusante dos processos regenerativos requeridos, para o cenário 3a

Operação	Uso Geral		Dessalgadora	
Corrente	45 (a montante da regeneração)	12 (a jusante da regeneração)	44 (a montante da regeneração)	38 (a jusante da regeneração)
Componentes	Concentração (mg/L)			
Cálcio	**15,63**	0,4689	**94,44**	2,8332
Sílica	**17,08**	0,8540	**17,63**	0,8815
Amônia	**0,13**	0,0650	2,07	2,07
Sulfeto	0,09	0,09	0,27	0,27
Cloreto	**33,49**	3,3490	47,01	47,01
Cianeto	0	0	0,15	0,15
Fenol	0,05	0,05	0,98	0,98

Tabela 7.50 – Comparação entre as correntes a montante e a jusante dos processos regenerativos requeridos, para o cenário 11a

Operação	Uso Geral		Dessalgadora	
Corrente	11+12 (a montante da regeneração)	12 (a jusante da regeneração)	44 (a montante da regeneração)	38 (a jusante da regeneração)
Componentes	Concentração (mg/L)			
Cálcio	**66,22**	1,9866	**85,14**	2,5542
Sílica	**72,38**	3,6190	**17,00**	0,8500
Amônia	**0,57**	0,0356	2,17	2,17
Sulfeto	0,06	0,1	0,28	0,28
Cloreto	**204,69**	2,0469	18,47	18,47
Cianeto	0	0,02	0,11	0,11
Fenol	**0,06**	0,0030	1,03	1,03

Tabela 7.51 – Comparação entre as correntes a montante e a jusante dos processos regenerativos requeridos, para o cenário 17a

Operação	Uso Geral		Dessalgadora	
Corrente	45 (a montante da regeneração)	12 (a jusante da regeneração)	44 (a montante da regeneração)	38 (a jusante da regeneração)
Componentes	Concentração (mg/L)			
Cálcio	**52,97**	1,5891	**96,33**	2,8899
Sílica	**57,89**	2,8945	**18,09**	0,9045
Amônia	**0,46**	0,0575	2,16	2,16
Sulfeto	0,07	0,07	0,28	0,28
Cloreto	**159,84**	1,5984	48,96	48,96
Cianeto	0	0	0,16	0,16
Fenol	**0,06**	0,0030	1,02	1,02

Critérios de seleção de investimentos

De modo a avaliar a viabilidade econômica de cada cenário, o julgamento é realizado por meio de métodos determinísticos de análise de projetos (por exemplo, *Pay-back* – simples ou descontado da taxa de atratividade ou desconto adotada – valor presente líquido, taxa interna de retorno); nestas circunstâncias, cumpre verificar se o investimento adicional para a consolidação do reúso é sustentado por argumentos econômicos de longo prazo. Para isso, deve-se fundamentar a presença da taxa de juros do mercado financeiro como parâmetro de avaliação de investimento, assim como o papel do contexto inflacionário.

Neste trabalho, optou-se por considerar uma taxa mínima de desconto de 13% a.a. (juro aparente ou nominal), para auxiliar o processo de priorização de alternativas de investimento. Adotando o valor de 6,45% a.a. de inflação (média considerada entre janeiro de 2007 e março de 2012 – Figura B.2, Apêndice 2), obtém-se um valor correspondente a 6,15% a.a. de taxa real de juros, a ser indicada como TMA.

Na Tabela 7.52, têm-se os parâmetros calculados para avaliação econômica dos cenários. O retorno sobre o investimento (ROI) é calculado com base nos custos de investimento e de economia total operacional dos cenários, e é dado pela divisão da diferença de economia acumulada durante o período de vida útil e o investimento total no equipamento e este próprio investimento total; quanto maior seu valor, melhor e mais favorável será o processo decisório, utilizado na comparação com uma taxa de aplicação em investimento de baixo risco, por exemplo, embora não considere o valor do dinheiro no

tempo (não incorpora a taxa de juros) na análise. O ROI mede o retorno do investimento realizado e cujo valor indica seu período necessário para amortização (devolução do principal ou capital emprestado), a partir do qual contribuirá para a geração de lucros. Trabalha-se aqui com um horizonte de planejamento (vida útil dos equipamentos) de 10 anos.

Da mesma forma que o ROI, período de retorno (*payback simples*) não considera o conceito de distribuição de fluxos de caixa no tempo, limitando sua análise ao período de recuperação do investimento. Já o *payback* descontado considera a distribuição ao longo do tempo, incorporando uma taxa de desconto (neste caso, 6,15 % a.a.) para o cálculo dos respectivos fluxos de caixa descontado. Refere-se à identificação do tempo no qual o saldo acumulado do fluxo de caixa torna-se zero, subtraído o investimento. Neste estudo, a recuperação do capital é bastante atraente, apresentando horizonte inferior a 5 anos para os cenários. A TIR indica que o cenário 3a é bem superior ao valor dos cenários 11a e 17a, embora o VPL do cenário 11a seja maior para o referencial da taxa mínima de atratividade (custo de capital) de 6,15% a.a. (padrão de aceite). A relação VPL/investimento é mais indicada para distinguir alternativas com valores de VPL semelhantes, incidindo a escolha sobre o projeto de maior valor da relação. Embora aqui não haja alternativas com VPL's iguais, seus valores encontram-se próximos, e a maior relação é a do cenário 3a, conquanto o VPL do cenário 11a apresenta maior contribuição para o crescimento do patrimônio líquido (capital próprio da empresa) que os demais.

Tabela 7.52 – Parâmetros de viabilidade econômica dos cenários

		Cenário		
		3a	11a	17a
	Investimento total (custo total) dos equipamentos (R$)	(958.071,81)	(3.131.117,40)	(3.130.913,53)
	Vida útil dos equipamentos (anos)	10	10	10
Ano 0	Economia anual (R$)	1.006.427,69	1.493.342,28	1.413.147,73
	Economia acumulada (R$)	10.064.276,94	14.933.422,77	14.131.477,28
Ano 1	Economia anual (R$)	948.118,41	1.406.822,68	1.331.274,4
Ano 2		893.187,39	1.325.315,76	1.254.144,5
Ano 3		841.438,90	1.248.531,1	1.181.483,3
Ano 4		792.688,55	1.176.195,1	1.113.031,8
Ano 5		746.762,65	1.108.050,02	1.048.546,2
Ano 6		703.497,55	1.043.853,06	987.796,71
Ano 7		662.739,09	983.375,47	930.566,85
Ano 8		624.342,06	926.401,762	876.652,7
Ano 9		588.169,63	872.728,932	825.862,18
Ano 10		554.092,91	822.165,739	778.014,3
	ROI	9,50	3,77	3,51
	Payback simples (anos)	1,05 (*1 ano e 20 dias*)	2,10 (2 anos e 2 *meses*)	2,22 (2 anos e 3 *meses*)
	Payback descontado (i = 6,15% a.a.) (anos)	1,01 (*1 ano e 5 dias*)	4,71 (*4 anos e 9 meses*)	2,46 (*2 anos e 6 meses*)
	TIR (%)	104,7234	46,5932	43,6205
	VPL (i_{MA} = 6,15%)	6.396.965,32	7.782.322,23	7.196.459,30
	Relação VPL/Investimento	6,68	2,48	2,30

A Figura 7.34 reflete a variação do VPL em função de diferentes valores de taxa de desconto consideradas. As linhas verticais tracejadas indicam o ponto de igualdade entre os VPL's de 3a e 17a e 3a e 11a. Na linha tracejada da esquerda, ocorre que o VPL do cenário 11a é maior que o do cenário 17a, que por sua vez é maior que o do cenário 3a, onde a taxa de desconto encontra-se bem abaixo da taxa interna de retorno de cada um dos três cenários analisados. Neste caso, sugere-se que o cenário 11a seja mais atrativo

economicamente em relação aos demais. Por outro lado, na linha vertical tracejada da direita, o comportamente é inverso, ou seja, o VPL do cenário 3a é maior que o do cenário 11a, o qual por sua vez é maior que o do cenário 17a, para uma taxa de desconto que ainda é inferior à taxa interna de retorno dos demais cenários. O ponto de interseção das curvas 3a e 11a é denominado taxa incremental de Fisher (SAMANEZ, 2009), e é uma característica que reflete o conflito em projetos ditos mutuamente excludentes, onde se deve optar por apenas um projeto. Observa-se que não há cruzamento das curvas que definem as alternativas 11a e 17a. Nem sempre a alternativa com a maior taxa interna de retorno apresenta-se como o melhor investimento, pois se pode considerar uma taxa mínima de atratividade mais baixa, de modo que a análise do valor presente líquido considera um viés mais adequado para a tomada de decisão.

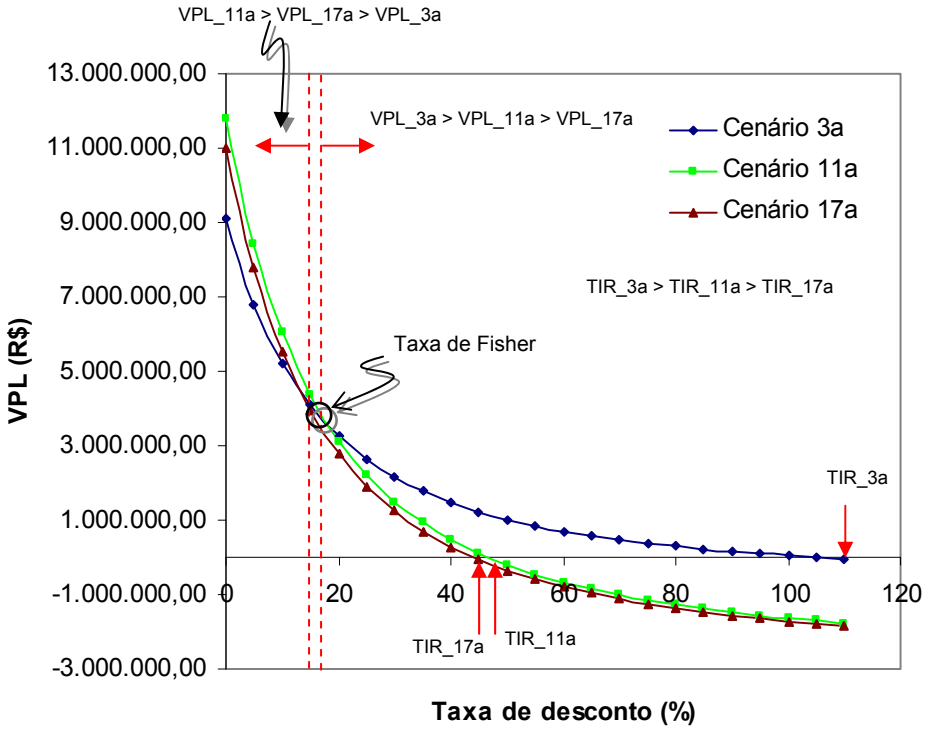


Figura 7.34 – Sensibilidade do VPL em função da taxa de desconto, indicando as taxas internas de retorno (TIR's) de cada cenário

O custo de oportunidade para investimento de cada cenário refere-se ao que se deixa de ganhar com um investimento alternativo, como em títulos públicos, por exemplo, em que a taxa de rentabilidade é superior ao indicador Selic. Se a TIR de uma alternativa for menor que o custo de oportunidade incorrrido, esse projeto deve então ser rejeitado; por

outro lado, se a TIR for maior que o custo de oportunidade, então a análise quanto às condições de aceitação do projeto deve prosseguir.

As alternativas de implementação de cenários de reúso são atrativas neste caso. Na Figura 7.34, observa-se que a TIR do cenário 3a (obtida por interpolação linear) é superior à do cenário 11a, que por sua vez é ligeiramente superior à do cenário 17a. Por outro lado, sendo o VPL um método mais adequado para seleção de alternativas de investimento, em relação ao critério da TIR, o cenário 11a, por possuir maior VPL, é mais apropriado quando se trabalha com taxas de retorno levemente superiores à taxa mínima de atratividade de 6,15% a.a., além de apresentar um período de retorno de investimento menor que o do cenário 3a. No entanto, é importante lembrar que esta análise de investimento é realizada sem levar em conta os custos com realinhamento de tubulações e emprego adicional de bombas; do mesmo modo, o custo adicional de impacto relativo ao descarte final sobre o corpo hídrico também não está incluída, uma vez que são necessárias informações complementares para que a seleção do cenário mais adequado seja concluída. Nestas condições, assumindo a não complementaridade ou a imprecisão de tais informações, torna-se oportuno apontar o cenário 11a como um projeto promissor a ser implementado, como forma de demonstrar a aplicabilidade dos critérios inseridos na abordagem seletiva da metodologia estruturada neste trabalho.

Sob a perspectiva da multiplicidade de alternativas de investimento, os cenários em análise constituem projetos mutuamente excludentes, onde a escolha de um deles implica eliminar a possibilidade de implementação dos demais (BORDEAUX-RÊGO *et al*., 2010). Em problemas que apresentam divergência de critérios em relação à TIR e ao VPL, como neste caso, onde o cenário 3a apresenta maior TIR, enquanto que o cenário 11a possui maior VPL, pode-se optar pela análise do fluxo incremental, adotando tanto o VPL quanto a TIR como parâmetro de tomada de decisão.

Segundo Samanez (2009), a TIR pode levar a uma seleção inconsistente e oposta ao método do VPL em alternativas mutuamente excludentes de tamanho, acentuadas em projetos de escalas diferentes, pois cada método considera a forma de reinvestimento de fluxos de caixa gerados durante a vida útil do projeto de modo diferente. Uma solução oportuna para evitar essa contradição entre os métodos VPL e TIR na comparação de propostas mutuamente excludentes seria por meio da taxa de investimento do fluxo incremental (TIR do fluxo incremental). A aplicação deste critério é restrita aos projetos identificados como os mais promissores, 3a e 11a, onde os valores da diferença entre o investimento e a economia anual relativos aos cenários 11a e 3a são analisados conforme dispostos na Tabela 7.53 (i_{MA} = 6,15% a.a.).

Tabela 7.53 – Resultados da análise do fluxo incremental (11a – 3a)

		Cenário		
		3a	11a	11a – 3a
Ano 0	Investimento total (custo total) dos equipamentos (R$)	(958.071,81)	(3.131.117,40)	(2.173.045,59)
		Fluxo de caixa descontado (R$)		
Ano 1	Economia anual (R$)	948.118,41	1.406.822,68	458.704,27
Ano 2		893.187,39	1.325.315,76	432.128,37
Ano 3		841.438,90	1.248.531,10	407.092,20
Ano 4		792.688,55	1.176.195,10	383.506,55
Ano 5		746.762,65	1.108.050,02	361.287,38
Ano 6		703.497,55	1.043.853,06	340.355,51
Ano 7		662.739,09	983.375,47	320.636,38
Ano 8		624.342,06	926.401,76	302.059,70
Ano 9		588.169,62	872.728,93	284.559,31
Ano 10		554.092,91	822.165,74	268.072,83
	Economia acumulada (R$)	7.355.037,13	10.913.439,63	3.558.402,51
	VPL (i_{MA} = 6,15%)	6.396.965,32	7.782.322,23	1.385.356,92
	TIR (%)	104,7234	46,5932	17,8476

O VPL de cada projeto à taxa de 6,15% a.a. indica que o cenário 11a é mais vantajoso, uma vez que o seu valor é maior que o do cenário 3a, conforme já observado, sendo positivo o valor da diferença (11a – 3a). Após calcular a TIR da diferença de cenários (taxa de Fisher), constata-se que seu valor (17,85%) é superior ao da taxa mínima de desconto de 6,15% a.a., o que sinaliza para a seleção do cenário 11a como o mais vantajoso.

Os resultados referentes à análise de sensibilidade econômica (VPL em função da taxa de desconto) dos cenários em estudo podem ser integralmente consultados no Apêndice 6 deste trabalho.

Cumpre destacar que embora a análise econômica aqui realizada tenha sido de forma ampla e criteriosa no sentido de identificar a melhor oportunidade de cenário de reúso, não se levou em conta a influência de sistemas de bombeamento e tubulações adicionais requeridos pelo eventual realinhamento de correntes. No entanto, esta etapa

deve ser realizada em um nível posterior, com vista a consolidar a proposta a ser implementada. Da mesma forma, não se avaliou a influência da tributação do imposto sobre a renda, o qual incide sobre o lucro operacional definido pela diferença entre a receita total e as despesas totais (incluindo depreciação). A alíquota de tributação influencia sobre a taxa de retorno, que passa a ser menor após o desconto do imposto de renda, de tal modo que a carga tributária tem o efeito de reduzir a rentabilidade do projeto, levando inclusive a torná-lo desvantajoso frente à taxa mínima de atratividade adotada. Por esta razão, torna-se conveniente e justo ponderar que o estímulo às práticas de reúso não dependeria somente da iniciativa do empreendedor, mas também poderia ser favorecida com a adoção de mecanismos de incentivo fiscal coordenada pelas autoridades tributárias. Porém, como toda proposta de regulamentação legal, discussões como esta devem ser bem conduzidas, de modo a evitar vinculação de interesses e eventuais desvios de conduta, os quais poderiam romper o benefício do pacto voluntário proporcionado pelo caminho da sustentabilidade empresarial.

7.9. INFLUÊNCIA DA QUALIDADE DOS RECURSOS HÍDRICOS SOBRE OS CUSTOS POTENCIAIS DE IMPACTOS DE EFLUENTES

De modo a complementar o estudo seletivo dos cenários de reúso gerados, pode-se proceder a uma análise de sensibilidade para verificação da influência dos índices de qualidade sobre o comportamento dos custos adicionais de impactos sobre o recurso hídrico. Esta previsão assume que os custos de tratamento de efluentes e de descarte final no curso hídrico exercem influência no valor do custo para o processo de seleção final dos cenários, onde o que se procura é um suporte adicional para a seleção adequada, com menor impacto dentre as alternativas em análise.

Como as informações disponíveis pelos cenários não permitem a completa e desejável determinação dos índices de qualidade e, consequentemente, dos respectivos custos relacionados ao potencial de impacto, optou-se por avaliar a sua sensibilidade diante de uma faixa aceitável e possível de valores dos índices IQA (qualidade das águas) e IVA (proteção da vida aquática).

A Figura 7.35 apresenta o efeito do índice de qualidade IQA sobre o custo adicional de impacto referentes a cada cenário em análise (dentro da faixa de validade do IQA), calculados pela Equação 6.63. Observa-se que quanto maior o índice de qualidade IQA (compreendido entre 0 e 100%) menor será o custo externo associado ao potencial de compensação do dano ambiental sobre o recurso hídrico. O cenário 3a, por apresentar o maior custo relativo ao tratamento e descarte final de efluentes, em relação ao demais,

transfere esse ônus para o custo adicional de impacto, para um dado valor de IQA. No entanto, observa-se a tendência de aproximação dos respectivos valores de custos, em relação aos cenários analisados, conforme há um aumento da qualidade da água, determinado pelo IQA. Já a Figura 7.36 apresenta a variação dos custos em função de valores de IVA compreendidos entre 1 e 8 (aplicando-se a Equação 6.64), os quais encontram-se inseridos na faixa de categoria de atribuição de qualidade do índice. Observa-se que valores menores do índice nesta faixa implicam em custos semelhantes para os três cenários analisados; por outro lado, conforme há aumento do índice, acompanhando a tendência de diminuição de qualidade, ocorre sensível aumento do custo para o cenário 3a, enquanto que os demais preservam a aproximação inicial. Tais observações tornam-se importantes à medida que permitem avaliar a condição de qualidade mais adequada, e que indicarão cenários com menor tendência de impacto.

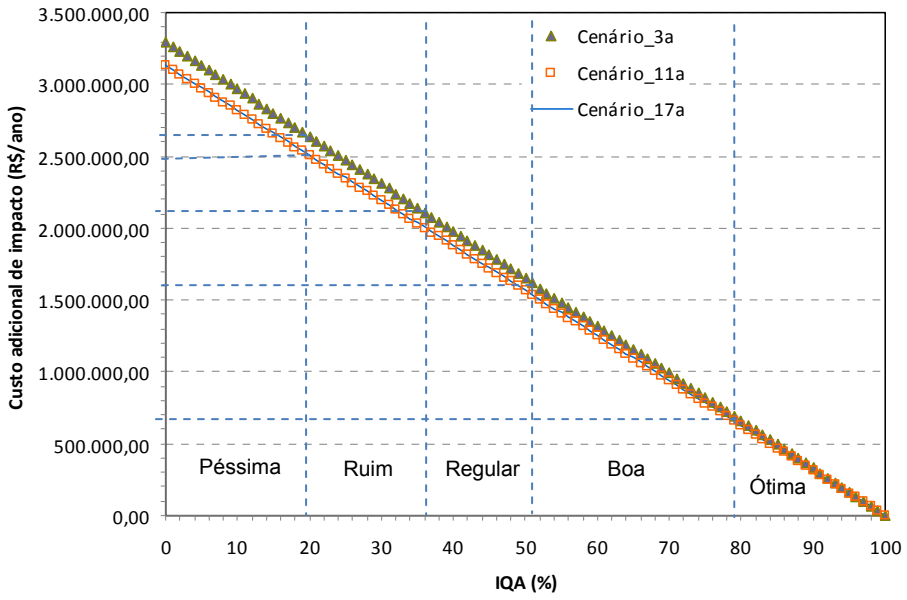


Figura 7.35 – Sensibilidade do custo adicional de impacto a variações do IQA

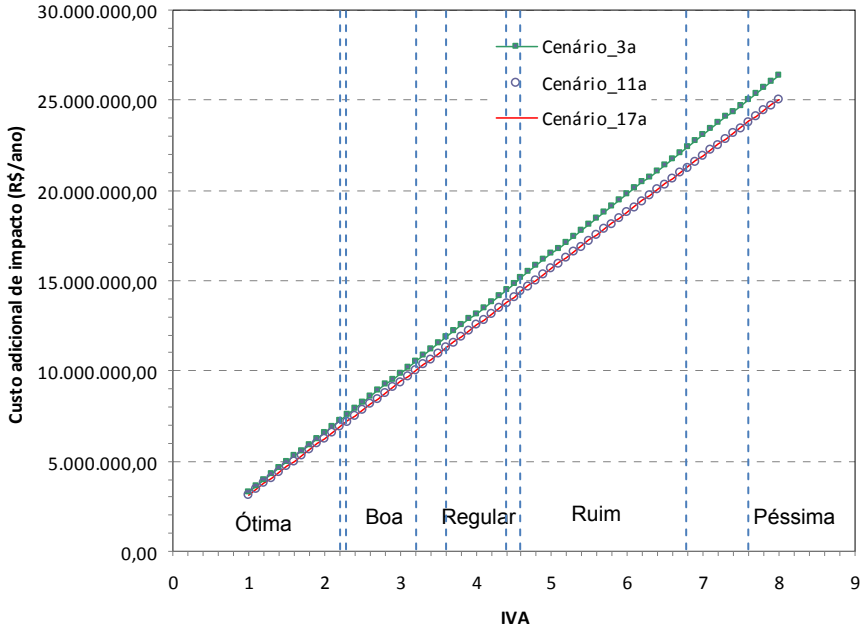


Figura 7.36 – Sensibilidade do custo adicional de impacto em função do IVA, para uma faixa especificada de IVA

A Tabela 7.54 compara as características das correntes efluentes dos processos de tratamento final visando ao descarte no corpo receptor. Cabe salientar que, ao contrário da corrente 44 identificada no balanço hídrico de cada cenário, os valores apresentados na Tabela 7.47 não incorporam a vazão de reciclo da ETDI para outras operações, pois aqui o que se pretende é mostrar as características do efluente final a ser devolvido ao corpo receptor.

Tabela 7.54 – Comparação entre as características das correntes de efluente final dos cenários com os da configuração original e do padrão de lançamento

Número da corrente	44	44	44	44	
Cenário	Base	3a	11a	17a	
Nome da corrente	Saída da ETDI (*descarte final*)	Saída da ETDI (*a jusante do divisor de reciclo: descarte final*)	Saída da ETDI (*a jusante do divisor de reciclo: descarte final*)	Saída da ETDI (*a jusante do divisor de reciclo: descarte final*)	Padrão de Lançamento Conama 357 (água doce – classe 2)
Vazão (t/h)	414	295,90	252	263,50	
pH	6,26	6,25	6,21	6,22	5,0 – 9,0
Concentração (mg/L)					
Cálcio	79,29	72,38	69,52	69,59	NF
Sílica	17,29	12,28	8,51	8,50	NF
Amônia	1,56	2,07	2,17	2,16	20
Sulfeto	0,24	0,27	0,28	0,28	1,0
Cloreto	56,41	47,01	18,47	48,96	250
Cianeto	0,18	0,15	0,11	0,16	0,2
Fenol	0,30	0,98	1,03	1,02	0,5

Nota: NF: valor não fixado

Em um primeiro momento, o efluente final dos cenários sugere que os valores de concentração de fenol sejam lançados acima do limite estabelecido pela legislação. Entretanto, esta constatação normalmente é validada em função da carga (vazão x concentração) de efluentes lançados, incluindo a vazão e a concentração do componente no corpo receptor, e então é comparada a concentração do componente no despejo ao valor correspondente atribuído pela legislação. Assim, dependendo das características do corpo receptor, o efluente final tratado pode atender ao padrão de qualidade observado.

7.10. COMENTÁRIOS GERAIS

Este trabalho teve como objetivo desenvolver e aplicar uma metodologia voltada para avaliação de alternativas promissoras de reúso de águas e efluentes industriais, disponibilizando um suporte para a prática efetiva do gerenciamento de reúso sustentável nos processos industriais. Um grande incentivo para a adoção de práticas de reúso reside no fato de que o uso industrial é um dos últimos a serem observados na escala de prioridade de usos múltiplos da água. Sendo assim, o reúso possibilita menor captação de água proveniente de um recurso disponível para consumo humano, como um rio que integra uma importante bacia hidrográfica, por exemplo.

O estudo de caso foi elaborado a partir de um conjunto de dados reais de uma refinaria de petróleo, em termos de contaminantes e operações, sendo um setor que se

diferencia pela estrutura complexa de suas atividades e pressionado pela necessidade atual de aliviar sua expressiva demanda hídrica. A criação da metodologia P+ÁGUA possibilita integrar o método DFA, ferramenta voltada para a identificação de oportunidades de reúso de fontes aquosas nos processos industriais, aos objetivos de um programa estruturado de Produção mais Limpa (P+L), que estabelece a melhoria de processos produtivos. O modelo apresentado tem a vantagem de ser extensivo a problemas complexos que envolvem grande consumo hídrico, embora também possa ser aplicado a processos de menor magnitude, bem como a qualquer tipo de indústria.

A apresentação de um caso real permitiu gerar uma variedade de cenários que levariam a eventuais mudanças de realinhamento de correntes, o que seria compensada pela redução na captação de água do corpo hídrico e consequentemente tenderia à economia de custos com a implementação do cenário adequado. Assim, um procedimento para seleção de cenários (Figura 6.7) foi desenvolvido como ramificação de uma metodologia mais abrangente (Figura 6.4), e aplicado em conjunto com a análise de sistemas de resfriamento de água, resultante das particularidades operacionais do setor.

A aplicação do DFA levou à criação de diferentes cenários nos quais foram analisados a influência unilateral de cada componente. Em um primeiro momento, os cenários agrupados em categorias a e b, considerando ou não a possibilidade de reciclo da ETDI, indicaram oportunidades que poderiam reduzir a captação e os custos em aproximadamente 40%. No entanto, o estudo de melhorias operacionais de um sistema de resfriamento também está ligado à importância de suportar eventuais variações de concentração de componentes e flexibilização de ciclos nas torres de resfriamento. Desta forma, as características deste sistema foram avaliadas, no sentido de verificar seu comportamento por meio de índices de estabilidade, a fim de conhecer adequadamente as condições operacionais diante de alternativas de reúso e/ou reciclo. A aplicação do DFA para análise simultânea de transferência de compomentes não permitiu identificar oportunidades de reúso, em função da complexidade do sistema; este resultado não é considerado definitivo, uma vez que outras possibilidades podem ser exploradas para este caso, como a abordagem macro-estrutural testada por Calixto (2011). No entanto, a quantidade de cenários levantados possibilitou encaminhar o processo de tomada de decisão inserido no escopo do modelo P+ÁGUA.

A seleção de cenários por meio de técnicas estatísticas, em analogia aos critérios estabelecidos pela área de finanças corporativas, pode ser um mecanismo de utilidade para a tomada de decisão em um ambiente de múltiplas oportunidades. Apesar disso, a flexibilização de propostas normalmente acarreta violações de concentrações nas correntes envolvidas nas práticas de reúso/reciclo, e o modelo deve então prever a alocação

adequada de eventuais processos regenerativos adicionais para componentes específicos. Neste estudo, a aplicação da proposta integrada de alocação de processos regenerativos foi reduzida a três cenários promissores identificados pela abordagem: 3a, 11a e 17a. Naturalmente, este procedimento fundamenta o critério seletivo em termos de custos totais anuais, embora não se tenha optado aqui em eleger o melhor cenário neste estágio.

Por se tratar de um modelo integrado às premissas da P+L, a avaliação de parâmetros econômicos para seleção de cenários torna-se necessária, observando os respectivos valores de taxa interna de retorno (TIR), valor presente líquido (VPL), retorno sobre o investimento (ROI), *pay-back* (simples e descontado) e da relação VPL/investimento. Ao fim desta análise, o cenário 11a foi apontado como potencialmente viável de ser implementado; porém, o modelo também prevê a incorporação do custo de impacto das propostas em relação à qualidade dos recursos hídricos utilizados como fonte para os processos industriais.

A influência de possíveis impactos causados sobre o corpo hídrico, pelo lançamento de efluente final a partir das alternativas de reúso selecionadas também se mostrou critério diferencial de análise, vinculando a geração de externalidades ambientais negativas decorrentes da atividade a índices de qualidade de águas. Como os dados não encontram-se disponíveis para este estudo, foram então observadas a sensibilidade do custo adicional de impacto dentro dos limites estabelecidos para análise da qualidade da água. Além disso, constatou-se que os efluentes dos cenários promissores podem se enquadrar aos padrões de lançamento, atendendo ao limite tolerado pela legislação federal para sua classe.

Naturalmente, nem sempre será necessário dispor o potencial da metodologia para a avaliação das alternativas identificadas dentro do processo hídrico estudado. Quando necessário, o modelo tem a flexibilidade de ser simplificado, em termos de uso de ferramentas como o DFA. Assim, para casos mais simples, contendo menor número de operações e componentes, por exemplo, é possível que a etapa de seleção de cenários seja abreviada e desviada da etapa de filtragem preliminar para a etapa final de valoração de danos; uma vez que o número de cenários a ser avaliado neste caso é relativamente compacto, torna-se então o critério mais oportuno levar em conta todos os cenários gerados e dispensá-lo do processo seletivo da etapa de “filtragem”. De qualquer forma, as técnicas que conduzem a aplicação de P+L continuam sendo importantes instrumentos na busca pela melhoria contínua dos processos. Além disso, a valoração econômica de danos ambientais representa um poderoso mecanismo para incorporar e avaliar os efeitos decorrentes das atividades de reúso, tanto sob o aspecto ambiental como o social, constituindo um referencial que orienta o mastro para a redução de impactos dos processos.

A metodologia aqui proposta procurou atender à oportuna tarefa de integrar ferramentas tecnológicas, as quais são normalmente desprovidas de abordagem holística acerca da natureza do empreendimento ambiental, às premissas de um estruturado instrumento de gestão industrial voltado para a sustentabilidade empresarial. Neste sentido, buscou-se aproximar o emprego de técnicas estruturadas aos objetivos de um sistema de gestão, associados às práticas de reúso, e visando atenuar os impactos de ordem ambiental, econômica e social; espera-se contribuir para o alinhamento das práticas de gestão, integrada com o uso de tecnologias sustentáveis dentro dos processos, e especificamente voltadas para ações direcionadas ao gerenciamento do reúso de águas e efluentes industriais.

CAPÍTULO 8

CONCLUSÃO E SUGESTÕES

"(...) A humanidade é parte de um vasto universo evolutivo (...) O bem-estar dos povos e da biosfera depende da preservação do ar limpo, das águas puras, dos solos férteis, uma rica variedade de plantas, animais e ecossistemas. O meio ambiente global com seus recursos finitos é uma preocupação primordial para toda a humanidade (...) À medida que se desenvolve uma civilização global, (...) podemos perceber que nossos problemas sociais, econômicos, ambientais e espirituais encontram-se interligados e cooperar no desenvolvimento de estratégias integradas para solucioná-los.(...)".

(Trechos da "Carta da Terra" – Declaração Universal dos Direitos Humanos para a área de meio ambiente)

Os resultados deste trabalho permitem tecer as seguintes ponderações:

► O estudo de caso foi estruturado a partir de dados de balanço hídrico de uma refinaria de petróleo, embora o diagrama de processo original represente uma adaptação quanto ao conjunto de blocos empregados como operações, de modo a facilitar a abordagem da metodologia. A aplicação do DFA a cada componente relevante da análise permitiu gerar diferentes cenários, cada qual propondo alterações ou ajustes eventuais de alinhamento de correntes para a prática de reúso. O uso da estação de tratamento de efluentes (ETDI) como fonte adicional para reúso também foi uma possibilidade levantada e incorporada na realização dos cenários. Tais cenários levaram à redução de água captada para os processos da refinaria em diferentes valores, de 0 a 45%; os custos também foram obtidos, e revelaram valores compreendidos entre 0 e 37% de redução. Estes resultados demonstram a variedade de alternativas levantadas como propostas para a implementação do reúso; no entanto, a vantagem que o DFA possui em estabelecer diferentes configurações para a posterior análise do engenheiro de processos também reflete a complexidade envolvida na tomada de decisão diante de alternativas potencialmente promissoras e adequadas para as condições físicas do caso.

► O estudo de melhorias de condições operacionais dos ciclos das torres de resfriamento é um fator importante a ser considerado, uma vez que o sistema é um grande consumidor de água em uma refinaria. Os resultados permitiram comprovar que os ciclos de concentração

devem ter seus valores controlados, pois embora acarrete diminuição na vazão de purga e diminuição da reposição, este parâmetro interfere na qualidade da água de circulação, com reflexos nas condições operacionais dos equipamentos. Neste estudo determinou-se um valor máximo de ciclo de 16, o qual foi utilizado como base para flexibilização limite da água de reposição nas torres de resfriamento, e posterior geração de cenários com o DFA. Também optou pela flexibilização de 20% nas concentrações de entrada dos componentes. Para estudar o grau de comprometimento de qualidade na água de resfriamento, as simulações de índices de estabilidade de Langelier, Ryznar e Puckorius permitiram indicar faixas de valores de pH e ciclo de concentração nas quais devem ser respeitadas, principalmente com a prática de reúso, amenizando problemas maiores quanto à ocorrência de incrustação e corrosão. A dosagem de produto químico também é um fator importante a ser observado, pois está ligado ao custo de tratamento da água neste sistema. Constatou-se que o aumento do ciclo influencia na diminuição da quantidade de produto a ser dosado, o que em princípio constitui um ponto favorável à seleção de propostas de reúso com relaxação de ciclos, embora seja uma decisão que requer cautela e conhecimento do sistema.

► A aplicação do procedimento para a consideração de transferência simultânea de componentes (análise multicomponentes) não proporcionou a geração adicional de cenários de reúso, principalmente pela complexidade de componentes envolvidos e características de restrição de concentração nas correntes. Este fato corrobora a aplicação do procedimento aos dados originais, para a geração de diferentes cenários com a análise unicomponente, no sentido de identificar oportunidades promissoras por meio de um critério de tomada de decisão que leve em conta aspectos de redução de vazão, de custos e de alinhamento adicional de correntes para reúso.

► A triagem do conjunto de cenários estabelece uma seleção prévia de oportunidades com base em critérios de estatística descritiva aplicada a finanças corporativas. Foram selecionados previamente doze cenários, que apresentassem maior redução nos custos e menor divergência entre a média de cada cenário, e para cada categoria estudada (com e sem ETDI como fonte de reúso). Destes, também foram analisados o chamado Índice de Aceitabilidade Superior, com base no pH de reposição e de purga das torres de resfriamento. Outro critério proposto foi o Fator Adicional de Reúso, o qual procura incorporar na análise o efeito qualitativo do realinhamento de correntes de reúso. Este parâmetro foi determinado para cada uma das duas categorias compostas por seis cenários, permitindo selecionar três cenários promissores para análise de viabilidade de

implementação (cenários 3a, 11a e 17a). Em princípio, o procedimento mostrou-se válido para apontar cenários condizentes com a realidade do sistema estudado, sendo uma plataforma importante em processos decisórios desta natureza.

► Dentre os cenários selecionados, constatou-se a ocorrência de violação de concentrações de componentes nas correntes envolvidas com o reúso. Para resolver este problema, propôs-se a aplicação de um procedimento adicional voltado para a alocação de regeneradores específicos agrupados para as devidas correntes de entrada nas operações receptoras de correntes de reúso. Os resultados da aplicação deste procedimento mostraram um aumento de custo total anual por conta do investimento adicional de regeneradores para o alcance de concentrações metas de entrada nas operações subsequentes. Vale ressaltar que são custos adicionais como estes, em sua maioria ligados à substituição de matérias-primas e ao aperfeiçoamento de processos produtivos, que constituem a principal barreira para a adoção de práticas ambientalmente responsáveis pelas empresas. Esta constatação é atribuída à pesquisa realizada pela Confederação Nacional da Indústria envolvendo sessenta presidentes, vice-presidentes e diretores de sustentabilidade brasileiros (SEGALA, 2012, p. 132), sob o argumento de que o custo é imediato, mas o retorno é demorado.

► Para verificar a melhor oportunidade de cenário de reúso, foi então realizada uma análise econômica com base nos principais parâmetros, dentre os quais: ROI, *Payback*, VPL, TIR e VPL/Investimento. O tempo de retorno dos três cenários ficou entre 1 e 2,5 anos, o que pode ser considerado satisfatório diante dos benefícios proporcionados pela adoção da prática. Neste caso, a avaliação conjunta dos demais parâmetros levou a apontar o cenário 11a como o mais promissor, tornando-o neste caso elegível a estudos posteriores de implementação.

► Por fim, o modelo proposto considera avaliar a influência do impacto dos efluentes sobre a qualidade dos recursos hídricos, particularmente do corpo receptor, a fim de verificar a consistência da medida tomada. A análise foi efetuada sobre os três cenários remanescentes e constitui um parâmetro adicional na tomada de decisão referente ao cenário mais promissor. Neste caso, a ausência de informações que permitissem determinar os índices de qualidade adotados levou a um estudo de sensibilidade do chamado custo adicional de impacto frente a variações de cada índice (IQA e IVA). Constatou-se ainda que os efluentes de descarte encontram-se em condições de atender ao padrão de qualidade estabelecido pela legislação.

Diante destas observações, pode-se ressaltar a importância e a representatividade do estudo de caso elaborado para este trabalho quanto à aplicação e ao desenvolvimento da metodologia proposta. Evidentemente que uma série de oportunidades podem ser ainda exploradas, seja pela natureza extensiva que o próprio tema dispõe, ou pelo desejável aprimoramento deste trabalho. Como sugestões para a continuidade e melhoria deste estudo, algumas observações podem ser levantadas, dentre as quais:

► Avaliação complementar para a seleção final e implantação de cenário promissor considerando a infraestrutura necessária para a distribuição dos fluxos de água na rede (custos do sistema adicional de bombeamento e tubulações). No entanto, trata-se de uma etapa que envolve trabalho de avaliação em campo para levantamento de dados e logística (distância entre unidades), os quais permitam o estudo de viabilidade técnica e econômica (EVTE) da(s) alternativa(s) de reúso/reciclo e/ou regeneração.

► Ampliar o estudo de estimativa de custos de impactos sobre a qualidade do recurso hídrico, de modo a consolidar a aplicação da metodologia de valoração de externalidades (impactos negativos), incorporando outros parâmetros que influenciam no processo de degradação ambiental, com implicações de natureza social, além de enumerar os benefícios econômicos, ambientais e sociais da adoção de reúso de correntes hídricas. Além disso, esta vertente pode contribuir para a análise e o gerenciamento de riscos do projeto; neste caso, os riscos referem-se a quaisquer eventos ou condições de incerteza cuja probabilidade de ocorrência exerce efeitos positivos (oportunidades) ou negativos (ameaças) sobre os objetivos do projeto. Neste processo, o foco está em aumentar o valor econômico esperado do produto da probabilidade pelo impacto (econômico) do risco referente ao seu efeito positivo, bem como reduzir o valor esperado de um evento de risco negativo. A extensão desta análise contribuiria para consolidar a valoração ambiental como suporte na tomada de decisão em projetos de reúso industrial.

► Analisar o mecanismo de autodepuração envolvido a partir do ponto de lançamento do efluente industrial, visando, por exemplo, determinar a mínima distância a partir da qual pode ser realizada a captação de água no corpo hídrico para fins de irrigação; em um primeiro momento, o estudo pode ser conduzido desconsiderando a influência de outras decargas no sistema durante o processo.

► Avaliar o sistema de tratamento final de efluentes, testando, além da configuração centralizada, a disposição distribuída, aprimorando o enfoque das contribuições de Húngaro (2005) e Delgado (2008).

► Testar e estabelecer pesos relativos à composição do fator adicional de reúso, de modo a levar em conta o efeito de realinhamento de correntes de reúso, em relação à configuração original.

► Testar a influência do Imposto sobre a Renda na tomada de decisão diante de alternativas de investimento, onde uma análise de sensibilidade em relação a alíquotas distintas permitiria verificar as taxas de retorno face ao referencial de atratividade mínima adotado.

► Buscar dados complementares de temperatura das correntes do fluxograma base, na fase inicial do balanço hídrico, de forma a analisar conjuntamente o potencial de viabilidade de integração mássica e energética combinadas.

Referências Bibliográficas

ABADIE, E., **Processos de refinação**, Petrobras/Serec/Cen-Sud, Rio de Janeiro, 2001.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Sistemas de gestão ambiental: diretrizes gerais sobre princípios, sistemas e técnicas de apoio**. NBR ISO 14004. Rio de Janeiro, RJ, 1996.

ABOU-ELELA, S.I., HALEEM, H.A., ABOU-TALEB, E., IBRAHIM, H.S., "Application of cleaner production technology in chemical industry: a near zero emission", **Journal of Cleaner Production**, 15 (18), 1852-1858, 2007.

ABREU, M.C.S., **Modelo de avaliação da estratégia ambiental**: uma ferramenta para a tomada de decisão, Tese (Doutorado em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2001.

ABREU FILHO, J.C.F., SOUZA, C.P., GONÇALVES, D.A., CURY, M.V.Q., **Finanças corporativas**, 9ª edição revista, Rio de Janeiro: Editora FGV, 2007.

ADAMS, M., GHALY, A.E., "Maximizing sustainability of the Costa Rican coffe industry", **Journal of Cleaner production**, 15 (17), 1716-1729, 2007.

AFP (Agence France-Presse). "Relatório aponta esgotamento de água potável em menos de 20 anos". Folha Online - Ambiente, 02/02/2009. Disponível em: <http://www1.folha.uol.com.br/folha/ambiente/ult10007u497470.shtml>. Acessado em: 20 de março de 2009.

ALMEIDA, A.A., LIMA, G., "Estudo comparativo entre os métodos IQANSF e IQACCME na análise da qualidade da água do rio Cuiabá", **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, 4, 1-17, 2008.

ALMEIDA, F., **Os desafios da sustentabilidade**: uma ruptura urgente, Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda., 2007.

ANDERSEN, M., HOLM KRISTENSEN, G., WENZEL, H., "Tools for evaluation of water reuse scenarios in industry", In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL WASTEWATER RECOVERY AND REUSE, 2002, **Proceedings of the IWRR2**, 1-9, Cranfield University, United Kingdom, 2002.

ANDRADE, J.C.S., MARINHO, M.M.O., KIPERSTOK, A., “Uma política nacional de meio ambiente focada na produção limpa: elementos para discussão”, **Bahia Análise & Dados**, 10 (4), 326-332, 2001.

_____, MARINHO, M.M.O., CARDOSO, L.M.F., SANTOS, JJ.O., “Análise dos balanços ambientais no estado da Bahia sob a perspectiva da produção limpa”, In: XXX ENCONTRO DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM ADMINISTRAÇÃO, 2006, Salvador, **Anais do XXX EnANPAD**, 1-13, Salvador, BA, 2006.

ANDRES, L.F., **A gestão ambiental em industriais do Vale do Taquari**: vantagem com o uso das técnicas de Produção mais Limpa, Dissertação (Mestrado em Administração), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2001.

ÁVILA FILHO, S., **Metodologia para minimizar efluentes na fonte a partir da investigação de anormalidades operacionais: casos da indústria química**, Dissertação (Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo), Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2004.

AZAPAGIC, A., “Systems approach to corporate sustainability: a general management framework”, **Transactions of Institution of Chemical Engineers**, 81, Part B, 303-316, 2003.

_____, MILLINGTON, A., COLLETT, A., “A methodology for integrating sustainability considerations into process design”, **Transactions of Institution of Chemical Engineers**, 84 (A6), Part A, 439-452, 2006.

AZEVEDO, C.A.L., KAYANO, C.A.S., ABREU, G.M.R., SALVESTRO, R.E., **Reutilização de efluentes líquidos de uma refinaria de petróleo**, Trabalho de Conclusão de Curso de Pós-Graduação em Controle da Poluição Ambiental, FAAP / CENAP, São José dos Campos, SP, 1999.

BAAS, L., “To make zero emissions technologies and strategies become a reality, the lessons learned of cleaner production dissemination have to be known”, **Journal of Cleaner Production**, 15 (13-14), 1205-1216, 2007.

BACEN (Banco Central do Brasil), 2012. **Comitê de Política Monetária**. Disponível em: <http://www.bcb.gov.br/?COPOMJUROS>. Acessado em: 20 de abril de 2012.

BAGAJEWICZ, M., “Review of recent design procedures for water networks in refineries and process plants”, **Computers and Chemical Engineering**, 24, 2093-2113, 2000.

BARBIERI, J.C., **Gestão ambiental empresarial**: conceitos, modelos e instrumentos, 2ª edição, São Paulo: Editora Saraiva, 2007.

BARROS, O., GIAMBIAGI, F. (Orgs.), **Brazil globalizado**: o Brasil em um mundo surpreendente, 3ª. Edição, Rio de Janeiro: Campus/Elsevier, 2008.

BELLEN, H.M.V., **Indicadores de sustentabilidade**: uma análise comparativa, Rio de Janeiro: Editora FGV, 2ª edição, 2006.

BERKEL, R.V., "Cleaner production and eco-efficiency initiatives in Western Austrália 1996-2004", **Journal of Cleaner production**, 15 (8-9), 741-755, 2007.

BERNARDI, C.C., **Reuso de água para irrigação**, Monografia (MBA em Gestão Sustentável da Agricultura Irrigada) - ISEA-FGV/Ecobusiness School, Distrito Federal, DF, 2003.

BINSWANGER, H.C., Fazendo a sustentabilidade funcionar, In: FERREIRA, L.C., VIOLA, E. (Orgs.), **Incertezas de sustentabilidade na globalização**, Campinas: Editora da Unicamp, 1996.

BM&FBOVESPA (Bolsa de Valores, Mercadorias e Futuros), 2008. Disponível em: <http://www.bovespa.com.br/Mercado/RendaVariavel/Indices/FormConsultaApresentacaoP.asp?Indice=ISE>. Acessado em: 19 de janeiro de 2009.

BONILLA, S.H., ALMEIDA, C.M.V.B., GIANNETTI, B.F., HUISINGH, D., "The roles of cleaner production in the sustainable development of modern societies: an introduction to this special issue", **Journal of Cleaner Production**, 18 (1), 1-5, 2010.

BORDEAUX-RÊGO, R., PAULO, G.P., SPRITZER, I.M.P.A., ZOTES, L.P., **Viabilidade econômico-financeira de projetos**, 3ª. Edição, Rio de Janeiro: Editora FGV, 2010.

BRAGA, B.,HESPANHOL, I., CONEJO, J.G.L., MIERZWA, J.C., BARROS, M.T.L., SPENCER, M., PORTO, M., NUCCI, N., JULIANO, N., EIGER, S., **Introdução à engenharia ambiental**, 2ª. Edição, São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

BRASIL. **Decreto n° 24.643, de 10 de julho de 1934**. Decreta o Código de Águas. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d24643.htm>. Acessado em: 15 de fevereiro de 2009.

_____. **Lei n°. 9.433, de 08 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, entre outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9433.htm>. Acessado em: 15 de fevereiro de 2009.

_____. **Lei n° 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gol.br/ccivil_03/leis/L6938compilada.htm>. Acessado em: 15 de fevereiro de 2009.

_____. **Lei n° 7.804, de 18 de julho de 1989**. Altera a Lei n° 6.938, de 31 de agosto de 1981, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, a Lei n° 7.735, de 22 de fevereiro de 1989, a Lei n° 6.803, de 2 de julho de 1980, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gol.br/ccivil_03/leis/L7804.htm>. Acessado em: 15 de fevereiro de 2009.

_____. **Lei n° 9.605, de 12 de fevereiro de 1998**. Lei dos Crimes Ambientais. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=320>. Acessado em: 15 de fevereiro de 2009.

_____. **Lei Complementar n° 140, de 8 de dezembro de 2011**. Fixa normas, nos termos dos incisos III, VI e VII do caput e do parágrafo único do art. 23 da Constituição Federal, para a cooperação entre a União, os Estados, o Distrito Federal e os Municípios nas ações administrativas decorrentes do exercício da competência comum relativas à proteção das paisagens naturais notáveis, à proteção do meio ambiente, ao combate à poluição em qualquer de suas formas e à preservação das florestas, da fauna e da flora; e altera a Lei n° 6.938, de 31 de agosto de 1981. Disponível em: <http://www010.dataprev.gov.br/sislex/paginas/43/2011/140.htm>. Acessado em: 27 de dezembro de 2011.

_____. **Lei Federal n° 9.984, de 17 de julho de 2000**. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas – ANA, entidade federal de implementação da política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9984.htm>. Acessado em: 15 de fevereiro de 2009.

_____. **Resolução CNRH n° 16, de 08 de maio de 2001**. Estabelece critérios gerais para a outorga de direito de uso de recursos hídricos. Disponível em: <http://www.cnrh.gov.br/sitio/index.php?option=com_content&view=article&id=14>. Acessado em: 27 de dezembro de 2011.

_____. **Portaria nº. 518, de 25 de março de 2004**. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providêncis. Disponível em: <http://dtr2001.saude.gov.br/sas/PORTARIAS/Port2004/GM/GM-518.htm>. Acessado em: 28 de dezembro de 2011.

_____. **Resolução Conama n°. 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>. Acessado em: 15 de fevereiro de 2009.

_____. **Objetivos de Desenvolvimento do Milênio – Relatório Nacional de Acompanhamento**, Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, Secretaria de Planejamento e Investimentos Estratégicos, Brasília: Ipea, 2010.

_____. **Resolução Conama n°. 430, de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n° 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – Conama. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>. Acessado em: 12 de setembro de 2011.

BRAVO, J.L.R., **Levantamento de oportunidades para racionalização do uso da água em unidades de processo de uma metalurgia de cobre primário**, Dissertação (Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo), Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2003.

BREGA FILHO, D., MANCUSO, P.C.S., "Conceito de reúso de água", 21-36, 2003, MANCUSO, P.C.S., SANTOS, H.F. (Editores), **Reúso de Água**, Barueri, SP: Manole, 2003.

BROWN, G., STONE, L., "Cleaner production in New Zealand: taking stock", **Journal of Cleaner production**, 15 (8-9), 716-728, 2007.

BROWN, R.M., MCLELLAND, N.I., DEININGER, R.A., TOZER, R.G.A., "Water Quality Index – Do we dare?", **Water & Sewage Works**, 339-343, 1970.

BUSSAB, W.O., MORETTIN, P.A., **Estatística básica** (Métodos quantitativos), 4ª. Edição, São Paulo: Atual, 1987.

BÜYÜKBAY, B., CILIZ, N., GOREN, G.E., MAMMADOV, A., "Cleaner production application as a sustainable production strategy, in a Turkish Printed Circuit Board Plant", **Resources, Conservation and Recycling**, 54 (10), 744-751, 2010.

CABEZAS, H., BARE, J.C., MALLICK, S.K., "Pollution prevention with chemical process simulators: the generalized waste reduction (WAR) algorithm – full version", **Computers and Chemical Engineering**, 23 (4-5), 623-634, 1999.

CALIXTO, E.E.S., **Procedimento total site na síntese de redes de águas com múltiplos contaminantes**, Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e

Bioquímicos), Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2011.

CÁNEPA, E.M., "Economia da poluição", In: MAY, P.H., LUSTOSA, M.C., VINHA, V. (Org.), **Economia do meio ambiente: teoria e prática**, Rio de Janeiro: Elsevier, 6ª reimpressão, 2003.

CARDOSO, A.R.A., "A degradação ambiental e seus valores econômicos associados -uma proposta", In: XXVII CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2000, **Anais...**, Porto Alegre, RS, ABES, Ref. VI-009, 1-25, 2000.

CARLSON, R.E., "A trophic state index for lakes", **Limnology and Oceanography**, 22 (2), 261-269, 1977.

CARRIER (Carrier Air Conditioning Company), **Handbook of Air Conditioning System Design**, New York: McGraw-Hill Books, 1965.

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

CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental). Disponível em <http://www.cetesb.sp.gov.br/>. Acessado em: 18 de junho de 2007.

_____. Disponível em <http://www.cetesb.sp.gov.br/Tecnologia/producao_limpa/casos_geral.asp>. Acessado em: 04 de março de 2008.

_____. **A Produção mais Limpa e o Consumo Sustentável na América Latina e Caribe**, Pnuma: Escritório Regional para América Latina e Caribe, São Paulo, 2004.

_____. **Manual para implementação de um programa de prevenção à poluição**, 4ª edição, 16 p., São Paulo, 2002. Disponível em <http://www.cetesb.sp.gov.br/>. Acessado em: 18 de junho de 2007.

_____. **IQA - Índice de qualidade das águas**. 2011a. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/Águas-Superficiais/42-Índice-de-Qualidade-das-Águas-(iqa)>. Acessado em: 28 de dezembro de 2011.

_____. **IAP - Índice de qualidade das águas brutas para fins de abastecimento público / ISTO – Índice de substâncias tóxicas e organolépticas**. 2011b.
Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/agua/aguas-superficiais/aguas-interiores/documentos/indices/03.pdf>. Acessado em: 28 de dezembro de 2011.

_____. **IVA - Índice de qualidade de água para a proteção de vida aquática**. 2011c. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/aguas-superficiais/44-indice-de-qualidade-de-agua-para-a-protecao-da-vida-aquatica-(iva)>. Acessado em: 29 de dezembro de 2011.

CICCOZZI, E., CHECKENYA, R., RODRIGUEZ, A.V., "Recent experiences and challenges in promoting cleaner production investments in developing countries", **Journal of Cleaner Production**, 11 (6), 629-638, 2003.

CMMAD (Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento). **Nosso Futuro Comum**. Rio de Janeiro: Fundação Getulio Vargas, 1991.

CNI (Confederação Nacional da Iindústria), 2008. Disponível em: <http://www.cni.org.br/>. Acessado em: 15 de janeiro de 2009.

CNTL (Centro Nacional de Tecnologias Limpas). **Série manuais de produção mais limpa**, Porto Alegre: UNIDO/UNEP/CNTL/SENAI-RS, vols. 1 a 15, 2000.

_____. **Implementação de programas de produção mais limpa**, Rio Grande do Sul: UNIDO/UNEP/CNTL/SENAI-RS, 2003.

COELHO, A.C.D., **Avaliação da aplicação da metodologia de Produção mais Limpa *Unido/Unep* no setor de saneamento** – Estudo de caso: Embasa S.A., Dissertação (Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo), Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2004.

COMMONER, B., **The closing circle**: nature, man, and technology, New: York: Random House, 1971.

CORAL, E., **Modelo de planejamento estratégico para a sustentabilidade empresarial**, Tese (Doutorado em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2002.

CORDER, G. D., MCLELLAN, B. C., BANGERTER, P. J., VAN BEERS, D., GREEN, S. R., "Engineering-in sustainability through the application of SUSOP®", **Chemical Engineering Research and Design**, 90 (1), 98-109, 2012.

CUNHA, E., **Metodologia para redução de efluente líquido industrial na fonte: uma proposta a partir da experiência da Deten Química S.A.**, Dissertação (Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo), Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2006.

DELGADO, B.E.P.C., **Minimização de efluentes aquosos em plantas industriais** – Extensão do algoritmo diagrama de fontes de água para regeneração diferenciada, Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos), Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2003.

_____, **Síntese de sistemas de regeneração e tratamento final de efluentes**, Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos), Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2008.

_____, MIRRE, R.C., SANTOS, R.P., QUEIROZ, E.M., PESSOA, F.L.P., "Industrial Water/Wastewater Reuse using Water Sources Diagram (WSD): Single Contaminant", **Revista de Ciência e Tecnologia (Unimep)**, Editora da Unimep: Piracicaba, SP, 16 (31), 85-97, 2009.

DELGADO, J.J.S., **Desenvolvimento Sustentável e a indústria química brasileira:** análise das posturas empresariais e proposta de desdobramento das suas estratégias, Tese (Doutorado em Planejamento Energético), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

DEL GRANDE, M.H., **Racionalização do uso de água na indústria de celulose**: o caso Bahia Pulp, Dissertação (Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo), Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2004.

DIAS, R., **Gestão ambiental**: responsabilidade social e sustentabilidade, 2ª Edição, São Paulo: Atlas, 2011.

DINATO, M.R., **Produção e consumo sustentáveis**: o caso da Natura Cosméticos S.A., Tese (Doutorado em Administração), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2006.

DJSI (Dow Jones Sustainability Indexes), 2008. Disponível em: <http://www.sustainability-index.com/>. Acessado em: 19 de janeiro de 2009.

DUNN, R.F., BUSH, G.E., "Using Process Integration Technology for Cleaner Production", **Journal of Cleaner Production**, 9 (1), 1-23, 2001.

_____, EL-HALWAGI, M.M., “Process integration technology review: background and applications in the chemical process industry”, **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, 78 (9), 1011-1021, 2003.

ECKENFELDER, W.W., **Water quality engineering for practicing engineers**, Professional Engineering Career Development Series, New York (USA): Barnes and Noble, Inc., 1970.

EHRLICH, P. **The population bomb**, New York (USA): Ballantine Books, 1968.

EL-HALWAGI, M. M., **Pollution prevention through process integration: systematic design tools**, San Diego (USA): Academic Press Ltd., 1997.

ELKINGTON, J. **Sustentabilidade** – Canibais com garfo e faca, Edição histórica de 12 anos, MBooks, 2011.

ESTEVES, F.A., BARBOSA, F.A.R., “Eutrofização artificial: a doença dos lagos”, **Revista Ciência Hoje**, SBPC: Rio de Janeiro, 5 (27), 56-61, 1986.

FENKER, E.A., “Impacto ambiental e dano ambiental”, IN: II SEMINÁRIO SOBRE SUSTENTABILIDADE, Centro Universitário Franciscano – FAE, 1-13, Curitiba, PR, 2007. Disponível em: <http://www.fae.edu/publicacoes/pdf/IIseminario/pdf_reflexoes/reflexoes_10.pdf>. Acessado em: 08 de junho de 2009.

FERREIRA, M.I.P., TERRA, G.S., MORAES, G.P., MELLO, D.S., SANTOS, N.M., “Valoração econômica de impactos ambientais de dutos de efluentes em UCs de proteção integral – estudo de caso: o Parna Jurubatiba”, In: III SIMPÓSIO DE ÁREAS PROTEGIDAS, 2005, Pelotas, **Anais...**, 1-10, Pelotas, RS, 2005.

FGV (Fundação Getulio Vargas), 2012. **Instituto Brasileiro de Economia**. Disponível em: <http://portalibre.fgv.br/>. Acessado em: 20 de abril de 2012.

FIA, R., MATOS, A.T., CORADI, P.C., PEREIRA-RAMIREZ, O., “Estado trófico da água na bacia hidrográfica da Lagoa Mirim, RS, Brasil”, **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, SP, 4 (1), 132-141, 2009.

FIESP (Federação das Indústrias do Estado de São Paulo). **Conservação e Reuso de Água.** Manual de orientações para o setor industrial, vol. 1, Fiesp/Ciesp, São Paulo, 2004.

FRESNER, J., ENGELHARDT, G., “Experiences with integrated management systems for two small companies in Áustria”, **Journal of Cleaner production**, 12 (6), 623-631, 2004.

FURTADO, M.R., “Água escassa e cara obriga as indústrias a encomendar projetos”, **Revista Química e Derivados**, edição nº 455, Novembro, 2006, São Paulo: Editora QD. Disponível em: <http://www.quimicaederivados.com.br/revista/qd455/agua1.html>. Acessado em: 16 de setembro de 2008.

_____, “Tarifas em alta incentivam os primeiros projetos na indústria”, **Revista Química e Derivados**, edição nº 444, Dezembro, 2005, São Paulo: Editora QD. Disponível em: <http://www.quimicaederivados.com.br/revista/qd444/reuso1.html>. Acessado em: 16 de setembro de 2008.

_____, “P+L: Brasil assume compromisso com a Produção mais Limpa”, **Revista Química e Derivados**, edição nº 407, Agosto, 2002, São Paulo: Editora QD. Disponível em: <http://www.quimicaederivados.com.br/revista/qd407/pl1.htm>. Acessado em: 16 de setembro de 2008.

GALE, R., “Environmental management accounting as a reflexive modernization strategy in cleaner production”, **Journal of Cleaner Production**, 14 (14), 1228-1236, 2006.

GASI, T.M.T., FERREIRA, E., “Produção mais limpa”, In: VILELA JÚNIOR, A., DEMAJOROVIC, J. (Organizadores), **Modelos e ferramentas de gestão ambiental: desafios e perspectivas para as organizações**, São Paulo: Editora Senac São Paulo, 2006.

GAZETA MERCANTIL, “Sustentabilidade é uma oportunidade para inovar”, São Paulo, 07/08/2007, A-14.

GHAZINOORY, S., “Cleaner production in Iran: necessities and priorities, **Journal of Cleaner production**, 13 (8), 755-762, 2005.

GIANNETTI, B.F., ALMEIDA, C.M.V.B., **Ecologia Industrial**: conceitos, ferramentas e aplicações, São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2006.

_____, B.F., BONILLA, S.H., SILVA, I.R., ALMEIDA, C.M.V.B., “Cleaner production practices in a médium sizegold-plated jewelry company in Brazil: when little changes make the difference”, **Journal of Cleaner production**, 16 (10), 1106-1117, 2008.

GOMBAULT, M., VERSTEEGE, S., “Cleaner production in SMEs through a partnership with (local) authorities: sucesses from the Netherlands”, **Journal of Cleaner production**, 7 (4), 249-261, 1999.

GOMES, J.F.S., **Procedimento para minimização de efluentes aquosos**, Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos), Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2002.

_____, QUEIROZ, E.M., PESSOA, F.L.P., “Design procedure for water/wastewater minimization: single contaminant”, **Journal of Cleaner Production**, 15 (5), 474-485, 2007.

GONÇALVES, N.M.F., **Programa de minimização de efluentes líquidos na indústria** – estudo de caso Polibrasil, Monografia (Especialização em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais na Indústria), Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2001.

GONZALEZ, A. “Pesquisa: Empresas querem ser sustentáveis. Mas não conseguem”, Jornal O Globo, 05/07/2011, Disponível em: <http://oglobo.globo.com/blogs/razaosocial/posts/2011/07/05/pesquisa-empresas-querem-ser-sustentaveis-mas-nao-conseguem-390413.asp >. Acessado em: 07 de julho de 2011.

GREENPEACE, “O que é Produção Limpa?”, **Greenpeace Report**, Outubro de 1997. Disponível em: <http://www.greenpeace.org.br/toxicos/pdf/producao_limpa.doc>. Acessado em: 16 de junho de 2009.

GRUTTER, J.M., EGLER, H-P., ”From cleaner production to sustainable industrial production modes”, **Journal of Cleaner Production**, 12 (3), 249-256, 2004.

GUNARATNAM, M., ALVA-ARGÁEZ, A., KOKOSSIS, A., KIM, J.-K., SMITH, R., “Automated design of total water systems”, **Industrial and Engineering Chemistry Research**, 44, 588-599, 2005.

GWEHENBERGER, G., NARODOSLAWSKY, M., “Sustainable processes – the challenge of the 21st century for chemical engineering”, **Process Safety and Environment Protection**, 86 (5), 321-327, 2008.

HALIM, I., CARVALHO, A., SRINIVASAN, R., MATOS, H.A., GANI, R., “A combined heuristic and indicator-based methodology for design of sustainable chemical process plants”, **Computers & Chemical Engineering**, 35 (8), 1343-1358, 2011.

HALLALE, N., “Burning bright trends in process integration”, **Chemical Engineering Progress,** July, 30-40, 2001.

HAMED, M.M., EL MAHGARY, Y., “Outline of a nacional strategy for cleaner production: the case of Egypt”, **Journal of Cleaner production**, 12 (4), 327-336, 2004.

HARADA, F.H., **Uso da Técnica Produção mais Limpa em Estação de Tratamento de Efluentes Industriais**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2006.

HESPANHOL, I., “Potencial de reúso de água no Brasil: agricultura, indústria, município e recarga de aquíferos”, 37-95, 2003, In: MANCUSO, P.C.S., SANTOS, H.F. (Editores), **Reúso de Água**, Barueri, SP: Manole, 2003.

HICKS, C., DIETMAR, R., “Improving cleaner production through the application of environmental management tools in China”, **Journal of Cleaner Production**, 15 (5), 395-408, 2007.

HIGA, C.M., DELGADO, B.E.P.C., QUEIROZ, E.M., PESSOA, F.L.P., “Minimização do consumo de água: o caso de uma refinaria de petróleo”, In: 4° CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS, 2007, Campinas, **Anais do 4° PDPETRO**, Campinas, SP, 1-10, 2007.

HINZ, R.T.P., VALENTINA, L.V.D., FRANCO, A.C., “Sustentabilidade ambiental das organizações através da produção mais limpa ou pela avaliação do ciclo de vida”, **Estudos Tecnológicos**, 2 (2), 91-98, jul/dez 2006.

HOBSBAWN, E. **Era dos extremos**: o breve século XX – 1914-1991, São Paulo: Companhia das Letras, 1995.

HOSSAIN, K.A., KHAN, F.I., HAWBOLDT, K., “Sustainable development of process facilities: state-of-the-art review of pollution prevention frameworks”, **Journal of Hazardous Materials**, 150 (1), 4-20, 2008.

HOSSAIN, K.A., KHAN, F., HAWBOLDT, K., “SusDesign – an approach for a sustainable process system design and its application to a thermal power plant”. **Applied Thermal Engineering**, 30 (14-15), 1896-1913, 2010.

HUBERMAN, L., **História da riqueza do homem**, 21ª edição, Rio de Janeiro: LTC Editora, 1986.

HUNGARO, L.M., **Desenvolvimento de algoritmo para síntese de tratamento distribuído para efluentes líquidos**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2005.

IMMICH, A.P.S.; GUSATTI, M.; MELLO, J.M.M.; GUELLI U. SOUZA, S.M.A.; PESSOA, F.L.P.; ULSON DE SOUZA, A.A. “Application of the water source diagram (WSD) procedure to water use minimization in a batchy process”, In: EUROPEAN CONGRESS OF CHEMICAL ENGINEERING, 2007, **Proceedings of ECCE-6**, Copenhagen, Denmark, 1-14, 2007.

IRABIEN, A., ALDACO, R., OLMO, I.F., GAREA, A., “Sustainability integration in chemical process engineering”, In: EUROPEAN CONGRESS OF CHEMICAL ENGINEERING (ECCE-6), 2007, Copenhagen, **Book of Abstracts**, Copenhagen, Denmark, September, 2007.

JABBOUR, C.J.C., SILVA, E.M., PAIVA, E.L., SANTOS F.C.A., “Environmental management in Brazil: is it a completely competitive priority?”, **Journal of Cleaner Production**, 21 (1), 11-22, 2012.

KARTHICK, R., KUMARAPRASAD, G., SRUTI, B., “Hybrid optimization approach for water allocation and mass exchange network”, **Resources, Conservation and Recycling**, 54 (11), 783-792, 2010.

KHAN, Z., “Cleaner production: an economial option for ISO certification in developing countries”, **Journal of Cleaner Production**, 16 (1), 22-27, 2008.

KHAN, F.I., NATRAJAN, B.R., REVATHI, P., “GreenPro: a new methodology for cleaner and greener process design”, **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, 14 (4), 307-328, 2001.

KIPERSTOK, A. Ciência e Cultura – Agência de notícias em CT&I da Bahia, Salvador, 2011. Entrevista concedida a Priscilla Machado em junho de 2011. Disponível em: <http://www.cienciaecultura.ufba.br/agenciadenoticias/entrevistas/asher-kiperstok/>. Acessado em: 22 de dezembro de 2011.

KIST, L.T., EL MOUTAQI, S., MACHADO, Ê. L., “Cleaner production in the management of water use at a poultry slaughterhouse of Vale do Taquari, Brazil: a case study”, **Journal of Cleaner Production**, 17 (13), 1200-1205, 2009.

KJAERHEIM, G., “Cleaner production and sustainability”, **Journal of Cleaner Production**, 13 (4), 329-339, 2005.

KLINE, S., ROSENBERG, N., “An overview of innovation”, In: Landau, R; Rosenberg, N. (org.), **The Positive Sum Strategy: Harnessing Technology for Economic Growth**, Washington, DC (USA): National Academy of Press, 1986.

KLIOPOVA, I., STANISKIS, J.K., ”The evaluation of cleaner production performance in Lithuanian industries”, **Journal of Cleaner production**, 14 (18), 1561-1575, 2006.

KUMARAPRASAD, G., MUTHUKUMAR, K., Design of mass exchange network and effluent distribution system for effective water management, **Journal of Cleaner Production**, 17 (17), 1580-1593, 2009.

LAGREGA, M. D.; BUCKINGHAM, P. L.; EVANS, J. C. **The environmental resources management group**: Hazardous Waste Management. Singapore: McGraw-Hill, 1994.

LAKHANI, M., “The need for clean production and product re-design”, **Journal of Cleaner Production**, 15 (13-14), 1391-1394, 2007.

LAMPARELLI, M.C., **Grau de trofia em corpos d’água do estado de São Paulo**: avaliação dos métodos de monitoramento, Tese (Doutorado), Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 238 p., 2004.

LANDWEHR, J.M., DEININGER, R.A., “A Comparison of Several Water Quality Indices”, **Journal of the Water Pollution Control Federation**, 48 (5), 954-958, 1976.

LEMME, C.F., **Avaliação econômica de impactos ambientais no Brasil**: da atividade acadêmica ao financiamento de longo prazo de projetos e empresas, Tese (Doutorado em Administração), Instituto de Pós-graduação em Administração, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2000.

LERIPIO, A.A., **GAIA** – um método de gerenciamento de aspectos e impactos ambientais, Tese (Doutorado em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2001.

LIBÂNIO, M., **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**, Campinas: Editora Átomo, 3ª. Edição, 2010.

LINNHOFF, B., HINDMARSH, E., “The pinch design method of heat exchanger networks”, **Chemical Engineering Science**, 38 (5), 745-763, 1983.

LIPORACE, F.S., **Síntese de redes de trocadores de calor afastadas do ponto de estrangulamento energético**, Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1996.

LOPES, C.L.J., **Gerenciamento de recursos hídricos e o processo de internalização da variável água nas indústrias**, Dissertação (Mestrado em Geociências), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2006.

LOZOWSKI, D., “Economic indicators”, **Chemical Engineering**, 118 (4), 67-68, 2011.

LUSTOSA, M.C.J., “Industrialização, meio ambiente, inovação e competitividade”, In: MAY, P.H., LUSTOSA, M.C., VINHA, V. (Org.), **Economia do meio ambiente**: teoria e prática, Rio de Janeiro: Elsevier, 6ª reimpressão, 2003.

_____, CÁNEPA, E.M., YOUNG, C.E.F., “Política ambiental”, In: MAY, P.H., LUSTOSA, M.C., VINHA, V. (Org.), **Economia do meio ambiente**: teoria e prática, Rio de Janeiro: Elsevier, 6ª reimpressão, 2003.

MARIANO, J.B., **Impactos ambientais do refino de petróleo**, Rio de Janeiro: Interciência, 2005.

MARQUES, S.V., **Minimização do consumo de água e da geração de efluentes aquosos** – estudos de casos, Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2008.

MATTOS, K.M.C., MATTOS, K.M.C., MATTOS, A., "Sustentabilidade ambiental e o uso do instrumento de valoração econômica do meio ambiente – abordagens teórica e prática", **Anais do XIII SIMPEP**, Bauru, SP, 1-9, 2006.

MAJOZI, T., BROUCKAERT, C. J., BUCKLEY, C. A., "A graphical technique for wastewater minimisation in batch processes", **Journal of Environmental Management,** 78 (4), 317-329, 2006.

MCGIVNEY, W., KAWAMURA, S., **Cost estimating manual for water treatment facilities**, New Jersey (USA): John Wiley & Sons, Inc., 2008.

MEADOWS, H.D., MEADOWS, D.L., RANDERS, J., BEHRENS III, W.W., **Limites do crescimento**, São Paulo: Perspectiva, 1972.

MELLO, M.C.A., **Produção mais limpa**: um estudo de caso na AGCO do Brasil, Dissertação (Mestrado em Administração), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2002.

MELO, A.R., **Uso integrado e eficiente da água nas indústrias têxteis catarinenses**, Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2008.

MIERZWA, J.C., **O uso racional e o reuso como ferramentas para o gerenciamento de águas e efluentes na indústria**: estudo de caso na Kodak Brasileira, Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Sanitária), Volumes 1 e 2, Universidade de São Paulo, SP, 2002.

_____, HESPANHOL, I., **Água na indústria**: uso racional e reúso, São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

MIGUEL, E.N., SANTOS, S.G., **Oportunidades para redução de efluentes líquidos industriais** – caso da OPP Química S.A., Monografia (Curso de Especialização em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais na Indústria), Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2002.

MILFONT JR., W., **Avaliação econômica de projetos industriais**, Apostila de Curso de Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1999.

MILLER, G., BURKE, J., MCCOMAS, C., DICK, K., "Advancing pollution prevention and cleaner production – USA's contribution", **Journal of Cleaner Production**, 16 (6), 665-672, 2008.

MIRRE, R.C., **Recuperação e reúso de água na indústria de petróleo**: síntese de redes de transferência de massa, Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

_____, CAMPOS, C.E.P.S., PESSOA, F.L.P., "Alocação de Tanque Pulmão com o Procedimento Algorítmico Diagrama de Fontes de Água", In: IV WORKSHOP SOBRE GESTÃO E REÚSO DE ÁGUA NA INDÚSTRIA, 2008, Florianópolis, **Anais do IV WGRAI**, CD-ROM, Florianópolis, SC, novembro, 2008.

_____, DELGADO, B.E.P.C., YOKOYAMA, L., QUEIROZ, E.M., PESSOA, F.L.P., "Diagrama de fontes de água: uma ferramenta para gestão e reúso de água na indústria", In: III WORKSHOP SOBRE GESTÃO E REÚSO DE ÁGUA NA INDÚSTRIA, 2007, Florianópolis, **Anais...**, CD-ROM, Florianópolis, SC, 1-6, 2007.

_____, FERREIRA, S.C.L., DIAS, A.R., PESSOA, F.L.P., "Conservação e reúso de águas usando o método Diagrama de Fontes de Água para processos em batelada: estudo de casos", **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, SP, 7 (1), 182-203, 2012.

_____, YOKOYAMA, L., PESSOA, F.L.P., "Reúso de efluentes industriais em refinarias de petróleo usando o método DFA para sistemas regenerativos", **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, SP, 6 (3), 127-151, 2011.

_____, SANTOS, R.P., DELGADO, B.E.P.C., PESSOA, F.L.P., "Application of WSD procedure to petroleum industry", In: 17th INTERNATIONAL CONGRESS OF CHEMICAL AND PROCESS ENGINEERING (CHISA 2006), 9th CONFERENCE "PROCESS INTEGRATION, MODELLING AND OPTIMIZATION OF ENERGY SAVING AND POLLUTION REDUCTION", 2006, Prague, **Proceedings of...**, CD-ROM, Prague, Czech Republic, 1-16, August, 2006.

_____, YOKOYAMA, L., PESSOA, F.L.P., "WSD as a sustainable tool for the CP practices: water/wastewater minimization in industrial processes", In: 2nd INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION, 2009, São Paulo, **Proceedings of the 2nd WACP**, São Paulo, SP, May, 2009.

MITCHELL, C.L., "Beyond barries: examining root causes behind commonly cited cleaner production barriers in Vietnam", **Journal of Cleaner production**, 14 (18), 1576-1585, 2006.

MONTEIRO, J.P., MAGRINI, A., SZKLO, A.S., NUNES, R.T.S., “Gerenciamento de água na indústria de refino de petróleo e as perspectivas de reuso”, **Anais do 12° Congresso Acadêmico sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento do Rio de Janeiro (CADMA)**, Rio de Janeiro, RJ, 1-12, 2004.

MONTGOMERY, D.C., RUNGER, G.C., **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**, 2ª Edição, Rio de Janeiro: LTC, 2003.

MOREIRA, R.C., **Minimização de efluentes em uma unidade de tratamento de água industrial**, Dissertação (Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo), Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2009.

MUSTAFA, G.S., **Reutilização de efluentes líquidos em indústria petroquímica**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, BA, 1998.

NARAYANASWAMY, V., SCOTT, J.A., “Lessons from cleaner production experiences in Indian hosiery clusters”, **Journal of Cleaner production**, 9 (4), 325-340, 2001.

_____, STONE, L., “From cleaner production to sustainable production and consumption in Australia and New Zealand: achievements, challenges, and opportunities”, **Journal of Cleaner production**, 15 (8-9), 711-715, 2007.

NHAPI, I., HOKO, Z., “A cleaner production approach to urban water management: potencial for application in Harare, Zimbabwee”, **Physics and Chemistry of the Earth**, 29, 1281-1289, 2004.

NONAKA, I., TAKEUCHI, H., **Criação de conhecimento na empresa**, Rio de Janeiro: Editora Campus, 1997.

OGATA, T., **Aplicação do conceito de produção mais limpa na otimização do processo de produção de álcool butílico**, Dissertação (Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo), Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2004.

OLIVEIRA, A.M., **Valoração econômica dos danos ambientais causados pela erosão do solo agrícola: um estudo de caso do Município de Santo Antônio do Jardim – SP**, Dissertação (Mestrado em desenvolvimento econômico, espaço e meio ambiente), Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2006b.

OLIVEIRA, J.A., **Otimização ambiental de um sistema de produção de petróleo baseada em critérios de produção mais limpa** – estudo de caso, Dissertação (Mestrado

Profissional em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo), Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2006a.

OLIVEIRA, G., PACHECO, M., **Mercado financeiro**: objetivo e profissional, Curitiba: Editora Fundamento Educacional Ltda, 2ª. Edição, 2011.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD). Disponível em: < http://www.pnud.org.br/odm/index.php>. Acessado em: 11 de fevereiro de 2009.

ORTIZ, R. A., "Valoração econômica ambiental", In: MAY, P.H., LUSTOSA, M.C., VINHA, V. (Org.), **Economia do Meio Ambiente: teoria e prática**, Rio de Janeiro: Elsevier, 6ª reimpressão, 2003.

OUTORGA. TORGA, M., **Poesia completa I**, Lisboa: Círculo de Leitores, 2002. Disponível em: <http://torguices.blogspot.com/2007/04/gua.html>. Acessado em: 15 de outubro de 2011.

PAULA, B.G.C., **Valoração das externalidades negativas sobre a saúde geradas a partir da queima da cana-de-açúcar na região de Ribeirão Preto**, Monografia (Graduação em Economia), Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, SP, 2008.

PEREIRA, C. A., **Tratamentos físico-químicos de águas (I)**, Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Resende, RJ, 2001.

PERLINGEIRO, C.A.G., **Engenharia de Processos: análise, simulação, otimização e síntese de processos químicos**, São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 2005.

PETEK, J., GLAVIČ, P., "An integral approach to waste minimization in process industries", **Resources, Conservation and Recycling**, 17, 3, 169-188, 1996.

_____, GLAVIÇ, P., "Improving the sustainability of regional cleaner production programs", **Resources, Conservation and Recycling**, 29, 1-2, 19-31, 2000.

PRESTRELO, R. C., **Aplicação do conceito de produção mais limpa no gerenciamento do uso da água em atividades terrestres de exploração e produção de petróleo**, Dissertação (Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo), Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2006.

RDH (Relatório de Desenvolvimento Humano da ONU) 2006, Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD). Disponível em:

<http://www.pnud.org.br/rdh/destaques/index.php?lay=inst&id=dtq#d2006>. Acessado em: 11 de fevereiro de 2009.

RELVAS, S., FERNANDES, M.C., MATOS, H.A., PEDRO NUNES, C., **Integração de Processos**: uma metodologia de optimização energética e ambiental, Programa Operacional de Economia – Parcerias e Iniciativas Públicas, 1ª edição, Lisboa, 2002.

REVISTA PETROBRAS, "A água no refino – Água: o combustível da vida", ano VII, n° 66, 18-23, 2000.

REVISTA VOCÊ S/A, "Produção mais responsável", edição 117, 32-33, São Paulo: Editora Abril, 2008.

REYES-CORDOBA, A., SHARRATT, P., ARIZMENDI-SÁNCHEZ, J., "Analysis of the contribution of information management for the implementation of pollution prevention mesuares into process industries", In: EUROPEAN CONGRESS OF CHEMICAL ENGINEERING, 2007, Copenhagen, **Proceedings of ECCE-6**, CD-ROM, Copenhagen, Denmark, 1-11, September, 2007.

RYZNAR, T., "A new índex for determining the amount of calcium carbonate scale formed by a water", **Journal of American Water Works Association**, Denver, 36 (4), 472-486, 1944.

RODRIGUES, W., "Valoração econômica dos impactos ambientais de tecnologias de plantio em região de Cerrados", **RER**, 43 (1), 135-153, Rio de Janeiro, 2005.

RUBINO, F.F., CAMPOS, J.C., YOKOYAMA, L., BATISTA, D.S.A., "Implementação do Programa de Produção Mais Limpa no Setor de Corte em uma Indústria Têxtil", In: 1st INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION, 2007, São Paulo, **Proceedings of the 1st WACP**, São Paulo, SP, 2007.

SABESP. Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. **Uso racional da água**. Disponível em: <http://www.sabesp.com.br/CalandraWeb/CalandraRedirect/?temp=2&temp2=3&proj=sabesp&pub=T&nome=Uso_Racional_Agua_Generico&db=&docid=DAE20C6250A162698325711B00508A40>. Acessado em: 20 de março de 2011.

SALEK, S. "Economia da China é maior que as de Brasil, Rússia, Índia e África do Sul somadas", BBC Brasil, Abril de 2011. Disponível em: <http://www.bbc.co.uk/portuguese/noticias/2011/04/110414_china_economia_brics.shtml>. Acessado em: 28 de outubro de 2011.

SAMANEZ, C.P., **Engenharia econômica**, São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

SANTOS, C., **Prevenção à poluição industrial**: identificação de oportunidades, análise dos benefícios e barreiras. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2005.

SANTOS, H.F., MANCUSO, P.C.S., "A escassez e o reúso de água em âmbito mundial", In: MANCUSO, P.C.S., SANTOS, H.F. (Editores), **Reúso de Água**, Barueri, SP: Manole, 2003.

SANTOS, J.M.M., **Índice de qualidade de água subterrânea aplicado em área de aqüíferos cristalinos com uso agrícola**: bacia do rio São Domingos – RJ, Tese (Doutorado em Geologia), Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2009.

SANTOS, M.R.M., "O princípio poluidor-pagador e a gestão de recursos hídricos: a experiência européia e brasileira", In: MAY, P.H., LUSTOSA, M.C., VINHA, V. (Organizadores), **Economia do Meio Ambiente: teoria e prática**, Rio de Janeiro: Elsevier, 6ª reimpressão, 2003.

SANTOS, R.P., **Extensão e automatização do Diagrama de Fontes de Água usado no gerenciamento e redução do consumo de água em plantas industriais**, Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

SAVELSKI, M., BAGAJEWICZ, M., "On the necessary conditions of optimality of water utilization systems in process plants with multiple contaminants", **Chemical Engineering Science**, 58, 5349-5362, 2003.

SAVITZ, A.W., WEBER, K., **A empresa sustentável**: o verdadeiro sucesso é lucro com responsabilidade social e ambiental, Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

SCAVONE, G.M., "Challenges in internal environmental management reporting in Argentina", **Journal of Cleaner Production**, 14 (14), 1276-1285, 2006.

SCHERER, F.M., ROSS, D., **Industrial market structure and economic performance**, 3rd. edition, Boston: Houghton Mifflin, 1990.

SEGALA, M., "O custo é imediato. O retorno...", **Revista Exame**, edição 1.018, ano 46, n. 11, São Paulo: Editora Abril, 13/06/2012.

SEIDER, W. D., SEADER, J. D., LEWIN, D. R., **Product & process design principles**, 2nd. edition, John Wiley & Sons, Inc., 2003.

SEIFFERT, M.E.B., **ISO 14001 Sistemas de gestão ambiental**: implantação objetiva e econômica, 3ª Edição, São Paulo: Atlas, 2007.

SEIFFERT, M.E.B., **Gestão ambiental**: instrumentos, esferas de ação e educação ambiental, 2ª Edição, São Paulo: Atlas, 2011.

SEROA DA MOTTA, R., **Manual para valoração econômica de recursos ambientais**, Rio de Janeiro: Coordenação de Estudos do Meio Ambiente / IPEA , Coordenação Geral de Diversidade biológica / MMA, 1997.

SEROA DA MOTTA, R., **Economia ambiental**, Rio de Janeiro: FGV Editora, 2006.

SHARPE, W. F., "Capital asset prices: a theory of market equilibrium under conditions of risk", **Journal of Finance**, 19 (3), 425-442, 1964.

SIAMINWE, L., CHINSEMBU, K.C., SYAKALIMA, M., "Policy and operational constraints for the implementation of cleaner production in Zambia", **Journal of Cleaner production**, 13 (10-11), 1037-1047, 2005.

SILLOS, M.R.A., **Valoração ambiental de processos de remediação de áreas contaminadas por hidrocarbonetos de petróleo**, Dissertação (Mestrado), Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), São Paulo, SP, 2006.

SILVA, G.S., JARDIM, W.F., "Um novo índice de qualidade das águas para proteção da vida aquática aplicado ao rio Atibaia, região de Campinas/Paulínia – SP", **Química Nova**, 29 (4), 689-694, 2006.

SILVA, F.P.T., QUEIROZ, E.M., PESSOA, F.L.P., "Multiple contaminants water network synthesis: a heuristic procedure", IN: 4th MERCOSUR CONGRESS ON PROCESS SYSTEMS ENGINEERING, 2001, Santa Fé, **Proceedings of the 4th ENPROMER**, Santa Fé, Argentina, vol. I, 79-84, 2001.

SILVA, M.H., **Modelo de procedimentos para elaboração de metodologia de valoração econômica de impactos ambientais em bacia hidrográfica**: estudo de caso – Guarapiranga – aplicação da função dose-resposta, Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, SP, 2008.

SILVA FILHO, J.C.G., SICSÚ, A.B., "Produção mais Limpa: uma ferramenta da gestão ambiental aplicada às empresas nacionais", In: XXIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2003, Ouro Preto, **Anais...**, 1-8, Ouro Preto, MG, 2003.

SINISGALLI, P.A.A., **Valoração dos danos ambientais de hidrelétricas**: estudos de caso, Tese (Doutorado em Economia), Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2005.

SMITH, A., **Uma investigação sobre a natureza e as causas da riqueza das nações**, São Paulo: Hemus editora Ltda., 1981, 515 p.

SMITH, R., "State of the art in process integration", **Applied Thermal Engineering**, 20, 1337-1345, 2000.

SOUZA, E.A., **Avaliação de inibidores de corrosão para sistemas de resfriamento industrial operando com ciclo elevado de concentração**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

SOUZA, L. S., BRAGA, B. V. D., KIPERSTOK, A., KALID, R. A., SALES, E. A., "Balanço hídrico: uma ferramenta para gestão industrial e otimização ambiental". IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2009, Recife, **Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Recife, Pernambuco, 1-8, 2009.

SPERLING, M.V., **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1995.

STELLING, R.J., **Síntese combinada de redes de equipamentos de transferência de massa e de trocadores de calor**, Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2004.

SZKLO, A.S., **Fundamentos do refino de petróleo**, Rio de Janeiro: Interciência, 2005.

TAYLOR, B., "Encouraging industry to assess and implement cleaner production measures" **Journal of Cleaner Production**, 14 (6-7), 601-609, 2006.

TEIXEIRA, L.A.C., Tratamento de efluentes industriais, 2006. Disponível em: <http://www.dcmm.puc-rio.br/cursos/TEI/efluentes2006.pdf >. Acessado em: 18 de novembro de 2010.

THOMAS, J.E. (Organizador), **Fundamentos de engenharia de petróleo**, Rio de Janeiro: Ed. Interciência, Petrobras, 2001.

TOLEDO JR., A.P., TALARICO, M., CHINEZ, S.J., AGUDO, E.G., "A aplicação de modelos simplificados para a avaliação do processo da eutrofização em lagos e reservatórios tropicais". IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 1983, Balneário Camboriú, **Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Balneário Camboriú, Santa Catarina, 1-34, 1983.

TROVATI, J., **Tratamento de água de resfriamento**, Apostila de curso de atualização. Portal Tratamento de Água, São Paulo, 2007.

TUNDISI, J.G., "Ambiente, represas e barragens", **Revista Ciência Hoje**, SBPC: Rio de Janeiro, 5 (27), 48-54, 1986.

TUNDISI, J.G., "Água, a sustentabilidade vital", **Revista Terra 3.0 Especial Scientific American Brasil**, São Paulo: Duetto, 15-19, 2009.

ULSON DE SOUZA, A.A.; FORGIARINI, E.; BRANDÃO, H.L.; XAVIER, M.F.; PESSOA, F.L.P.; GUELLI U. SOUZA, S.M.A. "Application of water source diagram (WSD) method for the reduction of water consumption in petroleum refineries", **Resources, Conservation and Recycling**, 53 (3), 149-154, 2009.

_____, MELO, A.R., PESSOA, F.L.P., GUELLI U. SOUZA, S.M.A., "The modified water source diagram method applied to reuse of textile industry continuous washing water", **Resources, Conservation and Recycling**, 54 (12), 1405-1411, 2010.

UNNIKRISHNAN, S., HEGDE, D.S., "An analysis of cleaner production and its impact on health hazards in the workplace", **Environment International**, 32 (1), 87-94, 2006.

USEPA, **Waste minimization opportunity assessment manual**, epa/625/7-88/003, Office of the Research and Development, Cincinnati, Ohio, 45268, 1988.

VEIGA, A.A., **Estudo do efeito biocida do cloro e do peróxido de hidrogênio em sistemas de resfriamento com reúso de efluente como água de reposição**, Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2010.

VINHA, V., "As empresas e o desenvolvimento sustentável: da eco-eficiência à responsabilidade social corporativa", In: MAY, P.H., LUSTOSA, M.C., VINHA, V. (Org.), **Economia do meio ambiente**: teoria e prática, Rio de Janeiro: Elsevier, 6ª reimpressão, 2003.

WANG, Y.P., SMITH, R., "Wastewater minimisation", **Chemical Engineering Science**, 49 (7), 981-1006, 1994a.

_____, **"**Desing of distriduted effluent treatment systems"; **Chemical Engineering Science**, 49 (18), 3127-3145, 1994b.

_____, "Wastewater minimization with flowrate constraints", **Transactions of the Institution of Chemical Engineers**, 73 (A), 889-904, 1995.

WEBBER, M.E., “Uma questão de opção”, **Revista Scientific American Brasil**, Edição Especial, 32, 28-35, 2009.

WOLNIK, C., FISCHER, P., “Advancing pollution prevention and cleaner production – Canada’s contribution”, **Journal of Cleaner production**, 14 (6-7), 539-541, 2006.

WWA (World Water Assessment Programme), 2009. **The United Nations World Water Development Report 3**: Water in a Changing World. Paris: UNESCO, and London: Earthscan. Disponível em: <http://webworld.unesco.org/water/wwap/wwdr/wwdr3/index.shtml>. Acessado em: 10 de agosto de 2009.

WWF-Brasil (World Wide Fund for Nature), **Agenda elétrica sustentável 2020**: estudo de cenários para um setor elétrico brasileiro eficiente, seguro e competitivo, Brasília, DF, 2006. Disponível em: <http://assets.wwf.org.br/downloads/wwf_energia_ebook.pdf > Acessado em: 16 de julho de 2009.

XAVIER, M.F., **Reúso e minimização do consumo de água em industrias químicas utilizando a regeneração diferenciada de contaminantes**, Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2009.

YANG, Y.H., LOU, H.H., HUANG, Y.L., “Synthesis of an optimal wastewater reuse network”, **Waste Management**, 20 (4), 311-319, 2000.

YOKOYAMA, L., TEIXEIRA, L.A.C., PEREIRA, J.D.M., “Implantação de programa de produção mais limpa em pequena empresa do setor químico”, **Revista Mundo e Vida**: alternativas em estudos ambientais, vol. 6 (suplemento 1), Número especial do Congresso Acadêmico de Meio Ambiente e Desenvolvimento (CADMA 2004), Rio de Janeiro, 2005.

ZAGATTO, P. A., LORENZETTI, M. L., LAMPARELLI, M. C., SALVADOR, M. E. P., MENEGON JR., N., BERTOLETTI, E., “Aperfeiçoamento de um índice de qualidade de águas”. **Acta Limnologica Brasiliensia**, 11 (2), 111-126, 1999.

ZINKUS, G. A., BYERS, W. D., DOERR, W. W. “Identify appropriate water reclamation technologies”, **Chemical Engineering Progress**, 94 (5), 19-31, May, 1998.

APÊNDICES

O CD-ROM que se encontra afixado nesta página é parte integrante deste trabalho, cujo arquivo eletrônico está estruturado nas seguintes seções:

APÊNDICE 1 – MINEA: Procedimento Automático para o DFA ---------- 332

APÊNDICE 2 – Análise Econômica de Processos (Abordagem Teórica) ---------- 353

APÊNDICE 3 – Os Processos de Refino e o Sistema Hídrico---------- 364

APÊNDICE 4 – Resultados da Aplicação do DFA aos Dados Relativos aos Processos Hídricos da Refinaria de Petróleo ---------- 369

APÊNDICE 5 – Resultados da Análise do Sistema de Resfriamento e de Índices de Estabilidade da Água ---------- 523

APÊNDICE 6 – Resultados da Análise de Sensibilidade Econômica---------- 644

APÊNDICE 1

MINEA:

Procedimento Automático para o DFA

O MINEA é um programa desenvolvido em plataforma Microsoft® Excel a partir do estudo de Santos (2007), na Escola de Química (UFRJ), como uma ferramenta de automação do método Diagrama de Fontes de Água (DFA). Sua principal utilidade está proporcionar cálculos rápidos na geração do DFA, tornando mais prática a identificação de oportunidades de reúso em processos industriais. Assim, fornece ao usuário informações acerca da rede de transferência de massa com consumo mínimo de água, embora não ilustre a estrutura da rede nem realize seu balanço material, deixando para o usuário a análise das propostas de reúso.

A interface do programa permite indicar restrições como proibições de correntes para reúso, perda e/ou ganho de vazão, operações com vazão fixa, bem como análise de possibilidade de deslocamento quando se considera simultaneidade na transferência de componentes (análise de múltiplos componentes).

Ao abrir o programa e prepará-lo para uso, é necessário habilitar macros, clicando na opção que disponibiliza esta função (Figura A.1).

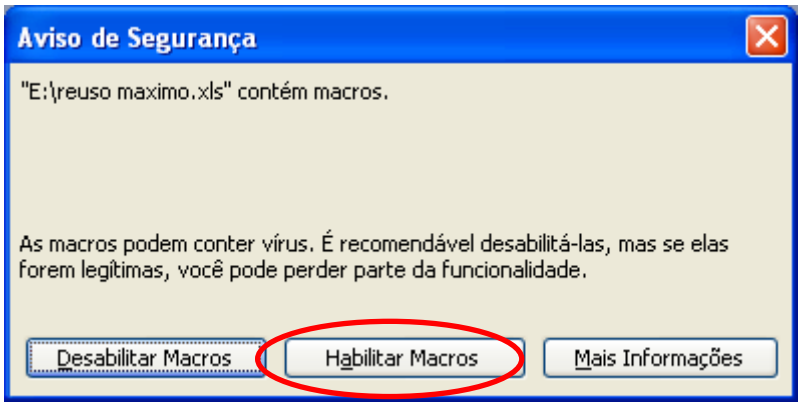


Figura A.1 – Tela inicial para habilitar a macro do MINEA

Se não for possível habilitar esta função com este procedimento inicial, deve-se então verificar se o aplicativo Excel está no nível de segurança avançado, sendo necessário modificá-lo para nível médio, em “Ferramentas” e “Opções”. Na janela Opções, deve-se clicar na aba “Segurança” e em seguida clicar em “Segurança de macro” (Figura A.2), para então marcar a opção de nível médio, e clicar em OK (Figura A.3). Após isto, deve-se fechar o programa em Excel e reabri-lo em seguida.

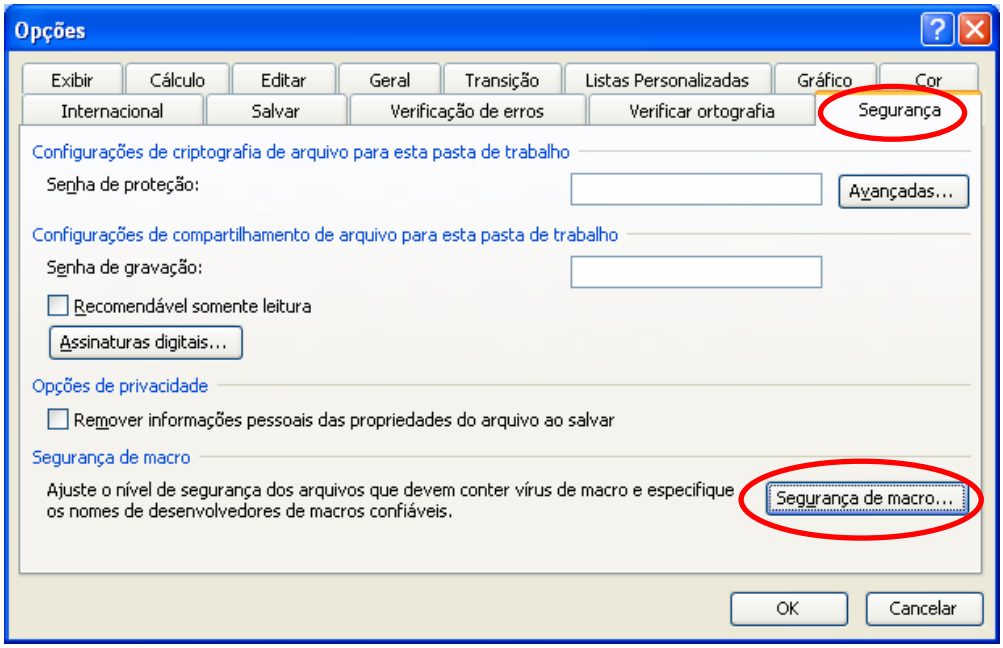


Figura A.2 – Tela de opções para habilitar macros no Excel

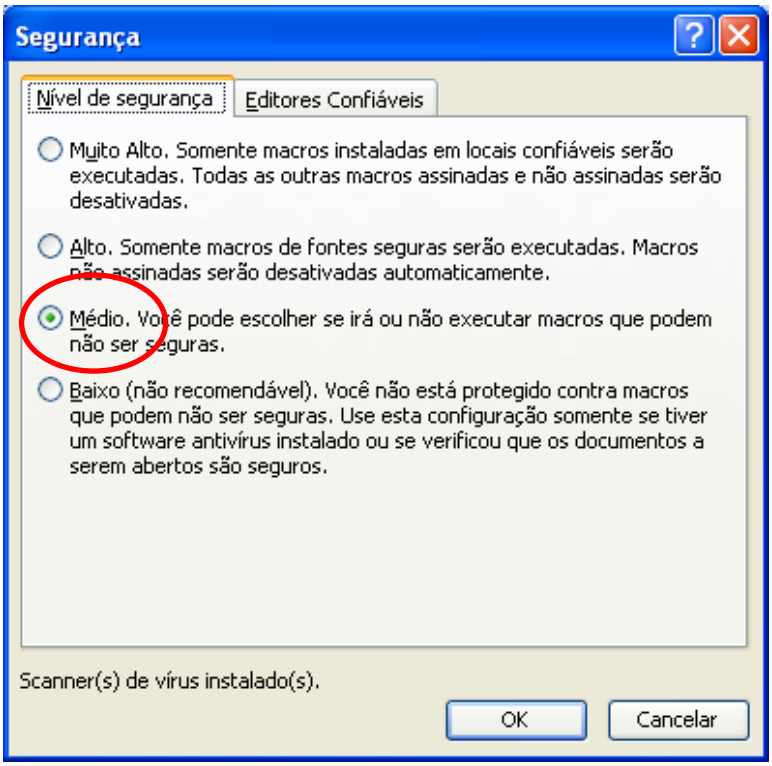


Figura A.3 – Tela de segurança para habilitar macros no Excel

Ao reabrir o programa MINEA, com a macro habilitada, tem-se a tela conforme mostrada na Figura A.4, e os campos podem então ser preenchidos com os respectivos dados referentes à: vazão (em t/h); concentração de entrada (em ppm); concentração de saída (ppm); perda ou ganho de vazão (t/h) em determinada operação, se houver; indicação de vazão menor ou igual à atual; indicação de concentração de fontes externas (limitada a três fontes).

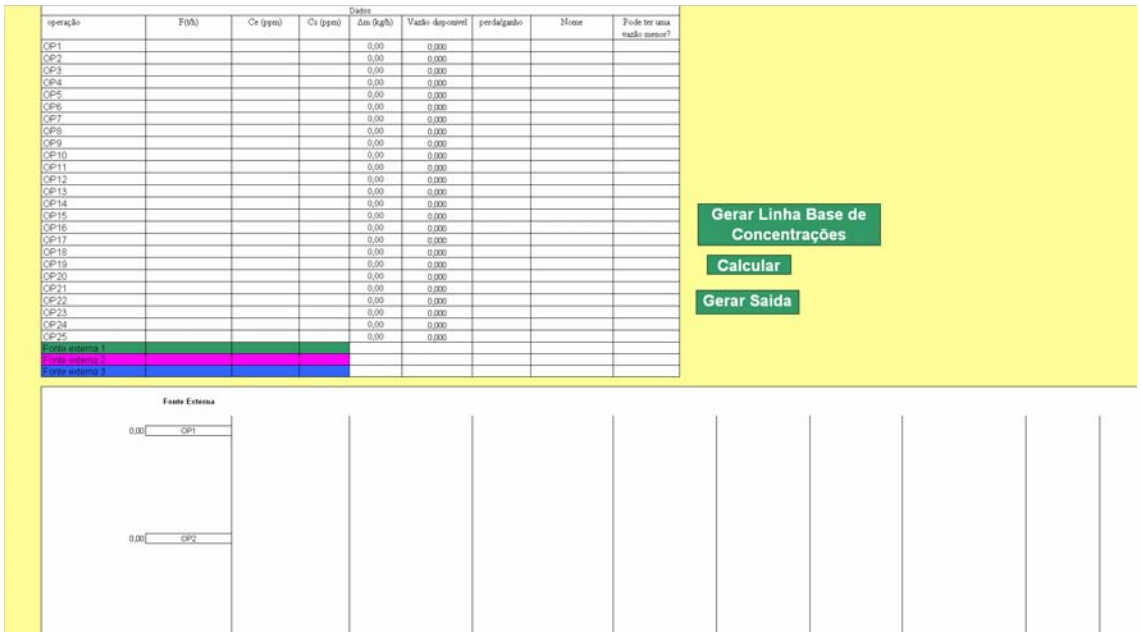


Figura A.4 – Tela inicial do MINEA

A Figura A.5 focaliza a tabela na qual as informações de entrada devem ser inseridas. Assim, com os dados de vazão (F (t/h)) e concentração de entrada (C_e) e de saída (C_s) em cada operação identificada e nomeada opcionalmente (Coluna “Nome”), o programa realiza o cálculo da carga mássica transferida na operação (Δm), em kg/h. A coluna de vazão disponível em cada operação indica o valor que pode ser reutilizado, descontando a perda ou o ganho de vazão informado. Por convenção neste programa, valores positivos de vazão indicam perda e valores negativos para ganho. Opcionalmente, é possível indicar se a vazão em uma dada operação pode ser menor que a indicada no campo F (t/h), ou se este valor deve ser fixado, por conta de restrição de vazão; a indicação é realizada simplesmente digitando “Sim” ou “Não”.

Dados								
operação	F(t/h)	Ce (ppm)	Cs (ppm)	Δm (kg/h)	Vazão disponivel	perda/ganho	Nome	Pode ter uma vazão menor?
OP1				0,00	0,000			
OP2				0,00	0,000			
OP3				0,00	0,000			
OP4				0,00	0,000			
OP5				0,00	0,000			
OP6				0,00	0,000			
OP7				0,00	0,000			
OP8				0,00	0,000			
OP9				0,00	0,000			
OP10				0,00	0,000			
OP11				0,00	0,000			
OP12				0,00	0,000			
OP13				0,00	0,000			
OP14				0,00	0,000			
OP15				0,00	0,000			
OP16				0,00	0,000			
OP17				0,00	0,000			
OP18				0,00	0,000			
OP19				0,00	0,000			
OP20				0,00	0,000			
OP21				0,00	0,000			
OP22				0,00	0,000			
OP23				0,00	0,000			
OP24				0,00	0,000			
OP25				0,00	0,000			
Fonte externa 1								
Fonte externa 2								
Fonte externa 3								

Figura A.5 – Tabela de dados do MINEA

Após preencher a tabela de dados, deve-se clicar em “Calcular” para que o programa determine os respectivos valores na coluna de Δm (kg/h). Em seguida, deve-se clicar em “Gerar Linha Base de Concentrações”, o que permite ao programa definir a seqüência ordenada de concentrações por intervalos na estrutura inicial do DFA. Logo após, deve-se clicar novamente em “Calcular”, e então o programa gera o DFA, indicando as vazões, concentrações, cargas mássicas e origens de possíveis reúsos, conforme mostra a legenda no exemplo da Figura A.6.

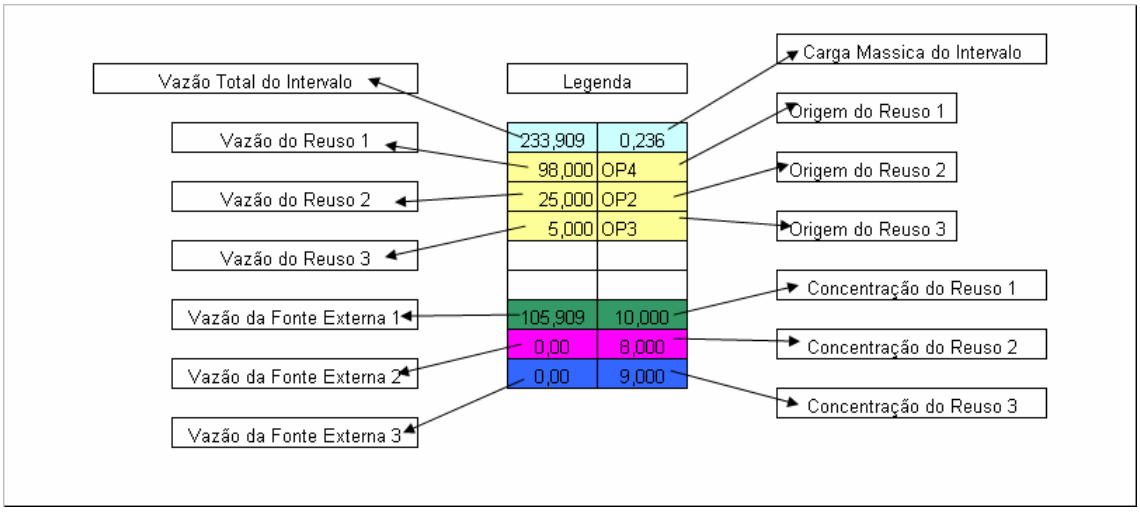


Figura A.6 – Legenda do MINEA

Para salvar a estrutura do DFA gerada pelo programa, deve-se clicar em “Gerar Saída”, sendo então as informações transferidas para uma planilha exclusiva.

Exemplo de aplicação do MINEA

De acordo com os dados da Tabela A.1, retirados de Wang e Smith (1994a), pode-se preencher tais informações no programa, conforme mostra a Figura A.7.

Tabela A.1 – Tabela de dados do problema

Operação	F (t/h)	C_e (ppm)	C_s (ppm)	Δm (kg/h)
1	20	0	100	2
2	100	50	100	5
3	40	50	800	30
4	10	400	800	4

Dados								
operação	F(t/h)	Ce (ppm)	Cs (ppm)	Δm (kg/h)	Vazão disponivel	perda/ganho	Nome	Pode ter uma vazão menor?
OP1	20,00	0,00	100,00	0,00	0,000	0	OP1	Sim
OP2	100,00	50,00	100,00	0,00	0,000	0	OP2	Sim
OP3	40,00	50,00	800,00	0,00	0,000	0	OP3	Sim
OP4	10,00	400,00	800,00	0,00	0,000	0	OP4	Sim
OP5				0,00	0,000			
OP6				0,00	0,000			
OP7				0,00	0,000			
OP8				0,00	0,000			
OP9				0,00	0,000			
OP10				0,00	0,000			
OP11				0,00	0,000			
OP12				0,00	0,000			
OP13				0,00	0,000			
OP14				0,00	0,000			
OP15				0,00	0,000			
OP16				0,00	0,000			
OP17				0,00	0,000			
OP18				0,00	0,000			
OP19				0,00	0,000			
OP20				0,00	0,000			
OP21				0,00	0,000			
OP22				0,00	0,000			
OP23				0,00	0,000			
OP24				0,00	0,000			
OP25				0,00	0,000			
Fonte externa 1		0,00						
Fonte externa 2								
Fonte externa 3								

Figura A.7 – Tabela de dados preenchida no MINEA

Clicando-se em “Calcular”, tem-se o cálculo dos respectivos valores de Δm (embora o programa indique em kg/h, os valores mostrados estão em g/h) (Figura A.8).

Dados								
operação	F(t/h)	Ce (ppm)	Cs (ppm)	Δm (kg/h)	Vazão disponivel	perda/ganho	Nome	Pode ter uma vazão menor?
OP1	20,00	0,00	100,00	2000,00	0,000	0	OP1	Sim
OP2	100,00	50,00	100,00	5000,00	0,000	0	OP2	Sim
OP3	40,00	50,00	800,00	30000,00	0,000	0	OP3	Sim
OP4	10,00	400,00	800,00	4000,00	0,000	0	OP4	Sim
OP5				0,00	0,000			
OP6				0,00	0,000			
OP7				0,00	0,000			
OP8				0,00	0,000			
OP9				0,00	0,000			
OP10				0,00	0,000			
OP11				0,00	0,000			
OP12				0,00	0,000			
OP13				0,00	0,000			
OP14				0,00	0,000			
OP15				0,00	0,000			
OP16				0,00	0,000			
OP17				0,00	0,000			
OP18				0,00	0,000			
OP19				0,00	0,000			
OP20				0,00	0,000			
OP21				0,00	0,000			
OP22				0,00	0,000			
OP23				0,00	0,000			
OP24				0,00	0,000			
OP25				0,00	0,000			
Fonte externa 1		0,00						
Fonte externa 2								
Fonte externa 3								

Figura A.8 – Tabela de dados do MINEA após o cálculo de Δm

A etapa seguinte do procedimento automático é a geração da linha base de concentrações, conforme mostra a Figura A.9.

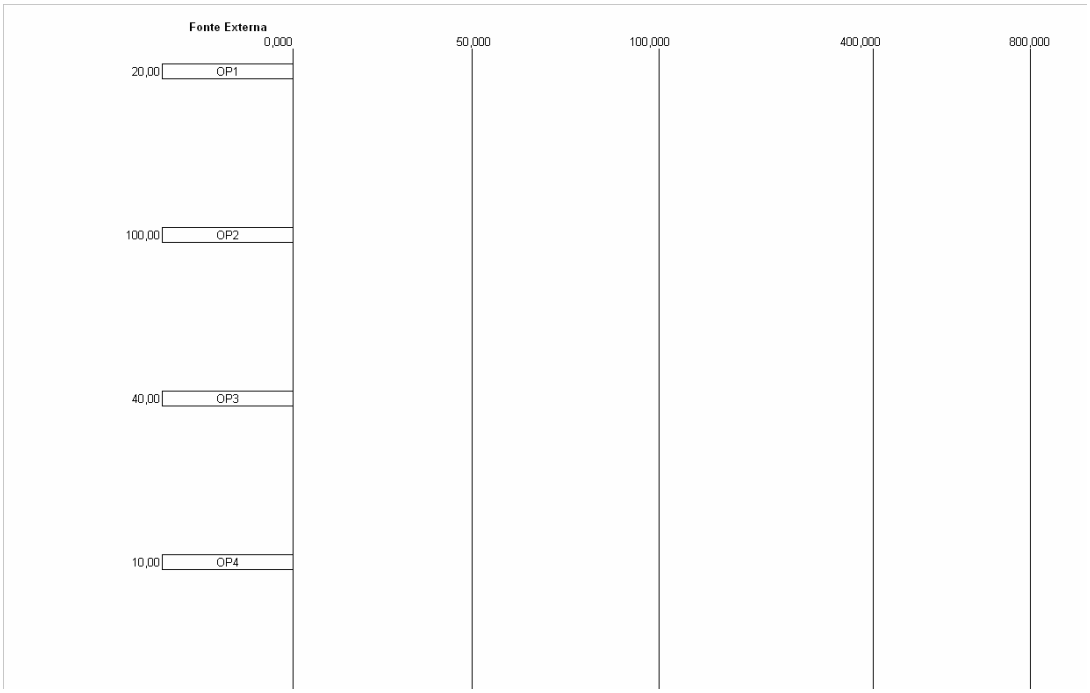


Figura A.9 – Estrutura inicial do DFA gerado pelo MINEA a partir da linha base de concentrações

Clicando-se novamente em “Calcular”, tem-se a estrutura final do DFA gerado pelo MINEA, conforme a Figura A.10.

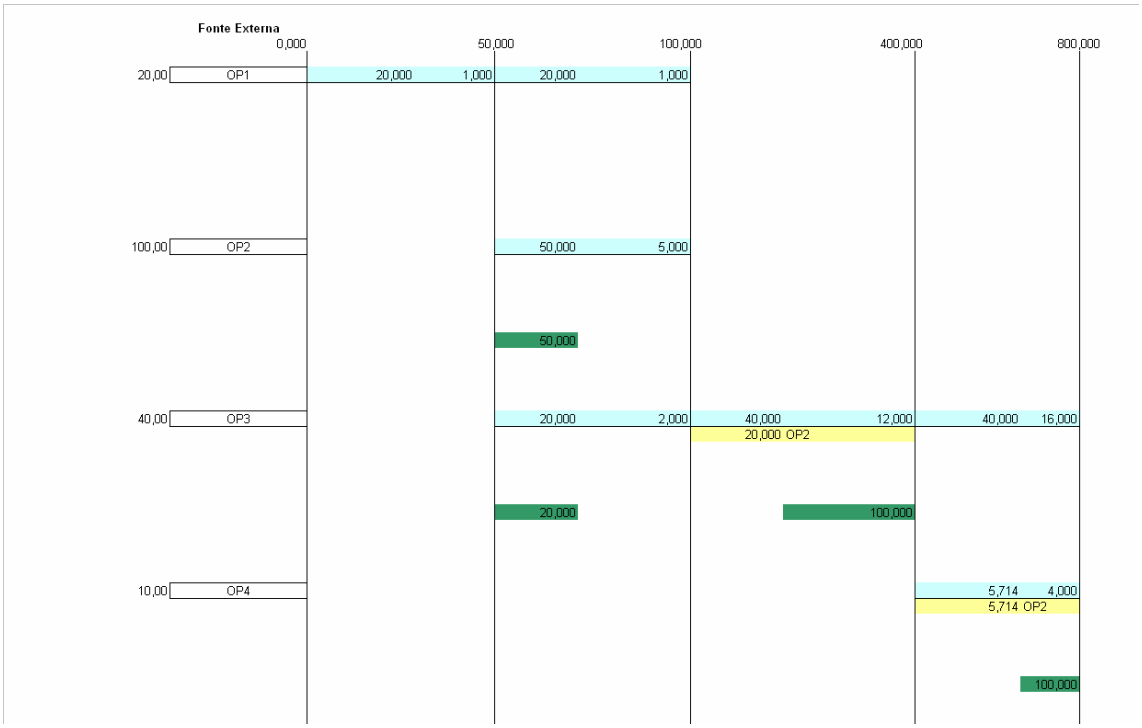


Figura A.10 – DFA gerado pelo MINEA para o problema exemplo

Após a geração do DFA, devem ser verificadas as oportunidades ocasionalmente levantadas: as operações 1 e 2 utilizam apenas água da fonte a 0 ppm, com vazão de 20 t/h e 50 t/h, respectivamente. A operação 3 utiliza 20 t/h da fonte a 0 ppm e 20 t/h provenientes da operação 2, na concentração de 100 ppm; já a operação 4 utiliza a parcela de 5,714 t/h da operação 2, na concentração de 100 ppm.

Por fim, o usuário pode salvar o DFA em uma planilha exclusiva, clicando-se na opção “Gerar Saída”, como mostra a Figura A.11.

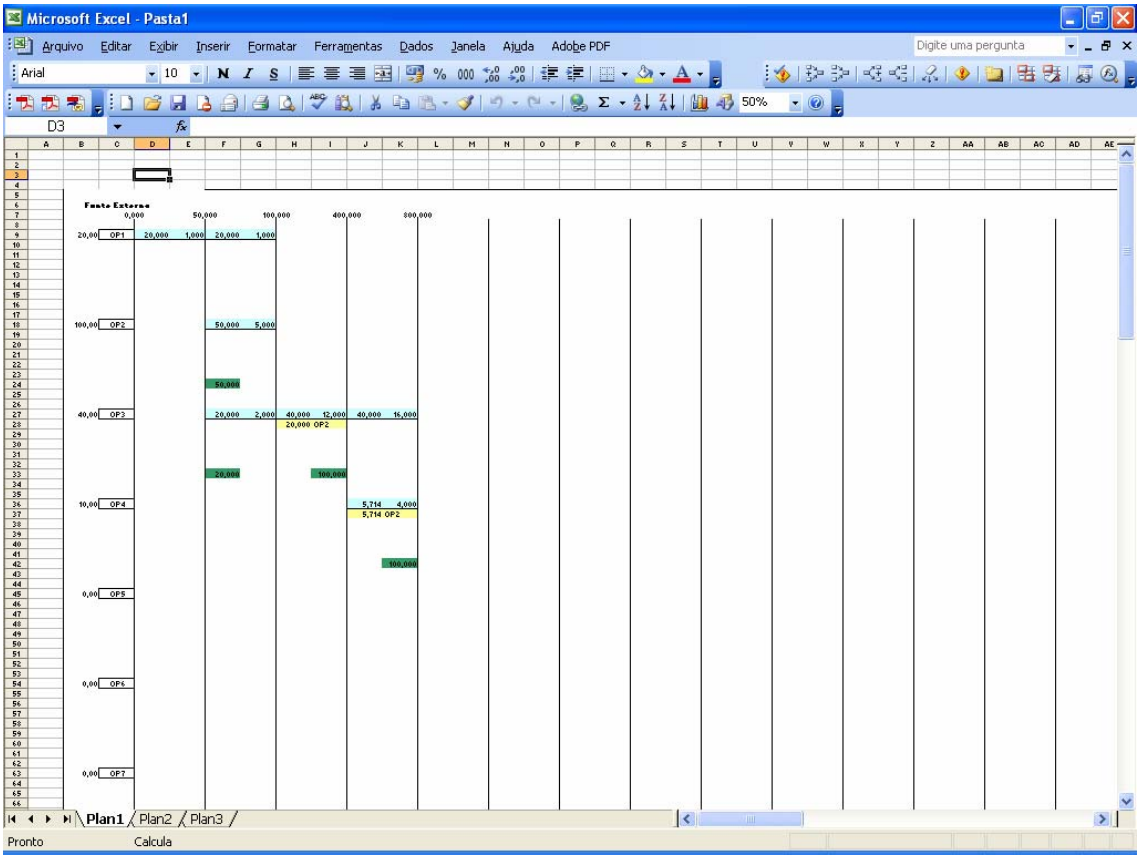


Figura A.11 – Planilha do DFA a ser gravada como arquivo exclusivo

Proibição de reúsos no MINEA

Na prática, é possível que o método indique correntes que não sejam convenientes para reúso entre operações. Nestes casos, o programa tem a opção de proibir que determinadas correntes sejam passíveis de reúso; como exemplo, utiliza-se a planilha “Proibição” do MINEA (realçada na Figura A.12) para desconsiderar a possibilidade de reúso da operação 2 para a operação 3, indicando “Não” na planilha de origem e destino das operações, conforme mostra a Figura A.13.

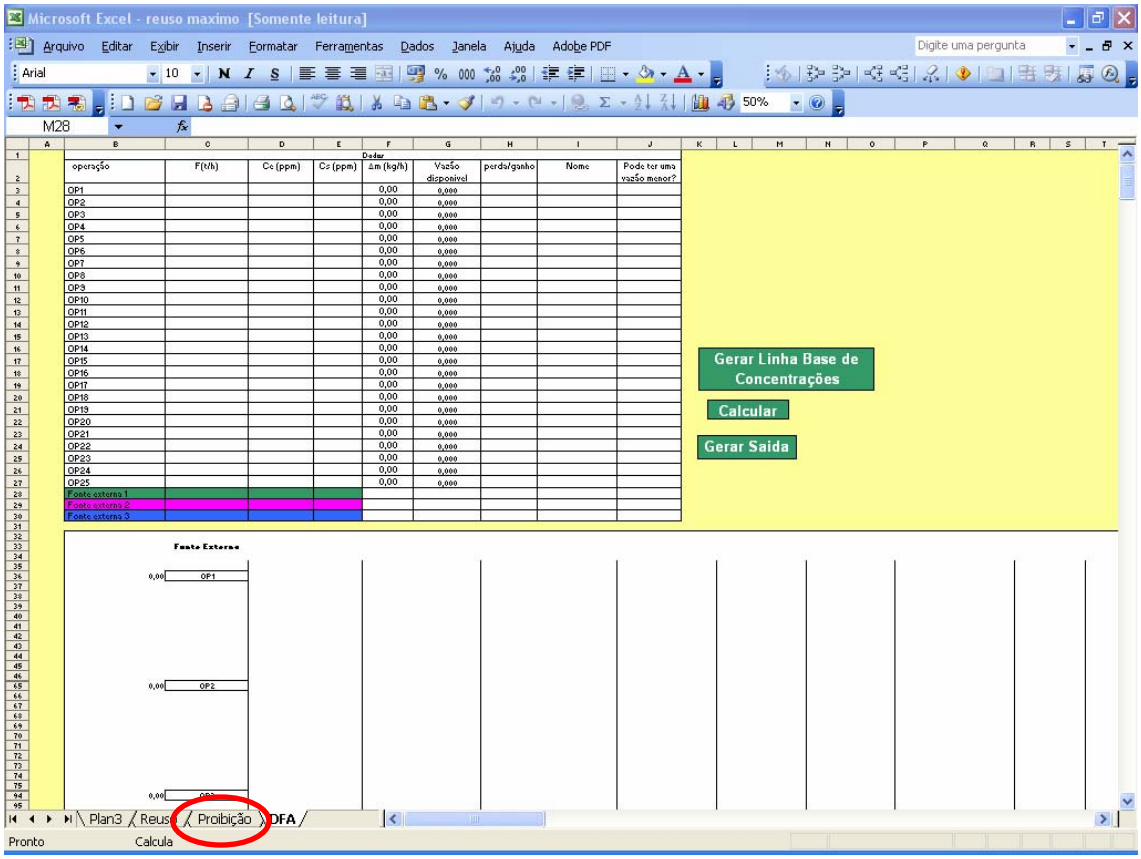


Figura A.12 – Localização da planilha Proibição no MINEA

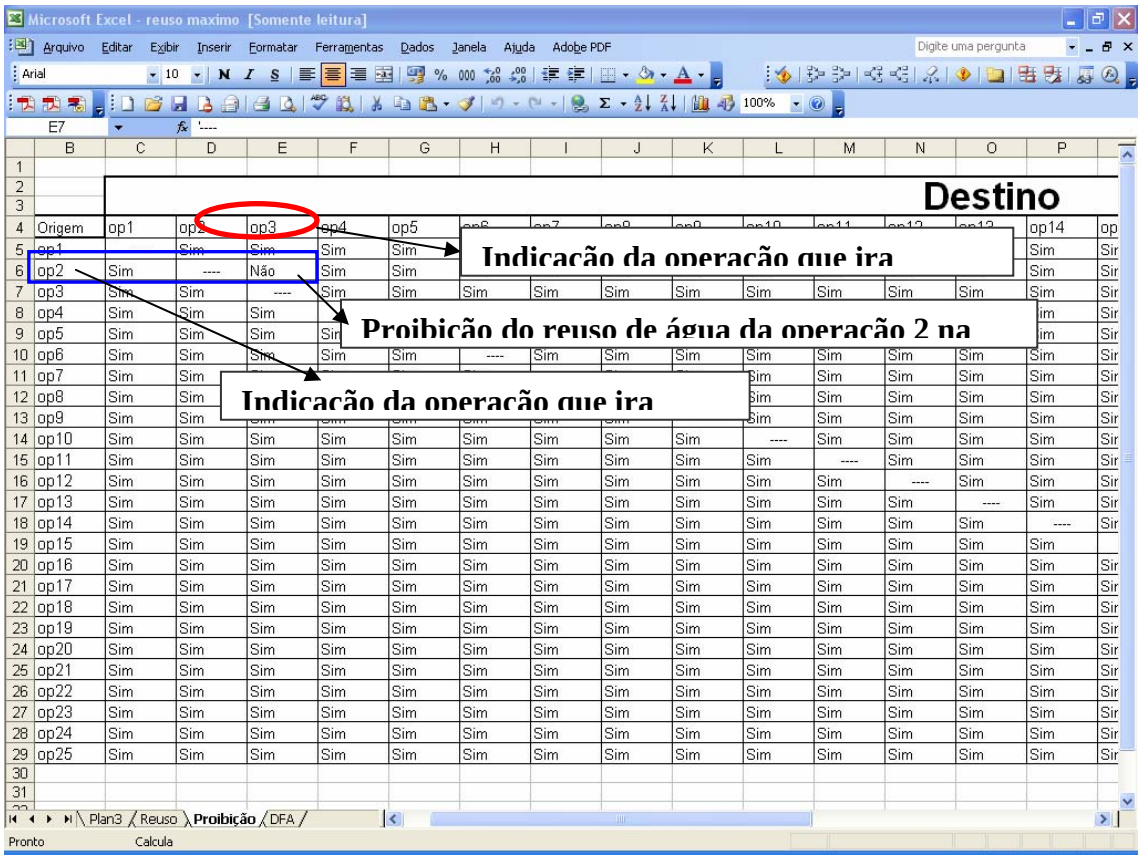


Figura A.13 – Proibição de reúso da operação 2 na operação 3

Após estabelecer a proibição do reúso de água da operação 2 na operação 3, deve-se clicar novamente em “Calcular” para a geração atualizada do DFA (Figura A.14).

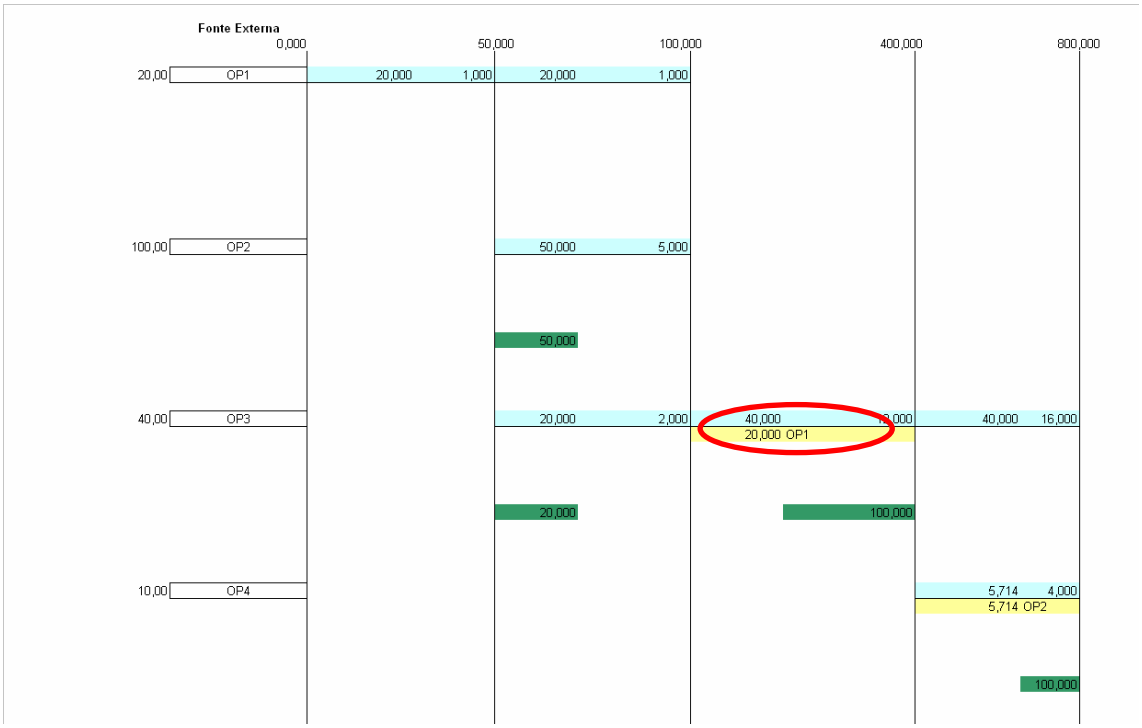


Figura A.14 – DFA gerado após a proibição de reúso de água da operação 2 na operação 3

Com a nova estrutura do DFA, as operações 1 e 2 continuam utilizando água a 0 ppm na vazão de 20 t/h e 50 t/h, respectivamente; porém, a operação 3 utiliza 20 t/h de água a 0 ppm e 20 t/h da operação 1, a 100 ppm; a operação 4 mantém o consumo de 5,714 t/h da operação 2, na concentração de 100 ppm.

Múltiplas Fontes no MINEA

Considerando a possibilidade de inclusão de mais uma fonte externa, a 25 ppm, por exemplo, o usuário deverá então indicar as fontes externas 1 e 2, ou seja, a 25 ppm e 0 ppm, respectivamente. O programa convenciona a prioridade de inclusão das fontes partindo daquela de maior concentração (Fonte externa 1) para a de menor concentração (Fonte Externa 3) (Figura A.15).

Dados								
operação	F(t/h)	Ce (ppm)	Cs (ppm)	Δm (kg/h)	Vazão disponivel	perda/ganho	Nome	Pode ter uma vazão menor?
OP1	20,00	0,00	100,00	2000,00	20,000	0	OP1	Sim
OP2	100,00	50,00	100,00	5000,00	66,667	0	OP2	Sim
OP3	40,00	50,00	800,00	30000,00	40,000	0	OP3	Sim
OP4	10,00	400,00	800,00	4000,00	5,714	0	OP4	Sim
OP5				0,00	0,000			
OP6				0,00	0,000			
OP7				0,00	0,000			
OP8				0,00	0,000			
OP9				0,00	0,000			
OP10				0,00	0,000			
OP11				0,00	0,000			
OP12				0,00	0,000			
OP13				0,00	0,000			
OP14				0,00	0,000			
OP15				0,00	0,000			
OP16				0,00	0,000			
OP17				0,00	0,000			
OP18				0,00	0,000			
OP19				0,00	0,000			
OP20				0,00	0,000			
OP21				0,00	0,000			
OP22				0,00	0,000			
OP23				0,00	0,000			
OP24				0,00	0,000			
OP25				0,00	0,000			
Fonte externa 1		25,00						
Fonte externa 2		0,00						
Fonte externa 3								

Figura A.15 – Tabela de dados do programa considerando mais de uma fonte externa de água

Após indicar a concentração da segunda fonte externa, deve-se clicar em “Gerar Linha Base de Concentração”, seguida de “Calcular”, para que o programa gere uma nova estrutura do DFA (Figura A.16).

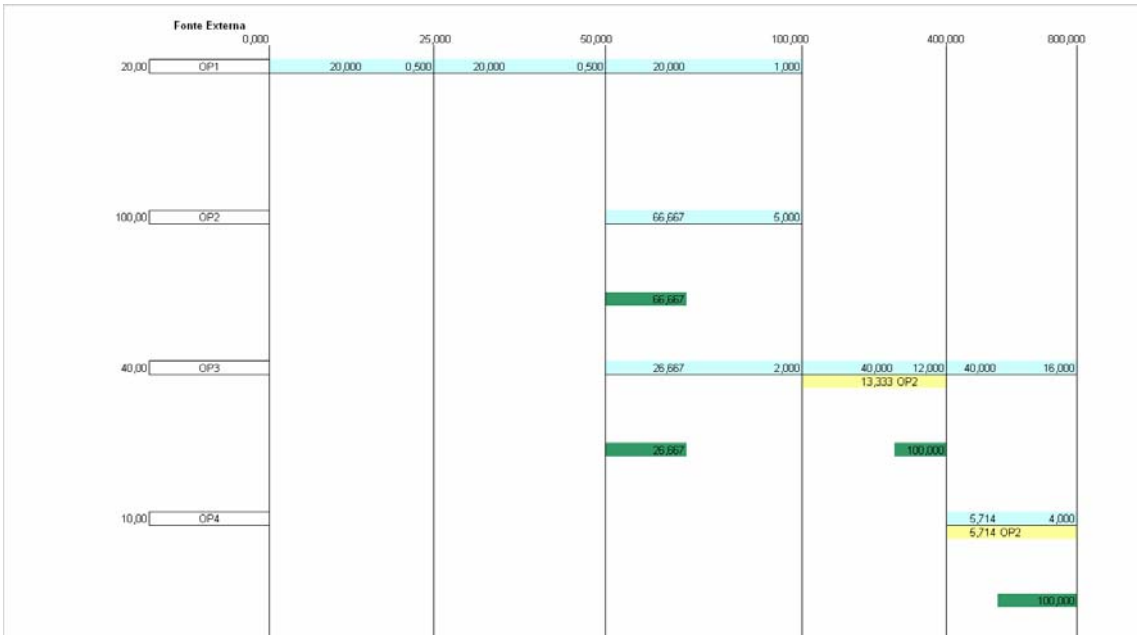


Figura F.16 – DFA gerado para múltiplas fontes de água

O DFA da Figura A.16 utiliza 20 t/h de água a 0 ppm na operação 1; porém, 66,667 t/h da fonte a 25 ppm são destinados na operação 2. A operação 3 consome a combinação de 26,667 t/h de água a 25 ppm e 20 t/h a 100 ppm da operação 2. A operação 4 utiliza 5,714 t/h da operação 2, na concentração de 100 ppm.

Regeneração no MINEA

A qualidade de água regenerada disponível pode ser indicada no MINEA pelo valor de concentração de entrada no campo "C_e", e a concentração de saída no campo "C_s", clicando-se em seguida em "Calcular". Supondo que, no exemplo considerado, o regenerador receba água a 800 ppm e regenere a 5 ppm, tem-se a tabela de entrada de dados da Figura A.17 (após clicar em "Calcular").

Dados								
operação	F(t/h)	Ce (ppm)	Cs (ppm)	Δm (kg/h)	Vazão disponível	perda/ganho	Nome	Pode ter uma vazão menor?
OP1	20,00	0,00	100,00	2000,00	20,000	0	OP1	Sim
OP2	100,00	50,00	100,00	5000,00	52,632	0	OP2	Sim
OP3	40,00	50,00	800,00	30000,00	40,000	0	OP3	Sim
OP4	10,00	400,00	800,00	4000,00	5,714	0	OP4	Sim
OP5	100,00	800,00	5,00	Regenerador	100,000			
OP6				0,00	0,000			
OP7				0,00	0,000			
OP8				0,00	0,000			
OP9				0,00	0,000			
OP10				0,00	0,000			
OP11				0,00	0,000			
OP12				0,00	0,000			
OP13				0,00	0,000			
OP14				0,00	0,000			
OP15				0,00	0,000			
OP16				0,00	0,000			
OP17				0,00	0,000			
OP18				0,00	0,000			
OP19				0,00	0,000			
OP20				0,00	0,000			
OP21				0,00	0,000			
OP22				0,00	0,000			
OP23				0,00	0,000			
OP24				0,00	0,000			
OP25				0,00	0,000			
Fonte externa 1		0,00						
Fonte externa 2								
Fonte externa 3								

Figura A.17 – Tabela de dados considerando regeneração (OP 5)

No lugar do campo reservado ao valor de Δm surge a palavra "Regenerador", caracterizando sua condição atual, na operação 5. Após clicar em "Gerar Linha Base de Concentração" e "Calcular", tem-se a nova estrutura do DFA, conforme a Figura A.18.

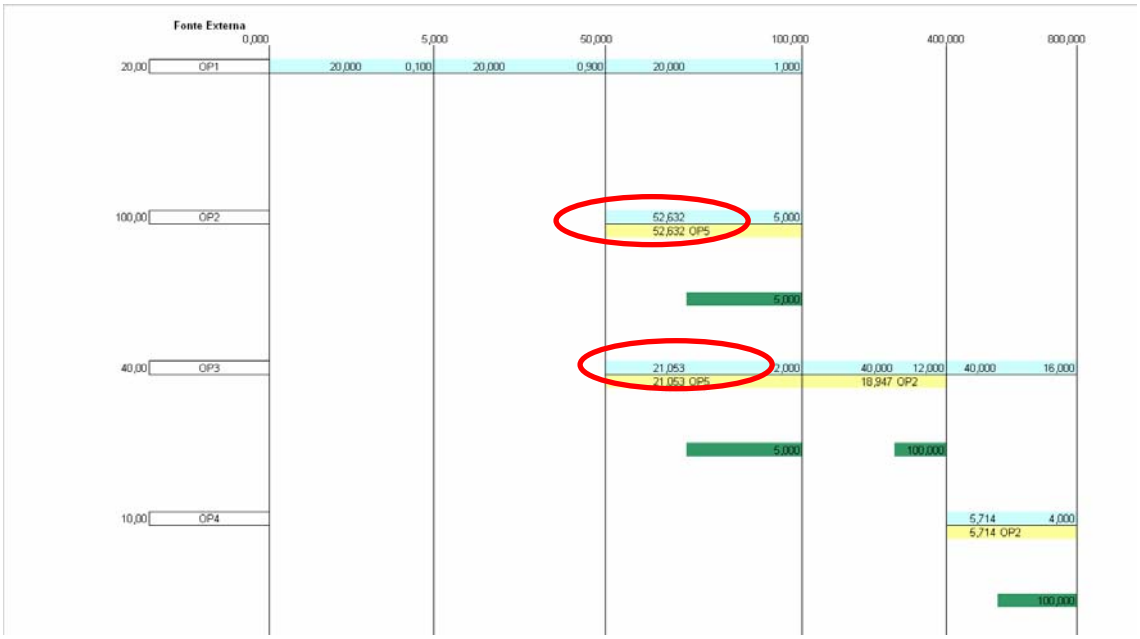


Figura A.18 – DFA considerando regeneração

De acordo com o diagrama, a operação 1 utiliza somente água a 0 ppm, na vazão de 20 t/h, enquanto a operação 2 consome 52,632 t/h de água regenerada (operação 5) a 5 ppm. A operação 3 consome 21,053 t/h de água regenerada (5 ppm) e 18,497 t/h a 100 ppm da operação 2; e a operação 4 mantém o consumo de 5,714 t/h da operação 2, na concentração de 100 ppm.

Perda de vazão no MINEA

A consideração relativa à perda ou a ganho de vazão também é possível no MINEA. Basta indicar o respectivo valor de vazão no campo destinado ao preenchimento da coluna “perda/ganho”, para a devida operação. Por convenção, valores positivos indicam perda e valores negativos de vazão referem-se ao ganho (Figura A.19).

No exemplo, pode-se considerar perda de 40 t/h na operação 2, inserindo o respectivo valor na célula “perda/ganho” para esta operação, e em seguida clicar em “Gerar Linha Base de Concentração” e “Calcular”, de forma a gerar uma nova estrutura do DFA (Figura A.20).

Dados								
operação	F(t/h)	Ce (ppm)	Cs (ppm)	Δm (kg/h)	Vazão disponivel	perda/ganho	Nome	Pode ter uma vazão menor?
OP1	20,00	0,00	100,00	2000,00	0,000	0		Sim
OP2	100,00	50,00	100,00	5000,00	0,000	40		Sim
OP3	40,00	50,00	800,00	30000,00	0,000	0		Sim
OP4	10,00	400,00	800,00	4000,00	0,000	0		Sim
OP5				0,00	0,000			
OP6				0,00	0,000			
OP7				0,00	0,000			
OP8				0,00	0,000			
OP9				0,00	0,000			
OP10				0,00	0,000			
OP11				0,00	0,000			
OP12				0,00	0,000			
OP13				0,00	0,000			
OP14				0,00	0,000			
OP15				0,00	0,000			
OP16				0,00	0,000			
OP17				0,00	0,000			
OP18				0,00	0,000			
OP19				0,00	0,000			
OP20				0,00	0,000			
OP21				0,00	0,000			
OP22				0,00	0,000			
OP23				0,00	0,000			
OP24				0,00	0,000			
OP25				0,00	0,000			
Fonte externa 1		0,00						
Fonte externa 2								
Fonte externa 3								

Figura A.19 – Tabela de dados considerando perda de vazão

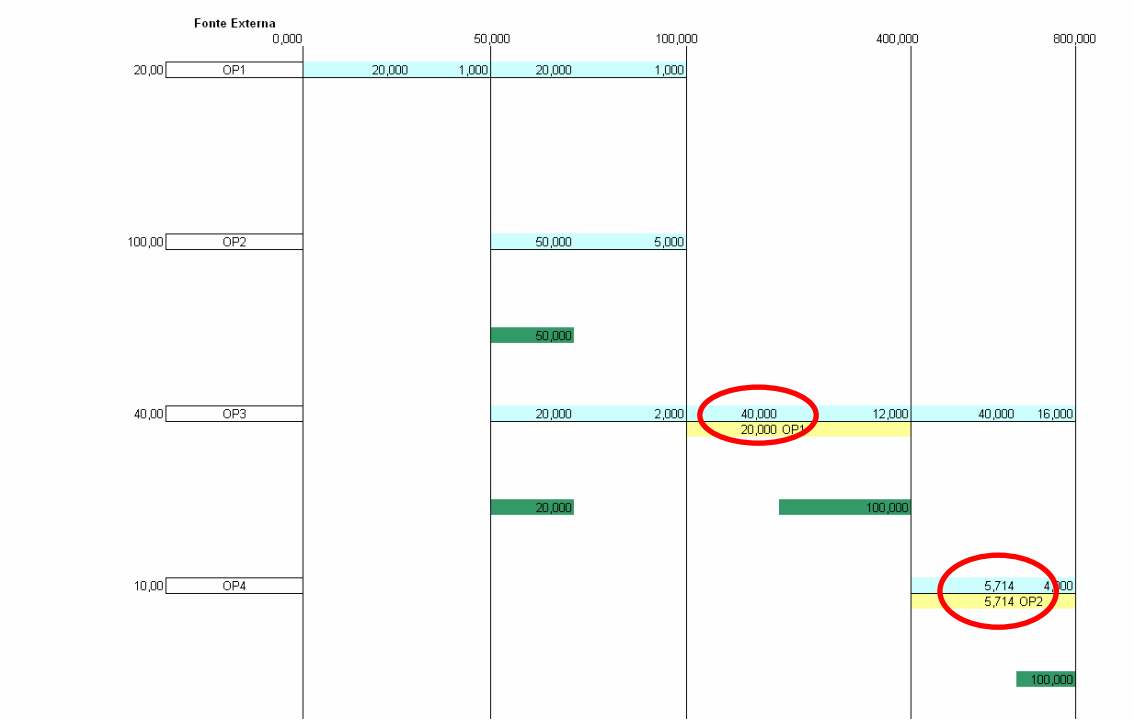


Figura A.20 – Estrutura do DFA considerando perda de vazão

O diagrama da Figura A.20 estabelece o consumo de 20 t/h e 50 t/h de água a 0 ppm para as operações 1 e 2, respectivamente; para a operação 3, são destinados 20 t/h a 0 ppm e 20 t/h a 100 ppm provenientes da operação 1; e a operação 4 mantém 5,714 t/h a 100 ppm da operação 2.

Restrição de vazão no MINEA

Se houver a necessidade de se manter o valor de vazão em determinada operação (vazão fixa no seu valor limite F (t/h)), basta digitar a palavra “Não” na célula correspondente ao campo “Pode ter uma vazão menor?”, conforme mostra a Figura A.21. Assim, o programa completa a vazão da operação utilizando uma fonte externa conveniente. Considerando o exemplo apresentado, pode-se indicar que a operação 4 necessite de vazão fixa (10 t/h), levando ao DFA da Figura A.22.

Dados								
operação	F(t/h)	Ce (ppm)	Cs (ppm)	Δm (kg/h)	Vazão disponivel	perda/ganho	Nome	Pode ter uma vazão menor?
OP1	20,00	0,00	100,00	2000,00	20,000	0		Sim
OP2	100,00	50,00	100,00	5000,00	10,000	0		Sim
OP3	40,00	50,00	800,00	30000,00	40,000	0		Sim
OP4	10,00	400,00	800,00	4000,00	5,714	0		Não
OP5				0,00	0,000			
OP6				0,00	0,000			
OP7				0,00	0,000			
OP8				0,00	0,000			
OP9				0,00	0,000			
OP10				0,00	0,000			
OP11				0,00	0,000			
OP12				0,00	0,000			
OP13				0,00	0,000			
OP14				0,00	0,000			
OP15				0,00	0,000			
OP16				0,00	0,000			
OP17				0,00	0,000			
OP18				0,00	0,000			
OP19				0,00	0,000			
OP20				0,00	0,000			
OP21				0,00	0,000			
OP22				0,00	0,000			
OP23				0,00	0,000			
OP24				0,00	0,000			
OP25				0,00	0,000			
Fonte externa 1		0,00						
Fonte externa 2								
Fonte externa 3								

Figura A.21 – Tabela de dados considerando restrição de vazão

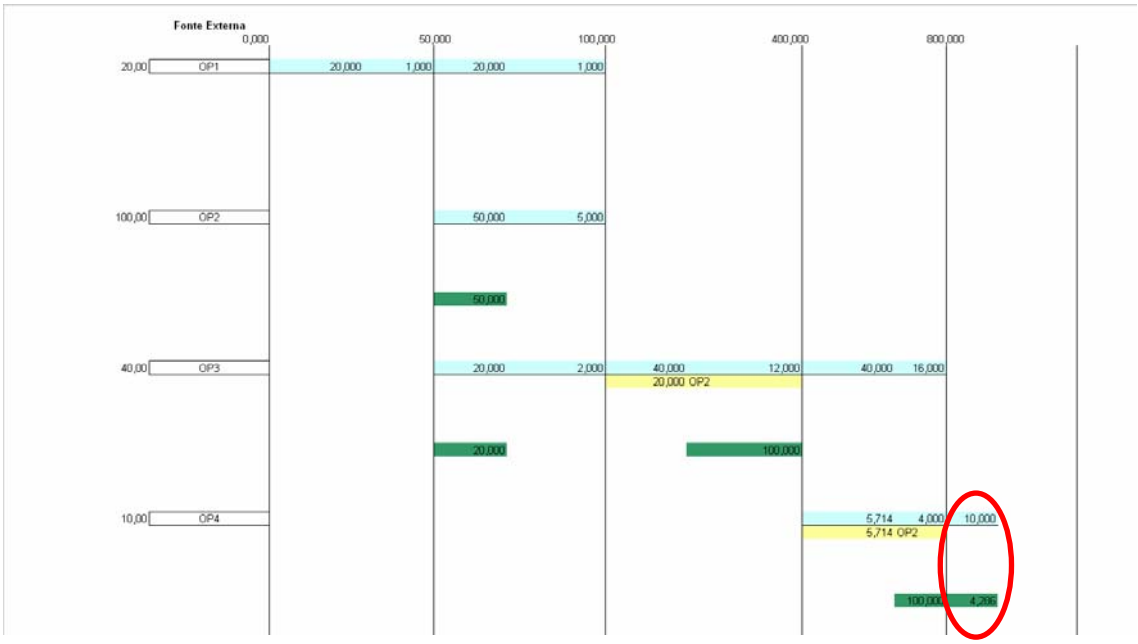


Figura A.22 – DFA do exemplo com restrição de vazão

No DFA gerado, as operações 1 e 2 utilizam somente água a 0 ppm, nas vazões de 20 t/h e 50 t/h, respectivamente. A operação 3 consome 20 t/h a 0 ppm, e 20 t/h a 100 ppm, da operação 2. A operação 4 mantém o consumo de 5,714 t/h a 100 ppm da operação 2, porém a vazão é completada a 10 t/h utilizando 4,286 t/h da fonte a 0 ppm.

Análise da possibilidade de deslocamento de concentrações – Múltiplos componentes

Para problemas envolvendo a consideração de transferência simultânea de componentes (análise de múltiplos componentes), o programa MINEA dispõe a planilha denominada “Deslocamentos”, na qual verifica a possibilidade de deslocamento de concentrações a partir dos seus valores de entrada e saída em cada operação. A Figura A.23 apresenta a tela inicial da planilha; com isso, após a geração do DFA, tem-se a concentração dos componentes igual ou inferior ao máximo estabelecido pelos dados do problema.

Como dados de entrada, o usuário deve identificar as operações e as respectivas vazões, e incluir as concentrações de entrada e saída de cada operação, sendo necessário definir a operação de referência, bem como o componente de referência.

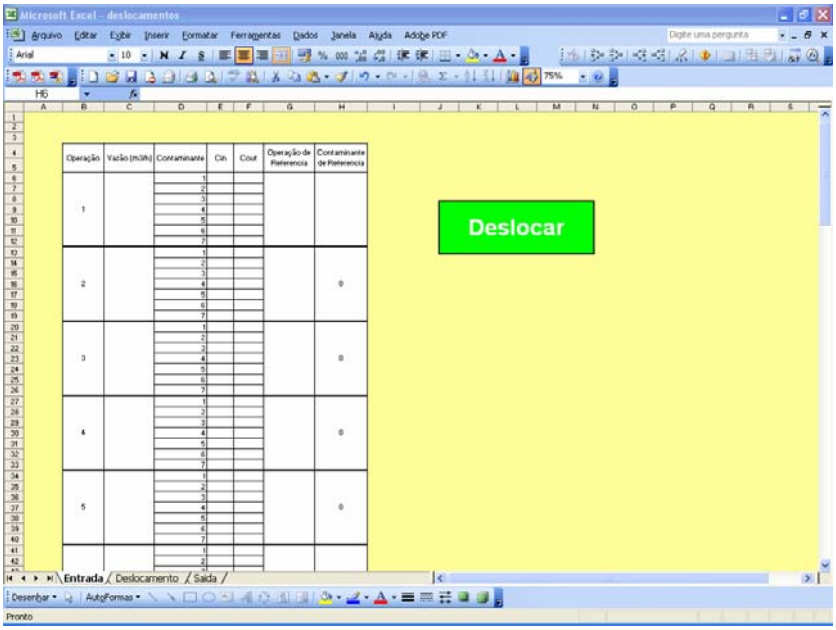


Figura A.23 – Tela inicial da planilha de deslocamentos

Para demonstrar a aplicação do programa quanto à análise de múltiplos componentes, utilizam-se os dados do problema de Wang e Smith (1994a), de acordo com a Tabela A.2.

Tabela A.2 – Dados do problema para 3 operações e 3 componentes

Operação	Componente	C_e (ppm)	C_s (ppm)	Vazão (t/h)
1	1	0	15	45
	2	0	400	
	3	0	35	
2	1	20	120	34
	2	300	12500	
	3	45	180	
3	1	120	220	56
	2	20	45	
	3	200	9500	

A Figura A.24 ilustra a tabela de dados de entrada preenchida no programa MINEA. Foi definido o componente 1 e a operação 1 como referências, tais condições são colocadas em seus respectivos campos. Após o preenchimento da tabela no MINEA, o usuário deve

então clicar em “Deslocar”, e automaticamente o programa realiza os cálculos e exibe uma planilha contendo as concentrações de entrada e saída das respectivas operações, ocasionalmente atualizadas pela análise de concentrações máximas (Figura A.25).

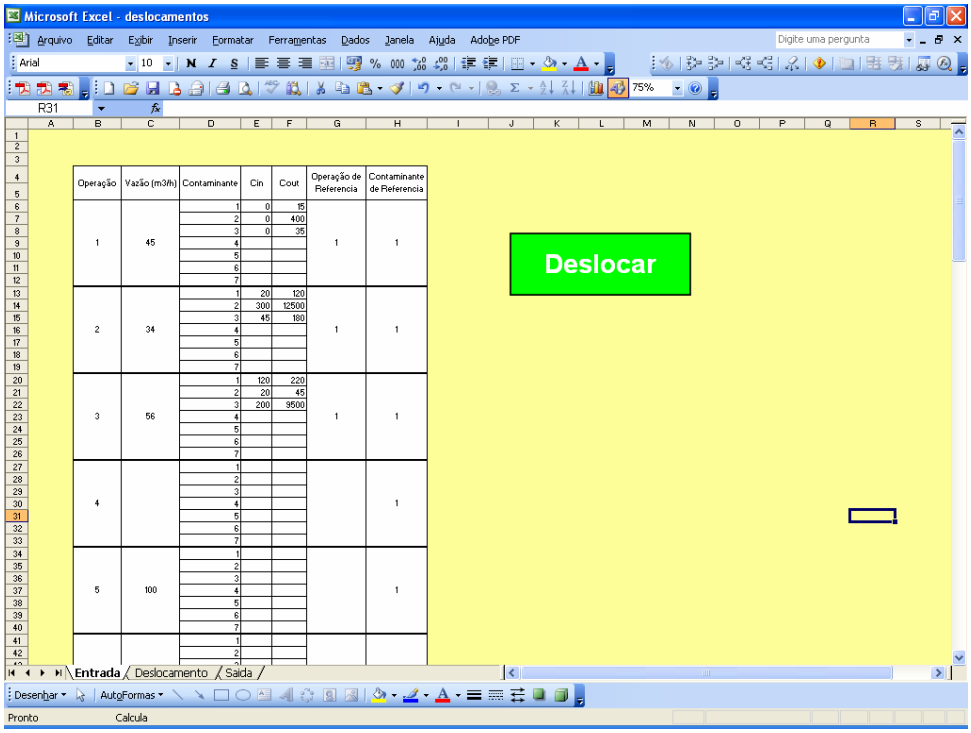


Figura A.24 – Tabela de dados preenchida para o exemplo de múltiplos componentes

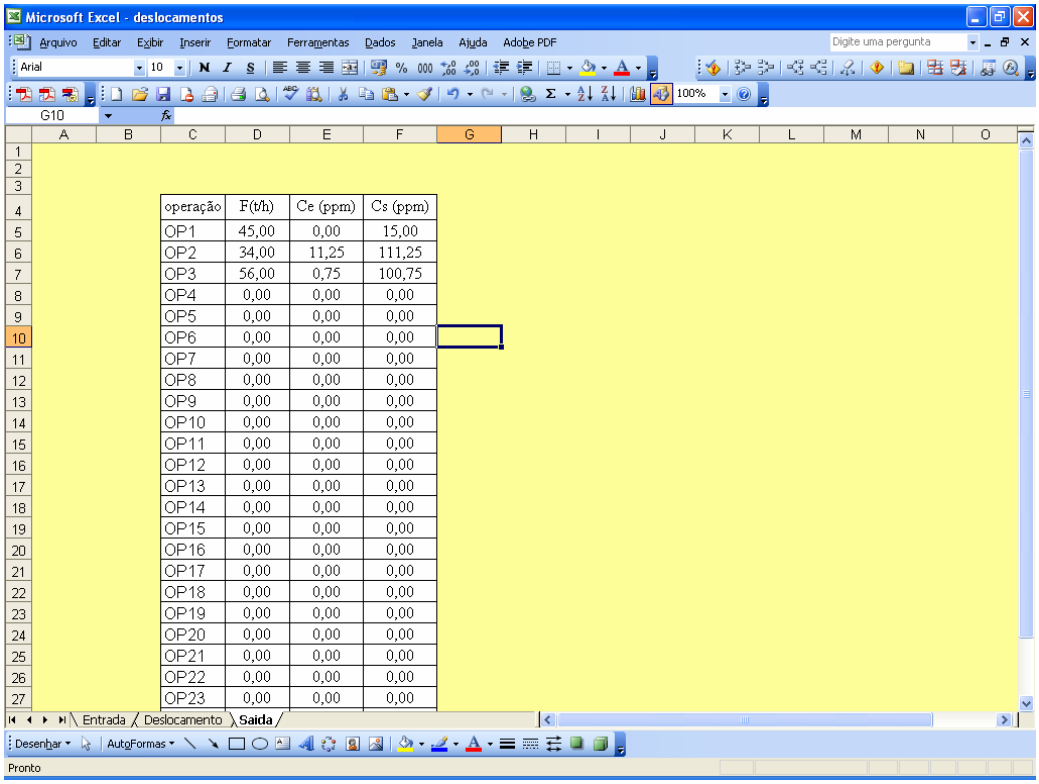


Figura A.25 – Valores de concentração deslocados

A partir deste resultado, o usuário deve então transferir manualmente os valores de concentração da planilha para a tabela de dados do MINEA, e proceder normalmente às etapas para a geração do DFA.

APÊNDICE 2

Análise Econômica de Processos

(Abordagem Teórica)

A avaliação de investimento de um projeto industrial tem como principal característica a estimativa de custo de equipamentos individuais. Uma estimativa propriamente dita corresponde a uma rápida análise efetuada dentro de um universo de menor precisão de dados, conduzido nos estágios iniciais de tomada de decisão de investimento de um projeto; e tal coordenada permite prejulgá-lo quanto à sua aceitação ou rejeição.

O investimento total requerido por um empreendimento pode ser dividido em investimento ou capital fixo (imobilizações técnicas e financeiras) e capital de giro (MILFONT JR., 1999). As imobilizações técnicas correspondem ao capital diretamente ligado à execução do projeto, à aquisição de equipamentos e materiais, entrega e instalação, engenharia e construção de instalações, testes pré-operacionais e de partida. Constitui o investimento fixo propriamente dito. Já as imobilizações financeiras compreendem juros, taxas e comissões decorrentes de financiamentos voltados para a implantação do projeto. Embora as imobilizações financeiras façam parte do investimento fixo, é comum a imobilização técnica receber tal denominação, mesmo porque representa a maior parcela monetária, e caracteriza tanto a planta industrial como a sua escala (MILFONT JR., 1999). O capital de giro corresponde à parcela de recursos necessários à cobertura de despesas (formação de estoques de matérias-primas, insumos e produtos, mão de obra, e despesas fixas) até a partida da fábrica, a partir da qual a própria receita gerada com a venda do produto é capaz de sustentar tais débitos durante a vida útil do empreendimento.

O investimento de capital fixo deve ser recuperado ao fim de um determinado período de vida útil do equipamento ou das instalações físicas; isto se faz necessário não apenas por questões de uso e deterioração do equipamento, mas também pela sua própria obsolescência tecnológica. Por meio da depreciação do ativo (somatório das contribuições de bens tangíveis do empreendimento) e da amortização de despesas incorridas (contribuição de bens intangíveis), pode-se criar um fundo de reserva que permite repor o componente do ativo ao final de sua vida útil, retornando integralmente o investimento direto ao caixa da empresa. Por essa razão, a depreciação não constitui um desembolso efetivo, mas uma provisão de caixa, além de um benefício fiscal proporcionado pela redução do imposto de renda (MILFONT JR., 1999; PERLINGEIRO, 2005, p. 78). O método mais simples utilizado para determinar a depreciação é do tipo linear (*straight-line*), onde a depreciação anual é obtida pela diferença entre o valor original de compra de um bem e o seu valor residual, ao fim da vida útil, cujo resultado é dividido pelo tempo de vida útil, em anos. Os limites da depreciação anual são estabelecidos por regulações tributárias governamentais. A depreciação anual do investimento de capital fixo é referida como custo fixo anualizado (EL-HALWAGI, 1997, p. 305). Desse modo, o custo de investimento anual pode ser determinado pelo custo de investimento (por exemplo, equipamentos de

regeneração, tubulações, misturadores, divisores de correntes) multiplicado pela depreciação (ou amortização) anual, representado por um fator de anualização (correspondente ao inverso do número de anos previstos como vida útil; por exemplo, 0,1 – taxa de depreciação de 10%), conforme a Equação B.1.

Custo de investimento anual = Custo de investimento *x* fator de anualização (B.1)

Há autores que dividem esta rubrica em investimento direto e indireto, destacando o investimento para a partida do investimento fixo (imobilizações técnicas) (PERLINGEIRO, 2005). O primeiro destina recursos ao material necessário à montagem de instalações, incluindo investimento em ISBL (*Inside Battery Limits*) e em OSBL (*Outside Battery Limits*). Já o investimento indireto é tratado como despesas com o projeto, com a construção (próprios) e eventuais, cujos valores são parcelas estimadas do investimento direto. O ISBL corresponde ao investimento na aquisição, no transporte e na instalação de equipamentos diretamente ligados ao processamento; equivale, portanto, ao somatório dos preços de compra dos equipamentos necessários, multiplicado por três fatores experimentais, os quais levam em conta o tipo de processamento (fator de *Lang*, – PETERS e TIMMERHAUS, 1991, *apud* PERLINGEIRO, 2005, p. 81-83), o fator de atualização de preços (índice de custos), e o fator local (transferência de região, do local de estimativa do custo para o local de instalação do equipamento, da planta ou do tipo de bem ou serviço). O OSBL, investimento do processo, porém fora da área de processamento, pode ser obtido como uma parcela estimada do ISBL (PERLINGEIRO, 2005, p. 83).

O investimento de capital total de um processo pode ser definido como a soma do investimento de capital fixo ao investimento de capital de giro (também denominado capital de trabalho – *working capital*), onde este último corresponde aos recursos de curto prazo destinados a cobrir custos operacionais necessários à partida da planta, incluindo provisões iniciais de matérias-primas, produtos intermediários, produtos finais e subprodutos em estoques, pagamento de salários, gastos operacionais iniciais, e contas a pagar e a receber. Tipicamente, o capital de trabalho é cerca de 15% do investimento de capital total (EL-HALWAGI, 1997, p. 306; SEIDER *et al*., 2003, p. 580).

Em uma estimativa preliminar, o custo de um equipamento pode ser obtido por meio de correlações da literatura, dada a relativa dificuldade de cotação junto a fabricantes e fornecedores quando o interesse demonstrado reside apenas em uma consulta aleatória. Publicações como a revista *Chemical Engineering* prestam enorme auxílio na atualização de custos, mediante a divulgação de índices relativos a plantas globais ou para setores industriais, equipamentos, outros bens e serviços. Tais índices medem processos

inflacionários, resultantes do desajuste entre oferta e demanda, e que provocam a evolução dos preços; seu emprego é uma forma de indexação (mecanismo de acompanhamento e correção por um índice de preços), e lida com a premissa conceitual básica das finanças segundo a qual o dinheiro tem valor no tempo. Dentre os mais utilizados na engenharia química, estão o *Chemical Engineering Plant Cost Index* (CE), o *Marshall and Swift Equipment Cost Index* (MS), o *Engineering News-Record Construction Cost Index* (ENR), divulgados mensalmente na revista *Chemical Engineering*, e o *Nelson-Farrar Refinery Construction Cost Index* (NR), publicado pelo periódico *Oil and Gas Journal*. Segundo El-Halwagi (1997, p. 304), não é recomendável utilizar índices quando o período de atualização excede a dez anos.

Normalmente em um projeto conceitual típico, os métodos de "estimativas" iniciais ("ordem de grandeza" e "estimativa preliminar"), cujos objetivos são fornecer subsídios para a tomada de decisão pelo estudo de viabilidade técnica-econômica de um empreendimento, possuem grau de precisão (ou a margem provável de erro) aceitável de ± 25 a 50% (MILFONT JR., 1999; EL-HALWAGI, 1997, p. 303; SEIDER *et al*., 2003, p. 497-505). A avaliação de investimento compreende estimativas e orçamentos, classificados segundo o grau crescente de precisão e detalhamento de informações requeridas, dada a evolução dos estágios de implantação do projeto.

As correlações de custos disponíveis na literatura frequentemente correspondem à base FOB (*free on board*), ou seja, "livre a bordo", condição na qual o custo de compra individual do equipamento não inclui o custo de entrega (frete) no *site* industrial. Assim, o comprador ainda precisa acrescentar os custos de entrega, instalação, isolamento, instrumentação, elétrica, tubulação, e construção civil e montagem (EL-HALWAGI, 1997, p. 305). E tais custos também integram o investimento de capital fixo. Os índices MS são os mais utilizados na estimativa do custo de compra do equipamento, já o CE inclui custos de trabalho e material para fabricação do equipamento.

O valor de um investimento em uma planta ou equipamento obedece a uma relação exponencial de economia de escala, ou seja, varia em uma razão menor que a variação da capacidade. Assim, pode-se relacionar o investimento e a capacidade conhecida e determinada para uma planta ou equipamento a outro que se deseja determinar, segundo a Equação B.2 (SEIDER *et al*., 2003, p. 486).

$$\frac{I_{c2}}{I_{c1}} = \left(\frac{c2}{c1} \right)^{k} \qquad \text{(B.2)}$$

onde I_{c1} e c1 são o investimento (ou custo) e a capacidade base 1, respectivamente; I_{c2} e c2 são o investimento e a capacidade da unidade 2 após *scaling up/down*, respectivamente; e k corresponde ao fator ou expoente de economia de escala.

Para k = 1, a economia de escala é nula, o que significa que o investimento varia na mesma proporção que a capacidade. Para k > 1, ocorre uma deseconomia de escala. No entanto, esta relação somente é assegurada dentro da faixa de valores definidos para a equação, de modo a não incorrer em desvios não previstos para o investimento. Os valores de k são tabulados para cada tipo de rubrica, e normalmente oscila em torno de 0,6, razão pela qual tornou o método conhecido como "regra dos seis décimos" (MILFONT JR., 1999; SEIDER *et al*., 2003, p. 486).

Os custos de capital do equipamento na data (ano) atual são nivelados em relação ao ano base do custo, aplicando o índice de custo selecionado; assim, a relação índice atual sobre índice base (obtido para o ano do custo original) é então multiplicada pelo valor de I_{c2_base}, conforme a Equação B.3.

$$I_{c2_atual} = I_{c2_base} \times \left(\frac{índice_atual}{índice_base} \right) \tag{B.3}$$

Além do investimento de capital fixo necessários à aquisição e instalação de equipamentos e processos, há também o custo operacional (custo de fabricação ou custo de produção), somatório de custos e despesas incorridos durante a operação da planta. É composto pelos custos de produção propriamente ditos, ligado à produção da planta industrial, e por despesas gerais e administrativas, bem como impostos sobre os produtos, e depreciação e amortização, os quais não representam propriamente um custo (MILFONT JR., 1999). Os custos de produção podem ser divididos em custos variáveis e custos fixos. Os primeiros são proprocionais à produção, e incluem matérias-primas, agentes de separação, utilidades (combustível, eletricidade, vapor, água, refrigerantes, ar, e outros), catalisadores, aditivos; podem ainda incluir a mão de obra direta da produção. Já os custos fixos não variam com o nível de produção, e compreendem mão de obra fixa e encargos, seguros, manutenção e suprimentos operacionais (MILFONT JR., 1999). O custo total anualizado de um processo corresponde à soma do custo fixo anualizado ao custo operacional anual (EL-HALWAGI, 1997, p. 306).

De acordo com Samanez (2009, p. 36), "o valor de um projeto depende de sua capacidade de gerar fluxos de caixa futuros, ou seja, do seu potencial de gerar renda econômica". Existem diversos métodos e critérios de avaliação de investimentos de capital para tomada de decisão em projetos. Dentre os principais métodos atuariais utilizados para

medir a rentabilidade e analisar a projeção do desempenho esperado de um ativo ou de alternativas de investimento, estão: (i) taxa média de retorno; (ii) *payback* simples; (iii) *payback* descontado; (iv) valor presente líquido (VPL); (v) taxa interna de retorno (TIR); (vi) índice de lucratividade líquida (ILL); (vii) ponto de equilíbrio (*break even*); índice custo-benefício; (viii) anuidade uniforme equivalente; (ix) custo anual equivalente; *venture profit* (ABREU-FILHO *et al*., 2007 p. 75-101; SAMANEZ, 2009, p. 36-82; SEIDER *et al*., 2003, p. 563; PERLINGEIRO, 2005, p. 77-90).

Em muitos problemas da engenharia econômica, os benefícios ou as receitas não podem ser quantificados monetariamente, ao contrário dos custos, pois se torna mais fácil determinar os fluxos de custos do que os de receitas. Neste caso, o critério decisório teria como base a determinação dos custos das alternativas e a posterior seleção daquelas que apresentarem os menores custos anualizados (SAMANEZ, 2009, p. 42). A rentabilidade do ativo, ou taxa de retorno do investimento (*rate of return on investment* - ROI), é um índice que utiliza o critério de demonstrar o potencial de geração de lucro líquido para cada $100 de investimento total do ativo, calculado pela Equação B.4 (EL-HALWAGI, 1997, p. 307).

$$ROI = \frac{Lucro_líquido_anual}{Investimento_capital_total} \times 100 \qquad \text{(B.4)}$$

O lucro líquido anual é dado pela diferença entre o lucro bruto anual e os tributos governamentais anuais. O lucro bruto anual é dado pela diferença entre as receitas (ou as economias) anuais e o custo operacional anual.

Quanto maior o valor da taxa de retorno do investimento, melhor e mais atrativo torna-se o processo. Com isso, pode-se utilizar um critério de liquidez para determinar o tempo de retorno do capital (*payback* ou *payout*), de modo que se julgue a rapidez com que o projeto recupera os investimentos de capital fixo a partir de sua geração de receitas líquidas; maior liquidez significa menor exposição ao risco, e consequentemente, menor possibilidade de perdas do negócio. A Equação B.5 define o método do *payback period* como uma relação entre o total de investimento fixo e o lucro anual gerado pelo projeto; quanto menor o seu valor, medido em anos, mais atrativa torna-se a alternativa de um projeto de investimento (EL-HALWAGI, 1997, p. 307).

$$Payback_period = \frac{Investimento_capital_fixo}{Lucro_líquido_anual + depreciação_anual} \qquad \text{(B.5)}$$

Ao se utilizar este método deve-se estabelecer um prazo máximo para a recuperação do investimento, a partir do qual condicionará a rejeição do projeto. Este método, também conhecido como *payback* simples, tem como desvantagem o fato de não levar em conta o valor do dinheiro no tempo, pois não prevê a distribuição dos fluxos de caixa dentro do tempo de retorno, assim como não considera os fluxos de caixa após o período de retorno, o que pode induzir o descarte de projetos com maior duração, porém com melhor rentabilidade (BORDEAUX-RÊGO *et al*., 2010, p. 43). O método possui utilidade quando se deseja avaliar as características de liquidez do projeto e a necessidade de dispor recursos em um menor período, sendo recomendado utilizá-lo somente como suporte complementar.

Para contornar parte da deficiência do método, há uma adaptação denominada *payback* descontado, no qual a introdução de uma taxa de desconto (ou de retorno), ou taxa mínima de atratividade, torna a consideração do valor do dinheiro no tempo. A taxa de desconto corresponde à taxa de custo de utilização do capital pela empresa (recursos próprios e/ou de terceiros) e normalmente está associada à taxa de juros do mercado financeiro. Este custo de capital da empresa (investidores) é estimado pelo chamado custo médio ponderado de capital (CMPC, ou WACC – *weighted average cost of capital*), e corresponde à média ponderada dos custos das fontes de capital, tendo como pesos as participações percentuais que compõem a estrutura de investimentos (próprios e terceiros) (ABREU FILHO *et al*., 2007, p. 46). Haverá então uma taxa de rentabilidade dada pelo projeto que condicionará sua aceitação somente se ela for superior à taxa de custo do capital (taxa mínima de atratividade – ou taxa máxima de juros que se aceita pagar pelos recursos obtidos). Em outras palavras, haverá uma taxa mínima de atratividade para que haja interesse econômico pelo projeto. O método *payback* descontado desconta as entradas e saídas de caixa a uma taxa de rentabilidade, trazendo a valor presente, na data zero (BORDEAUX-RÊGO *et al*., 2010, p. 43). Assim, deseja-se descobrir em quanto tempo o valor presente dos fluxos de caixa serão igualados ao investimento inicial.

O método do valor presente líquido (VPL, ou valor atual líquido, ou fluxo de caixa descontado) é uma técnica de orçamento de capital semelhante ao *payback* descontado, e mede o valor presente dos fluxos de caixa gerados pelo projeto, tendo como base a taxa mínima de atratividade. O processo de atualização transforma os fluxos de caixa futuros em valores presentes, uma vez que não se deve somar ou comparar fluxos em datas diferentes sem que haja conversão pela taxa de juros (SAMANEZ, 2009, p. 37). A diferença entre o *payback* descontado e o VPL é que este leva em conta todos os fluxos de caixa, e não apenas o período de tempo no qual o saldo acumulado se torna positivo. Com isso, ele fornece informações sobre a riqueza adicionada (VPL positivo) ou destruída (VPL negativo) (BORDEAUX-RÊGO *et al*., 2010, p. 47). A Equação B.6 define o VPL.

$$VPL = -I + \sum_{t=1}^{N} \frac{FC_t}{(1+r)^t} + \frac{VR}{(1+r)^n} \quad \text{(B.6)}$$

onde: I é o investimento inicial; FCt é o fluxo de caixa líquido na data “t”; r é o custo de capital definido pela empresa; e VR é o valor residual do projeto ao final do enésimo período). Se o VPL for maior que zero, então o projeto deve ser aceito; se for igual a zero, torna-se indiferente essa decisão; e caso seja menor que zero, então o projeto deve ser rejeitado.

O método *payback* mede a riqueza a ser gerada, enquanto que o VPL mede o lucro em termos absolutos, sendo o critério mais utilizado em análise de investimentos, embora não existam critérios melhores do que outros, pois cada um mede aspectos diferentes de um projeto (ABREU FILHO *et al*., 2007, p. 82).

Outro critério bastante utilizado na comparação de alternativas de investimentos é a taxa interna de retorno (TIR, ou IRR – *internal rate of return*). Por definição, é o valor da taxa de juros que corresponde ao valor nulo de VPL; isto significa que o valor presente da receita gerada pelo fluxo de caixa é igual ao investimento inicial. Embora não tenha como finalidade a avaliação da rentabilidade absoluta a um dado custo de capital, como o VPL, ela procura obter uma taxa de retorno do investimento. Essa taxa é então comparada com a TMA do projeto, sendo considerado economicamente atraente se o valor da taxa de retorno for igual ou superior a TMA (TIR ≥ TMA). A Figura B.1 ilustra a relação entre o VPL e a TIR (ponto onde o VPL é nulo). Se o investimento possui VPL positivo, então o retorno é maior que a taxa mínima de atratividade exigida na aplicação (correspondente ao custo de capital – CMPC). Se esta taxa mínima de retorno (TMA), ou taxa do mercado financeiro, for inferior ao valor da TIR, então o projeto indica retorno econômico atrativo; caso contrário, quando o valor do CMPC é maior que a TIR, em outras palavras, quando o retorno do investimento é menor que a TMA, o projeto deve ser rejeitado, pois se torna inviável economicamente. Já quando o VPL for zero, significa que o projeto tem o mesmo rendimento da TMA e, nestas condições, é indiferente aceitá-lo ou rejeitá-lo por este critério de seleção.

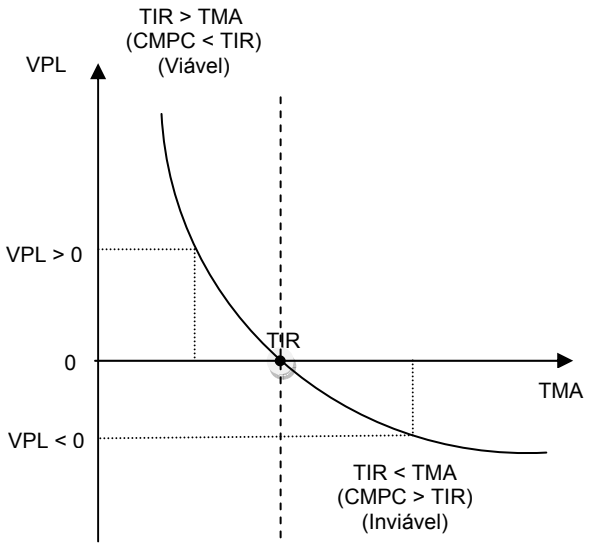


Figura B.1 – VPL em função da TIR

O VPL é bastante recomendado na tomada de decisão e seleção entre alternativas de investimento. A TMA é considerada como o custo das fontes de financiamento, onde a TIR é o maior custo de oportunidade para o projeto, o qual representa o retorno perdido pelo investimento se os recursos fossem aplicados em alternativas de risco semelhante. A TMA pode ser determinada pelo chamado modelo de precificação de ativos financeiros (CAPM – *capital asset pricing model*) – custo de capital dos acionistas –, desenvolvido por William Sharpe e John Lintner (ABREU FILHO *et al*., 2007, p. 37) como uma forma de explicar o comportamento dos preços dos ativos e para avaliação do impacto do risco sobre o retorno de um ativo. Uma de suas utilidades é que permite estimar a taxa esperada de retorno exigida nas decisões de investimento, ou seja, a taxa mínima de atratividade para o capital próprio (acionistas ou proprietários da empresa), de modo a compensar o investidor pelos riscos atribuídos ao ativo. Por outro lado, o CMPC também pode ser utilizado como a TMA para um projeto que apresente em sua estrutura capitais próprios e de terceiros (bancos). No entanto, há divergências quanto à forma de se obter essa taxa ou ainda quanto ao uso de uma adequada TMA para o risco do investimento (ABREU FILHO *et al*., 2007, p. 42).

Para uma análise realista, os critérios de seleção de projetos devem incluir não somente a taxa de juros do mercado financeiro como também o contexto inflacionário. Na economia brasileira, existem diversos índices no mercado voltados para medir a alta generalizada e contínua do nível de preços (inflação). Dentre eles, os mais utilizados são o IPCA (Índice de Preços ao Consumidor Amplo) e o IGP-M (Índice Geral de Preços ao

Mercado). O IPCA é divulgado pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) desde 1980, e sua apuração abrange famílias com rendimento mensal de 1 a 40 salários mínimos. É utilizado na política de metas da inflação no país. Já o IGP-M, é calculado desde 1989 pela FGV (Fundação Getulio Vargas), e pondera produção e consumo, constituído por 60% do IPA-FGV (Índice de Preços no Atacado), 30% do IPC-FGV (Índice de Preços ao Consumidor) e 10% do INCC-FGV (Índice Nacional da Construção Civil). Embora tenha a preferência do mercado, a proporção maior do IPA induz à elevação do IGP-M em relação ao IPCA, face às variações expressivas do dólar, refletindo no custo dos produtos. Apesar disso, há uma tendência de aproximação entre ambos os índices de preços (IPCA e IGP-M) no longo prazo (OLIVEIRA e PACHECO, 2011, p. 98-102).

A Figura B.2 apresenta a evolução histórica da taxa básica de juros da economia (Selic), fixadas conforme as reuniões periódicas do Comitê de Política Monetária (Copom), do Banco Central do Brasil, no período de janeiro de 2007 a março de 2012. A mesma Figura apresenta o comportamento da inflação no país pelo IGP-M, no mesmo período entre 2007 e 2012.

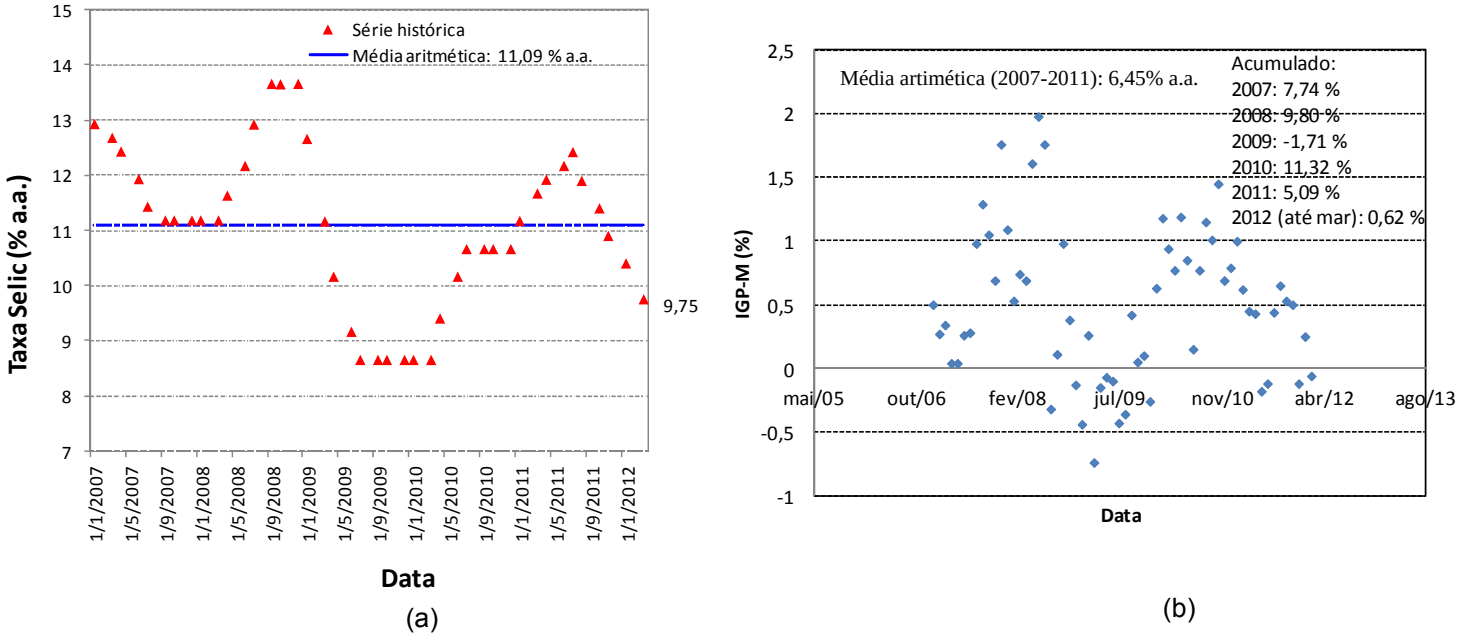


Figura B.2 – (a) Evolução histórica da taxa básica de juros da economia (Selic), fixadas pelo Comitê de Política Monetária (Copom), no período de janeiro de 2007 a março de 2012 (BACEN, 2012); (b) Evolução do Índice Geral de Preços do Mercado (IGP-M), no período de janeiro de 2007 a março de 2012 (FGV, 2012)

Em relação aos juros, observa-se no quadrimestre final uma tendência de queda para o valor fixado, o que estimula novos investimentos e aumento de consumo e de capacidade produtiva. A aplicação em títulos públicos federais, ativos de renda fixa caracterizados pelo risco mínimo, rentabilidade competitiva e alta liquidez (facilidade de conversão de um ativo em dinheiro vivo), é desestimulada com juros menores; estes títulos são utilizados como fonte de recursos para o financiamento da dívida pública, bem como para atividades do Governo Federal destinadas à educação, saúde e infraestrutura. Este sistema negocia títulos com taxas que são aceitas como taxa livre de risco da economia. Para que o investidor considere um projeto atrativo, é necessário estipular um valor acima do qual sua decisão seja recompensada pelo retorno do investimento, correspondente à TMA, cuja estimativa acompanha o comportamento da taxa de juros da economia (mecanismo de indexação financeira pela inflação para corrigir o empréstimo ou a aplicação financeira). No entanto, por se tratar de uma taxa de juros nominal (ou aparente), não está incluído o indexador da inflação, o qual reflete a variação do poder de compra com a alta de preços dos produtos.

A taxa de juros nominal pode ser decomposta em duas parcelas: taxa real (parcela de juros efetivamente paga ou recebida, refletindo aumento ou diminuição do poder de compra em relação à inflação) e taxa de inflação apurada no período.

Com isso, a taxa real de juros pode ser obtida de acordo com a Equação B.7.

$$(1 + \text{nominal}) = (1 + \text{real}) \cdot (1 + \text{inflação}) \qquad \text{(B.7)}$$

Assim, se a taxa nominal for menor que a inflação, a taxa real negativa reflete uma perda de poder de compra no período.

APÊNDICE 3

Os Processos de Refino e o Sistema Hídrico

Uma refinaria de petróleo caracteriza-se por ser um complexo industrial dependente de capital e tecnologia voltado para o processamento de volumes normalmente elevados de matéria-prima, convertendo-se em derivados de alto valor comercial. Em paralelo, visa minimizar a geração de produtos de menor valor e interesse econômico, e adequar seus produtos às especificações, de acordo com sua destinação, ao menor custo operacional. Tem como principais produtos o óleo diesel, o óleo combustível, a gasolina, a nafta, o gás liquefeito de petróleo, óleos lubrificantes, querosene e querosene de aviação, asfalto, coque, dentre outros. Como principais processos de transformação, são tipicamente encontrados a dessalgação, as unidades de destilação atmosférica e a vácuo, de hidrotratamento, reforma catalítica, craqueamento catalítico fluido e craqueamento térmico, tratamento Merox, além de outros utilizados de acordo com as características do petróleo processado e dos objetivos comerciais.

As seções de pré-aquecimento e dessalgação, que antecedem as seções de fracionamento (destilação atmosférica e a vácuo), têm por finalidade a remoção de sais, água e sólidos em suspensão. Esses contaminantes atuam baixando a eficiência da unidade de destilação e limitando seu tempo de campanha. A presença de sais de cloro, como o $MgCl_2$ e o $CaCl_2$ leva, sob ação do calor, à formação de HCl, que migra para o topo das torres de destilação provocando corrosão e, com isso, reduzindo espessuras ou mesmo ocasionando furos nas linhas, paredes de vasos e tubos dos trocadores de calor. Os sais de sódio diminuem a vida útil e o rendimento dos catalisadores conduzindo a produtos finais (combustíveis) de qualidade inferior. Os sais e sólidos presentes depositam-se em trocadores de calor e tubos de fornos, causando entupimentos, baixando a eficiência de troca térmica e levando ao superaquecimento local. Já os sais e sedimentos atuam como catalisadores para deposição de coque no interior de tubos, provocando entupimentos e redução na transferência de calor nos equipamentos (ABADIE, 2001; THOMAS, 2001).

A água proveniente da destilação normalmente encontra-se contaminada com o óleo ao final do processamento primário do petróleo, e tem como contaminantes típicos ácido sulfídrico, amônia, sólidos em suspensão, cloretos, mercaptans e fenol. O efluente desse processo comumente possui características ácidas, e deve ser previamente tratado antes de ser destinado à estação de tratamento primário da refinaria (SZKLO, 2005, p. 26).

Nas colunas de destilação geram-se condensados, que constituem a maior fonte de efluentes aquosos, os quais são direcionados para a unidade de tratamento de águas ácidas (contendo NH_3, H_2S e hidrocarbonetos). Outra importante fonte é a água ácida gerada no sistema de tratamento de água para caldeira, que é neutralizada e descartada. A dessalinização do petróleo gera um efluente com enorme concentração salina, sendo encaminhado para a estação de tratamento de efluentes. A parcela remanescente dos

efluentes aquosos como, por exemplo, os drenos de água de tanque de petróleo e chuva, é normalmente acrescentada à água tratada ou encaminhada para um tanque de acumulação, destinando-se a uma posterior separação de óleo e tratamento biológico.

A exemplo de muitas indústrias, as refinarias de petróleo utilizam grandes quantidades de água em suas atividades, decorrentes das características de operação requeridas pelos processos de refino. A principal função da água é a de resfriamento, como fluido nos processos de troca térmica.

O volume de água empregado é bastante variável, conforme a refinaria, e depende de fatores como a sua configuração, a complexidade, a capacidade de reciclagem e, mesmo, a localização. Em média, uma refinaria utiliza de meio a um metro cúbico de água para processar um metro cúbico de petróleo (REVISTA PETROBRAS, 2000, p. 20). Os efluentes gerados em cada etapa do processo contêm como contaminantes principais amônia, sulfetos, cianetos, fenóis e óleo. O processamento do petróleo gera resíduos normalmente em quantidades não muito variáveis; porém, a concentração de determinadas impurezas, tais como compostos de nitrogênio, enxofre e fenóis, sofre muitas variações dependendo do tipo de óleo. Geralmente, a caracterização dos efluentes é realizada através da especificação de seu volume / vazão, do tipo de contaminante e das respectivas cargas (vazões x concentrações) dos contaminantes presentes.

Uma significativa parcela da água pode ser continuamente reaproveitada, enquanto que o restante encontra-se em níveis de contaminação que induzem à necessidade de submeter-se, ao menos, aos tratamentos primário e secundário.

Em linhas gerais, os efluentes líquidos de refinarias são gerados a partir de vazamentos ou perdas decorrentes do uso na lavagem de tanques ou reatores, ou mesmo a anormalidades em equipamentos; as perdas do sistema de condensado estão associadas à despressurização do sistema de recuperação e a vazamentos no sistema de distribuição de vapor, em decorrência das anormalidades mecânicas dos equipamentos; descargas do sistema de resfriamento, como controle do processo de troca térmica entre a corrente de água e o ambiente, evitando a concentração indesejada de contaminantes na água de circulação; uso sanitário; e água de processo, oriunda de processos como dessalgação, destilação e esgotamento (*stripping*), nos quais a água entra em contato com o óleo e requer sua separação e a de sais e ao tratamento de água ácida gerada.

Após a captação de água, esta deve ser submetida a uma série de tratamentos que vão adequá-la aos padrões de qualidade de acordo com o uso. A água de combate a incêndio, por exemplo, deve permanecer abundante e sempre disponível. Para os demais usos, devem ser removidos os sólidos suspensos (argila, areia, microorganismos e outros), por meio de processos de clarificação e filtração. Para o consumo humano, a água deve

receber nova dose de cloro após a filtração. Já a remoção de sais dissolvidos na água torna-se necessária para a produção de vapor (REVISTA PETROBRAS, 2000, p. 21-22).

As torres de resfriamento, pelas razões já discutidas no Capítulo 6, recebem grande atenção quando se leva em conta a reutilização da água em uma refinaria, pelo enorme volume que consomem, viabilizando a redução na captação da água.

Em segundo plano de importância em relação à utilidade da água nas operações do sistema de resfriamento, está o seu uso direcionado à alimentação das caldeiras. A qualidade de água para este sistema deve ser alta, em geral, desmineralizada.

Analogamente com a torre de resfriamento, as caldeiras geradoras de vapor também necessitam de purgas constantes, para atenuar a concentração de sais. Este descarte possui muito boa qualidade, o que o torna forte candidato para reutilização em outras operações do refino. O vapor gerado pelas caldeiras é utilizado na geração de energia elétrica, no acionamento de máquinas ou diretamente no processo, como nas torres de destilação atmosférica e a vácuo, no coqueamento, no hidrocraqueamento, no craqueamento catalítico fluido (FCC) e/ou no hidrotratamento (HDT). Por entrar em contato direto com as frações do petróleo, origina um condensado que incorpora diversos contaminantes, os quais são removidos nas torres de *stripping* com vapor (retificação/esgotamento de águas ácidas), resultando na água retificada que, embora ainda possua pequenas quantidades de contaminantes, como amônia (NH_3), sulfeto de hidrogênio (H_2S), fenóis e cianetos, tem qualidade reutilizável em dessalgadoras, por exemplo. Nesta última operação, a água é utilizada para remover as gotas de água salgada presentes no óleo proveniente dos campos de petróleo. Contudo, vários outros contaminantes também são removidos, como H_2S, sólidos suspensos e amônia (BAGAJEWICZ, 2000).

A remoção dos sais nas dessalgadoras ocorre por meio de um processo eletrofísico, no qual a água é adicionada ao petróleo para a dissolução dos sais, sendo a água removida por decantação, mediante uma diferença de potencial elétrico gerada entre placas paralelas instaladas no interior dos vasos, promovendo aglutinação de gotículas de água e sua posterior decantação. A salmoura emulsionada com hidrocarbonetos e outros contaminantes constitui uma lama de dessalgação que é encaminhada para tratamento na estação de tratamento de despejos industriais (ETDI). Quando a água é empregada no tratamento cáustico, gera como principais contaminantes H_2S, amônia, fenol, mercaptans.

Em relação às torres de resfriamento, a água utilizada é previamente tratada por meio de processos simples, como a filtração, a clarificação e ajustes de pH. O tratamento da água de resfriamento é realizado através de técnicas químicas, físicas ou físico-químicas e visam fundamentalmente evitar ou minimizar a formação de incrustações em circuitos de resfriamento, minimizar os processos corrosivos e controlar o desenvolvimento

microbiológico. Já aquela destinada à geração de vapor nas caldeiras, a partir da queima de óleo e/ou gás combustível, é filtrada, descarbonatada, desmineralizada (processo de purificação que retira sais da água) através de osmose inversa, resina de troca iônica ou eletrodiálise, e posteriormente é desaerada para retirar todo o oxigênio que nela possa estar dissolvido. A concentração de sais presentes na água, em uma dada faixa de pressão associada à alta temperatura, pode levar à ocorrência de películas isolantes nos tubos da caldeira ou provocar a sua corrosão, fragilizando a resistência mecânica desses tubos.

Conforme esperado, o consumo de água nas atividades de refino incide proporcionalmente sobre a geração de efluentes, justificando tecnicamente o interesse em minimizá-la, como resultado de ações que invistam em reduzir o consumo de água limpa e maximizar o reúso de efluentes. O volume de despejos líquidos oriundos desses processos necessita de tratamento adequado para que sejam descartados nos corpos hídricos dentro das condições permitidas pela legislação. As técnicas de tratamento variam de acordo com as características do efluente, tanto em termos quantitativos como qualitativos; no caso das refinarias, é função do tipo de petróleo processado, do grau de complexidade, da idade, das unidades de processamento e de sua operacionalidade. Tais fatores contribuem para que cada refinaria tenha um perfil de processamento diferente, não permitindo que se generalizem as características dos efluentes de refino.

APÊNDICE 4

Resultados da Aplicação do DFA aos Dados Relativos aos Processos Hídricos da Refinaria de Petróleo

Cenário 1

DFA 1

Balanço 1

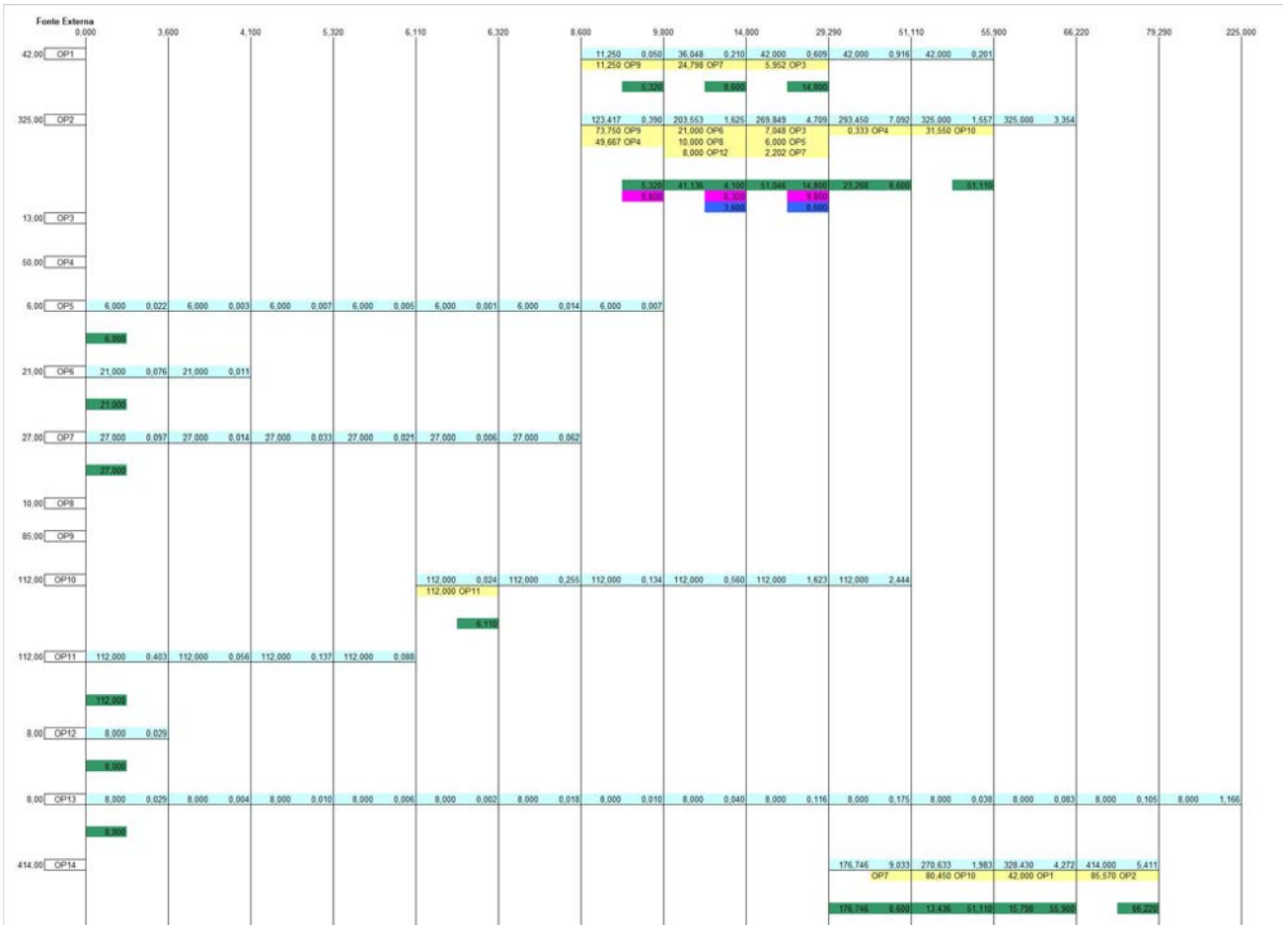


Figura D.1 – Diagrama de fontes de água para o caso de máximo reúso. Cenário 1: contaminante Cálcio

Tabela D.1 – Balanço hídrico do processo para o cenário 1

Número da corrente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nome da corrente	Água Potável	Purga da ETA	Água Bruta	Entrada (Pressurização) da água de combate a incêndios	Saída da água de combate a incêndios	Reposição da TR01	Perda da TR01	Purga da TR01	Reposição (água bruta) para a TR02	Perda da TR02
Vazão (t/h)	21	13	377,45	100	100	42	37	5	115,45	285
pH	7,50	5,40	6,90	6,90	6,90	5,91		7,01	6,90	
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	14,8	8,6	8,6	8,6	8,27	53,77	53,77	8,6	89,20
Sílica	0	15,6	9,4	9,4	9,4	27,71	180,12	180,12	9,4	60,69
Amônia	0	0,36	0,07	0,07	50,07	149,67	150,17	150,17	0,07	114,61
Sulfeto	0	0,32	0,1	0,1	10,10	83,13	5,45	5,45	0,1	3,59
Cloreto	0	170	9,7	9,7	109,7	75,49	590,71	590,71	9,7	1422,44
Cianeto	0	0	0	0	0	1,09	3,09	3,09	0	1,46
Fenol	0	0,06	0,05	0,05	0,05	31,62	82,20	82,20	0,05	31,09

Número da corrente	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Nome da corrente	Purga da TR02	Entrada para Uso Geral	Saída do Uso Geral	Junção (5 + 8 + 11)	Água Desmineralizada (Entrada da Caldeira)	Perda de vapor (Caldeira)	Perda de condensado (Caldeira)	Vapor de processo (Caldeira)	Entrada da UDASF	Saída da UDASF
Vazão (t/h)	40	50	50	145	322,87	78,26	85,61	159	6	6
pH	6,55	6,90	6,90	6,77	7,00		7,00	7,00	7,00	5,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	89,20	8,6	8,6	32,39	0	0	1	0	0	9,8
Sílica	60,69	9,4	9,4	29,43	0	0	1	0	0	4,6
Amônia	114,61	0,07	10,07	71,33	0	0	10	0	0	3,1
Sulfeto	3,59	0,1	1,1	8,14	0	0	10	0	0	6,3
Cloreto	1422,44	9,7	109,7	488,42	0	0	10	0	0	3,7
Cianeto	1,46	0	0	0,51	0	0	0	0	0	0,1
Fenol	31,09	0,05	0,05	11,44	0	0	0	0	0	39,3

Tabela D.1 – Balanço hídrico do processo para o cenário 1 (continuação)

Número da corrente	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Nome da corrente	Entrada da HDT	Saída da HDT	Entrada da FCC	Perda de vapor (FCC)	Saída da FCC	Vapor de processo (para *Stripper* I)	Entrada da Destila-ção Atmosféri ca	Saída da Destilação Atmosférica	Vapor de processo (para *Stripper* II)	Entrada da Destilação a Vácuo
Vazão (t/h)	6	6	50	10	40	31	21	21	18	27
pH	7,00	7,70	7,00		8,90	7,00	7,00	6,90	7,00	7,00
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	10,7	0	0	8,4	0	0	4,1	0	0
Sílica	0	1,3	0	0	3,5	0	0	8,4	0	0
Amônia	0	7708	0	0	13300,4	0	0	191,2	0	0
Sulfeto	0	22838,3	0	0	10374,4	0	0	268,3	0	0
Cloreto	0	75,4	0	0	51,5	0	0	132,7	0	0
Cianeto	0	33,8	0	0	67,4	0	0	3,3	0	0
Fenol	0	54,7	0	0	193,2	0	0	113,8	0	0

Número da corrente	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Nome da corrente	Saída da Destilação a Vácuo (para a entrada da Dessalgadora)	Afluente da *Stripper* I	Excedente (saída) da *Stripper* I	Saída da *Stripper* I (para *stripper* II)	Saída do Vaso de Pré-flash	Afluente da *Stripper* II	Saída da *Stripper* II	Entrada da Dessalgadora (31+37)	Saída da Dessalga-dora	Dreno do Tanque de Petróleo
Vazão (t/h)	27	77	10	67	8	85	85	112	112	8
pH	6,80	7,37	10,37	10,37	7,50	7,67	5,67	6,90	6,90	7,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	8,6	5,20	5,20	5,20	3,6	4,10	4,10	8,60	53,60	225
Sílica	42,5	1,92	1,92	1,92	1,7	1,51	1,51	9,40	14,40	25
Amônia	144,1	7509,92	826,09	826,09	774	651,15	240,93	0,07	0,03	68,8
Sulfeto	140,7	7168,91	14,34	14,34	1092,2	11,30	0,03	0,10	0,01	970,82
Cloreto	75,4	32,63	32,63	32,63	28,6	25,72	25,72	9,70	1309,70	6500
Cianeto	1,8	37,65	0,26	0,26	41,1	0,21	0,10	0	2,00	36,512
Fenol	23,6	104,63	83,70	83,70	44,8	65,98	65,98	0,05	0,01	39,8

Tabela D.1 – Balanço hídrico do processo para o cenário 1 (continuação)

Número da corrente	41	42	43	44	45
Nome da corrente	Junção (parte 39+40)	Junção (17+41)	Junção (14+42) / Entrada da ETDI	Saída da ETDI	Reposição da TR02
Vazão (t/h)	88,45	174,06	319,06	319,06	325
pH	6,93	6,96	6,87	6,87	6,15
Concentração (mg/L)					
Cálcio	69,10	35,61	34,15	84,15	11,58
Sílica	15,36	8,30	17,90	17,90	7,88
Amônia	6,25	8,09	36,83	0,92	114,11
Sulfeto	87,82	49,54	30,73	0,31	45,95
Cloreto	1779,14	909,01	717,87	71,79	167,85
Cianeto	5,12	2,60	1,65	0,17	1,46
Fenol	3,60	1,83	6,20	0,31	26,92

Cenário 2

DFA 2a

Balanço 2b

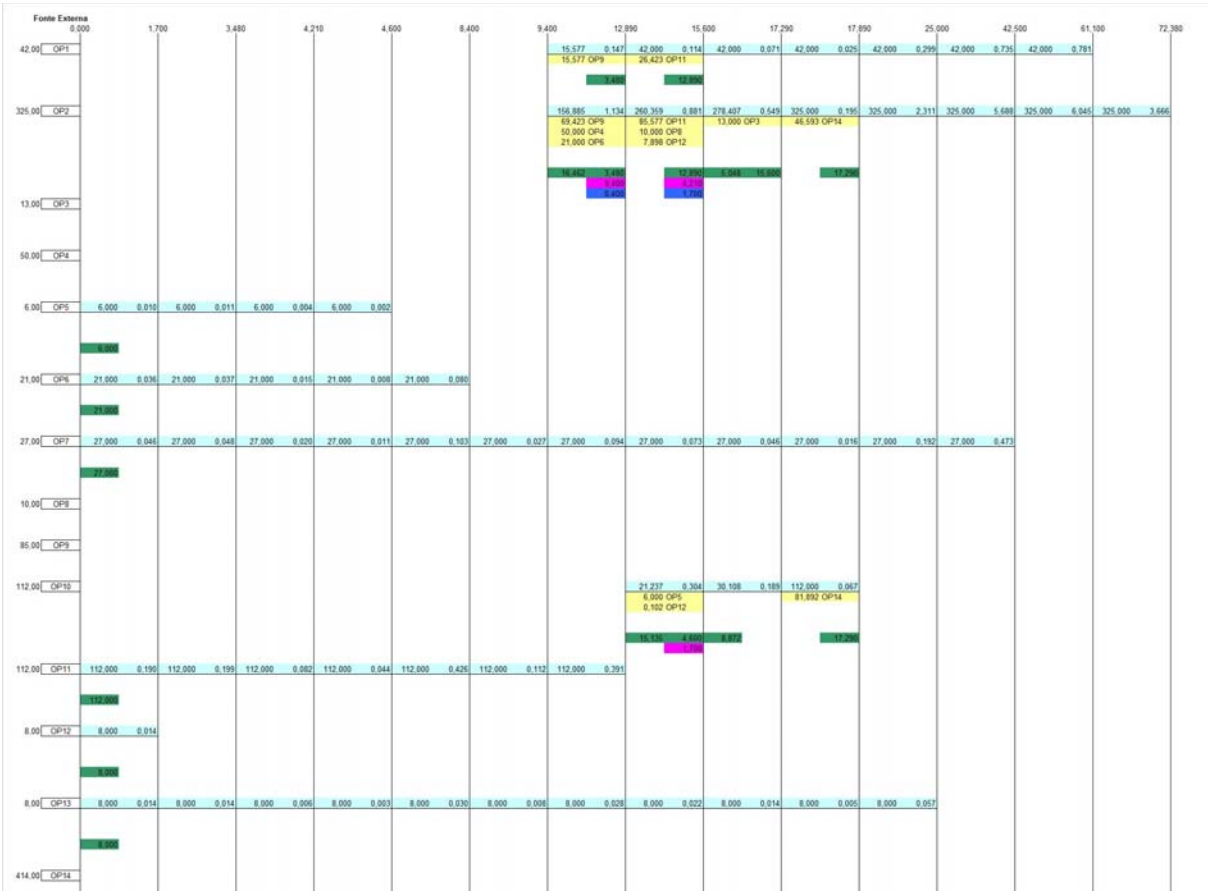


Figura D.2 – Diagrama de fontes de água para o caso de máximo reúso. Cenário 2a: contaminante Sílica

Tabela D.2 – Balanço hídrico do processo para o cenário 2b

Número da corrente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nome da corrente	Água Potável	Purga da ETA	Água Bruta	Entrada (Pressurização) da água de combate a incêndios	Saída da água de combate a incêndios	Reposição da TR01	Perda da TR01	Purga da TR01	Reposição (água bruta) para a TR02	Perda da TR02
Vazão (t/h)	21	13	297	100	100	42	37	5	68,1	285
pH	7,50	5,40	6,90	6,90	6,90	6,99		8,41	6,90	
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	14,8	8,6	8,6	8,6	35,27	229,28	229,28	8,6	148,10
Sílica	0	15,6	9,4	9,4	9,4	14,47	94,07	94,07	9,4	83,39
Amônia	0	0,36	0,07	0,07	50,07	98,34	98,84	98,84	0,07	113,88
Sulfeto	0	0,32	0,1	0,1	10,10	2,23	0,20	0,20	0,1	3,55
Cloreto	0	170	9,7	9,7	109,7	843,18	5580,64	5580,64	9,7	3136,40
Cianeto	0	0	0	0	0	1,60	3,60	3,60	0	1,89
Fenol	0	0,06	0,05	0,05	0,05	24,97	64,92	64,92	0,05	29,27

Número da corrente	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Nome da corrente	Purga da TR02	Entrada para Uso Geral	Saída do Uso Geral	Junção (5 + 8 + 11)	Água Desmineralizada (Entrada da Caldeira)	Perda de vapor (Caldeira)	Perda de condensado (Caldeira)	Vapor de processo (Caldeira)	Entrada da UDASF	Saída da UDASF
Vazão (t/h)	40	50	50	145	322,87	78,26	85,61	159	6	6
pH	6,99	6,90	6,90	7,03	7,00		7,00	7,00	7,00	5,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	148,10	8,6	8,6	54,69	0	0	1	0	0	9,8
Sílica	83,39	9,4	9,4	32,73	0	0	1	0	0	4,6
Amônia	113,88	0,07	10,07	69,35	0	0	10	0	0	3,1
Sulfeto	3,55	0,1	1,1	7,95	0	0	10	0	0	6,3
Cloreto	3136,40	9,7	109,7	1133,30	0	0	10	0	0	3,7
Cianeto	1,89	0	0	0,65	0	0	0	0	0	0,1
Fenol	29,27	0,05	0,05	10,35	0	0	0	0	0	39,3

Tabela D.2 – Balanço hídrico do processo para o cenário 2b (continuação)

Número da corrente	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Nome da corrente	Entrada da HDT	Saída da HDT	Entrada da FCC	Perda de vapor (FCC)	Saída da FCC	Vapor de processo (para *Stripper* I)	Entrada da Destila-ção Atmosféri ca	Saída da Destilação Atmosférica	Vapor de processo (para *Stripper* II)	Entrada da Destilação a Vácuo
Vazão (t/h)	6	6	50	10	40	31	21	21	18	27
pH	7,00	7,70	7,00		8,90	7,00	7,00	6,90	7,00	7,00
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	10,7	0	0	8,4	0	0	4,1	0	0
Sílica	0	1,3	0	0	3,5	0	0	8,4	0	0
Amônia	0	7708	0	0	13300,4	0	0	191,2	0	0
Sulfeto	0	22838,3	0	0	10374,4	0	0	268,3	0	0
Cloreto	0	75,4	0	0	51,5	0	0	132,7	0	0
Cianeto	0	33,8	0	0	67,4	0	0	3,3	0	0
Fenol	0	54,7	0	0	193,2	0	0	113,8	0	0

Número da corrente	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Nome da corrente	Saída da Destilação a Vácuo	Afluente da *Stripper* I	Excedente (saída) da *Stripper* I	Saída da *Stripper* I (para *stripper* II)	Saída do Vaso de Pré-flash	Afluente da *Stripper* II	Saída da *Stripper* II	Entrada da Dessalgadora (31+37)	Saída da Dessalga-dora	Dreno do Tanque de Petróleo
Vazão (t/h)	27	77	10	67	8	85	85	112	112	8
pH	6,80	7,37	10,37	10,37	7,50	7,67	5,67	6,53	6,53	7,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	8,6	5,20	5,20	5,20	3,6	4,10	4,10	8,66	53,66	225
Sílica	42,5	1,92	1,92	1,92	1,7	1,51	1,51	17,12	22,12	25
Amônia	144,1	7509,92	826,09	826,09	774	651,15	240,93	35,64	14,26	68,8
Sulfeto	140,7	7168,91	14,34	14,34	1092,2	11,30	0,03	35,30	3,53	970,82
Cloreto	75,4	32,63	32,63	32,63	28,6	25,72	25,72	25,23	1325,23	6500
Cianeto	1,8	37,65	0,26	0,26	41,1	0,21	0,10	0,48	2,48	36,51
Fenol	23,6	104,63	83,70	83,70	44,8	65,98	65,98	7,87	0,79	39,8

Tabela D.2 – Balanço hídrico do processo para o cenário 2b (continuação)

Número da corrente	41	42	43	44
Nome da corrente	Junção (17 +40)	Junção (14+41) / Entrada da ETDI	Saída da ETDI	Reposição da TR02
Vazão (t/h)	93,61	238,61	238,61	325
pH	7,03	7,03	7,03	6,59
Concentração (mg/L)				
Cálcio	20,14	41,14	91,14	19,23
Sílica	3,05	21,09	21,09	10,83
Amônia	15,03	48,04	1,20	113,38
Sulfeto	92,11	40,97	0,41	45,47
Cloreto	564,64	910,21	91,02	390,44
Cianeto	3,12	1,62	0,16	1,89
Fenol	3,40	7,62	0,38	25,34

Cenário 3

DFA 3a

Balanço 3b

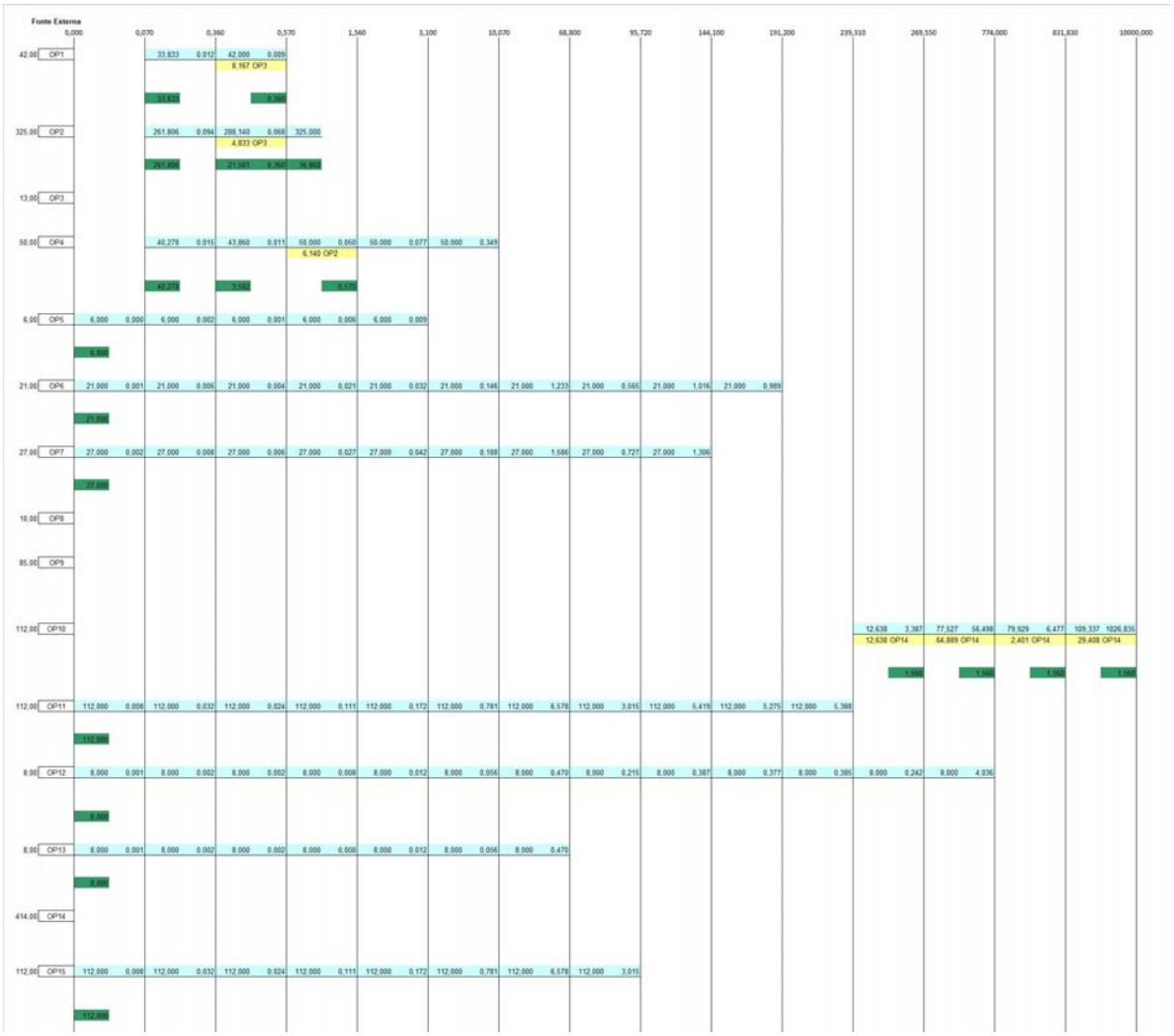


Figura D.3 – Diagrama de fontes de água para o caso de máximo reúso. Cenário 3a: contaminante Amônia

Tabela D.3 – Balanço hídrico do processo para o cenário 3b

Número da corrente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nome da corrente	Água Potável	Purga da ETA	Água Bruta	Entrada (Pressurização) da água de combate a incêndios	Saída da água de combate a incêndios	Reposição da TR01	Perda da TR01	Purga da TR01	Reposição da TR02	Perda da TR02
Vazão (t/h)	21	13	497,9	100	100	42	37	5	325	285
pH	7,50	5,40	6,90	6,90	6,90	6,06		7,16	6,74	
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	14,8	8,6	8,6	8,6	9,81	63,77	63,77	8,69	66,93
Sílica	0	15,6	9,4	9,4	9,4	10,61	68,97	68,97	9,49	73,09
Amônia	0	0,36	0,07	0,07	50,07	0,13	0,63	0,63	0,07	0,57
Sulfeto	0	0,32	0,1	0,1	10,10	0,14	0,06	0,06	0,10	0,06
Cloreto	0	170	9,7	9,7	109,7	50,00	366,48	366,48	12,07	222,92
Cianeto	0	0	0	0	0	0	2,00	2,00	0	0
Fenol	0	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,14	0,14	0,05	0,06

Número da corrente	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Nome da corrente	Purga da TR02	Entrada (água bruta) para Uso Geral	Saída do Uso Geral	Junção (5 + 8 + parte 11)	Água Desmineralizada (Entrada da Caldeira)	Perda de vapor (Caldeira)	Perda de condensado (Caldeira)	Vapor de processo (Caldeira)	Entrada da UDASF	Saída da UDASF
Vazão (t/h)	40	43,9	50	138,9	264	64	70	130	6	6
pH	7,14	6,90	6,92	6,96	7,00		7,00	7,00	7,00	5,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	66,93	8,6	15,72	24,82	0	0	1	0	0	9,8
Sílica	73,09	9,4	17,17	27,09	0	0	1	0	0	4,6
Amônia	0,57	0,07	10,13	36,21	0	0	10	0	0	3,1
Sulfeto	0,06	0,1	1,09	7,29	0	0	10	0	0	6,3
Cloreto	222,92	9,7	135,71	146,58	0	0	10	0	0	3,7
Cianeto	0	0	0	0,07	0	0	0	0	0	0,1
Fenol	0,06	0,05	0,05	0,05	0	0	0	0	0	39,3

Tabela D.3 – Balanço hídrico do processo para o cenário 3b (continuação)

Número da corrente	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Nome da corrente	Entrada da HDT	Saída da HDT	Entrada da FCC	Perda de vapor (FCC)	Saída da FCC	Vapor de processo (para *Stripper* I)	Entrada da Destila-ção Atmosféri ca	Saída da Destilação Atmosférica	Vapor de processo (para *Stripper* II)	Entrada da Destilação a Vácuo
Vazão (t/h)	6	6	50	10	40	10	21	21	10	27
pH	7,00	7,70	7,00		8,90	7,00	7,00	6,90	7,00	7,00
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	10,7	0	0	8,4	0	0	4,1	0	0
Sílica	0	1,3	0	0	3,5	0	0	8,4	0	0
Amônia	0	7708	0	0	13300,4	0	0	191,2	0	0
Sulfeto	0	22838,3	0	0	10374,4	0	0	268,3	0	0
Cloreto	0	75,4	0	0	51,5	0	0	132,7	0	0
Cianeto	0	33,8	0	0	67,4	0	0	3,3	0	0
Fenol	0	54,7	0	0	193,2	0	0	113,8	0	0

Número da corrente	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Nome da corrente	Saída da Destilação a Vácuo (para a entrada da Dessalgadora)	Afluente da *Stripper* I	Excedente (saída) da *Stripper* I	Saída da *Stripper* I (para *stripper* II)	Saída do Vaso de Pré-flash	Afluente da *Stripper* II	Saída da *Stripper* II	Entrada da Dessalgadora (31+37)	Saída da Dessalga-dora	Dreno do Tanque de Petróleo
Vazão (t/h)	27	77	10	67	8	85	85	112	112	8
pH	6,80	7,31	10,31	10,31	7,50	7,83	5,83	5,94	5,94	7,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	8,6	6,32	6,32	6,32	3,6	5,32	5,32	6,11	51,11	225
Sílica	42,5	4,21	4,21	4,21	1,7	3,48	3,48	12,89	17,89	25
Amônia	144,1	7562,07	831,83	831,83	774	728,52	269,55	239,31	95,72	68,8
Sulfeto	140,7	7242,08	14,48	14,48	1092,2	114,21	0,34	34,18	3,42	970,82
Cloreto	75,4	68,82	68,82	68,82	28,6	56,94	56,94	61,39	1361,39	6500
Cianeto	1,8	38,55	0,27	0,27	41,1	4,08	2,04	1,98	3,98	36,512
Fenol	23,6	135,66	108,53	108,53	44,8	89,76	89,76	73,81	7,38	39,8

Tabela D.3 – Balanço hídrico do processo para o cenário 3b (continuação)

Número da corrente	41	42	43	44	45
Nome da corrente	Junção (20 +33+39+40)	Junção (13+17+41)	Junção (14+42) / Entrada da ETDI	Saída da ETDI	Entrada para Uso Geral
Vazão (t/h)	136	256	394,9	394,9	50
pH	5,96	6,20	6,35	6,35	6,92
Concentração (mg/L)					
Cálcio	56,22	33,21	30,26	80,26	15,72
Sílica	16,71	12,51	17,63	17,63	17,17
Amônia	144,18	81,31	65,45	1,64	0,13
Sulfeto	61,26	35,50	25,57	0,26	0,09
Cloreto	1508,72	830,75	590,10	59,01	35,71
Cianeto	5,45	2,90	1,90	0,19	0
Fenol	18,13	9,64	6,27	0,31	0,05

Cenário 4

DFA 4a

Balanço 4b

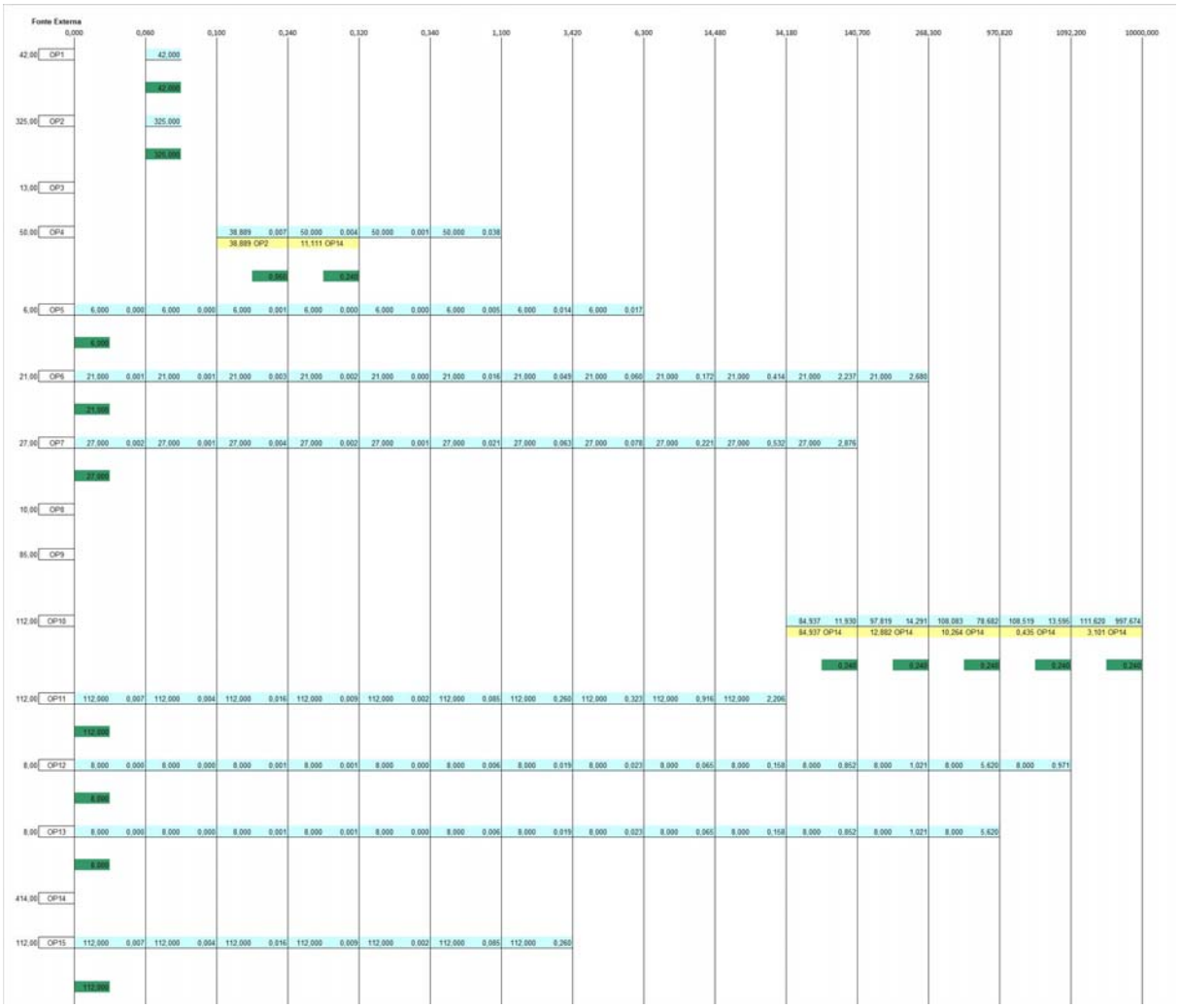


Figura D.4 – Diagrama de fontes de água para o caso de máximo reúso. Cenário 4a: contaminante Sulfeto

Tabela D.4 – Balanço hídrico do processo para o cenário 4b

Número da corrente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nome da corrente	Água Potável	Purga da ETA	Água Bruta	Entrada (Pressurização) da água de combate a incêndios	Saída da água de combate a incêndios	Reposição da TR01	Perda da TR01	Purga da TR01	Reposição da TR02	Perda da TR02
Vazão (t/h)	21	13	478,1	100	100	42	37	5	325	285
pH	7,50	5,40	6,90	6,90	6,90	6,90		8,00	6,90	
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	14,8	8,6	8,6	8,6	8,6	55,90	55,90	8,6	66,22
Sílica	0	15,6	9,4	9,4	9,4	9,4	61,10	61,10	9,4	72,38
Amônia	0	0,36	0,07	0,07	50,07	0,07	0,57	0,57	0,07	0,57
Sulfeto	0	0,32	0,1	0,1	10,10	0,1	0,06	0,06	0,1	0,06
Cloreto	0	170	9,7	9,7	109,7	9,7	163,05	163,05	9,7	204,69
Cianeto	0	0	0	0	0	0	2,00	2,00	0	0,00
Fenol	0	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,13	0,13	0,05	0,06

Número da corrente	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Nome da corrente	Purga da TR02	Entrada (água bruta) para Uso Geral	Saída do Uso Geral	Junção (2 + 5 + 8 + parte 11)	Água Desmineralizada (Entrada da Caldeira)	Perda de vapor (Caldeira)	Perda de condensado (Caldeira)	Vapor de processo (Caldeira)	Entrada da UDASF	Saída da UDASF
Vazão (t/h)	40	11,1	50	119,1	264	64	70	130	6	6
pH	7,30	6,90	7,17	6,27	7,00		7,00	7,00	7,00	5,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	66,22	8,6	53,43	11,79	0	0	1	0	0	9,8
Sílica	72,38	9,4	58,40	12,83	0	0	1	0	0	4,6
Amônia	0,57	0,07	10,46	42,11	0	0	10	0	0	3,1
Sulfeto	0,06	0,1	1,07	8,52	0	0	10	0	0	6,3
Cloreto	204,69	9,7	261,40	119,40	0	0	10	0	0	3,7
Cianeto	0,00	0	0,00	0,08	0	0	0	0	0	0,1
Fenol	0,06	0,05	0,06	0,05	0	0	0	0	0	39,3

Tabela D.4 – Balanço hídrico do processo para o cenário 4b (continuação)

Número da corrente	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Nome da corrente	Entrada da HDT	Saída da HDT	Entrada da FCC	Perda de vapor (FCC)	Saída da FCC	Vapor de processo (para *Stripper* I)	Entrada da Destila-ção Atmosféri ca	Saída da Destilação Atmosférica	Vapor de processo (para *Stripper* II)	Entrada da Destilação a Vácuo
Vazão (t/h)	6	6	50	10	40	10	21	21	10	27
pH	7,00	7,70	7,00		8,90	7,00	7,00	6,90	7,00	7,00
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	10,7	0	0	8,4	0	0	4,1	0	0
Sílica	0	1,3	0	0	3,5	0	0	8,4	0	0
Amônia	0	7708	0	0	13300,4	0	0	191,2	0	0
Sulfeto	0	22838,3	0	0	10374,4	0	0	268,3	0	0
Cloreto	0	75,4	0	0	51,5	0	0	132,7	0	0
Cianeto	0	33,8	0	0	67,4	0	0	3,3	0	0
Fenol	0	54,7	0	0	193,2	0	0	113,8	0	0

Número da corrente	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Nome da corrente	Saída da Destilação a Vácuo (para a entrada da Dessalgadora)	Afluente da *Stripper* I	Excedente (saída) da *Stripper* I	Saída da *Stripper* I (para *stripper* II)	Saída do Vaso de Pré-flash	Afluente da *Stripper* II	Saída da *Stripper* II	Entrada da Dessalgadora (31+37)	Saída da Dessalga-dora	Dreno do Tanque de Petróleo
Vazão (t/h)	27	77	10	67	8	85	85	112	112	8
pH	6,80	7,31	10,31	10,31	7,50	7,83	5,83	5,94	5,94	7,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	8,6	6,32	6,32	6,32	3,6	5,32	5,32	6,11	51,11	225
Sílica	42,5	4,21	4,21	4,21	1,7	3,48	3,48	12,89	17,89	25
Amônia	144,1	7562,07	831,83	831,83	774	728,52	269,55	239,31	95,72	68,8
Sulfeto	140,7	7242,08	14,48	14,48	1092,2	114,21	0,34	34,18	3,42	970,82
Cloreto	75,4	68,82	68,82	68,82	28,6	56,94	56,94	61,39	1361,39	6500
Cianeto	1,8	38,55	0,27	0,27	41,1	4,08	2,04	1,98	3,98	36,512
Fenol	23,6	135,66	108,53	108,53	44,8	89,76	89,76	73,81	7,38	39,8

Tabela D.4 – Balanço hídrico do processo para o cenário 4b (continuação)

Número da corrente	41	42	43	44	45
Nome da corrente	Junção (20 +33+39+40)	Junção (13+17+41)	Junção (14+42) / Entrada da ETDI	Saída da ETDI	Entrada para Uso Geral
Vazão (t/h)	136	256	375,1	375,1	50
pH	5,96	6,21	6,22	6,22	7,17
Concentração (mg/L)					
Cálcio	56,22	40,58	31,44	81,44	53,43
Sílica	16,71	20,56	18,10	18,10	58,40
Amônia	144,18	81,37	68,91	1,72	0,46
Sulfeto	61,26	35,49	26,93	0,27	0,07
Cloreto	1508,72	855,30	621,64	62,16	161,40
Cianeto	5,45	2,90	2,00	0,20	0,00
Fenol	18,13	9,64	6,60	0,33	0,06

Cenário 5

DFA 5a

Balanço 5b

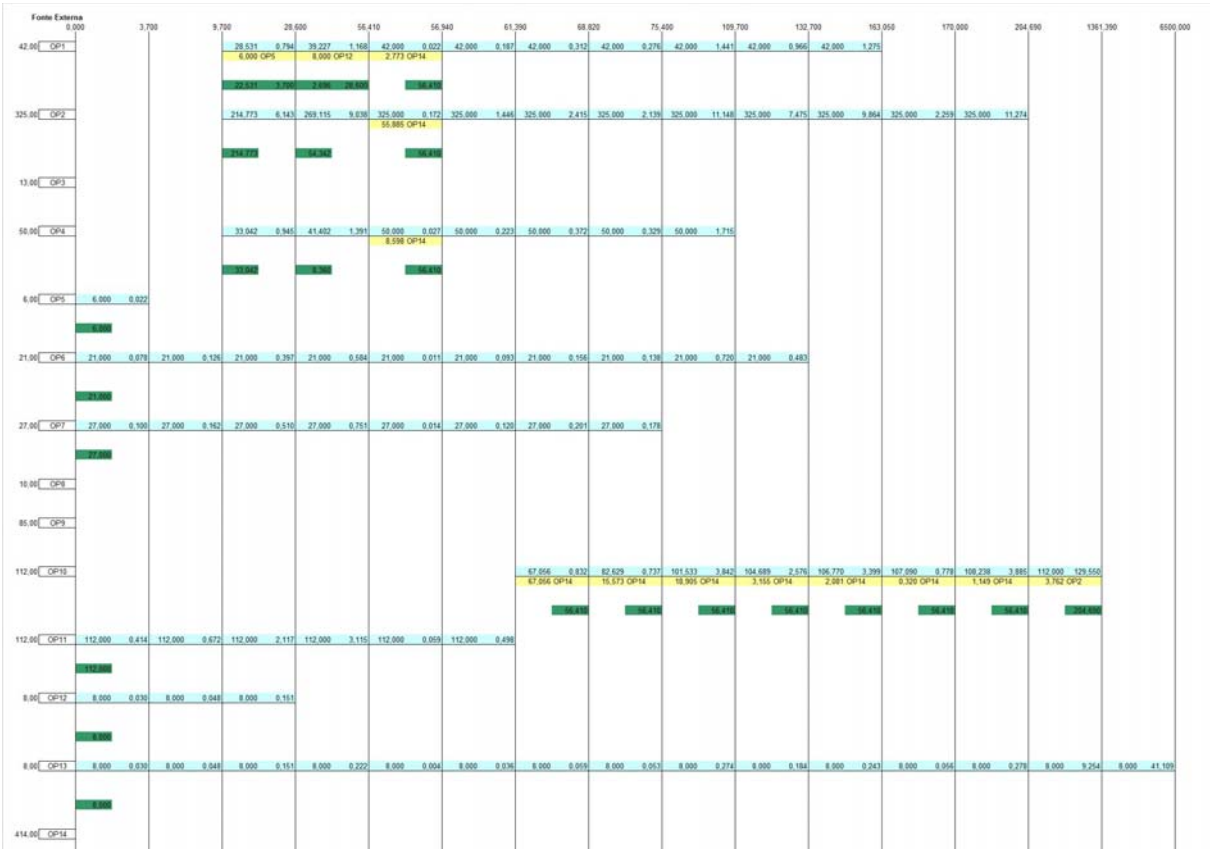


Figura D.5 – Diagrama de fontes de água para o caso de máximo reúso. Cenário 5a: contaminante Cloreto

Tabela D.5 – Balanço hídrico do processo para o cenário 5b

Número da corrente	1	2	3	4	5	6’	7	8	9	10
Nome da corrente	Água Potável	Purga da ETA	Água Bruta	Entrada (Pressurização) da água de combate a incêndios	Saída da água de combate a incêndios	Reposição da TR01	Perda da TR01	Purga da TR01	Reposição da TR02	Perda da TR02
Vazão (t/h)	21	13	503,0	100	100	28,0	37	5	325	285
pH	7,50	5,40	6,90	6,90	6,90	6,90		7,37	6,90	
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	14,8	8,6	8,6	8,6	8,6	50,82	50,82	8,6	66,22
Sílica	0	15,6	9,4	9,4	9,4	9,4	47,11	47,11	9,4	72,38
Amônia	0	0,36	0,07	0,07	50,07	0,07	148,42	148,42	0,07	0,57
Sulfeto	0	0,32	0,1	0,1	10,10	0,1	13,64	13,64	0,1	0,06
Cloreto	0	170	9,7	9,7	109,7	9,7	180,88	180,88	9,7	204,69
Cianeto	0	0	0	0	0	0	9,84	9,84	0	0,00
Fenol	0	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	36,87	36,87	0,05	0,06

Número da corrente	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Nome da corrente	Purga da TR02	Entrada para Uso Geral	Saída do Uso Geral	Junção (2 + 5 + 8 + parte 11)	Água Desmineralizada (Entrada da Caldeira)	Perda de vapor (Caldeira)	Perda de condensado (Caldeira)	Vapor de processo (Caldeira)	Entrada da UDASF	Saída da UDASF para TR01
Vazão (t/h)	40	50	50	154,24	264	64	70	130	6	6
pH	7,30	6,90	6,90	6,37	7,00		7,00	7,00	7,00	5,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	66,22	8,6	8,6	24,03	0	0	1	0	0	9,8
Sílica	72,38	9,4	9,4	25,94	0	0	1	0	0	4,6
Amônia	0,57	0,07	10,07	37,44	0	0	10	0	0	3,1
Sulfeto	0,06	0,1	1,1	7,03	0	0	10	0	0	6,3
Cloreto	204,69	9,7	109,7	139,41	0	0	10	0	0	3,7
Cianeto	0,00	0	0	0,32	0	0	0	0	0	0,1
Fenol	0,06	0,05	0,05	1,25	0	0	0	0	0	39,3

Tabela D.5 – Balanço hídrico do processo para o cenário 5b (continuação)

Número da corrente	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Nome da corrente	Entrada da HDT	Saída da HDT	Entrada da FCC	Perda de vapor (FCC)	Saída da FCC	Vapor de processo (para *Stripper* I)	Entrada da Destila-ção Atmosféri ca	Saída da Destilação Atmosférica	Vapor de processo (para *Stripper* II)	Entrada da Destilação a Vácuo
Vazão (t/h)	6	6	50	10	40	10	21	21	10	27
pH	7,00	7,70	7,00		8,90	7,00	7,00	6,90	7,00	7,00
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	10,7	0	0	8,4	0	0	4,1	0	0
Sílica	0	1,3	0	0	3,5	0	0	8,4	0	0
Amônia	0	7708	0	0	13300,4	0	0	191,2	0	0
Sulfeto	0	22838,3	0	0	10374,4	0	0	268,3	0	0
Cloreto	0	75,4	0	0	51,5	0	0	132,7	0	0
Cianeto	0	33,8	0	0	67,4	0	0	3,3	0	0
Fenol	0	54,7	0	0	193,2	0	0	113,8	0	0

Número da corrente	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Nome da corrente	Saída da Destilação a Vácuo (para a entrada da Dessalgadora)	Afluente da *Stripper* I	Excedente (saída) da *Stripper* I	Saída da *Stripper* I (para *stripper* II)	Saída do Vaso de Pré-flash para reúso	Afluente da *Stripper* II	Saída da *Stripper* II	Entrada da Dessalgadora (31+37)	Saída da Dessalga-dora	Dreno do Tanque de Petróleo
Vazão (t/h)	27	77	10	67	8	77	77	104	107,76	8
pH	6,80	7,31	10,31	10,31	7,50	7,89	5,89	6,00	6,01	7,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	8,6	6,32	6,32	6,32	3,6	5,495	5,50	6,30	53,39	225
Sílica	42,5	4,21	4,21	4,21	1,7	3,664	3,66	13,75	20,79	25
Amônia	144,1	7562,07	831,83	831,83	774	723,798	267,81	235,69	90,99	68,8
Sulfeto	140,7	7242,08	14,48	14,48	1092,2	12,603	0,04	36,56	3,53	970,82
Cloreto	75,4	68,82	68,82	68,82	28,6	59,882	59,88	63,91	1368,82	6500
Cianeto	1,8	38,55	0,27	0,27	41,1	0,235	0,12	0,55	2,53	36,512
Fenol	23,6	135,66	108,53	108,53	44,8	94,435	94,44	76,05	7,34	39,8

Tabela D.5 – Balanço hídrico do processo para o cenário 5b (continuação)

Número da corrente	41	42	43	44	6	38’
Nome da corrente	Junção (33+39+40)	Junção (13+17+41)	Junção (14+42) / Entrada da ETDI	Saída da ETDI	Reposição da TR01 com reúso	Entrada da dessalgadora com reúso (parcela 38 + parcela 11)
Vazão (t/h)	125,76	245,76	400	400	42	107,76
pH	6,08	6,32	6,34	6,34	6,27	6,01
Concentração (mg/L)						
Cálcio	60,565	33,03	29,56	79,56	7,82	8,39
Sílica	19,741	12,30	17,56	17,56	7,25	15,79
Amônia	148,491	80,88	64,13	1,60	147,92	227,49
Sulfeto	65,932	36,81	25,33	0,25	209,00	35,28
Cloreto	1591,862	839,75	569,70	56,97	12,44	68,82
Cianeto	4,516	2,31	1,54	0,15	7,84	0,53
Fenol	17,451	8,94	5,97	0,30	14,18	73,39

Cenário 6

DFA 6a

Balanço 6b

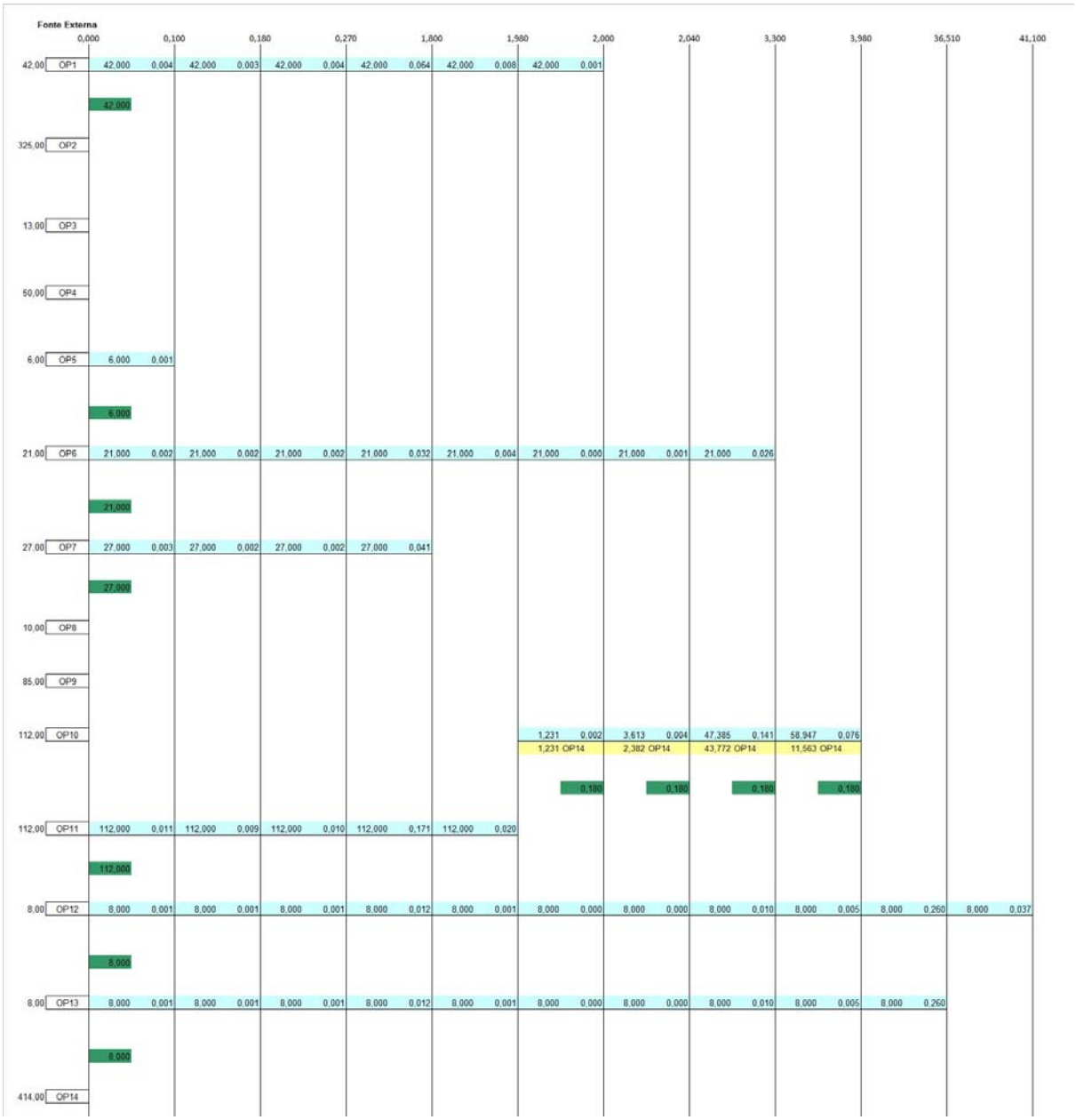


Figura D.6 – Diagrama de fontes de água para o caso de máximo reúso. Cenário 6a: contaminante Cianeto

Tabela D.6 – Balanço hídrico do processo para o cenário 6b

Número da corrente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nome da corrente	Água Potável	Purga da ETA	Água Bruta	Entrada (Pressurização) da água de combate a incêndios	Saída da água de combate a incêndios	Reposição da TR01	Perda da TR01	Purga da TR01	Reposição da TR02	Perda da TR02
Vazão (t/h)	21	13	517	100	100	42	37	5	325	285
pH	7,50	5,40	6,90	6,90	6,90	6,90		8,00	6,90	
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	14,8	8,6	8,6	8,6	8,6	55,90	55,90	8,6	66,22
Sílica	0	15,6	9,4	9,4	9,4	9,4	61,10	61,10	9,4	72,38
Amônia	0	0,36	0,07	0,07	50,07	0,07	0,57	0,57	0,07	0,57
Sulfeto	0	0,32	0,1	0,1	10,10	0,1	0,06	0,06	0,1	0,06
Cloreto	0	170	9,7	9,7	109,7	9,7	163,05	163,05	9,7	204,69
Cianeto	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0
Fenol	0	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,13	0,13	0,05	0,06

Número da corrente	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Nome da corrente	Purga da TR02	Entrada para Uso Geral	Saída do Uso Geral	Junção (2 + 5 + 8 + 11)	Água Desmineralizada (Entrada da Caldeira)	Perda de vapor (Caldeira)	Perda de condensado (Caldeira)	Vapor de processo (Caldeira)	Entrada da UDASF	Saída da UDASF
Vazão (t/h)	40	50	50	158	264	64	70	130	6	6
pH	7,30	6,90	6,90	6,38	7,00		7,00	7,00	7,00	5,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	66,22	8,6	8,6	25,19	0	0	1	0	0	9,8
Sílica	72,38	9,4	9,4	27,49	0	0	1	0	0	4,6
Amônia	0,57	0,07	10,07	31,88	0	0	10	0	0	3,1
Sulfeto	0,06	0,1	1,10	6,44	0	0	10	0	0	6,3
Cloreto	204,69	9,7	109,7	140,40	0	0	10	0	0	3,7
Cianeto	0	0	0	0,06	0	0	0	0	0	0,1
Fenol	0,06	0,05	0,05	0,06	0	0	0	0	0	39,3

Tabela D.6 – Balanço hídrico do processo para o cenário 6b (continuação)

Número da corrente	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Nome da corrente	Entrada da HDT	Saída da HDT	Entrada da FCC	Perda de vapor (FCC)	Saída da FCC	Vapor de processo (para *Stripper* I)	Entrada da Destila-ção Atmosféri ca	Saída da Destilação Atmosférica	Vapor de processo (para *Stripper* II)	Entrada da Destilação a Vácuo
Vazão (t/h)	6	6	50	10	40	10	21	21	10	27
pH	7,00	7,70	7,00		8,90	7,00	7,00	6,90	7,00	7,00
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	10,7	0	0	8,4	0	0	4,1	0	0
Sílica	0	1,3	0	0	3,5	0	0	8,4	0	0
Amônia	0	7708	0	0	13300,4	0	0	191,2	0	0
Sulfeto	0	22838,3	0	0	10374,4	0	0	268,3	0	0
Cloreto	0	75,4	0	0	51,5	0	0	132,7	0	0
Cianeto	0	33,8	0	0	67,4	0	0	3,3	0	0
Fenol	0	54,7	0	0	193,2	0	0	113,8	0	0

Número da corrente	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Nome da corrente	Saída da Destilação a Vácuo (para a entrada da Dessalgadora)	Afluente da *Stripper* I	Excedente (saída) da *Stripper* I	Saída da *Stripper* I (para *stripper* II)	Saída do Vaso de Pré-flash	Afluente da *Stripper* II	Saída da *Stripper* II	Entrada da Dessalgadora (31+37)	Saída da Dessalga-dora	Dreno do Tanque de Petróleo
Vazão (t/h)	27	77	10	67	8	85	85	112	112	8
pH	6,80	7,31	10,31	10,31	7,50	7,83	5,83	5,94	5,94	7,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	8,6	6,32	6,32	6,32	3,6	5,32	5,32	6,11	51,11	225
Sílica	42,5	4,21	4,21	4,21	1,7	3,48	3,48	12,89	17,89	25
Amônia	144,1	7562,07	831,83	831,83	774	728,52	269,55	239,31	95,72	68,8
Sulfeto	140,7	7242,08	14,48	14,48	1092,2	114,21	0,34	34,18	3,42	970,82
Cloreto	75,4	68,82	68,82	68,82	28,6	56,94	56,94	61,39	1361,39	6500
Cianeto	1,8	38,55	0,27	0,27	41,1	4,08	2,04	1,98	3,98	36,512
Fenol	23,6	135,66	108,53	108,53	44,8	89,76	89,76	73,81	7,38	39,8

Tabela D.6 – Balanço hídrico do processo para o cenário 6b (continuação)

Número da corrente	41	42	43	44
Nome da corrente	Junção (20 +33+39+40)	Junção (13+17+41)	Junção (14+42) / Entrada da ETDI	Saída da ETDI
Vazão (t/h)	136	256	414	414
pH	5,96	6,20	6,26	6,26
Concentração (mg/L)				
Cálcio	56,22	31,82	29,29	79,29
Sílica	16,71	10,99	17,29	17,29
Amônia	144,18	81,30	62,44	1,56
Sulfeto	61,26	35,50	24,41	0,24
Cloreto	1508,72	825,67	564,14	56,41
Cianeto	5,45	2,90	1,82	0,18
Fenol	18,13	9,64	5,98	0,30

Cenário 7

DFA 7a

Balanço 7b

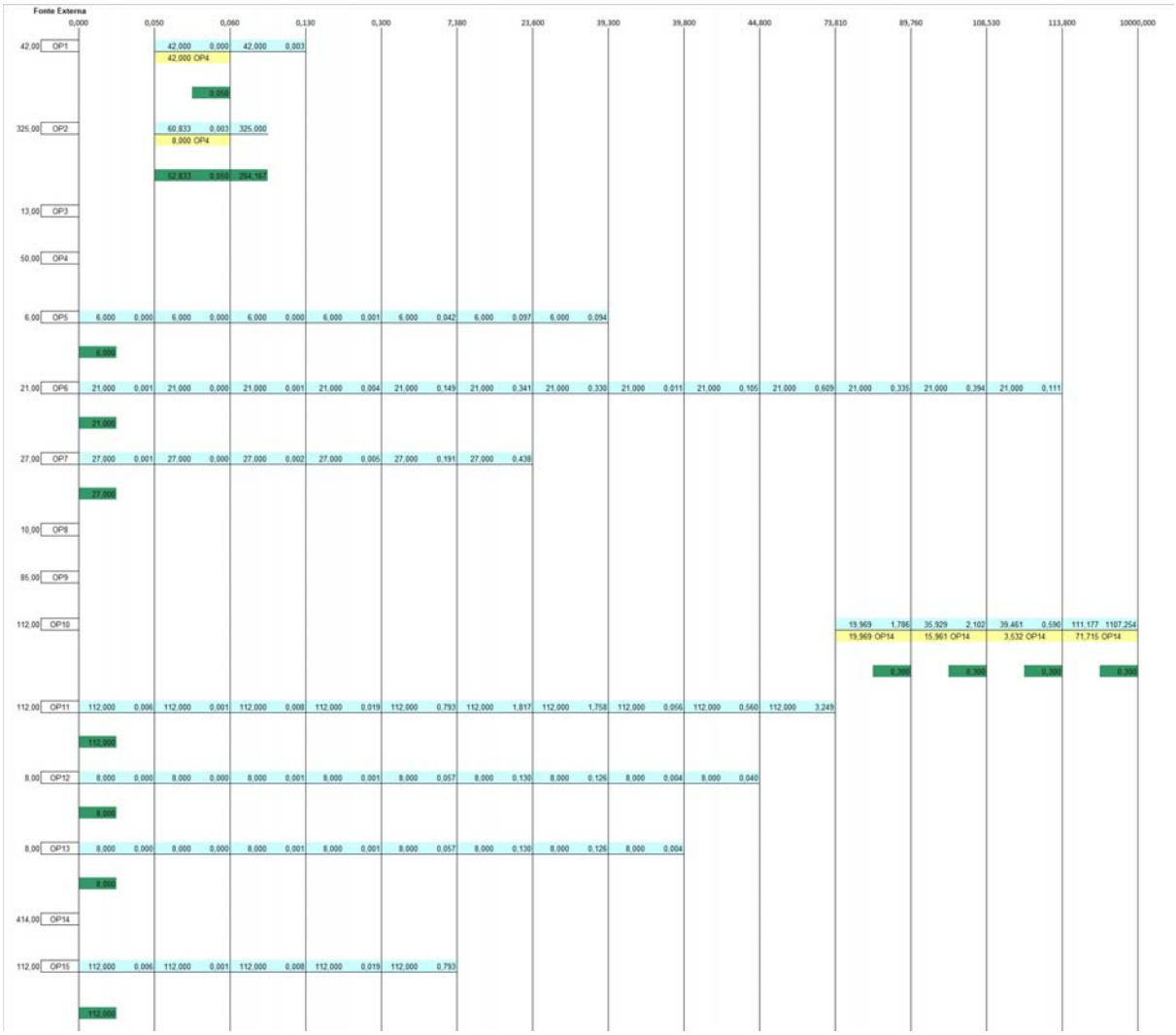


Figura D.7 – Diagrama de fontes de água para o caso de máximo reúso. Cenário 7a: contaminante Fenol

Tabela D.7 – Balanço hídrico do processo para o cenário 7b

Número da corrente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nome da corrente	Água Potável	Purga da ETA	Água Bruta	Entrada (Pressurização) da água de combate a incêndios	Saída da água de combate a incêndios	Reposição da TR01	Perda da TR01	Purga da TR01	Reposição da TR02	Perda da TR02
Vazão (t/h)	21	13	467	100	100	42	37	5	325	285
pH	7,50	5,40	6,90	6,90	6,90	6,90		8,00	6,90	
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	14,8	8,6	8,6	8,6	8,6	55,90	55,90	8,6	66,22
Sílica	0	15,6	9,4	9,4	9,4	9,4	61,10	61,10	9,4	72,38
Amônia	0	0,36	0,07	0,07	50,07	10,07	10,57	10,57	0,32	0,82
Sulfeto	0	0,32	0,1	0,1	10,10	1,1	0,12	0,12	0,12	0,06
Cloreto	0	170	9,7	9,7	109,7	109,7	813,05	813,05	12,16	223,64
Cianeto	0	0	0	0	0	0	2,00	2,00	0	0,00
Fenol	0	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,13	0,13	0,05	0,06

Número da corrente	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Nome da corrente	Purga da TR02	Entrada para Uso Geral	Saída do Uso Geral	Junção (2 + 5 + 8 + 11)	Água Desmineralizada (Entrada da Caldeira)	Perda de vapor (Caldeira)	Perda de condensado (Caldeira)	Vapor de processo (Caldeira)	Entrada da UDASF	Saída da UDASF para TR01
Vazão (t/h)	40	50	50	158	264	64	70	130	6	6
pH	7,30	6,90	6,90	6,38	7,00		7,00	7,00	7,00	5,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	66,22	8,6	8,6	25,19	0	0	1	0	0	9,8
Sílica	72,38	9,4	9,4	27,49	0	0	1	0	0	4,6
Amônia	0,82	0,07	10,07	32,26	0	0	10	0	0	3,1
Sulfeto	0,06	0,1	1,1	6,44	0	0	10	0	0	6,3
Cloreto	223,64	9,7	109,7	165,77	0	0	10	0	0	3,7
Cianeto	0,00	0	0	0,06	0	0	0	0	0	0,1
Fenol	0,06	0,05	0,05	0,06	0	0	0	0	0	39,3

Tabela D.7 – Balanço hídrico do processo para o cenário 7b (continuação)

Número da corrente	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Nome da corrente	Entrada da HDT	Saída da HDT	Entrada da FCC	Perda de vapor (FCC)	Saída da FCC	Vapor de processo (para *Stripper* I)	Entrada da Destila-ção Atmosféri ca	Saída da Destilação Atmosférica	Vapor de processo (para *Stripper* II)	Entrada da Destilação a Vácuo
Vazão (t/h)	6	6	50	10	40	10	21	21	10	27
pH	7,00	7,70	7,00		8,90	7,00	7,00	6,90	7,00	7,00
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	10,7	0	0	8,4	0	0	4,1	0	0
Sílica	0	1,3	0	0	3,5	0	0	8,4	0	0
Amônia	0	7708	0	0	13300,4	0	0	191,2	0	0
Sulfeto	0	22838,3	0	0	10374,4	0	0	268,3	0	0
Cloreto	0	75,4	0	0	51,5	0	0	132,7	0	0
Cianeto	0	33,8	0	0	67,4	0	0	3,3	0	0
Fenol	0	54,7	0	0	193,2	0	0	113,8	0	0

Número da corrente	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Nome da corrente	Saída da Destilação a Vácuo (para a entrada da Dessalgadora)	Afluente da *Stripper* I	Excedente (saída) da *Stripper* I	Saída da *Stripper* I (para *stripper* II)	Saída do Vaso de Pré-flash	Afluente da *Stripper* II	Saída da *Stripper* II	Entrada da Dessalgadora (31+37)	Saída da Dessalga-dora	Dreno do Tanque de Petróleo
Vazão (t/h)	27	77	10	67	8	85	85	112	112	8
pH	6,80	7,31	10,31	10,31	7,50	7,83	5,83	5,94	5,94	7,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	8,6	6,32	6,32	6,32	3,6	5,32	5,32	6,11	51,11	225
Sílica	42,5	4,21	4,21	4,21	1,7	3,48	3,48	12,89	17,89	25
Amônia	144,1	7562,07	831,83	831,83	774	728,52	269,55	239,31	95,72	68,8
Sulfeto	140,7	7242,08	14,48	14,48	1092,2	114,21	0,34	34,18	3,42	970,82
Cloreto	75,4	68,82	68,82	68,82	28,6	56,94	56,94	61,39	1361,39	6500
Cianeto	1,8	38,55	0,27	0,27	41,1	4,08	2,04	1,98	3,98	36,512
Fenol	23,6	135,66	108,53	108,53	44,8	89,76	89,76	73,81	7,38	39,8

Tabela D.7 – Balanço hídrico do processo para o cenário 7b (continuação)

Número da corrente	41	42	43	44
Nome da corrente	Junção (20+33+39+40)	Junção (17+41)	Junção (14+42) / Entrada da ETDI	Saída da ETDI
Vazão (t/h)	136	206	364	364
pH	5,96	6,12	6,21	6,21
Concentração (mg/L)				
Cálcio	56,22	37,46	32,13	82,13
Sílica	16,71	11,37	18,37	18,37
Amônia	144,18	98,58	69,80	1,74
Sulfeto	61,26	43,84	27,61	0,28
Cloreto	1508,72	999,45	637,57	63,76
Cianeto	5,45	3,60	2,06	0,21
Fenol	18,13	11,97	6,80	0,34

Cenário 8

Dados de Entrada 8

DFA 8

Fluxograma 8

Balanço 8

Tabela D.8 – Dados de entrada para a aplicação do DFA (componente Cálcio)

Operação	Vazão (t/h)	Cin (mg/L)	Cout (mg/L)	Δm (g/h)
OP1 (TR01)	42,00	10,32	67,08	2383,92
OP2 (TR02)	325,00	10,32	79,46	22470,50
OP3 (Purga da ETA)	13,00	14,80	14,80	0,00
OP4 (Uso Geral)	50,00	8,60	8,60	0,00
OP5 (Udasf)	6,00	0,00	9,80	58,80
OP6 (Destilação Atmosférica)	21,00	0,00	4,10	86,10
OP7 (Destilação a Vácuo)	27,00	0,00	8,60	232,20
OP8 (Stripper I)	10,00	6,32	6,32	0,00
OP9 (Stripper II)	85,00	5,32	5,32	0,00
OP10 (Dessalgadora)	112,00	6,11	51,11	5040,00
OP11 (Fonte Dessalgadora)	112,00	0,00	6,11	684,32
OP12 (Pré-Flash)	8,00	0,00	3,60	28,80
OP13 (Tanque de Petróleo)	8,00	0,00	225,00	1800,00
OP14 (ETDI)	414,00	30,71	80,71	20700,00
Fonte externa				
1 – Água Desmineralizada	264,00	0,00		
2 – Água Bruta	517,00	8,60		

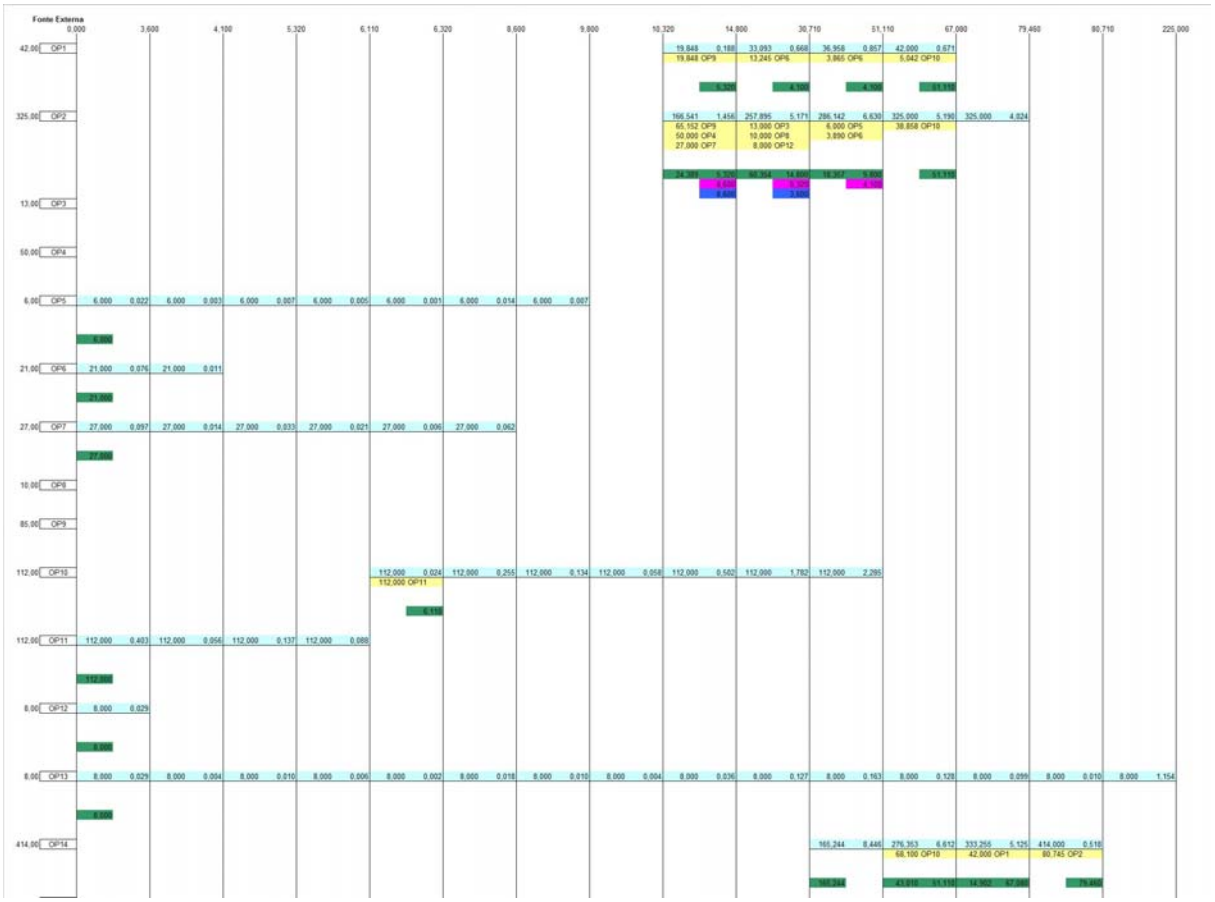


Figura D.8 – Diagrama de fontes de água para o caso de flexibilização nas concentrações de entrada da TR. Cenário 8: contaminante Cálcio

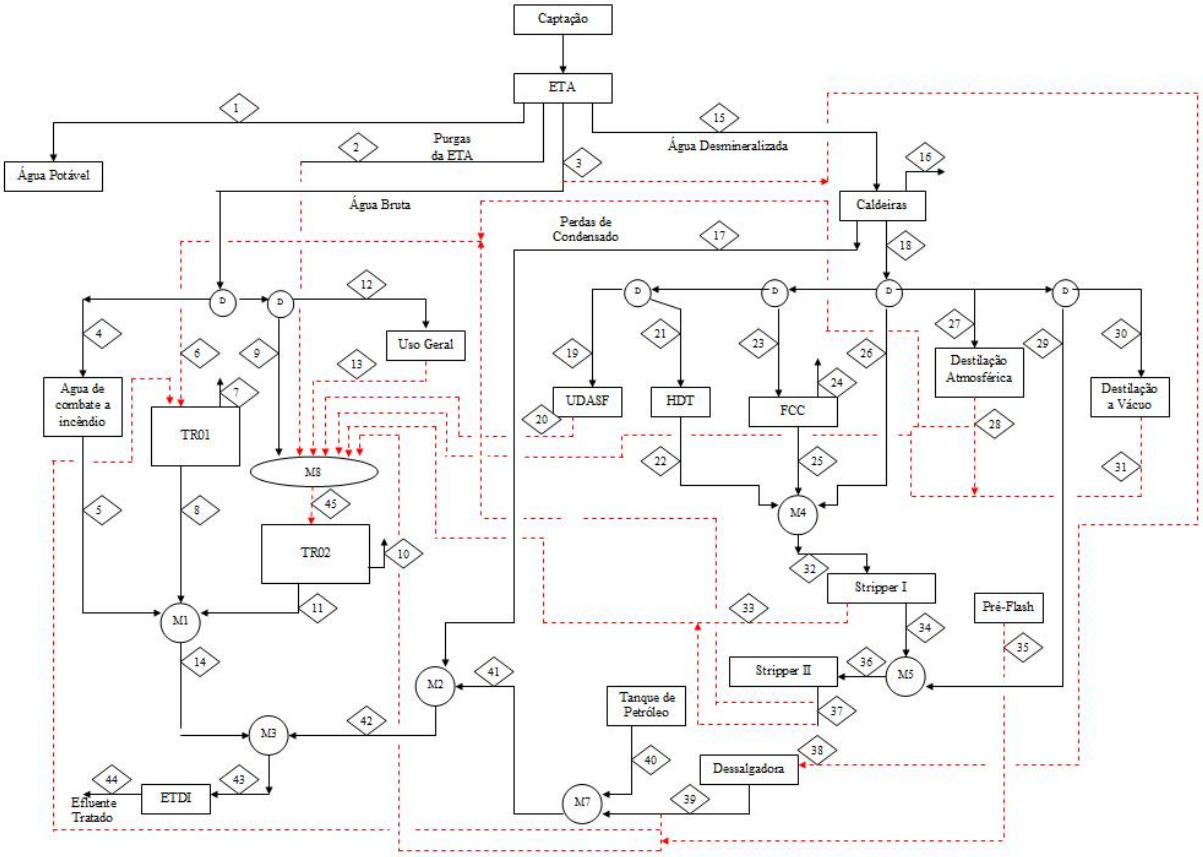


Figura D.9 – Diagrama de blocos do processo para flexibilização nas concentrações de entrada da TR – Cenário 8: contaminante Cálcio

Tabela D.9 – Balanço hídrico do processo para o cenário 8

Número da corrente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nome da corrente	Água Potável	Purga da ETA	Água Bruta	Entrada (Pressurização) da água de combate a incêndios	Saída da água de combate a incêndios	Reposição da TR01	Perda da TR01	Purga da TR01	Reposição (água bruta) para a TR02	Perda da TR02
Vazão (t/h)	21	13	365,1	100	100	42	37	5	103,1	285
pH	7,50	5,40	6,90	6,90	6,90	5,97		7,07	6,90	
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	14,8	8,6	8,6	8,6	10,04	65,25	65,25	8,6	100,61
Sílica	0	15,6	9,4	9,4	9,4	5,87	38,12	38,12	9,4	83,89
Amônia	0	0,36	0,07	0,07	50,07	191,76	192,26	192,26	0,07	109,17
Sulfeto	0	0,32	0,1	0,1	10,10	109,32	7,16	7,16	0,1	3,33
Cloreto	0	170	9,7	9,7	109,7	223,38	1551,96	1551,96	9,7	1655,66
Cianeto	0	0	0	0	0	1,63	3,63	3,63	0	1,47
Fenol	0	0,06	0,05	0,05	0,05	77,54	201,61	201,61	0,05	24,23

Número da corrente	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Nome da corrente	Purga da TR02	Entrada para Uso Geral	Saída do Uso Geral	Junção (5 + 8 + 11)	Água Desmineralizada (Entrada da Caldeira)	Perda de vapor (Caldeira)	Perda de condensado (Caldeira)	Vapor de processo (Caldeira)	Entrada da UDASF	Saída da UDASF
Vazão (t/h)	40	50	50	145	322,87	78,26	85,61	159	6	6
pH	6,54	6,90	6,90	6,77	7,00		7,00	7,00	7,00	5,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	100,61	8,6	8,6	35,94	0	0	1	0	0	9,8
Sílica	83,89	9,4	9,4	30,94	0	0	1	0	0	4,6
Amônia	109,17	0,07	10,07	71,28	0	0	10	0	0	3,1
Sulfeto	3,33	0,1	1,1	8,13	0	0	10	0	0	6,3
Cloreto	1655,66	9,7	109,7	585,91	0	0	10	0	0	3,7
Cianeto	1,47	0	0	0,53	0	0	0	0	0	0,1
Fenol	24,23	0,05	0,05	13,67	0	0	0	0	0	39,3

Tabela D.9 – Balanço hídrico do processo para o cenário 8 (continuação)

Número da corrente	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Nome da corrente	Entrada da HDT	Saída da HDT	Entrada da FCC	Perda de vapor (FCC)	Saída da FCC	Vapor de processo (para *Stripper* I)	Entrada da Destila-ção Atmosféri ca	Saída da Destilação Atmosférica	Vapor de processo (para *Stripper* II)	Entrada da Destilação a Vácuo
Vazão (t/h)	6	6	50	10	40	31	21	21	18	27
pH	7,00	7,70	7,00		8,90	7,00	7,00	6,90	7,00	7,00
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	10,7	0	0	8,4	0	0	4,1	0	0
Sílica	0	1,3	0	0	3,5	0	0	8,4	0	0
Amônia	0	7708	0	0	13300,4	0	0	191,2	0	0
Sulfeto	0	22838,3	0	0	10374,4	0	0	268,3	0	0
Cloreto	0	75,4	0	0	51,5	0	0	132,7	0	0
Cianeto	0	33,8	0	0	67,4	0	0	3,3	0	0
Fenol	0	54,7	0	0	193,2	0	0	113,8	0	0

Número da corrente	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Nome da corrente	Saída da Destilação a Vácuo	Afluente da *Stripper* I	Excedente (saída) da *Stripper* I	Saída da *Stripper* I (para *stripper* II)	Saída do Vaso de Pré-flash	Afluente da *Stripper* II	Saída da *Stripper* II	Entrada da Dessalgadora	Saída da Dessalga-dora	Dreno do Tanque de Petróleo
Vazão (t/h)	27	77	10	67	8	85	85	112	112	8
pH	6,80	7,37	10,37	10,37	7,50	7,67	5,67	6,90	6,90	7,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	8,6	5,20	5,20	5,20	3,6	4,10	4,10	8,60	53,60	225
Sílica	42,5	1,92	1,92	1,92	1,7	1,51	1,51	9,40	14,40	25
Amônia	144,1	7509,92	826,09	826,09	774	651,15	240,93	0,07	0,03	68,8
Sulfeto	140,7	7168,91	14,34	14,34	1092,2	11,30	0,03	0,10	0,01	970,82
Cloreto	75,4	32,63	32,63	32,63	28,6	25,72	25,72	9,70	1309,70	6500
Cianeto	1,8	37,65	0,26	0,26	41,1	0,21	0,10	0,00	2,00	36,512
Fenol	23,6	104,63	83,70	83,70	44,8	65,98	65,98	0,05	0,01	39,8

Tabela D.9 – Balanço hídrico do processo para o cenário 8 (continuação)

Número da corrente	41	42	43	44	45
Nome da corrente	Junção (parte 39+40)	Junção (17+41)	Junção (14+42) / Entrada da ETDI	Saída da ETDI	Reposição da TR02
Vazão (t/h)	76,1	161,71	306,71	306,71	325
pH	6,94	6,97	6,86	6,86	6,14
Concentração (mg/L)					
Cálcio	71,62	34,23	35,04	85,04	13,07
Sílica	15,51	7,83	18,75	18,75	10,89
Amônia	7,26	8,71	38,29	0,96	108,67
Sulfeto	102,07	53,33	31,96	0,32	42,56
Cloreto	1855,33	878,40	740,12	74,01	198,14
Cianeto	5,63	2,65	1,65	0,16	1,47
Fenol	4,19	1,97	7,50	0,38	20,98

Cenário 9

Dados de Entrada 9a

DFA 9a

Fluxograma 9a

Fluxograma 9b

Balanço 9b

Tabela D.10 – Dados de entrada para a aplicação do DFA (componente Sílica)

Operação	Vazão (t/h)	Cin (mg/L)	Cout (mg/L)	Δm (g/h)
OP1 (TR01)	42,00	11,28	73,32	2605,68
OP2 (TR02)	325,00	11,28	86,86	24563,50
OP3 (Purga da ETA)	13,00	15,60	15,60	0,00
OP4 (Uso Geral)	50,00	9,40	9,40	0,00
OP5 (Udasf)	6,00	0,00	4,60	27,60
OP6 (Destilação Atmosférica)	21,00	0,00	8,40	176,40
OP7 (Destilação a Vácuo)	27,00	0,00	42,50	1147,50
OP8 (Stripper I)	10,00	4,21	4,21	0,00
OP9 (Stripper II)	85,00	3,48	3,48	0,00
OP10 (Dessalgadora)	112,00	12,89	17,89	560,00
OP11 (Fonte Dessalgadora)	112,00	0,00	12,89	1443,68
OP12 (Pré-Flash)	8,00	0,00	1,70	13,60
OP13 (Tanque de Petróleo)	8,00	0,00	25,00	200,00
OP14 (ETDI)	414,00	18,83	18,83	0,00
Fonte externa				
1 – Água Desmineralizada	264,00	0,00		
2 – Água Bruta	517,00	9,40		

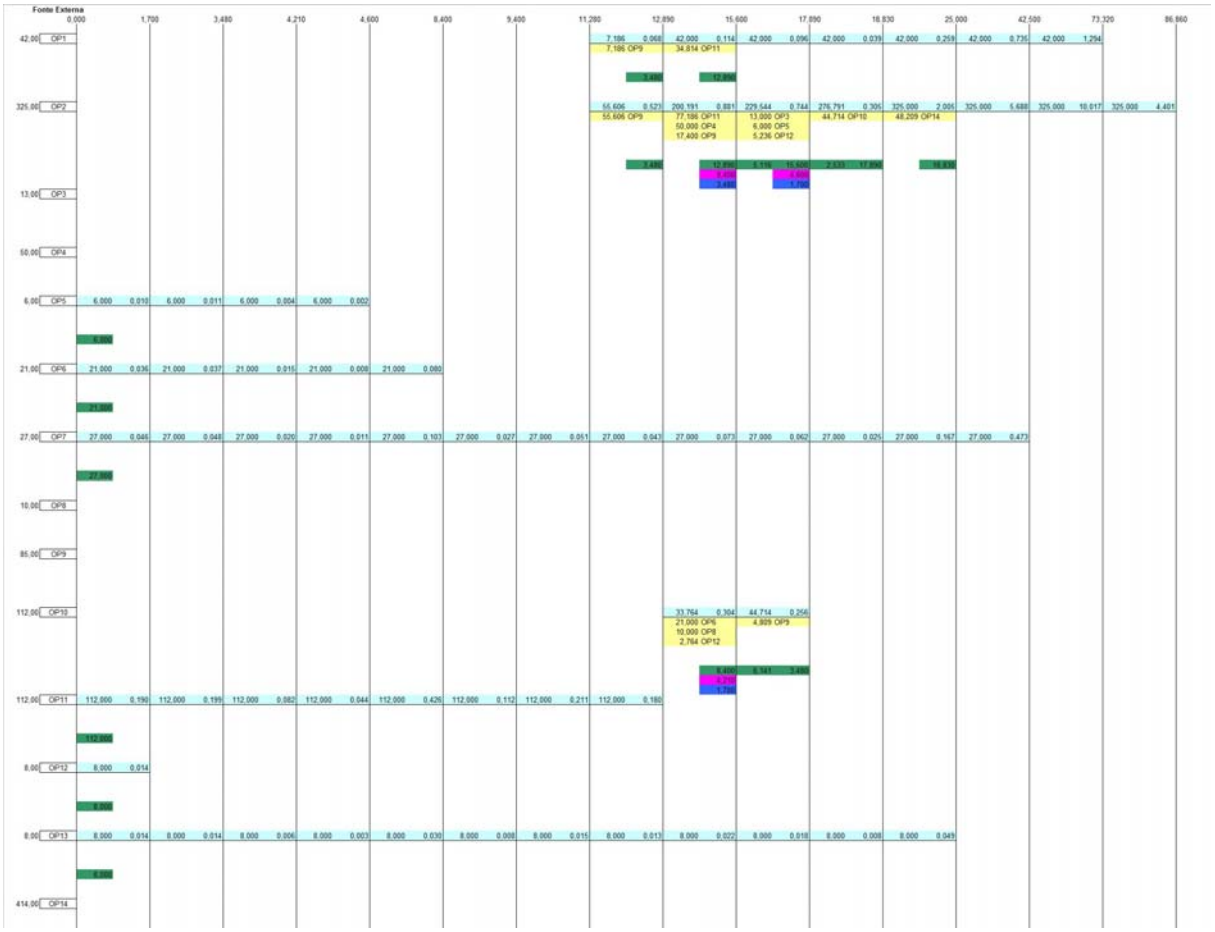


Figura D.10 – Diagrama de fontes de água para o caso de flexibilização nas concentrações de entrada da TR. Cenário 9a: contaminante Sílica

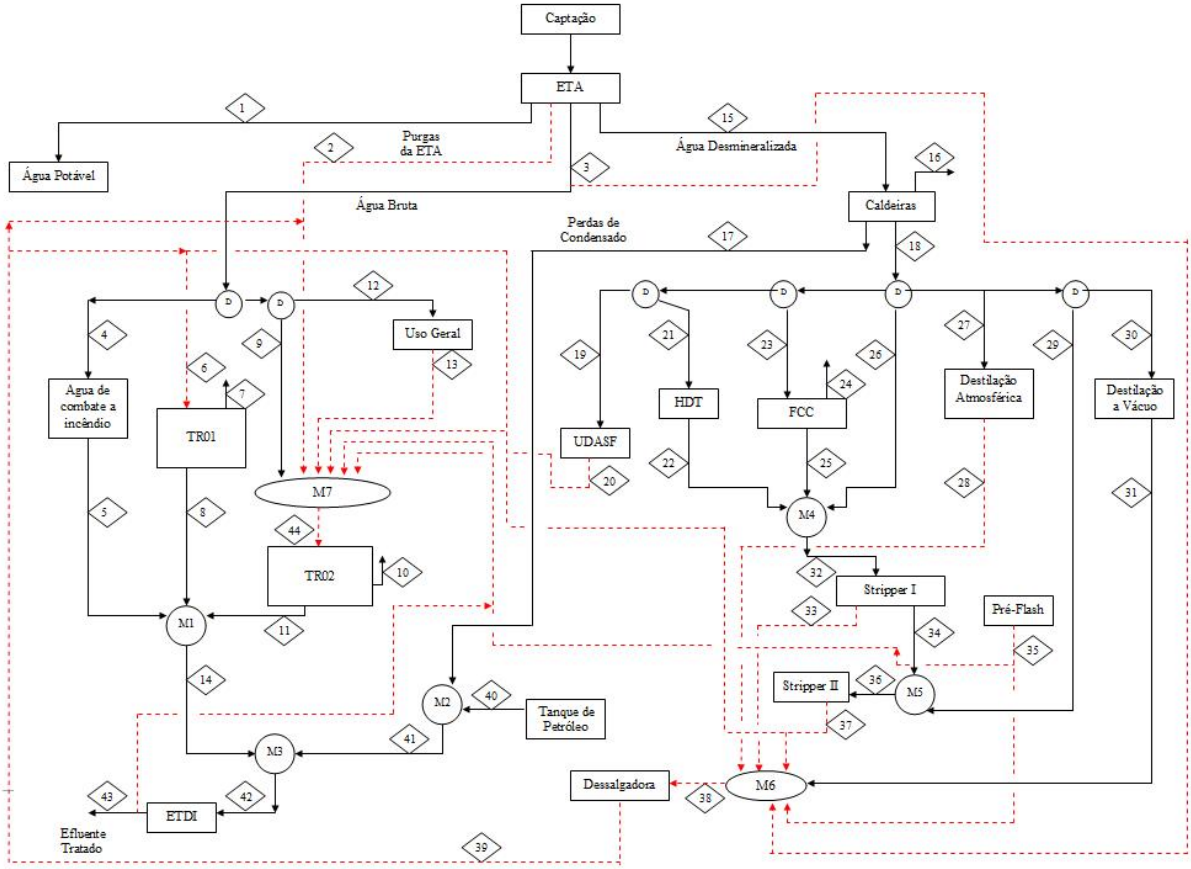


Figura D.11 – Diagrama de blocos do processo para flexibilização nas concentrações de entrada da TR – Cenário 9a: contaminante Sílica

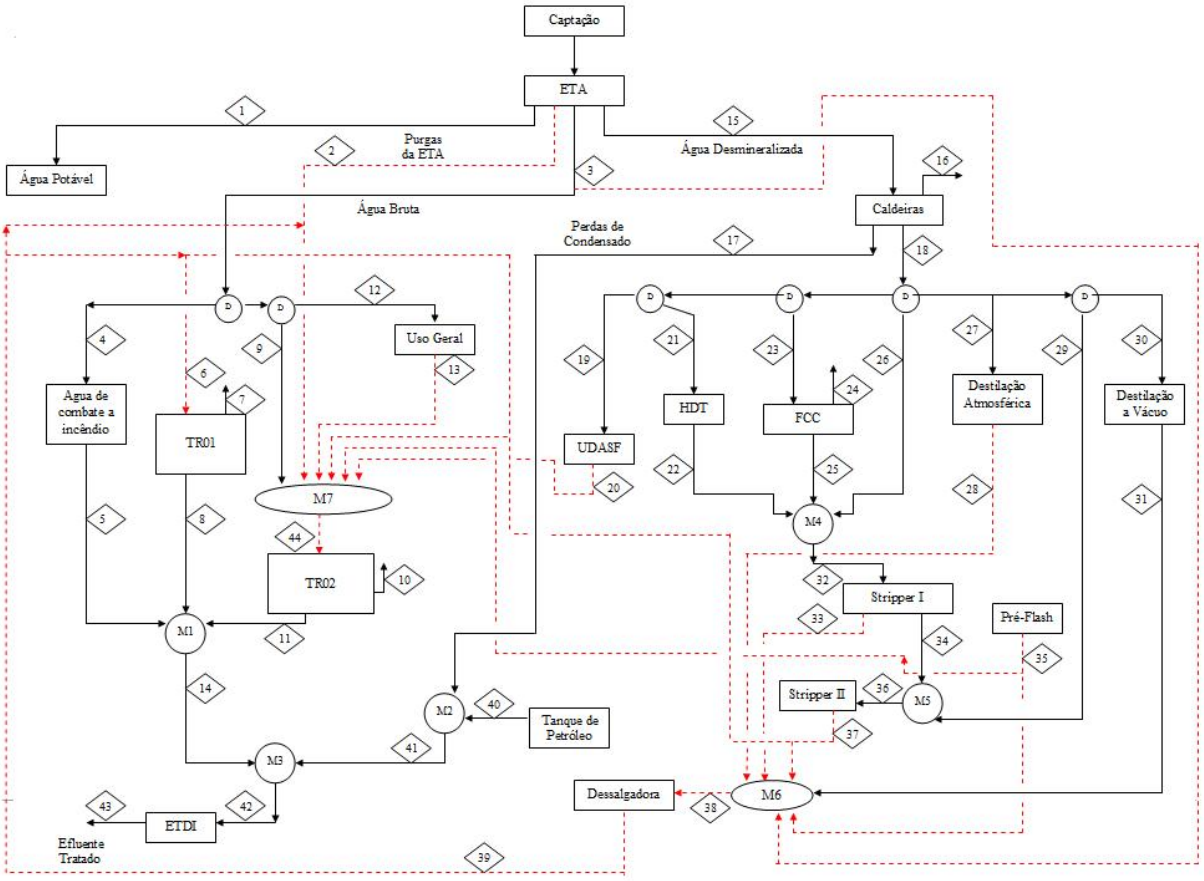


Figura D.12 – Diagrama de blocos do processo para flexibilização nas concentrações de entrada da TR – Cenário 9b: contaminante Sílica

Tabela D.11 – Balanço hídrico do processo para o cenário 9b

Número da corrente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nome da corrente	Água Potável	Purga da ETA	Água Bruta	Entrada (Pressurização) da água de combate a incêndios	Saída da água de combate a incêndios	Reposição da TR01	Perda da TR01	Purga da TR01	Reposição (água bruta) para a TR02	Perda da TR02
Vazão (t/h)	21	13	297	100	100	42	37	5	100,56	285
pH	7,50	5,40	6,90	6,90	6,90	6,27		7,37	6,90	
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	14,8	8,6	8,6	8,6	43,91	285,43	285,43	8,6	139,51
Sílica	0	15,6	9,4	9,4	9,4	17,66	114,80	114,80	9,4	80,22
Amônia	0	0,36	0,07	0,07	50,07	98,85	99,35	99,35	0,07	85,25
Sulfeto	0	0,32	0,1	0,1	10,10	9,33	0,66	0,66	0,1	1,64
Cloreto	0	170	9,7	9,7	109,7	1124,79	7411,12	7411,12	9,7	2856,17
Cianeto	0	0	0	0	0	3,41	5,41	5,41	0	1,66
Fenol	0	0,06	0,05	0,05	0,05	14,48	37,65	37,65	0,05	30,20

Número da corrente	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Nome da corrente	Purga da TR02	Entrada para Uso Geral	Saída do Uso Geral	Junção (5 + 8 + 11)	Água Desmineralizada (Entrada da Caldeira)	Perda de vapor (Caldeira)	Perda de condensado (Caldeira)	Vapor de processo (Caldeira)	Entrada da UDASF	Saída da UDASF
Vazão (t/h)	40	50	50	145	322,87	78,26	85,61	159	6	6
pH	6,50	6,90	6,90	6,75	7,00		7,00	7,00	7,00	5,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	139,51	8,6	8,6	54,26	0	0	1	0	0	9,8
Sílica	80,22	9,4	9,4	32,57	0	0	1	0	0	4,6
Amônia	85,25	0,07	10,07	61,48	0	0	10	0	0	3,1
Sulfeto	1,64	0,1	1,1	7,44	0	0	10	0	0	6,3
Cloreto	2856,17	9,7	109,7	1119,12	0	0	10	0	0	3,7
Cianeto	1,66	0	0	0,64	0	0	0	0	0	0,1
Fenol	30,20	0,05	0,05	9,66	0	0	0	0	0	39,3

Tabela D.11 – Balanço hídrico do processo para o cenário 9b (continuação)

Número da corrente	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Nome da corrente	Entrada da HDT	Saída da HDT	Entrada da FCC	Perda de vapor (FCC)	Saída da FCC	Vapor de processo (para *Stripper* I)	Entrada da Destila-ção Atmosféri ca	Saída da Destilação Atmosférica	Vapor de processo (para *Stripper* II)	Entrada da Destilação a Vácuo
Vazão (t/h)	6	6	50	10	40	31	21	21	18	27
pH	7,00	7,70	7,00		8,90	7,00	7,00	6,90	7,00	7,00
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	10,7	0	0	8,4	0	0	4,1	0	0
Sílica	0	1,3	0	0	3,5	0	0	8,4	0	0
Amônia	0	7708	0	0	13300,4	0	0	191,2	0	0
Sulfeto	0	22838,3	0	0	10374,4	0	0	268,3	0	0
Cloreto	0	75,4	0	0	51,5	0	0	132,7	0	0
Cianeto	0	33,8	0	0	67,4	0	0	3,3	0	0
Fenol	0	54,7	0	0	193,2	0	0	113,8	0	0

Número da corrente	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Nome da corrente	Saída da Destilação a Vácuo	Afluente da *Stripper* I	Excedente (saída) da *Stripper* I	Saída da *Stripper* I (para *stripper* II)	Saída do Vaso de Pré-flash	Afluente da *Stripper* II	Saída da *Stripper* II	Entrada da Dessalgadora	Saída da Dessalga-dora	Dreno do Tanque de Petróleo
Vazão (t/h)	27	77	10	67	8	85	85	112	112	8
pH	6,80	7,37	10,37	10,37	7,50	7,67	5,67	6,69	6,69	7,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	8,6	5,20	5,20	5,20	3,6	4,10	4,10	7,14	52,14	225
Sílica	42,5	1,92	1,92	1,92	1,7	1,51	1,51	16,00	21,00	25
Amônia	144,1	7509,92	826,09	826,09	774	651,15	240,93	173,77	69,51	68,8
Sulfeto	140,7	7168,91	14,34	14,34	1092,2	11,30	0,03	112,46	11,25	970,82
Cloreto	75,4	32,63	32,63	32,63	28,6	25,72	25,72	51,80	1351,80	6500
Cianeto	1,8	37,65	0,26	0,26	41,1	0,21	0,10	2,09	4,09	36,512
Fenol	23,6	104,63	83,70	83,70	44,8	65,98	65,98	38,45	3,85	39,8

Tabela D.11 – Balanço hídrico do processo para o cenário 9b (continuação)

Número da corrente	41	42	43	44
Nome da corrente	Junção (17 +40)	Junção (14+41) / Entrada da ETDI	Saída da ETDI	Reposição da TR02
Vazão (t/h)	93,61	238,61	238,61	325
pH	7,03	6,84	6,84	6,10
Concentração (mg/L)				
Cálcio	20,14	40,87	90,87	18,12
Sílica	3,05	20,99	20,99	10,42
Amônia	15,03	43,25	1,08	84,75
Sulfeto	92,11	40,66	0,41	20,62
Cloreto	564,64	901,59	90,16	354,05
Cianeto	3,12	1,62	0,16	1,66
Fenol	3,40	7,21	0,36	26,14

Cenário 10

Dados de Entrada 10a

DFA 10a

Fluxograma 10a

Fluxograma 10b

Balanço 10b

Tabela D.12 – Dados de entrada para a aplicação do DFA (componente Amônia)

Operação	Vazão (t/h)	Cin (mg/L)	Cout (mg/L)	Δm (g/h)
OP1 (TR01)	42,00	0,08	0,58	20,83
OP2 (TR02)	325,00	0,08	0,58	161,20
OP3 (Purga da ETA)	13,00	0,36	0,36	0,00
OP4 (Uso Geral)	50,00	0,07	10,07	500,00
OP5 (Udasf)	6,00	0,00	3,10	18,60
OP6 (Destilação Atmosférica)	21,00	0,00	191,20	4015,20
OP7 (Destilação a Vácuo)	27,00	0,00	144,10	3890,70
OP8 (Stripper I)	10,00	831,83	831,83	0,00
OP9 (Stripper II)	85,00	269,55	269,55	0,00
OP10 (Dessalgadora)	112,00	239,31	10000	1093197,28
OP11 (Fonte Dessalgadora)	112,00	0,00	239,31	26802,72
OP12 (Pré-Flash)	8,00	0,00	774,00	6192,00
OP13 (Tanque de Petróleo)	8,00	0,00	68,80	550,40
OP14 (ETDI)	414,00	1,56	1,56	0,00
OP15 (Dessalgadora Reúso)	112,00	0,00	95,72	10720,64
Fonte externa				
1 – Água Desmineralizada	264,00	0,00		
2 – Água Bruta	517,00	0,07		

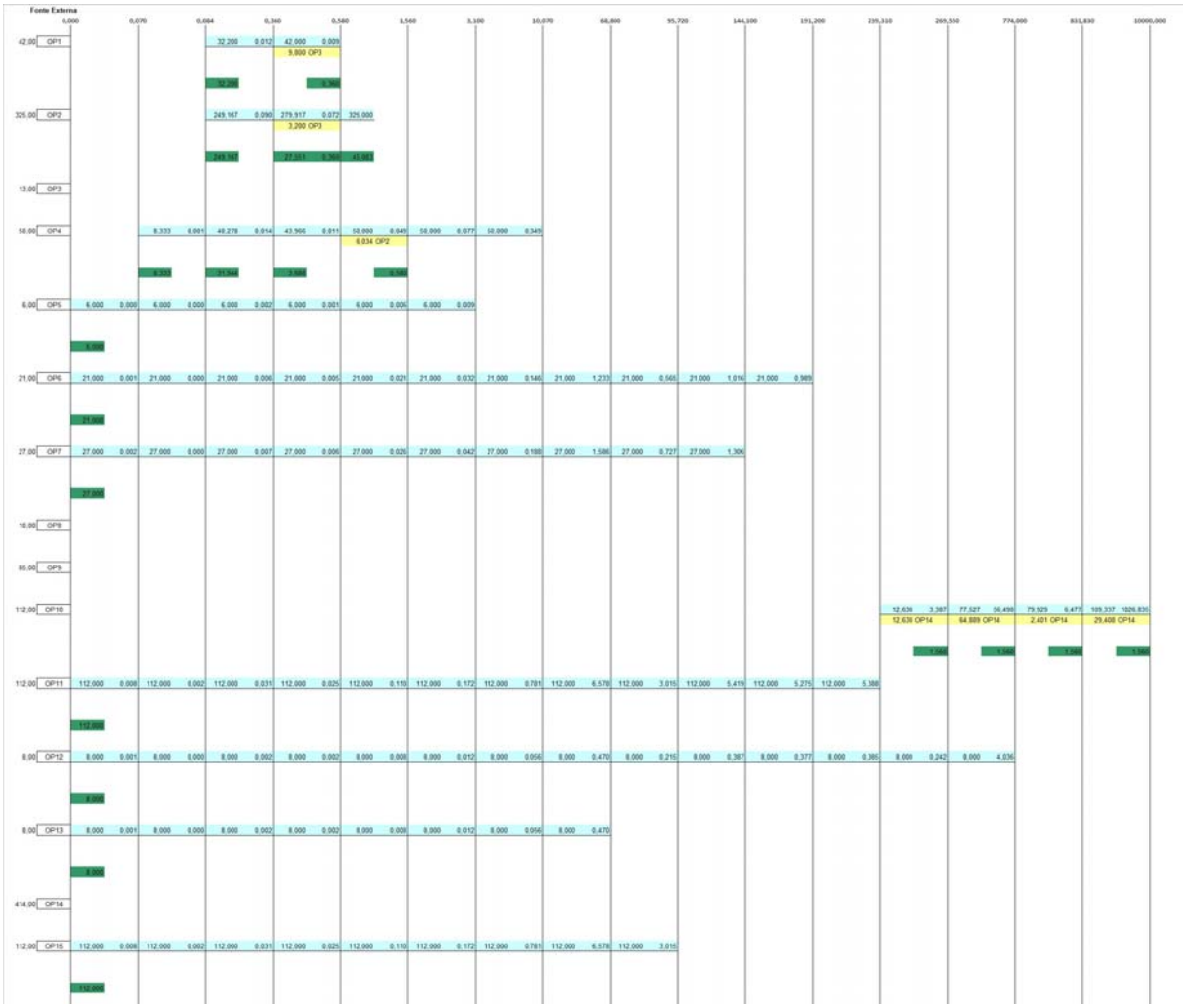


Figura D.13 – Diagrama de fontes de água para o caso de flexibilização nas concentrações de entrada da TR. Cenário 10a: contaminante Amônia

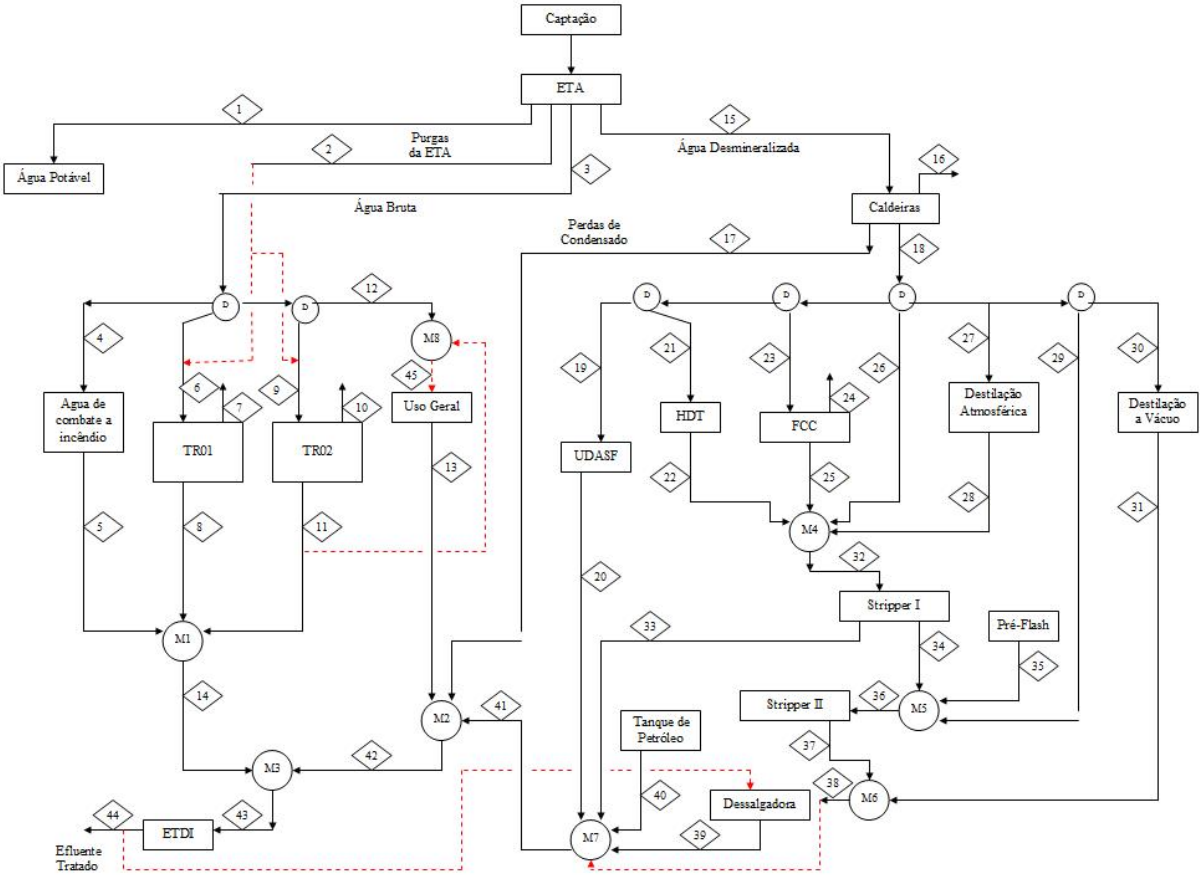


Figura D.14 – Diagrama de blocos do processo para flexibilização nas concentrações de entrada da TR – Cenário 10a: contaminante Amônia

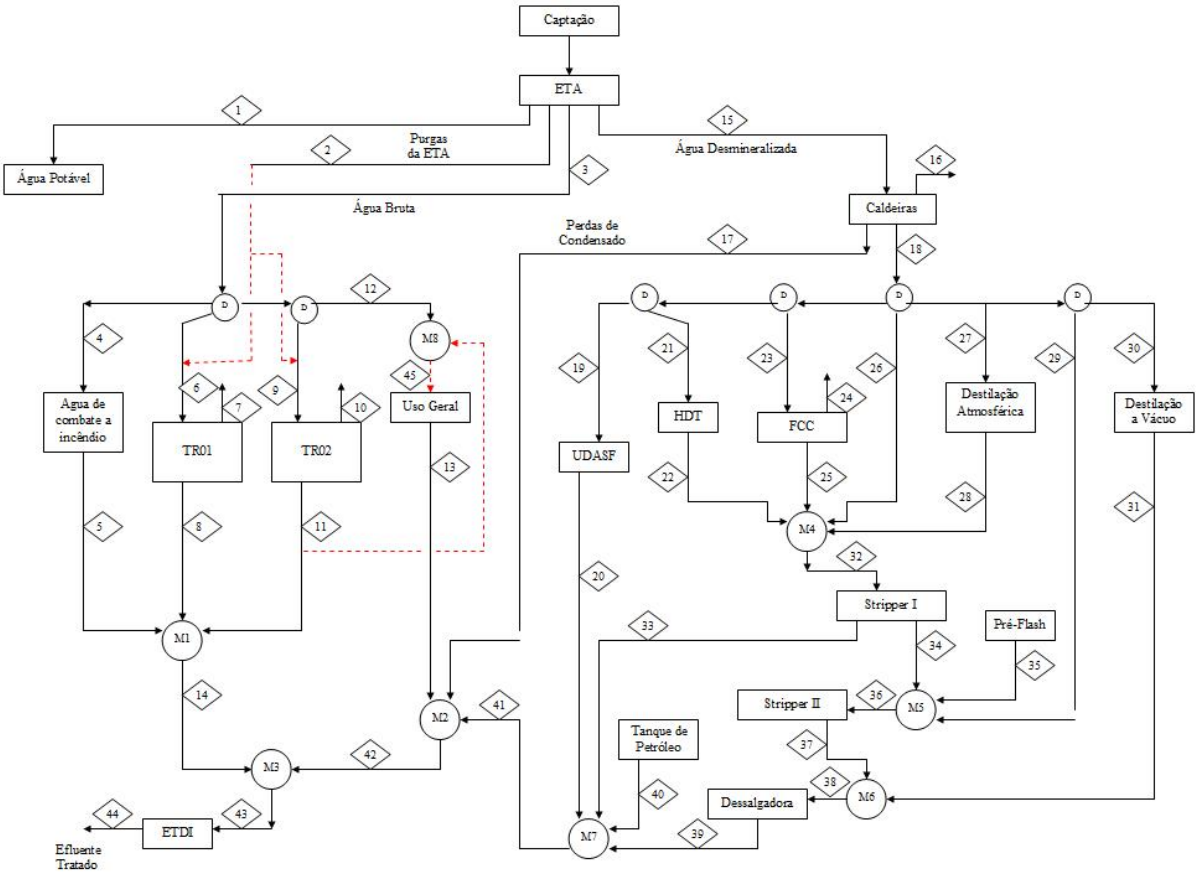


Figura D.15 – Diagrama de blocos do processo para flexibilização nas concentrações de entrada da TR – Cenário 10b: contaminante Amônia

Tabela D.13 – Balanço hídrico do processo para o cenário 10b

Número da corrente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nome da corrente	Água Potável	Purga da ETA	Água Bruta	Entrada (Pressurização) da água de combate a incêndios	Saída da água de combate a incêndios	Reposição da TR01	Perda da TR01	Purga da TR01	Reposição da TR02	Perda da TR02
Vazão (t/h)	21	13	498	100	100	42	37	5	325	285
pH	7,50	5,40	6,90	6,90	6,90	5,99		7,09	6,79	
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	14,8	8,6	8,6	8,6	10,05	65,30	65,30	8,66	66,69
Sílica	0	15,6	9,4	9,4	9,4	10,85	70,50	70,50	9,46	72,85
Amônia	0	0,36	0,07	0,07	50,07	0,14	0,64	0,64	0,07	0,57
Sulfeto	0	0,32	0,1	0,1	10,10	0,15	0,06	0,06	0,10	0,06
Cloreto	0	170	9,7	9,7	109,7	47,10	406,17	406,17	11,28	216,84
Cianeto	0	0	0	0	0	0,00	2,00	2,00	0,00	0,00
Fenol	0	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,14	0,14	0,05	0,06

Número da corrente	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Nome da corrente	Purga da TR02	Entrada (água bruta) para Uso Geral	Saída do Uso Geral	Junção (5 + 8 + parte 11)	Água Desmineralizada (Entrada da Caldeira)	Perda de vapor (Caldeira)	Perda de condensado (Caldeira)	Vapor de processo (Caldeira)	Entrada da UDASF	Saída da UDASF
Vazão (t/h)	40	44	50	139	264	64	70	130	6	6
pH	7,19	6,90	6,93	6,96	7,00		7,00	7,00	7,00	5,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	66,69	8,6	15,67	24,85	0	0	1	0	0	9,8
Sílica	72,85	9,4	17,13	27,12	0	0	1	0	0	4,6
Amônia	0,57	0,07	10,13	36,18	0	0	10	0	0	3,1
Sulfeto	0,06	0,1	1,09	7,28	0	0	10	0	0	6,3
Cloreto	216,84	9,7	134,92	146,57	0	0	10	0	0	3,7
Cianeto	0,00	0	0,00	0,07	0	0	0	0	0	0,1
Fenol	0,06	0,05	0,05	0,06	0	0	0	0	0	39,3

Tabela D.13 – Balanço hídrico do processo para o cenário 10b (continuação)

Número da corrente	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Nome da corrente	Entrada da HDT	Saída da HDT	Entrada da FCC	Perda de vapor (FCC)	Saída da FCC	Vapor de processo (para *Stripper* I)	Entrada da Destila-ção Atmosféri ca	Saída da Destilação Atmosférica	Vapor de processo (para *Stripper* II)	Entrada da Destilação a Vácuo
Vazão (t/h)	6	6	50	10	40	10	21	21	10	27
pH	7,00	7,70	7,00		8,90	7,00	7,00	6,90	7,00	7,00
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	10,7	0	0	8,4	0	0	4,1	0	0
Sílica	0	1,3	0	0	3,5	0	0	8,4	0	0
Amônia	0	7708	0	0	13300,4	0	0	191,2	0	0
Sulfeto	0	22838,3	0	0	10374,4	0	0	268,3	0	0
Cloreto	0	75,4	0	0	51,5	0	0	132,7	0	0
Cianeto	0	33,8	0	0	67,4	0	0	3,3	0	0
Fenol	0	54,7	0	0	193,2	0	0	113,8	0	0

Número da corrente	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Nome da corrente	Saída da Destilação a Vácuo (para a entrada da Dessalgadora)	Afluente da *Stripper* I	Excedente (saída) da *Stripper* I	Saída da *Stripper* I (para *stripper* II)	Saída do Vaso de Pré-flash	Afluente da *Stripper* II	Saída da *Stripper* II	Entrada da Dessalgadora (31+37)	Saída da Dessalga-dora	Dreno do Tanque de Petróleo
Vazão (t/h)	27	77	10	67	8	85	85	112	112	8
pH	6,80	7,31	10,31	10,31	7,50	7,83	5,83	5,94	5,94	7,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	8,6	6,32	6,32	6,32	3,6	5,32	5,32	6,11	51,11	225
Sílica	42,5	4,21	4,21	4,21	1,7	3,48	3,48	12,89	17,89	25
Amônia	144,1	7562,07	831,83	831,83	774	728,52	269,55	239,31	95,72	68,8
Sulfeto	140,7	7242,08	14,48	14,48	1092,2	114,21	0,34	34,18	3,42	970,82
Cloreto	75,4	68,82	68,82	68,82	28,6	56,94	56,94	61,39	1361,39	6500
Cianeto	1,8	38,55	0,27	0,27	41,1	4,08	2,04	1,98	3,98	36,512
Fenol	23,6	135,66	108,53	108,53	44,8	89,76	89,76	73,81	7,38	39,8

Tabela D.13 – Balanço hídrico do processo para o cenário 10b (continuação)

Número da corrente	41	42	43	44	45
Nome da corrente	Junção (20 +33+39+40)	Junção (13+17+41)	Junção (14+42) / Entrada da ETDI	Saída da ETDI	Entrada para Uso Geral
Vazão (t/h)	136	256	395	395	50,1
pH	5,96	6,20	6,35	6,35	6,93
Concentração (mg/L)					
Cálcio	56,22	33,20	30,26	80,26	15,67
Sílica	16,71	12,50	17,64	17,64	17,13
Amônia	144,18	81,31	65,43	1,64	0,13
Sulfeto	61,26	35,50	25,57	0,26	0,09
Cloreto	1508,72	830,59	589,89	58,99	34,92
Cianeto	5,45	2,90	1,90	0,19	0,00
Fenol	18,13	9,64	6,27	0,31	0,05

Cenário 11

Dados de Entrada 11a

DFA 11a

Fluxograma 11a

Fluxograma 11b

Balanço 11b

Tabela D.14 – Dados de entrada para a aplicação do DFA (componente Sulfeto)

Operação	Vazão (t/h)	Cin (mg/L)	Cout (mg/L)	Δm (g/h)
OP1 (TR01)	42,00	0,06	0,06	0,00
OP2 (TR02)	325,00	0,06	0,06	0,00
OP3 (Purga da ETA)	13,00	0,32	0,32	0,00
OP4 (Uso Geral)	50,00	0,10	1,10	50,00
OP5 (Udasf)	6,00	0,00	6,30	37,80
OP6 (Destilação Atmosférica)	21,00	0,00	268,30	5634,30
OP7 (Destilação a Vácuo)	27,00	0,00	140,70	3798,90
OP8 (Stripper I)	10,00	14,48	14,48	0,00
OP9 (Stripper II)	85,00	0,34	0,34	0,00
OP10 (Dessalgadora)	112,00	34,18	10000	1116171,84
OP11 (Fonte Dessalgadora)	112,00	0,00	34,18	3828,16
OP12 (Pré-Flash)	8,00	0,00	1092,20	8737,60
OP13 (Tanque de Petróleo)	8,00	0,00	970,82	7766,56
OP14 (ETDI)	414,00	0,24	0,24	0,00
OP15 (Dessalgadora Reúso)	112,00	0,00	3,42	383,04
Fonte externa				
1 – Água Desmineralizada	264,00	0,00		
2 – Água Bruta	517,00	0,10		

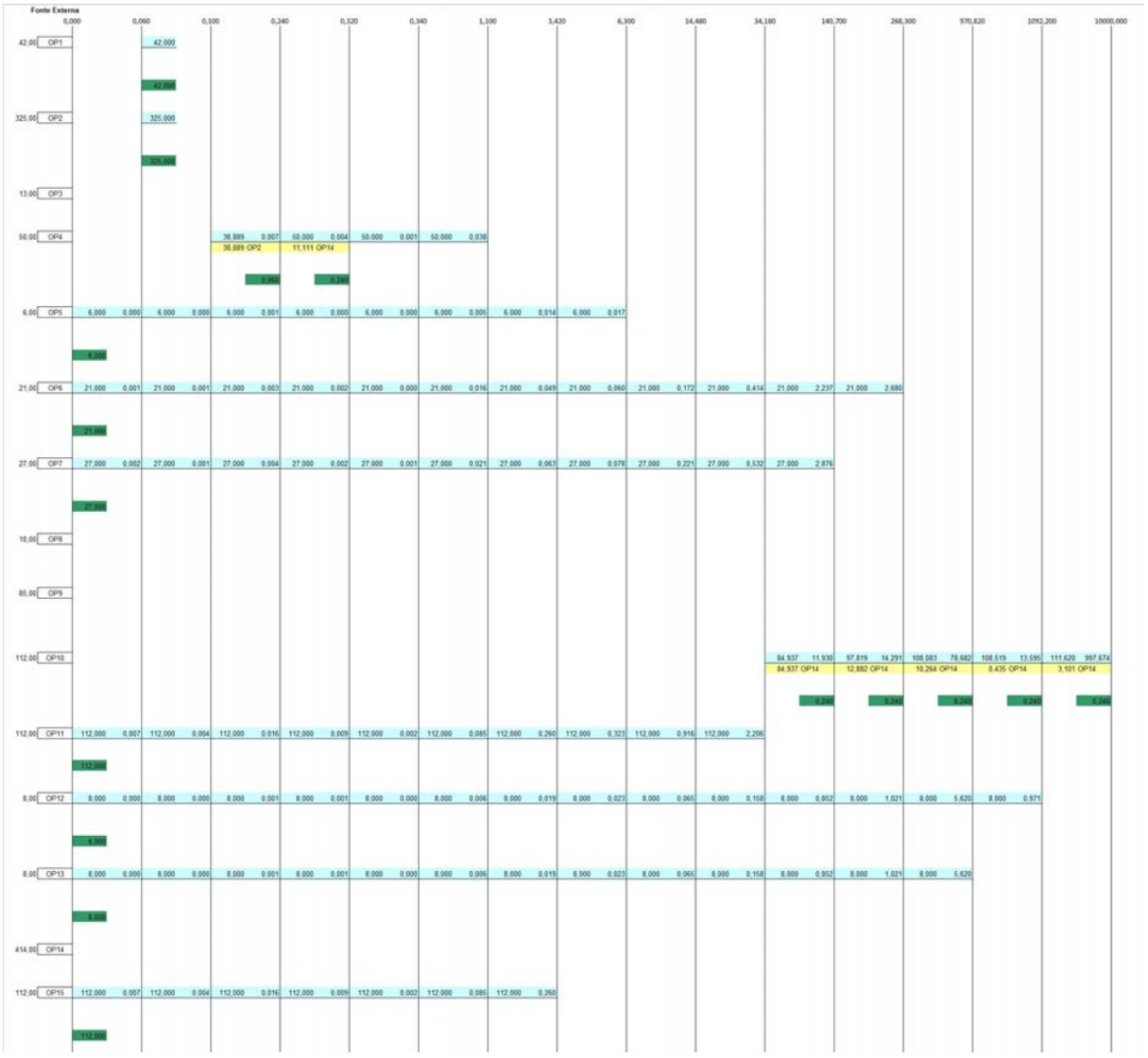


Figura D.16 – Diagrama de fontes de água para o caso de flexibilização nas concentrações de entrada da TR. Cenário 11a: contaminante Sulfeto

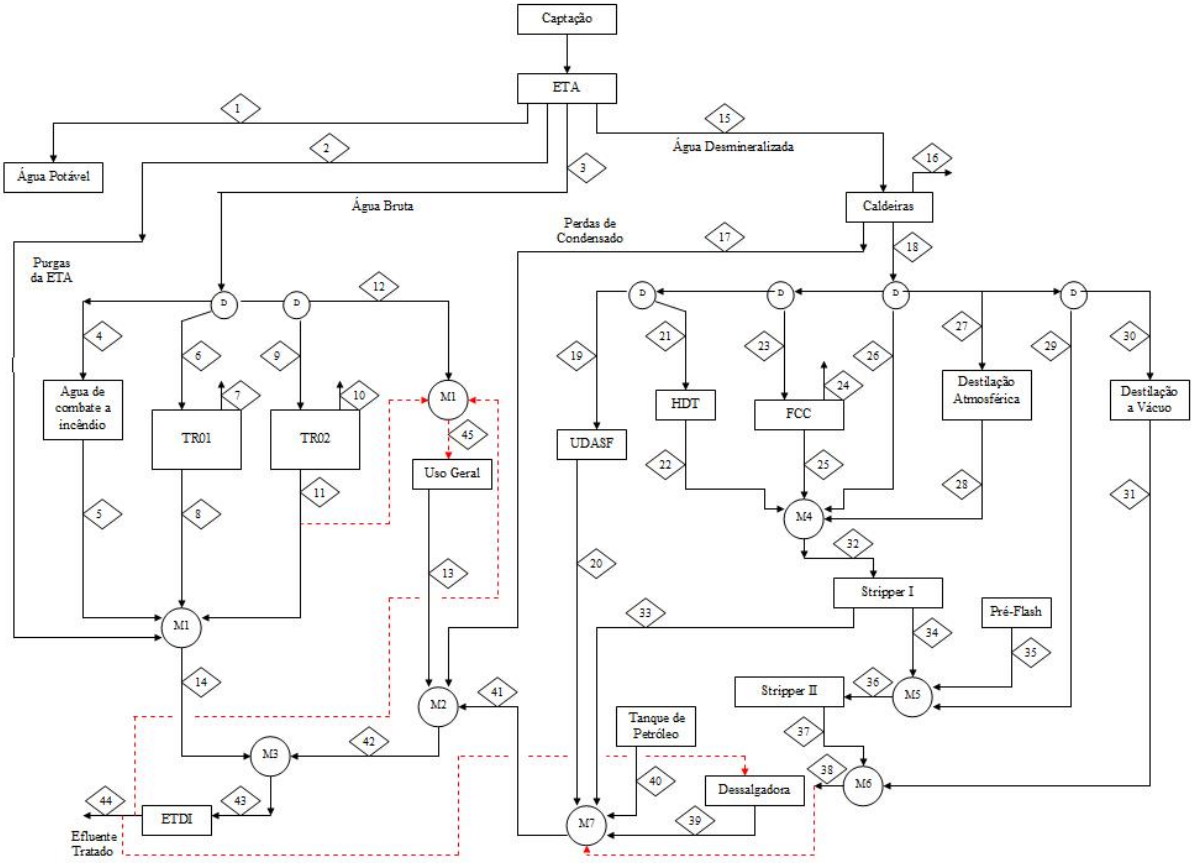


Figura D.17 – Diagrama de blocos do processo para flexibilização nas concentrações de entrada da TR – Cenário 11a: contaminante Sulfeto

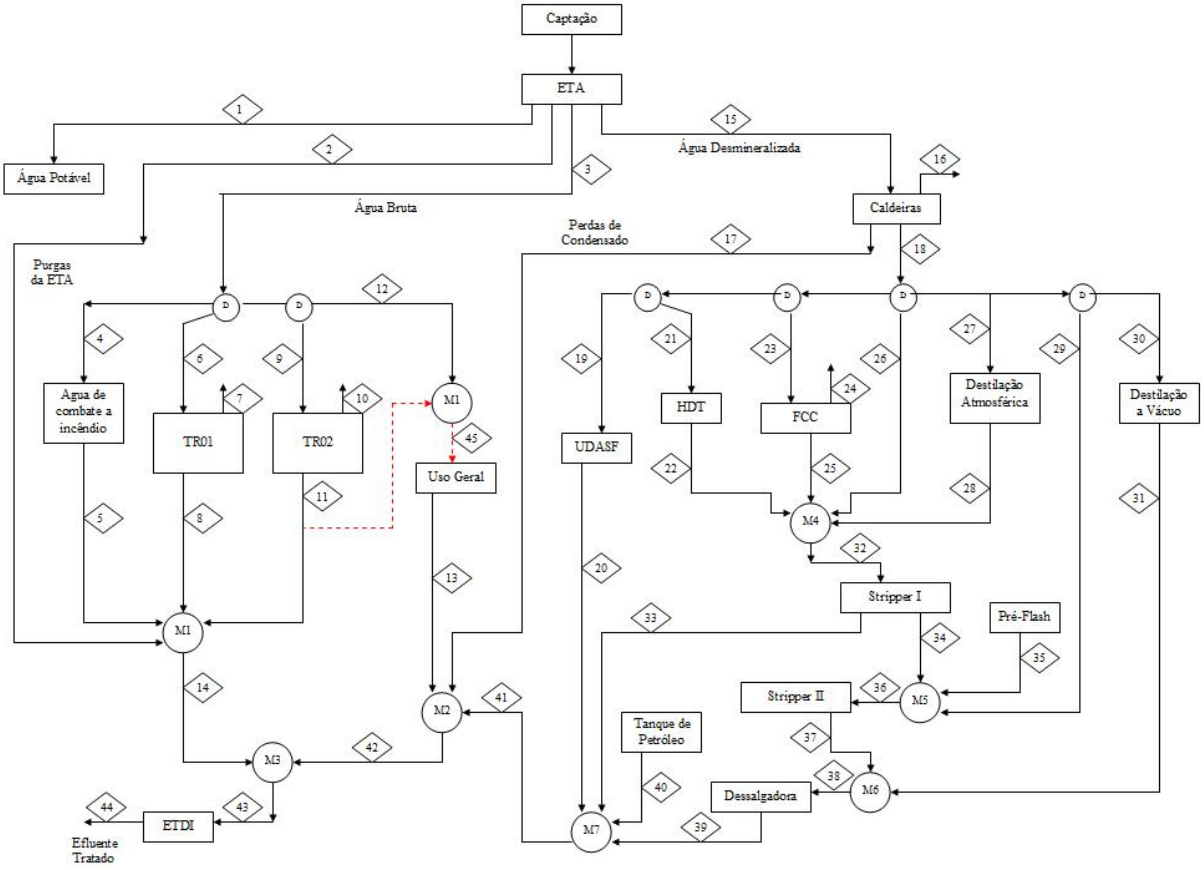


Figura D.18 – Diagrama de blocos do processo para flexibilização nas concentrações de entrada da TR – Cenário 11b: contaminante Sulfeto

Tabela D.15 – Balanço hídrico do processo para o cenário 11b

Número da corrente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nome da corrente	Água Potável	Purga da ETA	Água Bruta	Entrada (Pressurização) da água de combate a incêndios	Saída da água de combate a incêndios	Reposição da TR01	Perda da TR01	Purga da TR01	Reposição da TR02	Perda da TR02
Vazão (t/h)	21	13	478,1	100	100	42	37	5	325	285
pH	7,50	5,40	6,90	6,90	6,90	6,90		8,00	6,90	
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	14,8	8,6	8,6	8,6	8,6	55,90	55,90	8,6	66,22
Sílica	0	15,6	9,4	9,4	9,4	9,4	61,10	61,10	9,4	72,38
Amônia	0	0,36	0,07	0,07	50,07	0,07	0,57	0,57	0,07	0,57
Sulfeto	0	0,32	0,1	0,1	10,10	0,1	0,06	0,06	0,1	0,06
Cloreto	0	170	9,7	9,7	109,7	9,7	163,05	163,05	9,7	204,69
Cianeto	0	0	0	0	0	0	2,00	2,00	0	0,00
Fenol	0	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,13	0,13	0,05	0,06

Número da corrente	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Nome da corrente	Purga da TR02	Entrada (água bruta) para Uso Geral	Saída do Uso Geral	Junção (2 + 5 + 8 + parte 11)	Água Desmineralizada (Entrada da Caldeira)	Perda de vapor (Caldeira)	Perda de condensado (Caldeira)	Vapor de processo (Caldeira)	Entrada da UDASF	Saída da UDASF
Vazão (t/h)	40	11,1	50	119,1	264	64	70	130	6	6
pH	7,30	6,90	7,17	6,27	7,00		7,00	7,00	7,00	5,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	66,22	8,6	53,43	11,79	0	0	1	0	0	9,8
Sílica	72,38	9,4	58,40	12,83	0	0	1	0	0	4,6
Amônia	0,57	0,07	10,46	42,11	0	0	10	0	0	3,1
Sulfeto	0,06	0,1	1,07	8,52	0	0	10	0	0	6,3
Cloreto	204,69	9,7	261,40	119,40	0	0	10	0	0	3,7
Cianeto	0,00	0	0,00	0,08	0	0	0	0	0	0,1
Fenol	0,06	0,05	0,06	0,05	0	0	0	0	0	39,3

Tabela D.15 – Balanço hídrico do processo para o cenário 11b (continuação)

Número da corrente	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Nome da corrente	Entrada da HDT	Saída da HDT	Entrada da FCC	Perda de vapor (FCC)	Saída da FCC	Vapor de processo (para *Stripper* I)	Entrada da Destila-ção Atmosféri ca	Saída da Destilação Atmosférica	Vapor de processo (para *Stripper* II)	Entrada da Destilação a Vácuo
Vazão (t/h)	6	6	50	10	40	10	21	21	10	27
pH	7,00	7,70	7,00		8,90	7,00	7,00	6,90	7,00	7,00
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	10,7	0	0	8,4	0	0	4,1	0	0
Sílica	0	1,3	0	0	3,5	0	0	8,4	0	0
Amônia	0	7708	0	0	13300,4	0	0	191,2	0	0
Sulfeto	0	22838,3	0	0	10374,4	0	0	268,3	0	0
Cloreto	0	75,4	0	0	51,5	0	0	132,7	0	0
Cianeto	0	33,8	0	0	67,4	0	0	3,3	0	0
Fenol	0	54,7	0	0	193,2	0	0	113,8	0	0

Número da corrente	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Nome da corrente	Saída da Destilação a Vácuo (para a entrada da Dessalgadora)	Afluente da *Stripper* I	Excedente (saída) da *Stripper* I	Saída da *Stripper* I (para *stripper* II)	Saída do Vaso de Pré-flash	Afluente da *Stripper* II	Saída da *Stripper* II	Entrada da Dessalgadora (31+37)	Saída da Dessalga-dora	Dreno do Tanque de Petróleo
Vazão (t/h)	27	77	10	67	8	85	85	112	112	8
pH	6,80	7,31	10,31	10,31	7,50	7,83	5,83	5,94	5,94	7,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	8,6	6,32	6,32	6,32	3,6	5,32	5,32	6,11	51,11	225
Sílica	42,5	4,21	4,21	4,21	1,7	3,48	3,48	12,89	17,89	25
Amônia	144,1	7562,07	831,83	831,83	774	728,52	269,55	239,31	95,72	68,8
Sulfeto	140,7	7242,08	14,48	14,48	1092,2	114,21	0,34	34,18	3,42	970,82
Cloreto	75,4	68,82	68,82	68,82	28,6	56,94	56,94	61,39	1361,39	6500
Cianeto	1,8	38,55	0,27	0,27	41,1	4,08	2,04	1,98	3,98	36,512
Fenol	23,6	135,66	108,53	108,53	44,8	89,76	89,76	73,81	7,38	39,8

Tabela D.15 – Balanço hídrico do processo para o cenário 11b (continuação)

Número da corrente	41	42	43	44	45
Nome da corrente	Junção (20 +33+39+40)	Junção (13+17+41)	Junção (14+42) / Entrada da ETDI	Saída da ETDI	Entrada para Uso Geral
Vazão (t/h)	136	256	375,1	375,1	50
pH	5,96	6,21	6,22	6,22	7,17
Concentração (mg/L)					
Cálcio	56,22	40,58	31,44	81,44	53,43
Sílica	16,71	20,56	18,10	18,10	58,40
Amônia	144,18	81,37	68,91	1,72	0,46
Sulfeto	61,26	35,49	26,93	0,27	0,07
Cloreto	1508,72	855,30	621,64	62,16	161,40
Cianeto	5,45	2,90	2,00	0,20	0,00
Fenol	18,13	9,64	6,60	0,33	0,06

Cenário 12

Dados de Entrada 12a

DFA 12a

Fluxograma 12a

Fluxograma 12b

Balanço 12b

Tabela D.16 – Dados de entrada para a aplicação do DFA (componente Cloreto)

Operação	Vazão (t/h)	Cin (mg/L)	Cout (mg/L)	Δm (g/h)
OP1 (TR01)	42,00	11,64	175,66	6888,84
OP2 (TR02)	325,00	11,64	219,63	67596,75
OP3 (Purga da ETA)	13,00	170,00	170,00	0,00
OP4 (Uso Geral)	50,00	9,70	109,70	5000,00
OP5 (Udasf)	6,00	0,00	3,70	22,20
OP6 (Destilação Atmosférica)	21,00	0,00	132,70	2786,70
OP7 (Destilação a Vácuo)	27,00	0,00	75,40	2035,80
OP8 (Stripper I)	10,00	68,82	68,82	0,00
OP9 (Stripper II)	85,00	56,94	56,94	0,00
OP10 (Dessalgadora)	112,00	61,39	1361,39	145600,00
OP11 (Fonte Dessalgadora)	112,00	0,00	61,39	6875,68
OP12 (Pré-Flash)	8,00	0,00	28,60	228,80
OP13 (Tanque de Petróleo)	8,00	0,00	6500,00	52000,00
OP14 (ETDI)	414,00	56,57	56,57	0,00
Fonte externa				
1 – Água Desmineralizada	264,00	0,00		
2 – Água Bruta	517,00	9,70		

Figura D.19 – Diagrama de fontes de água para o caso de flexibilização nas concentrações de entrada da TR. Cenário 12a: contaminante Cloreto

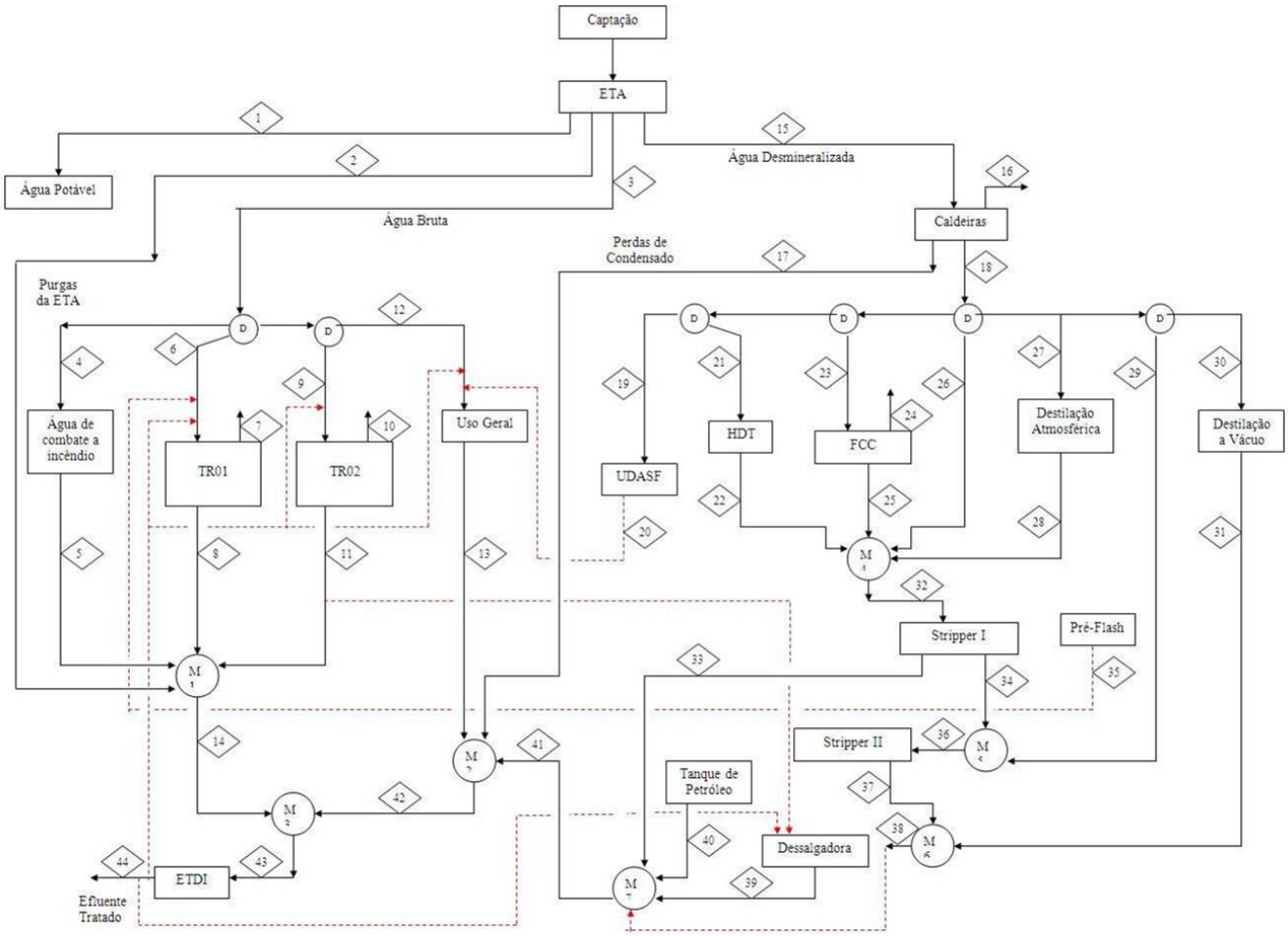


Figura D.20 – Diagrama de blocos do processo para flexibilização nas concentrações de entrada da TR – Cenário 12a: contaminante Cloreto

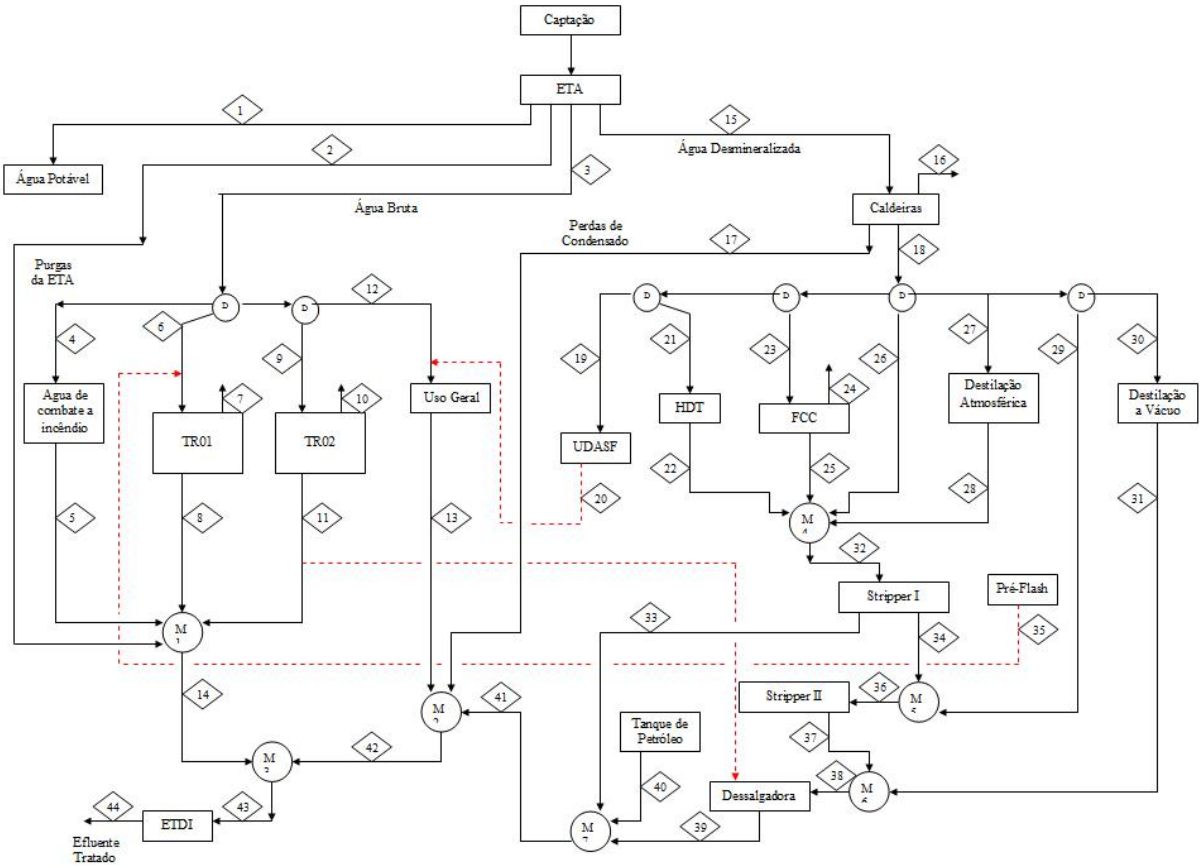


Figura D.21 – Diagrama de blocos do processo para flexibilização nas concentrações de entrada da TR – Cenário 12b: contaminante Cloreto

Tabela D.17 – Balanço hídrico do processo para o cenário 12b

Número da corrente	1	2	3	4	5	6’	7	8	9	10
Nome da corrente	Água Potável	Purga da ETA	Água Bruta	Entrada (Pressurização) da água de combate a incêndios	Saída da água de combate a incêndios	Reposição da TR01	Perda da TR01	Purga da TR01	Reposição da TR02	Perda da TR02
Vazão (t/h)	21	13	503	100	100	34	37	5	325	285
pH	7,50	5,40	6,90	6,90	6,90	6,90		8,07	6,90	
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	14,8	8,6	8,6	8,6	8,6	49,71	49,71	8,6	66,22
Sílica	0	15,6	9,4	9,4	9,4	9,4	51,57	51,57	9,4	72,38
Amônia	0	0,36	0,07	0,07	50,07	0,07	147,99	147,99	0,07	0,57
Sulfeto	0	0,32	0,1	0,1	10,10	0,1	13,58	13,58	0,1	0,06
Cloreto	0	170	9,7	9,7	109,7	9,7	186,45	186,45	9,7	204,69
Cianeto	0	0	0	0	0	0	9,83	9,83	0	0,00
Fenol	0	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	22,29	22,29	0,05	0,06

Número da corrente	11	12’	13	14	15	16	17	18	19	20
Nome da corrente	Purga da TR02	Entrada para Uso Geral	Saída do Uso Geral	Junção (2 + 5 + 8 + parte 11)	Água Desmineralizada (Entrada da Caldeira)	Perda de vapor (Caldeira)	Perda de condensado (Caldeira)	Vapor de processo (Caldeira)	Entrada da UDASF	Saída da UDASF
Vazão (t/h)	40	44	50	154,69	264	64	70	130	6	6
pH	7,30	6,90	6,31	6,37	7,00		7,00	7,00	7,00	5,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	66,22	8,6	8,74	24,12	0	0	1	0	0	9,8
Sílica	72,38	9,4	8,824	26,22	0	0	1	0	0	4,6
Amônia	0,57	0,07	10,4336	37,32	0	0	10	0	0	3,1
Sulfeto	0,06	0,1	1,844	7,01	0	0	10	0	0	6,3
Cloreto	204,69	9,7	108,98	139,78	0	0	10	0	0	3,7
Cianeto	0,00	0	0,012	0,32	0	0	0	0	0	0,1
Fenol	0,06	0,05	4,76	0,77	0	0	0	0	0	39,3

Tabela D.17 – Balanço hídrico do processo para o cenário 12b (continuação)

Número da corrente	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Nome da corrente	Entrada da HDT	Saída da HDT	Entrada da FCC	Perda de vapor (FCC)	Saída da FCC	Vapor de processo (para *Stripper* I)	Entrada da Destila-ção Atmosféri ca	Saída da Destilação Atmosférica	Vapor de processo (para *Stripper* II)	Entrada da Destilação a Vácuo
Vazão (t/h)	6	6	50	10	40	10	21	21	10	27
pH	7,00	7,70	7,00		8,90	7,00	7,00	6,90	7,00	7,00
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	10,7	0	0	8,4	0	0	4,1	0	0
Sílica	0	1,3	0	0	3,5	0	0	8,4	0	0
Amônia	0	7708	0	0	13300,4	0	0	191,2	0	0
Sulfeto	0	22838,3	0	0	10374,4	0	0	268,3	0	0
Cloreto	0	75,4	0	0	51,5	0	0	132,7	0	0
Cianeto	0	33,8	0	0	67,4	0	0	3,3	0	0
Fenol	0	54,7	0	0	193,2	0	0	113,8	0	0

Número da corrente	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Nome da corrente	Saída da Destilação a Vácuo (para a entrada da Dessalgadora)	Afluente da *Stripper* I	Excedente (saída) da *Stripper* I	Saída da *Stripper* I (para *stripper* II)	Saída do Vaso de Pré-flash para reúso	Afluente da *Stripper* II	Saída da *Stripper* II	Entrada da Dessalgadora (31+37+parte 11)	Saída da Dessalga-dora	Dreno do Tanque de Petróleo
Vazão (t/h)	27	77	10	67	8	77	77	107,31	107,31	8
pH	6,80	7,31	10,31	10,31	7,50	7,89	5,89	6,01	6,01	7,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	8,6	6,32	6,32	6,32	3,6	5,50	5,50	8,15	53,15	225
Sílica	42,5	4,21	4,21	4,21	1,7	3,66	3,66	15,55	20,55	25
Amônia	144,1	7562,07	831,83	831,83	774	723,80	267,81	228,44	91,37	68,8
Sulfeto	140,7	7242,08	14,48	14,48	1092,2	12,60	0,04	35,43	3,54	970,82
Cloreto	75,4	68,82	68,82	68,82	28,6	59,88	59,88	68,25	1368,25	6500
Cianeto	1,8	38,55	0,27	0,27	41,1	0,23	0,12	0,54	2,54	36,512
Fenol	23,6	135,66	108,53	108,53	44,8	94,44	94,44	73,70	7,37	39,8

Tabela D.17 – Balanço hídrico do processo para o cenário 12b (continuação)

Número da corrente	41	42	43	44	6	12
Nome da corrente	Junção (33+39+40)	Junção (13+17+41)	Junção (14+42) / Entrada da ETDI	Saída da ETDI	Reposição da TR01 com reúso	Entrada para Uso Geral com reúso
Vazão (t/h)	125,31	245,31	400	400	42	50
pH	6,08	6,25	6,30	6,30	6,97	6,31
Concentração (mg/L)						
Cálcio	60,38	32,91	29,51	79,51	7,65	8,74
Sílica	19,53	12,06	17,54	17,54	7,93	8,824
Amônia	149,02	81,10	64,17	1,60	147,49	0,4336
Sulfeto	66,17	37,03	25,42	0,25	208,12	0,844
Cloreto	1592,17	838,39	568,22	56,82	13,30	8,98
Cianeto	4,53	2,31	1,54	0,15	7,83	0,012
Fenol	17,51	9,92	6,38	0,32	8,57	4,76

Cenário 13

Dados de Entrada 13a

DFA 13a

Fluxograma 13a

Fluxograma 13b

Balanço 13b

Tabela D.18 – Dados de entrada para a aplicação do DFA (componente Fenol)

Operação	Vazão (t/h)	Cin (mg/L)	Cout (mg/L)	Δm (g/h)
OP1 (TR01)	42,00	0,06	0,16	4,20
OP2 (TR02)	325,00	0,06	0,07	3,25
OP3 (Purga da ETA)	13,00	0,06	0,06	0,00
OP4 (Uso Geral)	50,00	0,05	0,05	0,00
OP5 (Udasf)	6,00	0,00	39,30	235,80
OP6 (Destilação Atmosférica)	21,00	0,00	113,80	2389,80
OP7 (Destilação a Vácuo)	27,00	0,00	23,60	637,20
OP8 (Stripper I)	10,00	108,53	108,53	0,00
OP9 (Stripper II)	85,00	89,76	89,76	0,00
OP10 (Dessalgadora)	112,00	73,81	10000	1111733,28
OP11 (Fonte Dessalgadora)	112,00	0,00	73,81	8266,72
OP12 (Pré-Flash)	8,00	0,00	44,80	358,40
OP13 (Tanque de Petróleo)	8,00	0,00	39,80	318,40
OP14 (ETDI)	414,00	0,30	0,30	0,00
OP15 (Dessalgadora Reúso)	112,00	0,00	7,38	826,56
Fonte externa				
1 – Água Desmineralizada	264,00	0,00		
2 – Água Bruta	517,00	0,05		

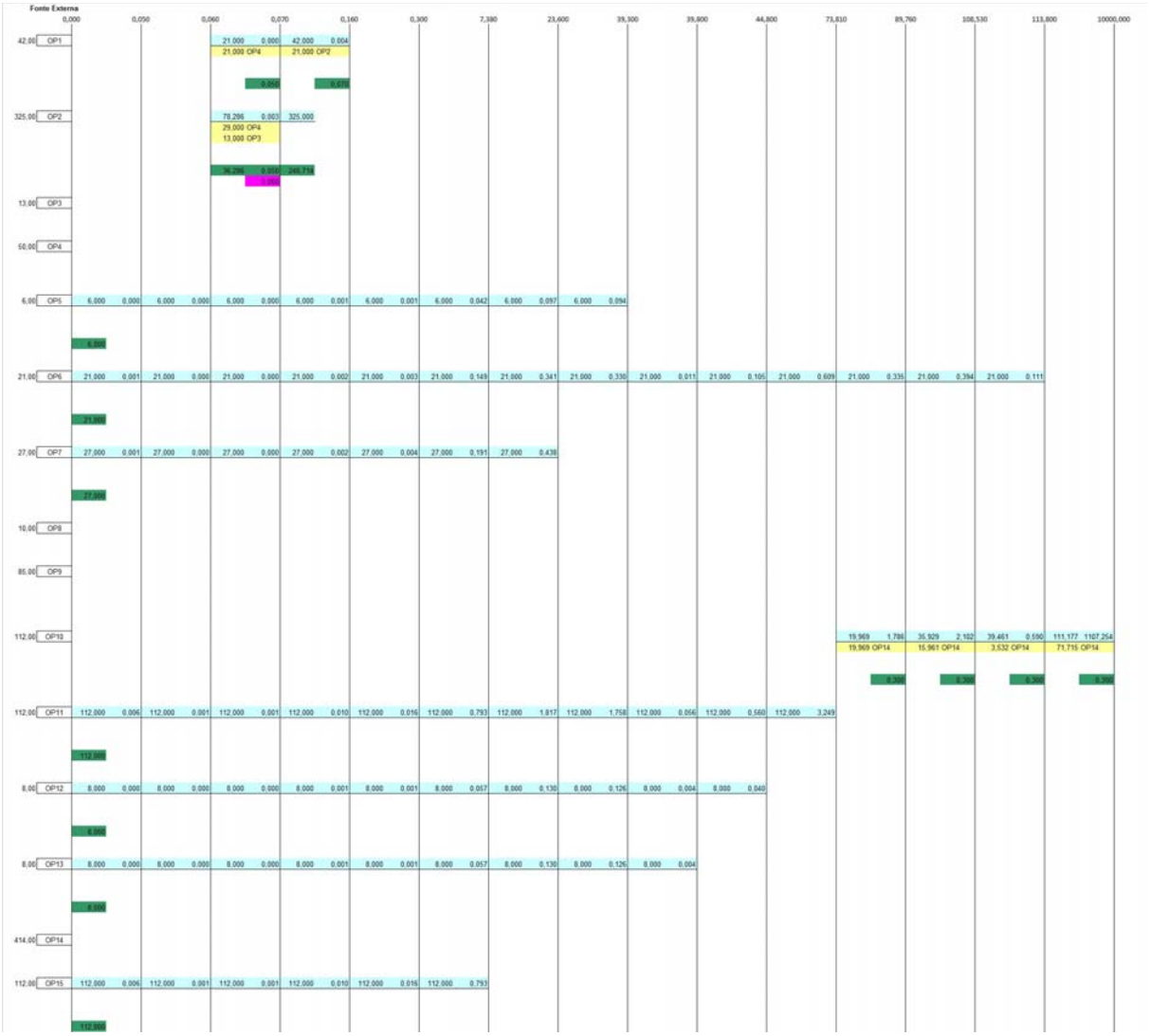


Figura D.22 – Diagrama de fontes de água para o caso de flexibilização nas concentrações de entrada da TR. Cenário 13a: contaminante Fenol

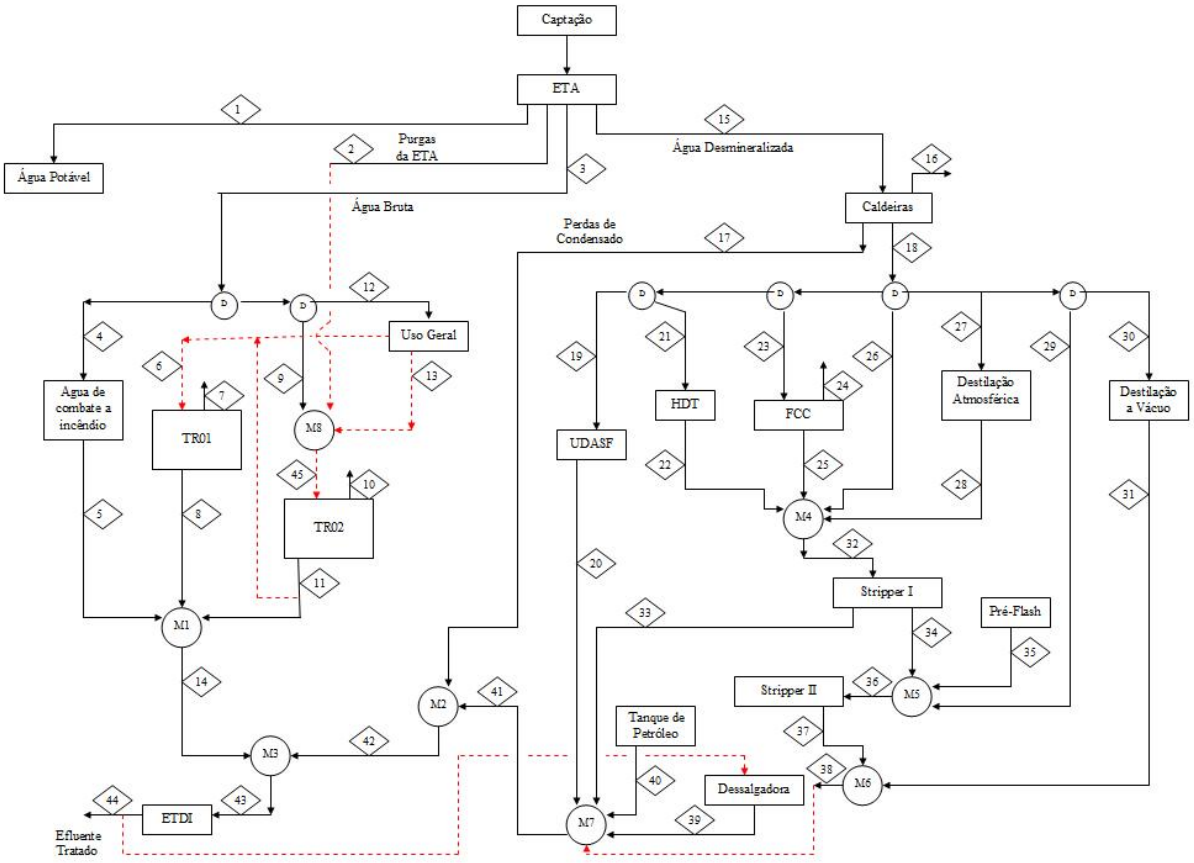


Figura D.23 – Diagrama de blocos do processo para flexibilização nas concentrações de entrada da TR – Cenário 13a: contaminante Fenol

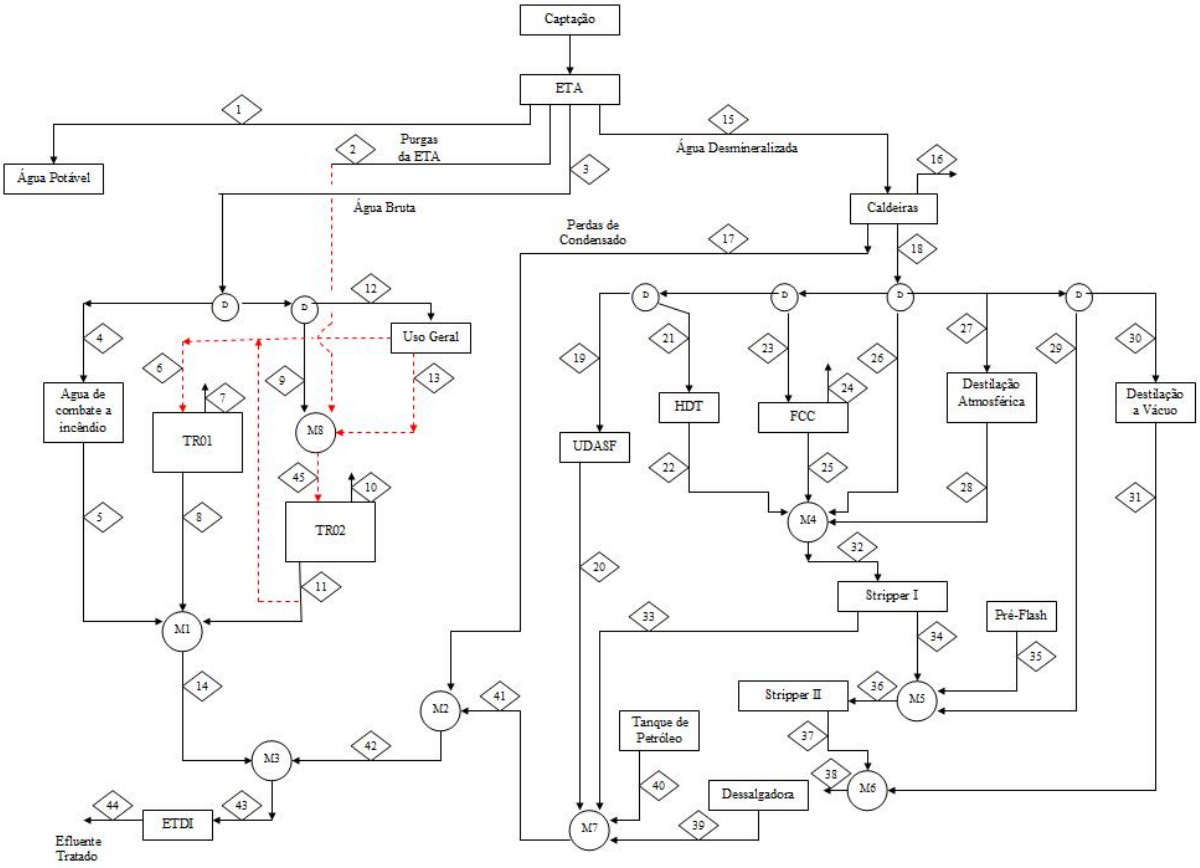


Figura D.24 – Diagrama de blocos do processo para flexibilização nas concentrações de entrada da TR – Cenário 13b: contaminante Fenol

Tabela D.19 – Balanço hídrico do processo para o cenário 13b

Número da corrente	1	2	3	4	5	6’	7	8	9	10
Nome da corrente	Água Potável	Purga da ETA	Água Bruta	Entrada (Pressurização) da água de combate a incêndios	Saída da água de combate a incêndios	Reposição da TR01	Perda da TR01	Purga da TR01	Reposição (água bruta) para a TR02	Perda da TR02
Vazão (t/h)	21	13	433	100	100	42	37	5	283	285
pH	7,50	5,40	6,90	6,90	6,90	6,93	8,03	8,03	6,90	
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	14,8	8,6	8,6	8,6	38,36	38,36	38,36	8,6	68,13
Sílica	0	15,6	9,4	9,4	9,4	41,84	41,84	41,84	9,4	74,29
Amônia	0	0,36	0,07	0,07	50,07	5,77	5,77	5,77	0,07	1,47
Sulfeto	0	0,32	0,1	0,1	10,10	0,58	0,58	0,58	0,1	0,07
Cloreto	0	170	9,7	9,7	109,7	216,24	216,24	216,24	9,7	322,77
Cianeto	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0	0,00
Fenol	0	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06

Número da corrente	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Nome da corrente	Purga da TR02	Entrada para Uso Geral	Saída do Uso Geral (para entrada no M8)	Junção (5 + 8 + parte 11)	Água Desmineralizada (Entrada da Caldeira)	Perda de vapor (Caldeira)	Perda de condensado (Caldeira)	Vapor de processo (Caldeira)	Entrada da UDASF	Saída da UDASF para TR01
Vazão (t/h)	40	50	29	124	264	64	70	130	6	6
pH	6,95	6,90	6,90	6,92	7,00		7,00	7,00	7,00	5,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	68,13	8,6	8,6	18,92	0	0	1	0	0	9,8
Sílica	74,29	9,4	9,4	20,65	0	0	1	0	0	4,6
Amônia	1,47	0,07	10,07	40,84	0	0	10	0	0	3,1
Sulfeto	0,07	0,1	1,1	8,18	0	0	10	0	0	6,3
Cloreto	322,77	9,7	109,7	146,64	0	0	10	0	0	3,7
Cianeto	0,00	0	0	0,00	0	0	0	0	0	0,1
Fenol	0,06	0,05	0,05	0,05	0	0	0	0	0	39,3

Tabela D.19 – Balanço hídrico do processo para o cenário 13b (continuação)

Número da corrente	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Nome da corrente	Entrada da HDT	Saída da HDT	Entrada da FCC	Perda de vapor (FCC)	Saída da FCC	Vapor de processo (para *Stripper* I)	Entrada da Destila-ção Atmosféri ca	Saída da Destilação Atmosférica	Vapor de processo (para *Stripper* II)	Entrada da Destilação a Vácuo
Vazão (t/h)	6	6	50	10	40	10	21	21	10	27
pH	7,00	7,70	7,00		8,90	7,00	7,00	6,90	7,00	7,00
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	10,7	0	0	8,4	0	0	4,1	0	0
Sílica	0	1,3	0	0	3,5	0	0	8,4	0	0
Amônia	0	7708	0	0	13300,4	0	0	191,2	0	0
Sulfeto	0	22838,3	0	0	10374,4	0	0	268,3	0	0
Cloreto	0	75,4	0	0	51,5	0	0	132,7	0	0
Cianeto	0	33,8	0	0	67,4	0	0	3,3	0	0
Fenol	0	54,7	0	0	193,2	0	0	113,8	0	0

Número da corrente	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Nome da corrente	Saída da Destilação a Vácuo (para a entrada da Dessalgadora)	Afluente da *Stripper* I	Excedente (saída) da *Stripper* I	Saída da *Stripper* I (para *stripper* II)	Saída do Vaso de Pré-flash	Afluente da *Stripper* II	Saída da *Stripper* II	Entrada da Dessalgadora (31+37)	Saída da Dessalga-dora	Dreno do Tanque de Petróleo
Vazão (t/h)	27	77	10	67	8	85	85	112	112	8
pH	6,80	7,31	10,31	10,31	7,50	7,83	5,83	5,94	5,94	7,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	8,6	6,32	6,32	6,32	3,6	5,32	5,32	6,11	51,11	225
Sílica	42,5	4,21	4,21	4,21	1,7	3,48	3,48	12,89	17,89	25
Amônia	144,1	7562,07	831,83	831,83	774	728,52	269,55	239,31	95,72	68,8
Sulfeto	140,7	7242,08	14,48	14,48	1092,2	114,21	0,34	34,18	3,42	970,82
Cloreto	75,4	68,82	68,82	68,82	28,6	56,94	56,94	61,39	1361,39	6500
Cianeto	1,8	38,55	0,27	0,27	41,1	4,08	2,04	1,98	3,98	36,512
Fenol	23,6	135,66	108,53	108,53	44,8	89,76	89,76	73,81	7,38	39,8

Tabela D.19 – Balanço hídrico do processo para o cenário 13b (continuação)

Número da corrente	41	42	43	44	45
Nome da corrente	Junção (20+33+39+40)	Junção (17+41)	Junção (14+42) / Entrada da ETDI	Saída da ETDI	Reposição da TR02 / Junção (2+9+13)
Vazão (t/h)	136	206	330	330	325
pH	5,96	6,12	6,29	6,29	6,55
Concentração (mg/L)					
Cálcio	56,22	37,46	30,49	80,49	8,85
Sílica	16,71	11,37	14,86	14,86	9,65
Amônia	144,18	98,58	76,89	1,92	0,97
Sulfeto	61,26	43,84	30,44	0,30	0,20
Cloreto	1508,72	999,45	679,00	67,90	25,04
Cianeto	5,45	3,60	2,25	0,22	0,00
Fenol	18,13	11,97	7,49	0,37	0,05

Cenário 14

Dados de Entrada 14a

DFA 14a

Fluxograma 14a

Fluxograma 14b

Balanço 14b

Tabela D.20 – Dados de entrada para a aplicação do DFA (componente Cálcio)

Operação	Vazão (t/h)	Cin (mg/L)	Cout (mg/L)	Δm (g/h)
OP1 (TR01)	42,00	21,17	137,61	4890,48
OP2 (TR02)	325,00	17,81	137,14	38782,25
OP3 (Purga da ETA)	13,00	14,80	14,80	0,00
OP4 (Uso Geral)	50,00	8,60	8,60	0,00
OP5 (Udasf)	6,00	0,00	9,80	58,80
OP6 (Destilação Atmosférica)	21,00	0,00	4,10	86,10
OP7 (Destilação a Vácuo)	27,00	0,00	8,60	232,20
OP8 (Stripper I)	10,00	6,32	6,32	0,00
OP9 (Stripper II)	85,00	5,32	5,32	0,00
OP10 (Dessalgadora)	112,00	6,11	51,11	5040,00
OP11 (Fonte Dessalgadora)	112,00	0,00	6,11	684,32
OP12 (Pré-Flash)	8,00	0,00	3,60	28,80
OP13 (Tanque de Petróleo)	8,00	0,00	225,00	1800,00
OP14 (ETDI)	414,00	37,13	87,13	20700,00
Fonte externa				
1 – Água Desmineralizada	264,00	0,00		
2 – Água Bruta	517,00	8,60		

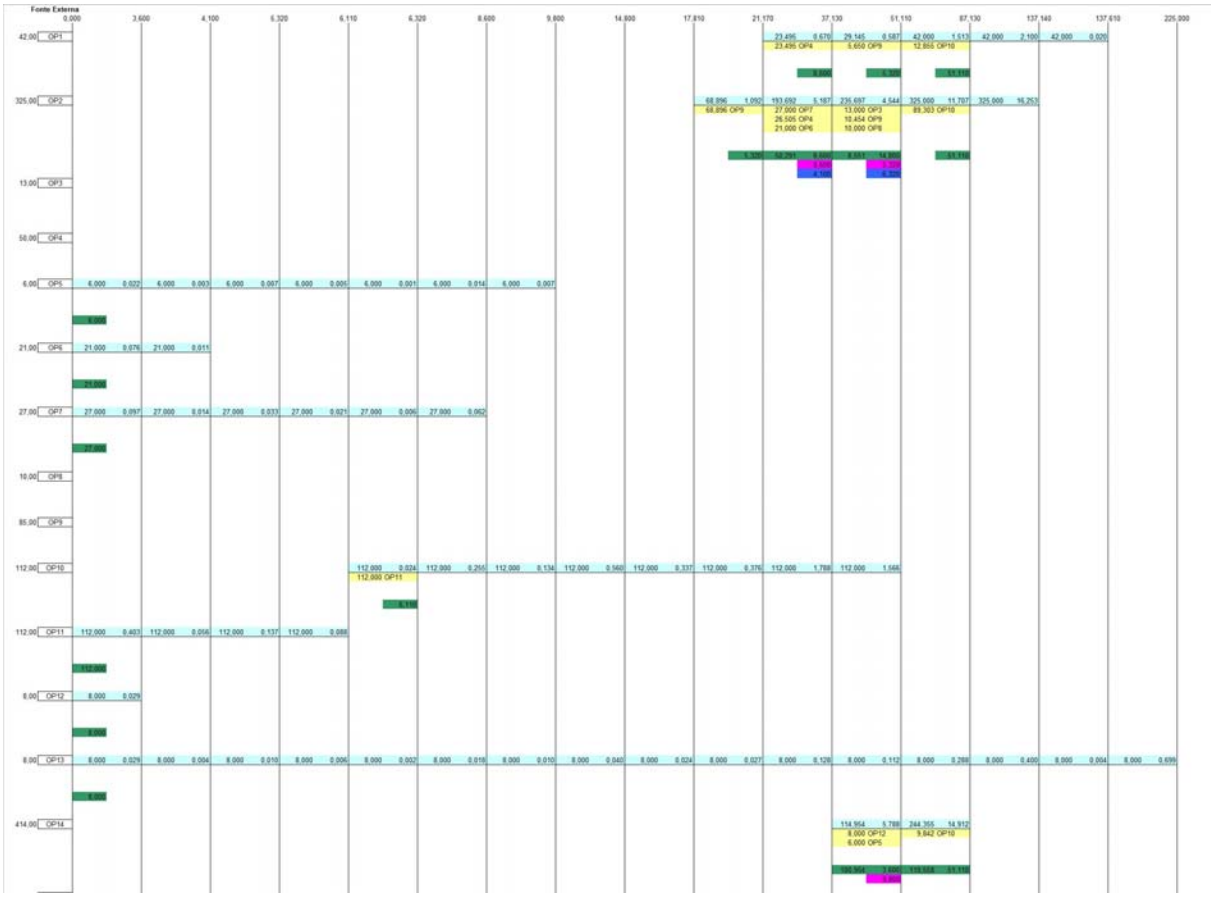


Figura D.25 – Diagrama de fontes de água para limite de 16 ciclos de concentração da TR – Cenário 14: contaminante Cálcio

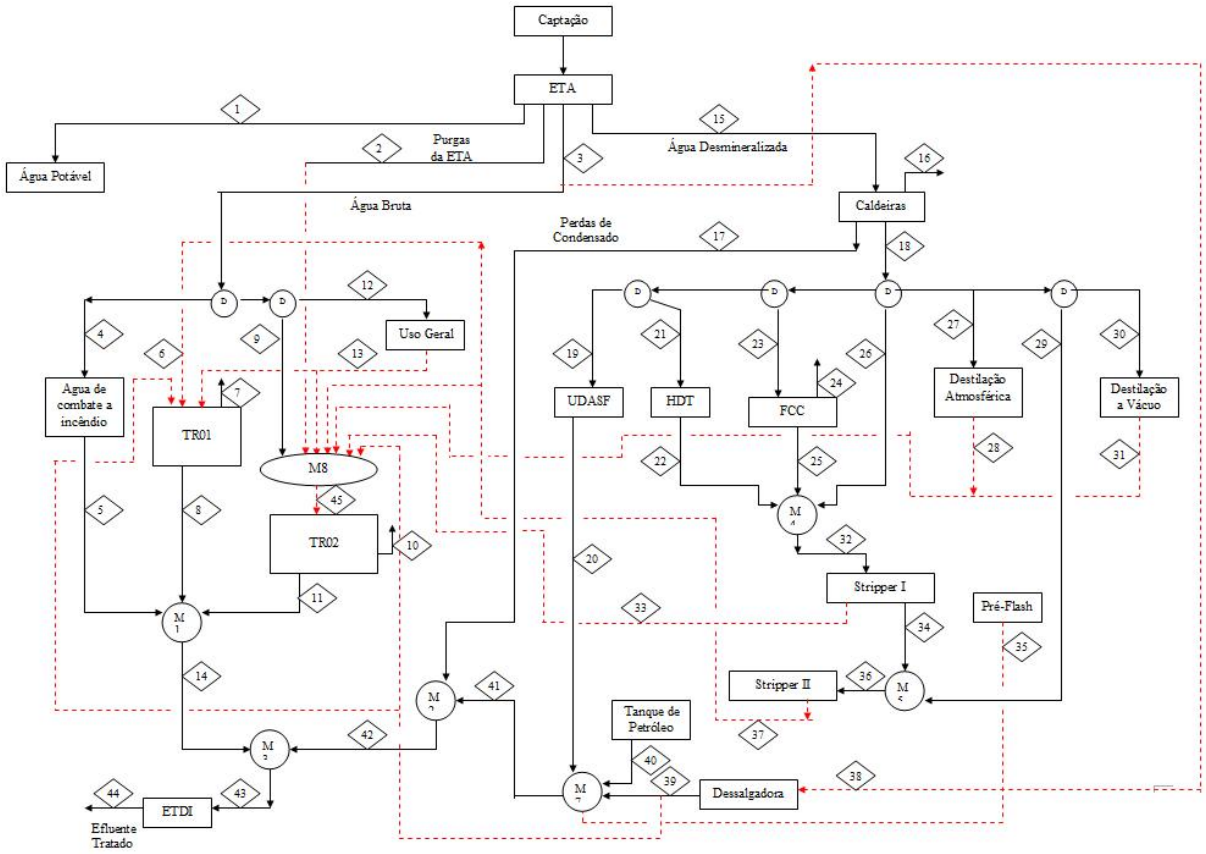


Figura D.26 – Diagrama de blocos do processo para limite de 16 ciclos de concentração da TR – Cenário 14: contaminante Cálcio

Tabela D.21 – Balanço hídrico do processo para o cenário 14

Número da corrente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nome da corrente	Água Potável	Purga da ETA	Água Bruta	Entrada (Pressurização) da água de combate a incêndios	Saída da água de combate a incêndios	Reposição da TR01	Perda da TR01	Purga da TR01	Reposição (água bruta) para a TR02	Perda da TR02
Vazão (t/h)	21	13	320,84	100	100					
pH	7,50	5,40	6,90	6,90	6,90	42	37	5	58,84	285
Concentração (mg/L)						6,40		7,50	6,90	
Cálcio	0	14,8	8,6	8,6	8,6					
Sílica	0	15,6	9,4	9,4	9,4	21,77	141,52	141,52	8,6	56,62
Amônia	0	0,36	0,07	0,07	50,07	9,87	64,15	64,15	9,4	78,37
Sulfeto	0	0,32	0,1	0,1	10,10	38,05	38,55	38,55	0,07	109,94
Cloreto	0	170	9,7	9,7	109,7	0,62	0,09	0,09	0,1	2,33
Cianeto	0	0	0	0	0	465,83	3127,90	3127,90	9,7	455,64
Fenol	0	0,06	0,05	0,05	0,05	0,63	2,63	2,63	0	0,40

Número da corrente	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Nome da corrente	Purga da TR02	Entrada para Uso Geral	Saída do Uso Geral	Junção (5 + 8 + 11)	Água Desmineralizada (Entrada da Caldeira)	Perda de vapor (Caldeira)	Perda de condensado (Caldeira)	Vapor de processo (Caldeira)	Entrada da UDASF	Saída da UDASF
Vazão (t/h)	40	50	50	145	322,87	78,26	85,61	159	6	6
pH	6,52	6,90	6,90	6,76	7,00		7,00	7,00	7,00	5,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	56,62	8,6	8,6	26,43	0	0	1	0	0	9,8
Sílica	78,37	9,4	9,4	30,31	0	0	1	0	0	4,6
Amônia	109,94	0,07	10,07	66,19	0	0	10	0	0	3,1
Sulfeto	2,33	0,1	1,1	7,61	0	0	10	0	0	6,3
Cloreto	455,64	9,7	109,7	309,21	0	0	10	0	0	3,7
Cianeto	0,40	0	0	0,20	0	0	0	0	0	0,1
Fenol	32,37	0,05	0,05	9,76	0	0	0	0	0	39,3

Tabela D.21 – Balanço hídrico do processo para o cenário 14 (continuação)

Número da corrente	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Nome da corrente	Entrada da HDT	Saída da HDT	Entrada da FCC	Perda de vapor (FCC)	Saída da FCC	Vapor de processo (para *Stripper* I)	Entrada da Destila-ção Atmosféri ca	Saída da Destilação Atmosférica	Vapor de processo (para *Stripper* II)	Entrada da Destilação a Vácuo
Vazão (t/h)	6	6	50	10	40	31	21	21	18	27
pH	7,00	7,70	7,00		8,90	7,00	7,00	6,90	7,00	7,00
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	10,7	0	0	8,4	0	0	4,1	0	0
Sílica	0	1,3	0	0	3,5	0	0	8,4	0	0
Amônia	0	7708	0	0	13300,4	0	0	191,2	0	0
Sulfeto	0	22838,3	0	0	10374,4	0	0	268,3	0	0
Cloreto	0	75,4	0	0	51,5	0	0	132,7	0	0
Cianeto	0	33,8	0	0	67,4	0	0	3,3	0	0
Fenol	0	54,7	0	0	193,2	0	0	113,8	0	0

Número da corrente	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Nome da corrente	Saída da Destilação a Vácuo	Afluente da *Stripper* I (Junção 22+25+ 26)	Excedente (saída) da *Stripper* I	Saída da *Stripper* I (para *stripper* II)	Saída do Vaso de Pré-flash	Afluente da *Stripper* II (Junção 29+34)	Saída da *Stripper* II	Entrada da Dessalgadora	Saída da Dessalga-dora	Dreno do Tanque de Petróleo
Vazão (t/h)	27	77	10	67	8	85	85	112	112	8
pH	6,80	7,37	10,37	10,37	7,50	7,67	5,67	6,90	6,90	7,50
Concentração (mg/L)	8,6	5,20	5,20	5,20	3,6	4,10	4,10	8,60	53,60	
Cálcio	42,5	1,92	1,92	1,92	1,7	1,51	1,51	9,40	14,40	225
Sílica	144,1	7509,92	826,09	826,09	774	651,15	240,93	0,07	0,03	25
Amônia	140,7	7168,91	14,34	14,34	1092,2	11,30	0,03	0,10	0,01	68,8
Sulfeto	75,4	32,63	32,63	32,63	28,6	25,72	25,72	9,70	1309,70	970,82
Cloreto	1,8	37,65	0,26	0,26	41,1	0,21	0,10	0,00	2,00	6500
Cianeto	23,6	104,63	83,70	83,70	44,8	65,98	65,98	0,05	0,01	36,512
Fenol	8,6	5,20	5,20	5,20	3,6	4,10	4,10	8,60	53,60	39,8

Tabela D.21 – Balanço hídrico do processo para o cenário 14 (continuação)

Número da corrente	41	42	43	44	45
Nome da corrente	Junção (20+35+parte 39+40)	Junção (17+41)	Junção (14+42) / Entrada da ETDI	Saída da ETDI	Reposição da TR02
Vazão (t/h)	31,84	117,45	262,45	262,45	325
pH	6,19	6,60	6,68	6,68	6,12
Concentração (mg/L)					
Cálcio	72,26	20,32	23,69	73,69	7,35
Sílica	11,61	3,88	18,48	18,48	10,18
Amônia	199,12	61,27	63,99	1,60	109,44
Sulfeto	487,14	139,35	66,57	0,67	29,62
Cloreto	1943,28	534,10	409,85	40,99	42,29
Cianeto	18,92	5,13	2,41	0,24	0,40
Fenol	27,34	7,41	8,71	0,44	28,03

Cenário 15

Dados de Entrada 15a

DFA 15a

Fluxograma 15a

Fluxograma 15b

Balanço 15b

Tabela D.22 – Dados de entrada para a aplicação do DFA (componente Sílica)

Operação	Vazão (t/h)	Cin (mg/L)	Cout (mg/L)	Δm (g/h)
OP1 (TR01)	42,00	23,14	150,41	5345,34
OP2 (TR02)	325,00	23,14	178,18	50388,00
OP3 (Purga da ETA)	13,00	15,60	15,60	0,00
OP4 (Uso Geral)	50,00	9,40	9,40	0,00
OP5 (Udasf)	6,00	0,00	4,60	27,60
OP6 (Destilação Atmosférica)	21,00	0,00	8,40	176,40
OP7 (Destilação a Vácuo)	27,00	0,00	42,50	1147,50
OP8 (Stripper I)	10,00	4,21	4,21	0,00
OP9 (Stripper II)	85,00	3,48	3,48	0,00
OP10 (Dessalgadora)	112,00	12,89	17,89	560,00
OP11 (Fonte Dessalgadora)	112,00	0,00	12,89	1443,68
OP12 (Pré-Flash)	8,00	0,00	1,70	13,60
OP13 (Tanque de Petróleo)	8,00	0,00	25,00	200,00
OP14 (ETDI)	414,00	28,59	28,59	0,00
Fonte externa				
1 – Água Desmineralizada	264,00	0,00		
2 – Água Bruta	517,00	9,40		

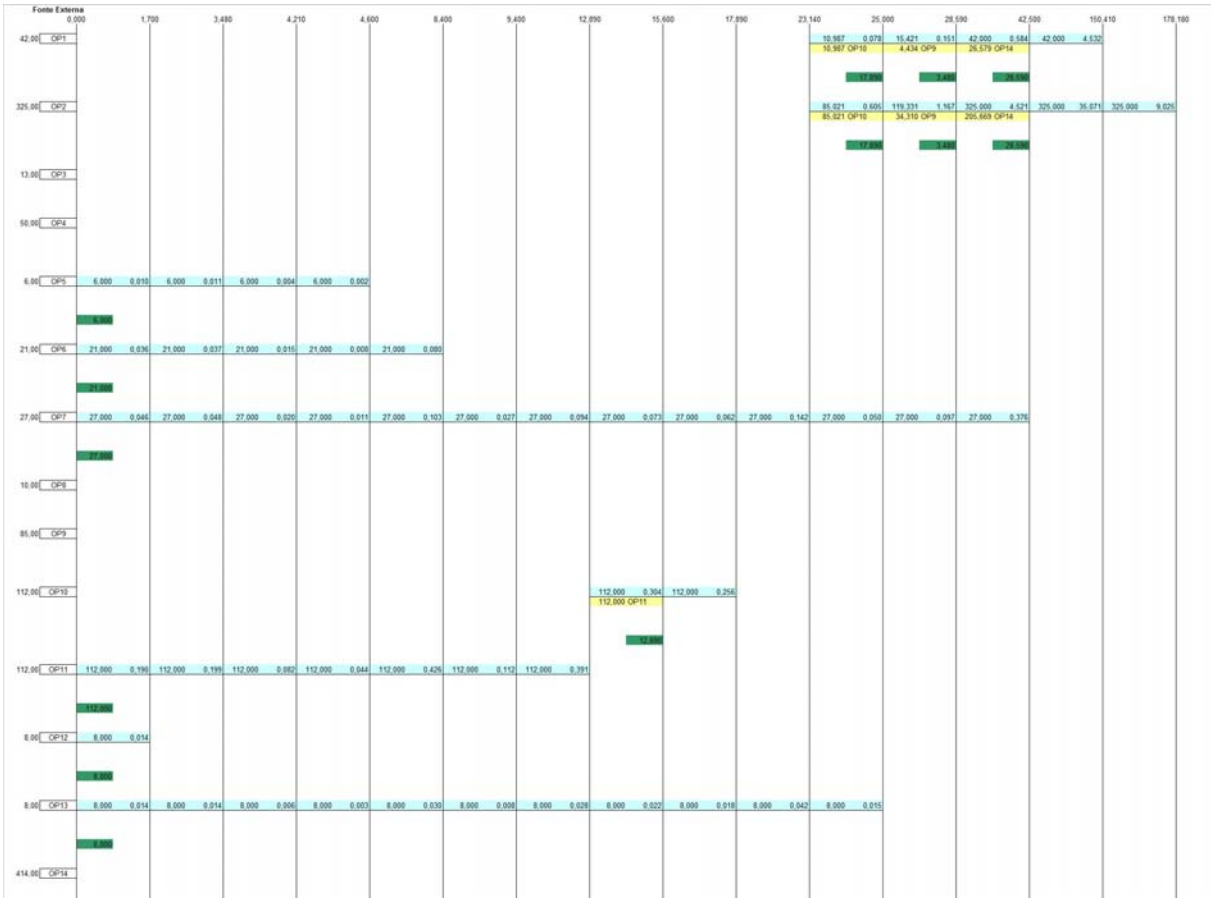


Figura D.27 – Diagrama de fontes de água para limite de 16 ciclos de concentração da TR – Cenário 15a: contaminante Sílica

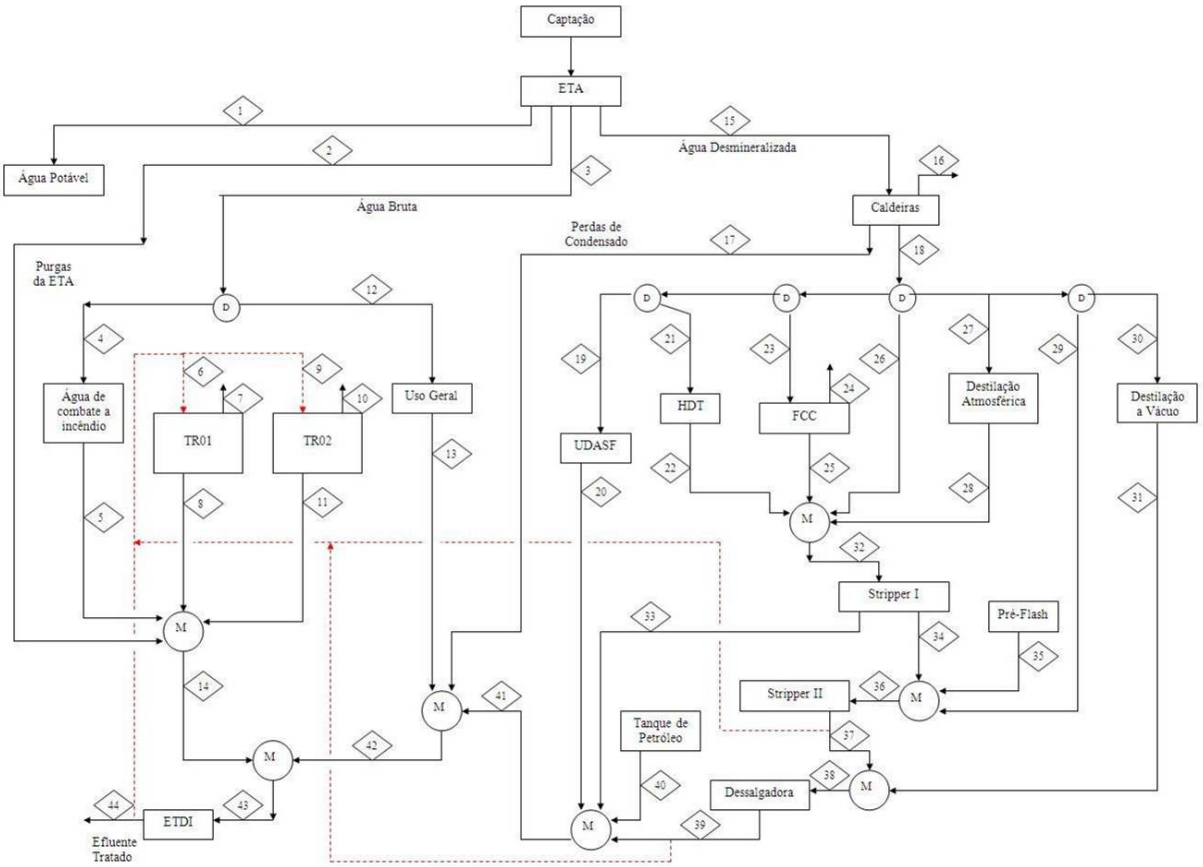


Figura D.28 – Diagrama de blocos do processo para limite de 16 ciclos de concentração da TR – Cenário 15a: contaminante Sílica

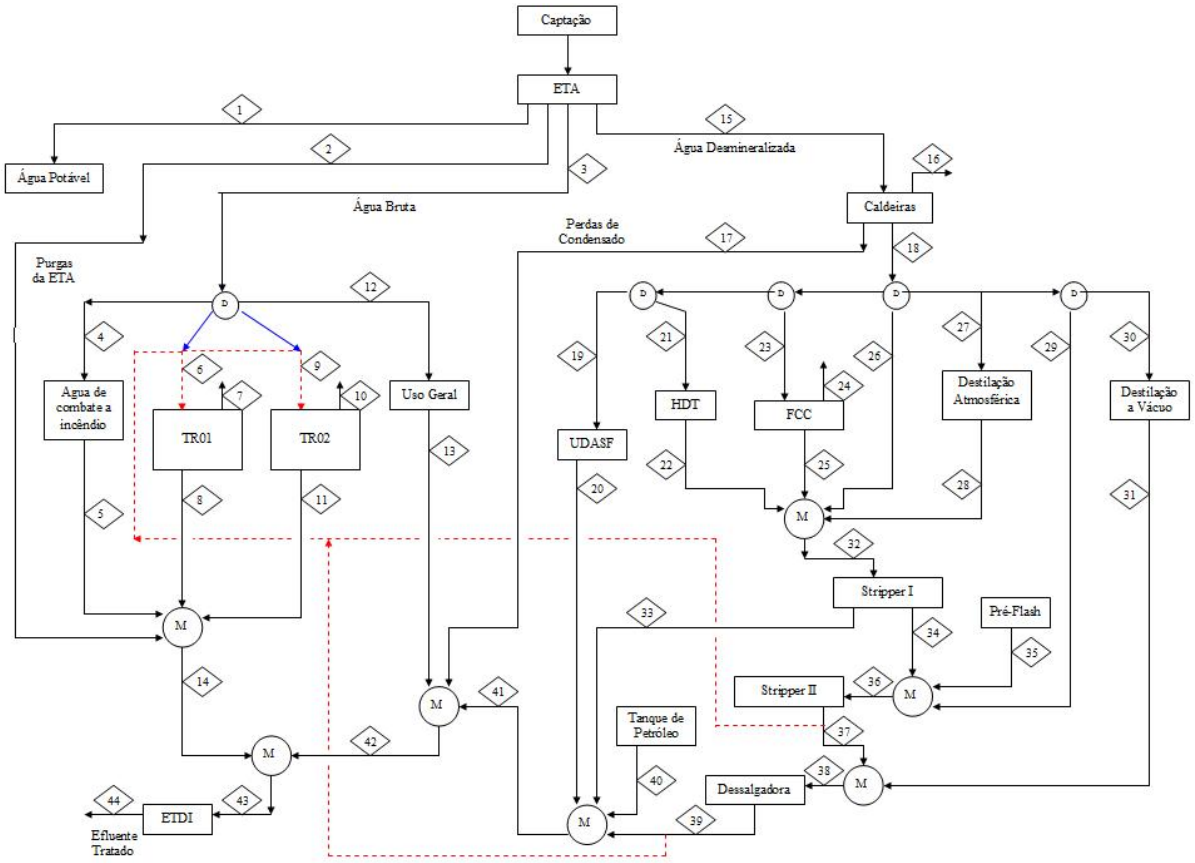


Figura D.29 – Diagrama de blocos do processo para limite de 16 ciclos de concentração da TR – Cenário 15b: contaminante Sílica

Tabela D.23 – Balanço hídrico do processo para o cenário 15b

Número da corrente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nome da corrente	Água Potável	Purga da ETA	Água Bruta	Entrada (Pressurização) da água de combate a incêndios	Saída da água de combate a incêndios	Reposição da TR01 com reúso	Perda da TR01	Purga da TR01	Reposição da TR02 com reúso	Perda da TR02
Vazão (t/h)	21	13	382,25	100	100	42	37	5	325	285
pH	7,50	5,40	6,90	6,90	6,90	6,39		7,49	6,39	
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	14,8	8,6	8,6	8,6	18,89	122,80	122,80	18,89	145,48
Sílica	0	15,6	9,4	9,4	9,4	10,68	69,42	69,42	10,68	82,24
Amônia	0	0,36	0,07	0,07	50,07	43,78	44,28	44,28	43,78	44,28
Sulfeto	0	0,32	0,1	0,1	10,10	0,99	0,11	0,11	0,99	0,13
Cloreto	0	170	9,7	9,7	109,7	363,12	2460,30	2460,30	363,15	2926,25
Cianeto	0	0	0	0	0	1,07	3,07	3,07	1,07	1,07
Fenol	0	0,06	0,05	0,05	0,05	10,63	27,63	27,63	10,63	12,27

Número da corrente	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Nome da corrente	Purga da TR02	Entrada para Uso Geral	Saída do Uso Geral	Junção (2 + 5 + 8 + 11)	Água Desmineralizada (Entrada da Caldeira)	Perda de vapor (Caldeira)	Perda de condensado (Caldeira)	Vapor de processo (Caldeira)	Entrada da UDASF	Saída da UDASF
Vazão (t/h)	40	50	50	158	264	64	70	130	6	6
pH	6,79	6,90	6,90	6,35	7,00		7,00	7,00	7,00	5,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	145,48	8,6	8,6	47,38	0	0	1	0	0	9,8
Sílica	82,24	9,4	9,4	30,25	0	0	1	0	0	4,6
Amônia	44,28	0,07	10,07	44,33	0	0	10	0	0	3,1
Sulfeto	0,13	0,1	1,1	6,45	0	0	10	0	0	6,3
Cloreto	2926,25	9,7	109,7	902,10	0	0	10	0	0	3,7
Cianeto	1,07	0	0	0,37	0	0	0	0	0	0,1
Fenol	12,27	0,05	0,05	4,02	0	0	0	0	0	39,3

Tabela D.23 – Balanço hídrico do processo para o cenário 15b (continuação)

Número da corrente	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Nome da corrente	Entrada da HDT	Saída da HDT	Entrada da FCC	Perda de vapor (FCC)	Saída da FCC	Vapor de processo (para *Stripper* I)	Entrada da Destila-ção Atmosféri ca	Saída da Destilação Atmosférica	Vapor de processo (para *Stripper* II)	Entrada da Destilação a Vácuo
Vazão (t/h)	6	6	50	10	40	10	21	21	10	27
pH	7,00	7,70	7,00		8,90	7,00	7,00	6,90	7,00	7,00
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	10,7	0	0	8,4	0	0	4,1	0	0
Sílica	0	1,3	0	0	3,5	0	0	8,4	0	0
Amônia	0	7708	0	0	13300,4	0	0	191,2	0	0
Sulfeto	0	22838,3	0	0	10374,4	0	0	268,3	0	0
Cloreto	0	75,4	0	0	51,5	0	0	132,7	0	0
Cianeto	0	33,8	0	0	67,4	0	0	3,3	0	0
Fenol	0	54,7	0	0	193,2	0	0	113,8	0	0

Número da corrente	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Nome da corrente	Saída da Destilação a Vácuo (para a entrada da dessalgadora)	Afluente da *Stripper* I	Excedente (saída) da *Stripper* I	Saída da *Stripper* I (para S*tripper* II)	Saída do Vaso de Pré-flash	Afluente da *Stripper* II	Saída da *Stripper* II	Entrada da Dessalgadora (31+37)	Saída da Dessalga-dora	Dreno do Tanque de Petróleo
Vazão (t/h)	27	77	10	67	8	85	85	112	112	8
pH	6,80	7,31	10,31	10,31	7,50	7,83	5,83	6,19	6,19	7,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	8,6	6,32	6,32	6,32	3,6	5,32	5,32	4,27	49,27	225
Sílica	42,5	4,21	4,21	4,21	1,7	3,48	3,48	11,68	16,68	25
Amônia	144,1	7562,07	831,83	831,83	774	728,52	269,55	146,07	58,43	68,8
Sulfeto	140,7	7242,08	14,48	14,48	1092,2	114,21	0,34	34,06	3,41	970,82
Cloreto	75,4	68,82	68,82	68,82	28,6	56,94	56,94	41,69	1341,69	6500
Cianeto	1,8	38,55	0,27	0,27	41,1	4,08	2,04	1,28	3,28	36,512
Fenol	23,6	135,66	108,53	108,53	44,8	89,76	89,76	42,76	4,28	39,8

Tabela D.23 – Balanço hídrico do processo para o cenário 15b (continuação)

Número da corrente	41	42	43	44	6’	6’’	9’	9’’	37’	37’’
Nome da corrente	Junção (20+33+39’+40)	Junção (13+17+41)	Junção (14+42) / Entrada da ETDI	Saída da ETDI	Reposição da TR01	Reúso para TR01	Reposição da TR02	Reúso para TR02	Restante da *Stripper* II após reúso	Reúso da *Stripper* II para TR01 e TR02
Vazão (t/h)	39,99	159,99	317,99	317,99	26,58	15,42	205,67	119,33	46,26	38,74
pH	6,13	6,57	6,45	6,45	6,90	6,05	6,90	6,05	5,83	5,83
Concentração (mg/L)										
Cálcio	67,76	20,06	33,63	83,63	8,60	36,63	8,60	36,63	5,32	5,32
Sílica	13,41	6,73	18,42	18,42	9,40	12,89	9,40	12,89	3,48	3,48
Amônia	245,60	68,91	56,70	1,42	0,07	119,13	0,07	119,13	269,55	269,55
Sulfeto	200,14	54,75	30,75	0,31	0,10	2,53	0,10	2,53	0,34	0,34
Cloreto	1854,57	502,21	700,90	70,09	9,70	972,33	9,70	972,33	56,94	56,94
Cianeto	8,70	2,17	1,28	0,13	0,00	2,92	0,00	2,92	2,04	2,04
Fenol	42,71	10,69	7,38	0,37	0,05	28,85	0,05	28,85	89,76	89,76

Número da corrente	39’	39’’	39’’’
Nome da corrente	Restante da dessalgadora após reúso	Reúso da dessalgadora para TR01 e TR02	Junção (39’’ + 37’’)
Vazão (t/h)	15,99	96,01	134,75
pH	6,19	6,19	6,05
Concentração (mg/L)			
Cálcio	49,27	49,27	36,63
Sílica	16,68	16,68	12,89
Amônia	58,43	58,43	119,13
Sulfeto	3,41	3,41	2,53
Cloreto	1341,69	1341,69	972,33
Cianeto	3,28	3,28	2,92
Fenol	4,28	4,28	28,85

Cenário 16

Dados de Entrada 16a

DFA 16a

Fluxograma 16a

Fluxograma 16b

Balanço 16b

Tabela D.24 – Dados de entrada para a aplicação do DFA (componente Amônia)

Operação	Vazão (t/h)	Cin (mg/L)	Cout (mg/L)	Δm (g/h)
OP1 (TR01)	42,00	0,91	1,41	21,08
OP2 (TR02)	325,00	0,68	1,18	161,20
OP3 (Purga da ETA)	13,00	0,36	0,36	0,00
OP4 (Uso Geral)	50,00	0,07	10,07	500,00
OP5 (Udasf)	6,00	0,00	3,10	18,60
OP6 (Destilação Atmosférica)	21,00	0,00	191,20	4015,20
OP7 (Destilação a Vácuo)	27,00	0,00	144,10	3890,70
OP8 (Stripper I)	10,00	831,83	831,83	0,00
OP9 (Stripper II)	85,00	269,55	269,55	0,00
OP10 (Dessalgadora)	112,00	239,31	10000	1093197,28
OP11 (Fonte Dessalgadora)	112,00	0,00	239,31	26802,72
OP12 (Pré-Flash)	8,00	0,00	774,00	6192,00
OP13 (Tanque de Petróleo)	8,00	0,00	68,80	550,40
OP14 (ETDI)	414,00	1,56	1,56	0,00
OP15 (Dessalgadora Reúso)	112,00	0,00	95,72	10720,64
Fonte externa				
1 – Água Desmineralizada	264,00	0,00		
2 – Água Bruta	517,00	0,07		

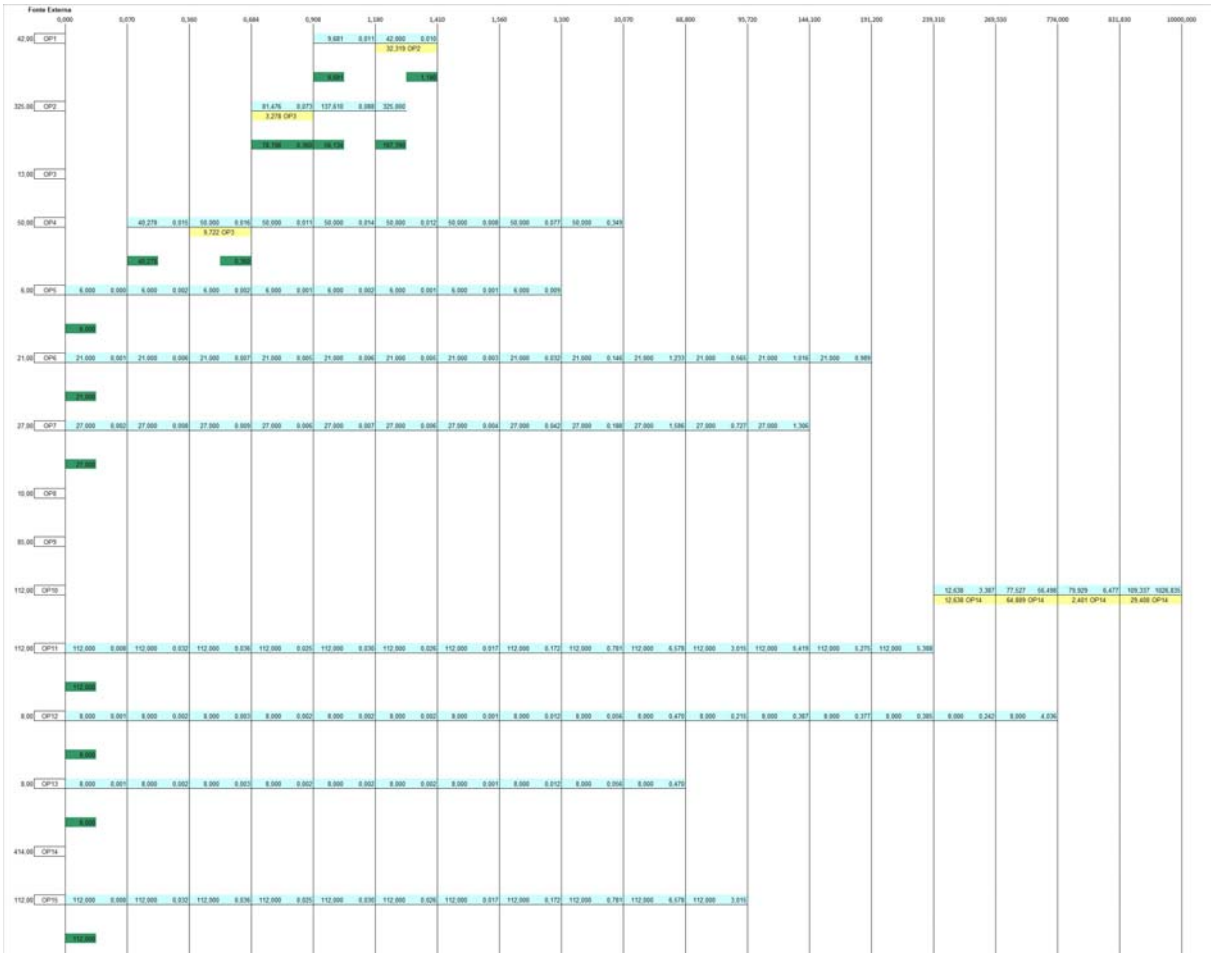


Figura D.30 – Diagrama de fontes de água do processo para limite de 16 ciclos de concentração da TR – Cenário 16a: contaminante Amônia

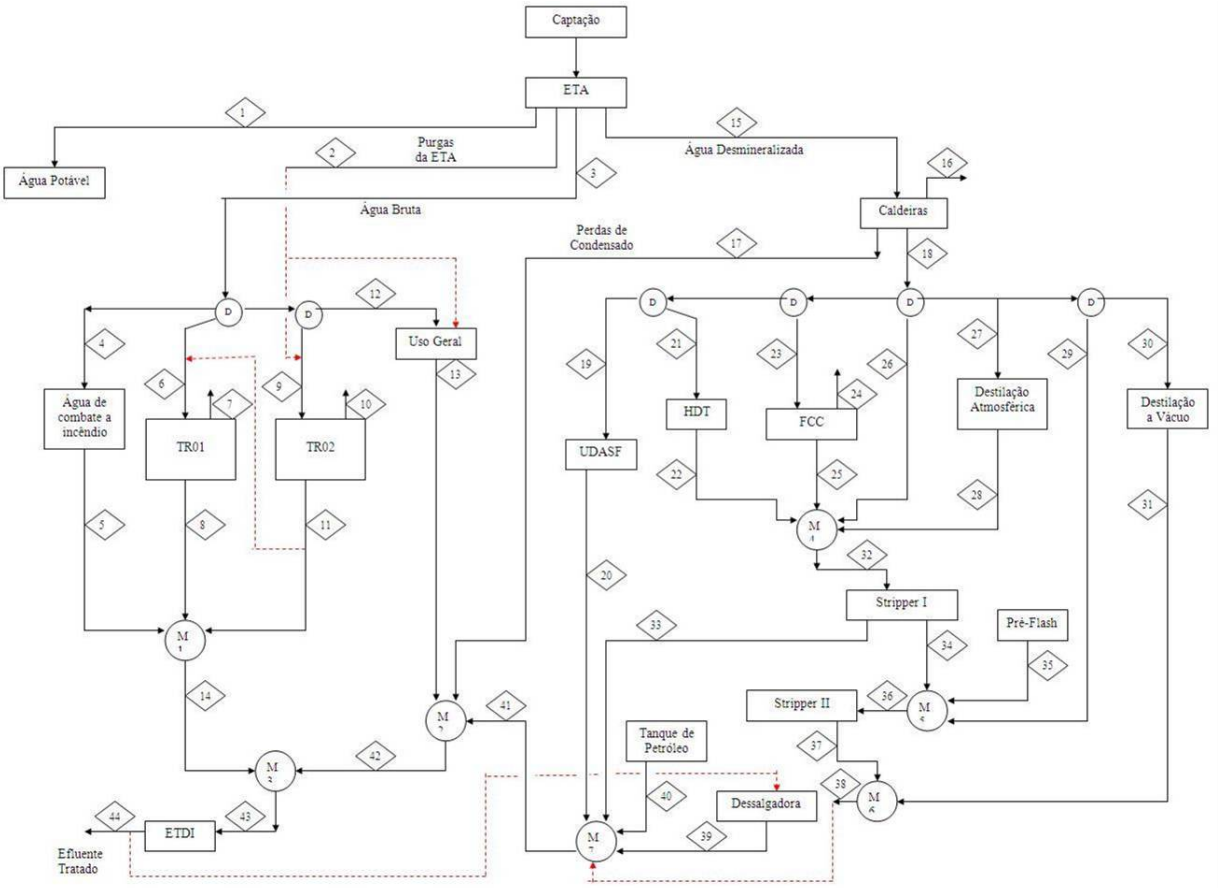


Figura D.31 – Diagrama de blocos do processo para limite de 16 ciclos de concentração da TR – Cenário 16a: contaminante Amônia

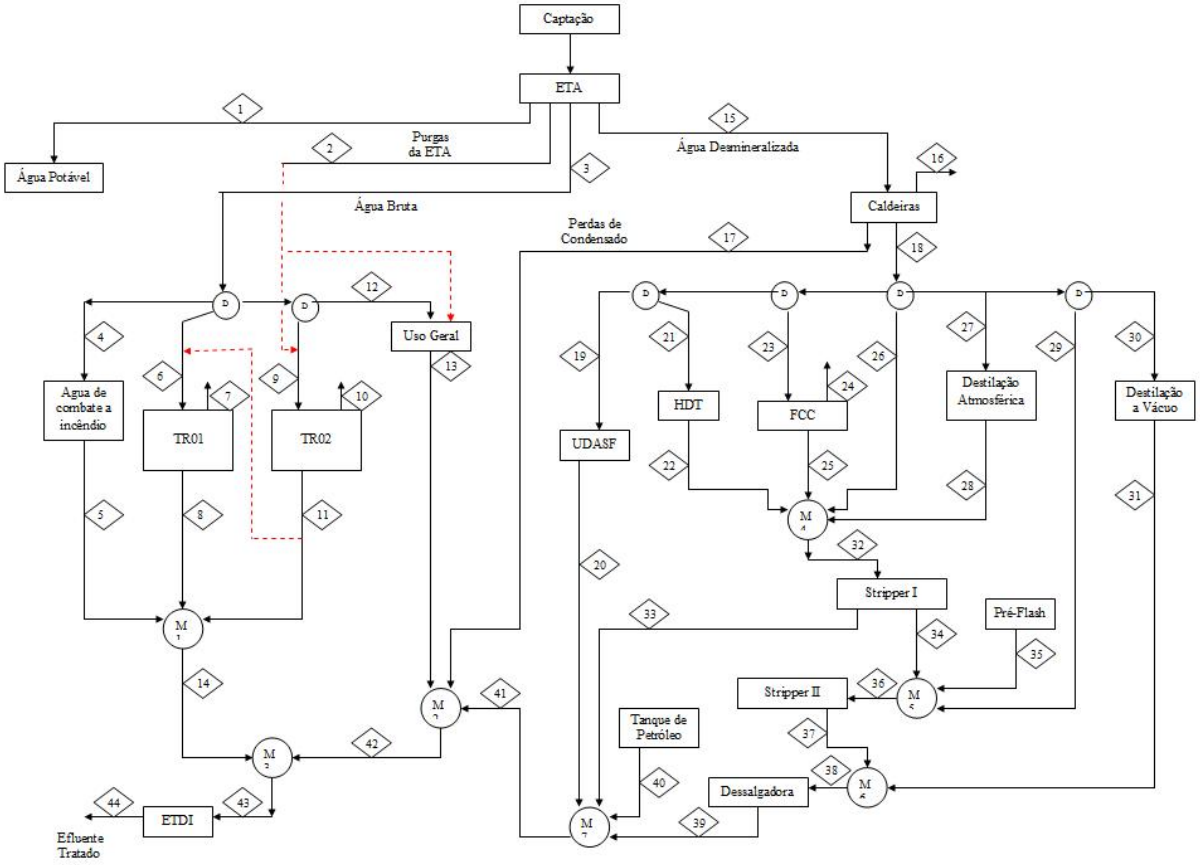


Figura D.32 – Diagrama de blocos do processo para limite de 16 ciclos de concentração da TR – Cenário 16b: contaminante Amônia

Tabela D.25 – Balanço hídrico do processo para o cenário 16b

Número da corrente	1	2	3	4	5	6’	7	8	9’’	10
Nome da corrente	Água Potável	Purga da ETA	Água Bruta	Entrada (Pressurização) da água de combate a incêndios	Saída da água de combate a incêndios	Reposição da TR01	Perda da TR01	Purga da TR01	Reposição da TR02	Perda da TR02
Vazão (t/h)	21	13	471,68	100	100	9,68	37	5	321,72	285
pH	7,50	5,40	6,90	6,90	6,90	6,90		8,26	6,90	
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	14,8	8,6	8,6	8,6	8,60	282,46	282,46	8,60	66,70
Sílica	0	15,6	9,4	9,4	9,4	9,40	308,56	308,56	9,40	72,86
Amônia	0	0,36	0,07	0,07	50,07	0,07	0,87	0,87	0,07	0,57
Sulfeto	0	0,32	0,1	0,1	10,10	0,10	0,05	0,05	0,10	0,06
Cloreto	0	170	9,7	9,7	109,7	9,70	992,14	992,14	9,70	217,15
Cianeto	0	0	0	0	0	0,00	2,00	2,00	0,00	0,00
Fenol	0	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,12	0,12	0,05	0,06

Número da corrente	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Nome da corrente	Purga da TR02	Entrada para Uso Geral	Saída do Uso Geral	Junção (2 + 5 + 8 + 11’)	Água Desmineralizada (Entrada da Caldeira)	Perda de vapor (Caldeira)	Perda de condensado (Caldeira)	Vapor de processo (Caldeira)	Entrada da UDASF	Saída da UDASF
Vazão (t/h)	40	40,28	50	125,68	264	64	70	130	6	6
pH	7,18	6,90	6,06	6,29	7,00		7,00	7,00	7,00	5,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	66,70	8,60	9,81	23,69	0	0	1	0	0	9,8
Sílica	72,86	9,40	10,61	25,82	0	0	1	0	0	4,6
Amônia	0,57	0,07	10,13	39,95	0	0	10	0	0	3,1
Sulfeto	0,06	0,10	1,14	8,08	0	0	10	0	0	6,3
Cloreto	217,15	9,70	140,86	157,61	0	0	10	0	0	3,7
Cianeto	0,00	0,00	0,00	0,08	0	0	0	0	0	0,1
Fenol	0,06	0,05	0,05	0,05	0	0	0	0	0	39,3

Tabela D.25 – Balanço hídrico do processo para o cenário 16b (continuação)

Número da corrente	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Nome da corrente	Entrada da HDT	Saída da HDT	Entrada da FCC	Perda de vapor (FCC)	Saída da FCC	Vapor de processo (para *Stripper* I)	Entrada da Destila-ção Atmosféri ca	Saída da Destilação Atmosférica	Vapor de processo (para *Stripper* II)	Entrada da Destilação a Vácuo
Vazão (t/h)	6	6	50	10	40	10	21	21	10	27
pH	7,00	7,70	7,00		8,90	7,00	7,00	6,90	7,00	7,00
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	10,7	0	0	8,4	0	0	4,1	0	0
Sílica	0	1,3	0	0	3,5	0	0	8,4	0	0
Amônia	0	7708	0	0	13300,4	0	0	191,2	0	0
Sulfeto	0	22838,3	0	0	10374,4	0	0	268,3	0	0
Cloreto	0	75,4	0	0	51,5	0	0	132,7	0	0
Cianeto	0	33,8	0	0	67,4	0	0	3,3	0	0
Fenol	0	54,7	0	0	193,2	0	0	113,8	0	0

Número da corrente	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Nome da corrente	Saída da Destilação a Vácuo (para a entrada da Dessalgadora)	Afluente da *Stripper* I	Excedente (saída) da *Stripper* I	Saída da *Stripper* I (para *stripper* II)	Saída do Vaso de Pré-flash	Afluente da *Stripper* II	Saída da *Stripper* II	Entrada da Dessalgadora (31+37)	Saída da Dessalga-dora	Dreno do Tanque de Petróleo
Vazão (t/h)	27	77	10	67	8	85	85	112	112	8
pH	6,80	7,31	10,31	10,31	7,50	7,83	5,83	5,94	5,94	7,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	8,6	6,32	6,32	6,32	3,6	5,32	5,32	6,11	51,11	225
Sílica	42,5	4,21	4,21	4,21	1,7	3,48	3,48	12,89	17,89	25
Amônia	144,1	7562,07	831,83	831,83	774	728,52	269,55	239,31	95,72	68,8
Sulfeto	140,7	7242,08	14,48	14,48	1092,2	114,21	0,34	34,18	3,42	970,82
Cloreto	75,4	68,82	68,82	68,82	28,6	56,94	56,94	61,39	1361,39	6500
Cianeto	1,8	38,55	0,27	0,27	41,1	4,08	2,04	1,98	3,98	36,512
Fenol	23,6	135,66	108,53	108,53	44,8	89,76	89,76	73,81	7,38	39,8

Tabela D.25 – Balanço hídrico do processo para o cenário 16b (continuação)

Número da corrente	41	42	43	44	6	9	9’	11’	11’’	12’
Nome da corrente	Junção (20 +33+39+40)	Junção (13+17+41)	Junção (14+42) / Entrada da ETDI	Saída da ETDI	Reposição da TR01 com reúso	Reposição da TR02 com reúso da purga	Reúso da purga para TR02	Restante da TR02	Reúso da TR02 para TR01	Entrada para Uso Geral com reúso
Vazão (t/h)	136	256	381,68	381,68	42	325	3,28	7,68	32,32	50
pH	5,96	6,11	6,16	6,16	7,16	6,78	5,40	7,18	7,28	6,06
Concentração (mg/L)										
Cálcio	56,22	32,06	29,30	79,30	43,46	8,66	14,80	66,70	53,90	9,81
Sílica	16,71	11,22	16,03	16,03	47,47	9,46	15,60	72,86	58,87	10,61
Amônia	144,18	81,31	67,69	1,69	0,37	0,07	0,36	0,57	0,46	0,13
Sulfeto	61,26	35,50	26,47	0,26	0,06	0,10	0,32	0,06	0,05	0,14
Cloreto	1508,72	831,75	609,77	60,98	137,25	11,32	170,00	217,15	175,45	40,86
Cianeto	5,45	2,90	1,97	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fenol	18,13	9,64	6,49	0,32	0,05	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05

Número da corrente	12’’
Nome da corrente	Reúso da purga para Uso Geral
Vazão (t/h)	9,72
pH	5,40
Concentração (mg/L)	
Cálcio	14,80
Sílica	15,60
Amônia	0,36
Sulfeto	0,32
Cloreto	170,00
Cianeto	0,00
Fenol	0,06

Cenário 17

Dados de Entrada 17a

DFA 17a

Fluxograma 17a

Fluxograma 17b

Balanço 17b

Tabela D.26 – Dados de entrada para a aplicação do DFA (componente Sulfeto)

Operação	Vazão (t/h)	Cin (mg/L)	Cout (mg/L)	Δm (g/h)
OP1 (TR01)	42,00	1,45	0,14	Regenerador
OP2 (TR02)	325,00	1,01	0,13	Regenerador
OP3 (Purga da ETA)	13,00	0,32	0,32	0,00
OP4 (Uso geral)	50,00	0,10	1,10	50,00
OP5 (Udasf)	6,00	0,00	6,30	37,80
OP6 (Destilação Atmosférica)	21,00	0,00	268,30	5634,30
OP7 (Destilação a Vácuo)	27,00	0,00	140,70	3798,90
OP8 (Stripper I)	10,00	14,48	14,48	0,00
OP9 (Stripper II)	85,00	0,34	0,34	0,00
OP10 (Dessalgadora)	112,00	34,18	10000	1116171,84
OP11 (Fonte Dessalgadora)	112,00	0,00	34,18	3828,16
OP12 (Pré-Flash)	8,00	0,00	1092,20	8737,60
OP13 (Tanque de Petróleo)	8,00	0,00	970,82	7766,56
OP14 (ETDI)	414,00	0,24	0,24	0,00
OP15 (Dessalgadora Reúso)	112,00	0,00	3,42	383,04
Fonte externa				
1 – Água Desmineralizada	264,00	0,00		
2 – Água Bruta	517,00	0,10		

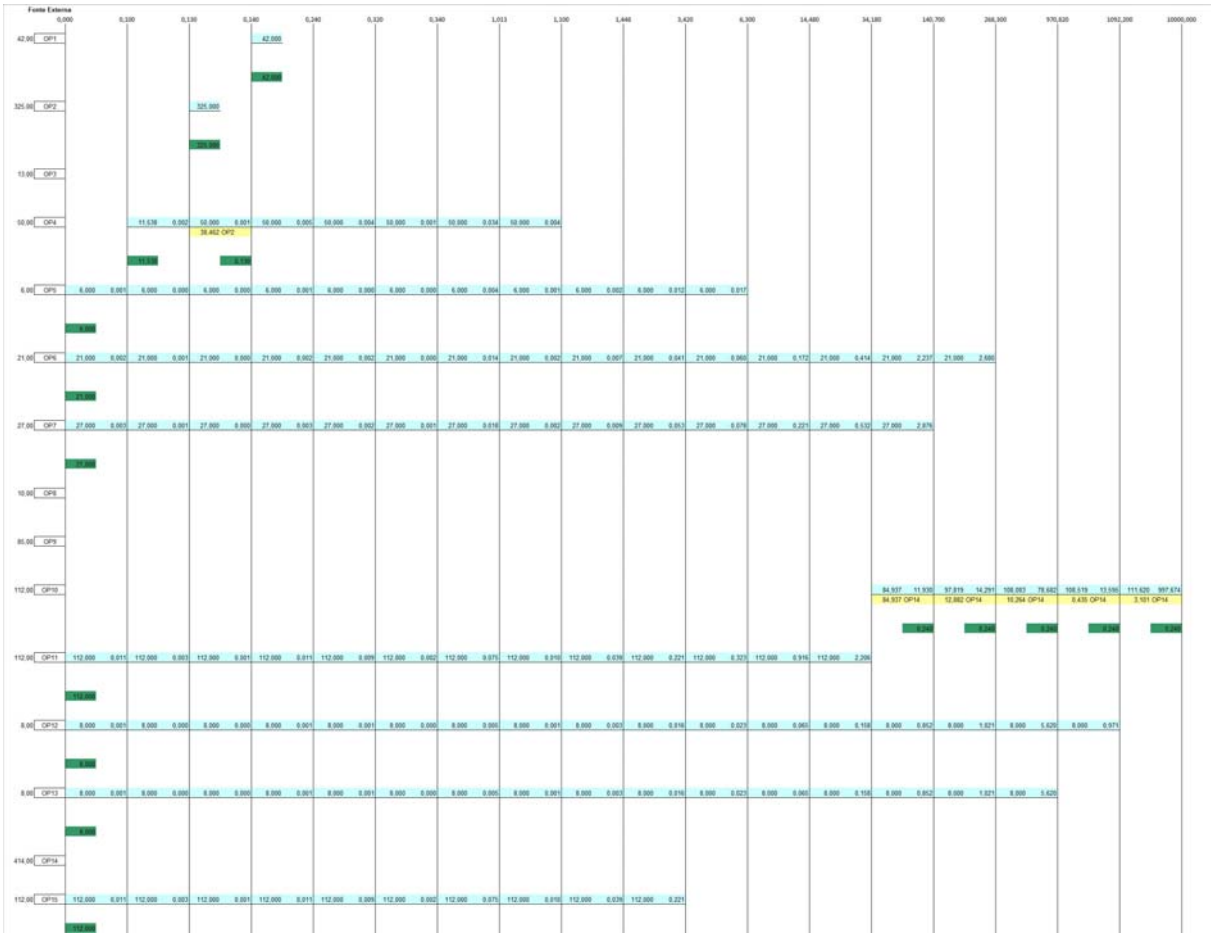


Figura D.33 – Diagrama de fontes de água do processo para limite de 16 ciclos de concentração da TR – Cenário 17a: contaminante Sulfeto

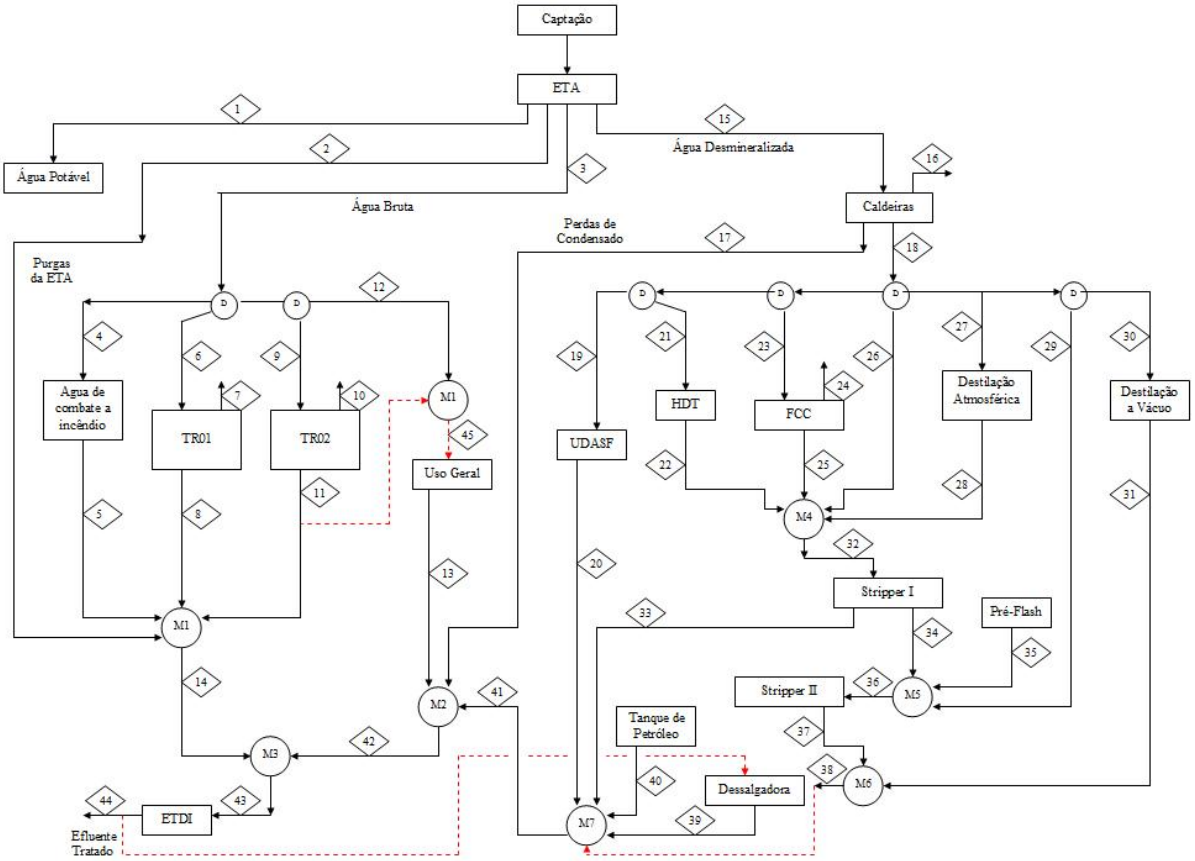


Figura D.34 – Diagrama de blocos do processo para limite de 16 ciclos de concentração da TR – Cenário 17a: contaminante Sulfeto

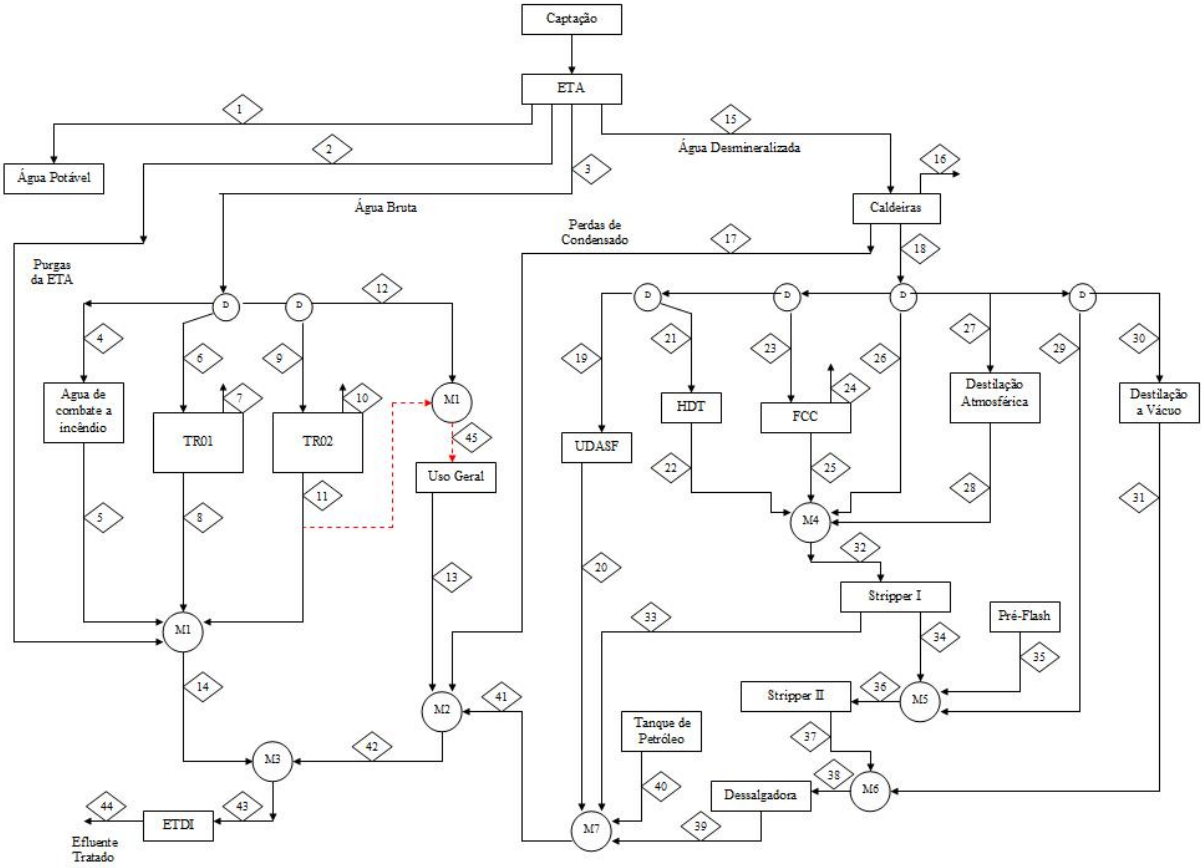


Figura D.35 – Diagrama de blocos do processo para limite de 16 ciclos de concentração da TR – Cenário 17b: contaminante Sulfeto

Tabela D.27 – Balanço hídrico do processo para o cenário 17b

Número da corrente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nome da corrente	Água Potável	Purga da ETA	Água Bruta	Entrada (Pressurização) da água de combate a incêndios	Saída da água de combate a incêndios	Reposição da TR01	Perda da TR01	Purga da TR01	Reposição da TR02	Perda da TR02
Vazão (t/h)	21	13	478,5	100	100	42	37	5	325	285
pH	7,50	5,40	6,90	6,90	6,90	6,90		8,00	6,90	
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	14,8	8,6	8,6	8,6	8,6	55,90	55,90	8,6	66,22
Sílica	0	15,6	9,4	9,4	9,4	9,4	61,10	61,10	9,4	72,38
Amônia	0	0,36	0,07	0,07	50,07	0,07	0,57	0,57	0,07	0,57
Sulfeto	0	0,32	0,1	0,1	10,10	0,1	0,06	0,06	0,1	0,06
Cloreto	0	170	9,7	9,7	109,7	9,7	163,05	163,05	9,7	204,69
Cianeto	0	0	0	0	0	0	2,00	2,00	0	0,00
Fenol	0	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,13	0,13	0,05	0,06

Número da corrente	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Nome da corrente	Purga da TR02	Entrada (água bruta) para Uso Geral	Saída do Uso Geral	Junção (2 + 5 + 8 + parte 11)	Água Desmineralizada (Entrada da Caldeira)	Perda de vapor (Caldeira)	Perda de condensado (Caldeira)	Vapor de processo (Caldeira)	Entrada da UDASF	Saída da UDASF
Vazão (t/h)	40	11,5	50	119,5	264	64	70	130	6	6
pH	7,30	6,90	7,17	6,27	7,00		7,00	7,00	7,00	5,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	66,22	8,6	52,97	11,98	0	0	1	0	0	9,8
Sílica	72,38	9,4	57,89	13,03	0	0	1	0	0	4,6
Amônia	0,57	0,07	10,46	41,97	0	0	10	0	0	3,1
Sulfeto	0,06	0,1	1,07	8,49	0	0	10	0	0	6,3
Cloreto	204,69	9,7	259,84	119,68	0	0	10	0	0	3,7
Cianeto	0,00	0	0,00	0,08	0	0	0	0	0	0,1
Fenol	0,06	0,05	0,06	0,05	0	0	0	0	0	39,3

Tabela D.27 – Balanço hídrico do processo para o cenário 17b (continuação)

Número da corrente	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Nome da corrente	Entrada da HDT	Saída da HDT	Entrada da FCC	Perda de vapor (FCC)	Saída da FCC	Vapor de processo (para *Stripper* I)	Entrada da Destila-ção Atmosféri ca	Saída da Destilação Atmosférica	Vapor de processo (para *Stripper* II)	Entrada da Destilação a Vácuo
Vazão (t/h)	6	6	50	10	40	10	21	21	10	27
pH	7,00	7,70	7,00		8,90	7,00	7,00	6,90	7,00	7,00
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	10,7	0	0	8,4	0	0	4,1	0	0
Sílica	0	1,3	0	0	3,5	0	0	8,4	0	0
Amônia	0	7708	0	0	13300,4	0	0	191,2	0	0
Sulfeto	0	22838,3	0	0	10374,4	0	0	268,3	0	0
Cloreto	0	75,4	0	0	51,5	0	0	132,7	0	0
Cianeto	0	33,8	0	0	67,4	0	0	3,3	0	0
Fenol	0	54,7	0	0	193,2	0	0	113,8	0	0

Número da corrente	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Nome da corrente	Saída da Destilação a Vácuo (para a entrada da Dessalgadora)	Afluente da *Stripper* I	Excedente (saída) da *Stripper* I	Saída da *Stripper* I (para *stripper* II)	Saída do Vaso de Pré-flash	Afluente da *Stripper* II	Saída da *Stripper* II	Entrada da Dessalgadora (31+37)	Saída da Dessalga-dora	Dreno do Tanque de Petróleo
Vazão (t/h)	27	77	10	67	8	85	85	112	112	8
pH	6,80	7,31	10,31	10,31	7,50	7,83	5,83	5,94	5,94	7,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	8,6	6,32	6,32	6,32	3,6	5,32	5,32	6,11	51,11	225
Sílica	42,5	4,21	4,21	4,21	1,7	3,48	3,48	12,89	17,89	25
Amônia	144,1	7562,07	831,83	831,83	774	728,52	269,55	239,31	95,72	68,8
Sulfeto	140,7	7242,08	14,48	14,48	1092,2	114,21	0,34	34,18	3,42	970,82
Cloreto	75,4	68,82	68,82	68,82	28,6	56,94	56,94	61,39	1361,39	6500
Cianeto	1,8	38,55	0,27	0,27	41,1	4,08	2,04	1,98	3,98	36,512
Fenol	23,6	135,66	108,53	108,53	44,8	89,76	89,76	73,81	7,38	39,8

Tabela D.27 – Balanço hídrico do processo para o cenário 17b (continuação)

Número da corrente	41	42	43	44	45
Nome da corrente	Junção (20 +33+39+40)	Junção (13+17+41)	Junção (14+42) / Entrada da ETDI	Saída da ETDI	Entrada para Uso Geral
Vazão (t/h)	136	256	375,5	375,5	50
pH	5,96	6,21	6,22	6,22	7,17
Concentração (mg/L)					
Cálcio	56,22	40,49	31,41	81,41	52,97
Sílica	16,71	20,46	18,09	18,09	57,89
Amônia	144,18	81,37	68,83	1,72	0,46
Sulfeto	61,26	35,49	26,90	0,27	0,07
Cloreto	1508,72	854,99	620,99	62,10	159,84
Cianeto	5,45	2,90	2,00	0,20	0,00
Fenol	18,13	9,64	6,59	0,33	0,06

Cenário 18

Dados de Entrada 18a

DFA 18a

Fluxograma 18a

Fluxograma 18b

Balanço 18b

Tabela D.28 – Dados de entrada para a aplicação do DFA (componente Cloreto)

Operação	Vazão (t/h)	Cin (mg/L)	Cout (mg/L)	Δm (g/h)
OP1 (TR01)	42,00	46,35	401,28	14907,06
OP2 (TR02)	325,00	38,34	425,22	125736,00
OP3 (Purga da ETA)	13,00	170,00	170,00	0,00
OP4 (Uso Geral)	50,00	9,70	109,70	5000,00
OP5 (Udasf)	6,00	0,00	3,70	22,20
OP6 (Destilação Atmosférica)	21,00	0,00	132,70	2786,70
OP7 (Destilação a Vácuo)	27,00	0,00	75,40	2035,80
OP8 (Stripper I)	10,00	68,82	68,82	0,00
OP9 (Stripper II)	85,00	56,94	56,94	0,00
OP10 (Dessalgadora)	112,00	61,39	1361,39	145600,00
OP11 (Fonte Dessalgadora)	112,00	0,00	61,39	6875,68
OP12 (Pré-Flash)	8,00	0,00	28,60	228,80
OP13 (Tanque de Petróleo)	8,00	0,00	6500,00	52000,00
OP14 (ETDI)	414,00	58,83	58,83	0,00
Fonte externa				
1 – Água Desmineralizada	264,00	0,00		
2 – Água Bruta	517,00	9,70		

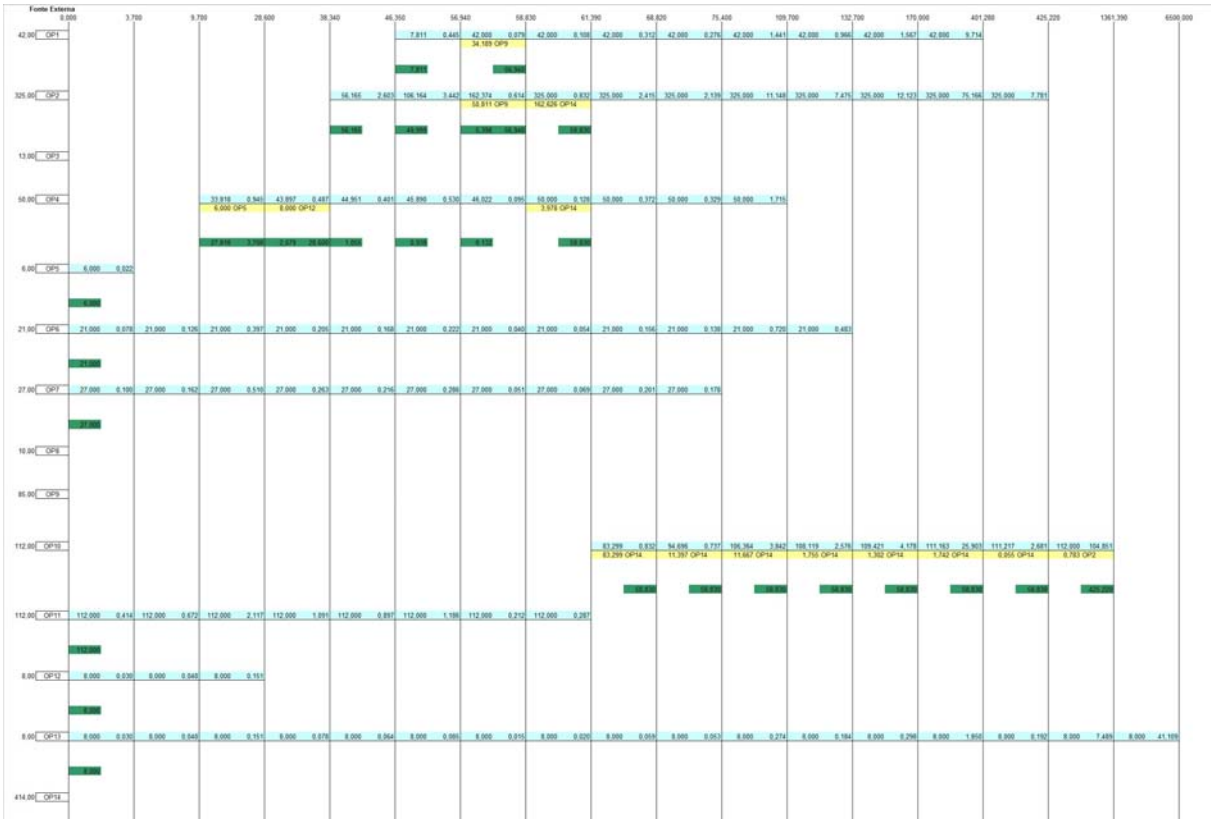


Figura D.36 – Diagrama de fontes de água do processo para limite de 16 ciclos de concentração da TR – Cenário 18a: contaminante Cloreto

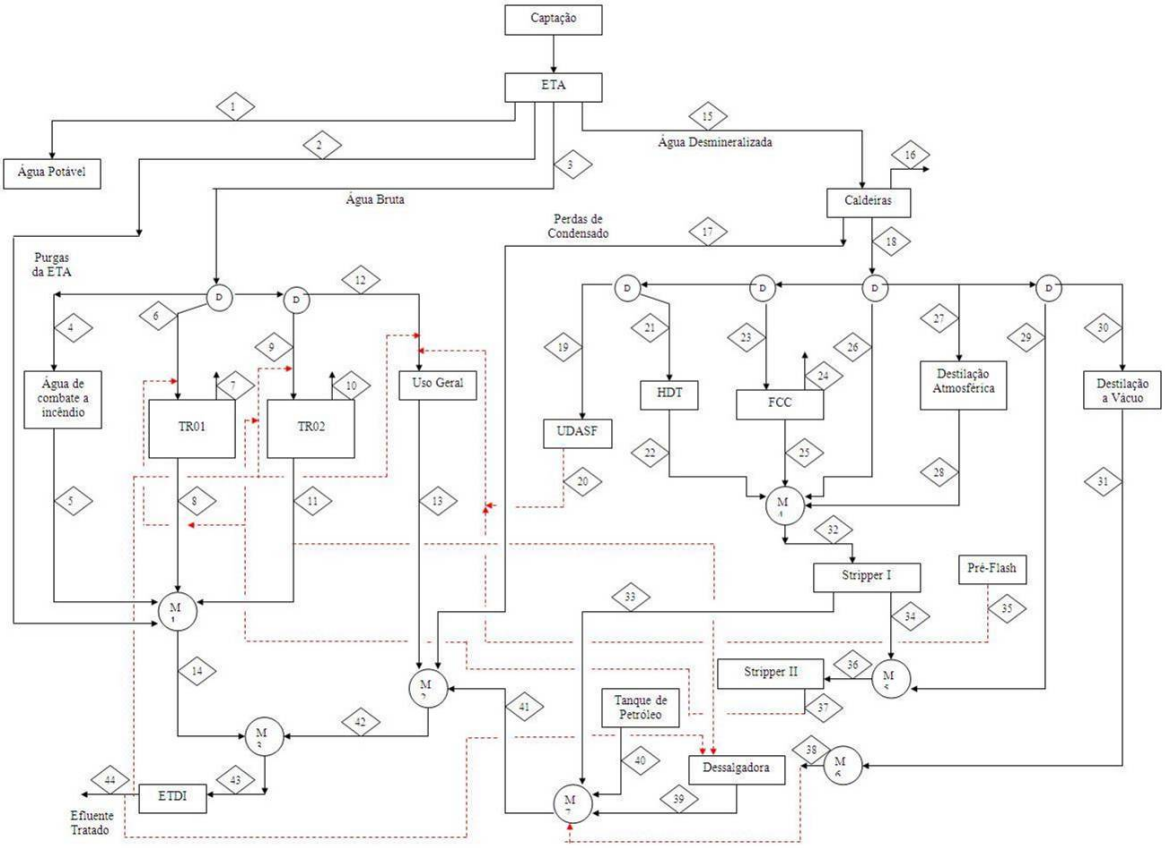


Figura D.37 – Diagrama de blocos do processo para limite de 16 ciclos de concentração da TR – Cenário 18a: contaminante Cloreto

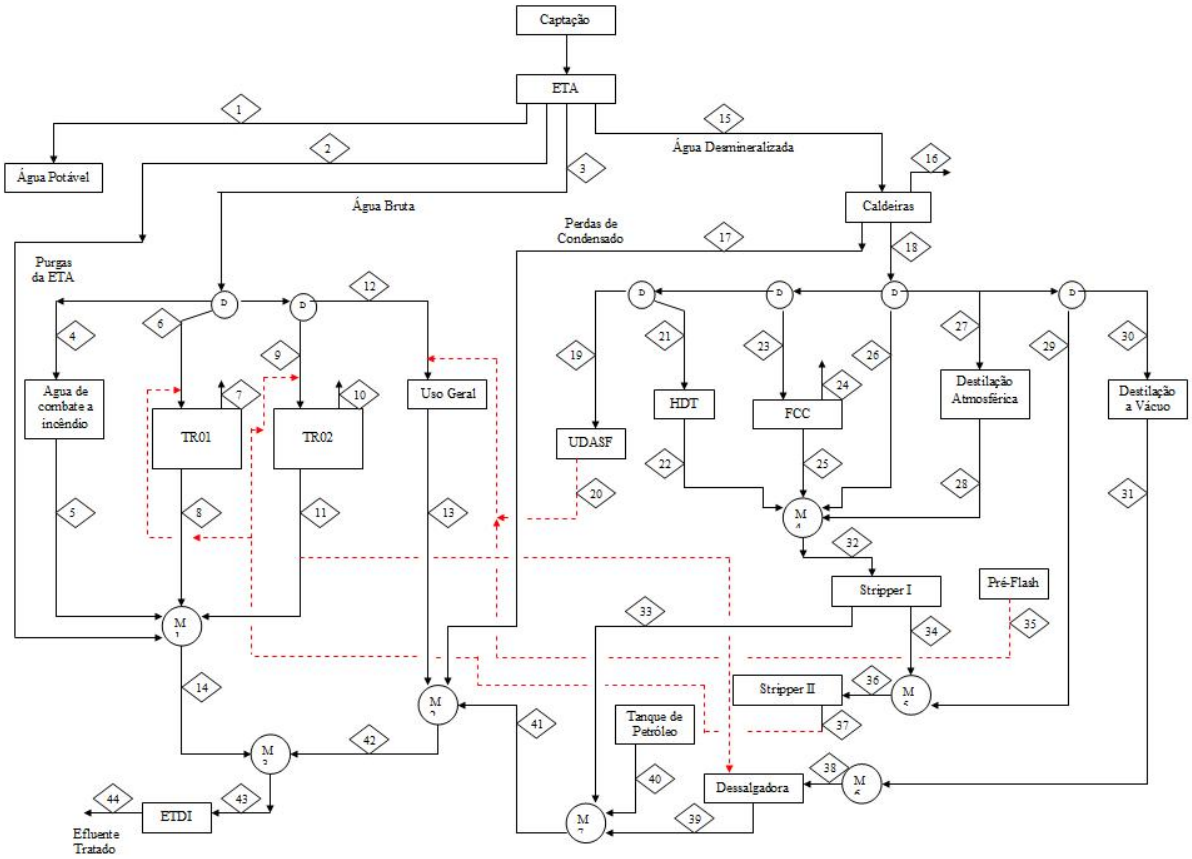


Figura D.38 – Diagrama de blocos do processo para limite de 16 ciclos de concentração da TR – Cenário 18b: contaminante Cloreto

Tabela D.29 – Balanço hídrico do processo para o cenário 18b

Número da corrente	1	2	3	4	5	6’	7	8	9’	10
Nome da corrente	Água Potável	Purga da ETA	Água Bruta	Entrada (Pressurização) da água de combate a incêndios	Saída da água de combate a incêndios	Reposição da TR01	Perda da TR01	Purga da TR01	Reposição da TR02	Perda da TR02
Vazão (t/h)	21	13	418,00	100	100	7,81	37	5	274,19	285
pH	7,50	5,40	6,90	6,90	6,90	6,90		6,86	6,90	
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	14,8	8,6	8,6	8,6	8,6	25,41	25,41	8,6	60,59
Sílica	0	15,6	9,4	9,4	9,4	9,4	18,45	18,45	9,4	64,21
Amônia	0	0,36	0,07	0,07	50,07	0,07	184,27	184,27	0,07	30,46
Sulfeto	0	0,32	0,1	0,1	10,10	0,1	0,19	0,19	0,1	0,06
Cloreto	0	170	9,7	9,7	109,7	9,7	231,01	231,01	9,7	244,49
Cianeto	0	0	0	0	0	0	15,19	15,19	0	0,01
Fenol	0	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	74,76	74,76	0,05	12,22

Número da corrente	11	12’	13	14	15	16	17	18	19	20
Nome da corrente	Purga da TR02	Entrada para Uso Geral	Saída do Uso Geral	Junção (2 + 5 + 8 + parte 11)	Água Desmineralizada (Entrada da Caldeira)	Perda de vapor (Caldeira)	Perda de condensado (Caldeira)	Vapor de processo (Caldeira)	Entrada da UDASF	Saída da UDASF
Vazão (t/h)	40	36,00	50,00	157,22	280,23	67,93	74,3	138	6	6
pH	6,76	6,90	6,32	6,34	7,00		7,00	7,00	7,00	5,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	60,59	8,60	7,94	22,62	0	0	1	0	0	9,8
Sílica	64,21	9,40	7,59	23,87	0	0	1	0	0	4,6
Amônia	30,46	0,07	134,26	45,33	0	0	10	0	0	3,1
Sulfeto	0,06	0,10	176,58	6,47	0	0	10	0	0	6,3
Cloreto	244,49	9,70	112,00	152,17	0	0	10	0	0	3,7
Cianeto	0,01	0,00	6,59	0,49	0	0	0	0	0	0,1
Fenol	12,22	0,05	11,92	5,46	0	0	0	0	0	39,3

Tabela D.29 – Balanço hídrico do processo para o cenário 18b (continuação)

Número da corrente	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Nome da corrente	Entrada da HDT	Saída da HDT	Entrada da FCC	Perda de vapor (FCC)	Saída da FCC	Vapor de processo (para *Stripper* I)	Entrada da Destila-ção Atmosféri ca	Saída da Destilação Atmosférica	Vapor de processo (para *Stripper* II)	Entrada da Destilação a Vácuo
Vazão (t/h)	6	6	50	10	40	10	21	21	18	27
pH	7,00	7,70	7,00		8,90	7,00	7,00	6,90	7,00	7,00
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	10,7	0	0	8,4	0	0	4,1	0	0
Sílica	0	1,3	0	0	3,5	0	0	8,4	0	0
Amônia	0	7708	0	0	13300,4	0	0	191,2	0	0
Sulfeto	0	22838,3	0	0	10374,4	0	0	268,3	0	0
Cloreto	0	75,4	0	0	51,5	0	0	132,7	0	0
Cianeto	0	33,8	0	0	67,4	0	0	3,3	0	0
Fenol	0	54,7	0	0	193,2	0	0	113,8	0	0

Número da corrente	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Nome da corrente	Saída da Destilação a Vácuo (para a entrada da Dessalgadora)	Afluente da *Stripper* I	Excedente (saída) da *Stripper* I	Saída da *Stripper* I (para *stripper* II)	Saída do Vaso de Pré-flash	Afluente da *Stripper* II (34+29)	Saída da *Stripper* II	Entrada da Dessalgadora (31+parte 11)	Saída da Dessalga-dora	Dreno do Tanque de Petróleo
Vazão (t/h)	27	77	10	67	8	85	85	27,78	27,78	8
pH	6,80	7,31	10,31	10,31	7,50	7,67	5,67	6,80	6,80	7,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	8,6	6,32	6,32	6,32	3,6	4,98	4,98	10,06	55,06	225
Sílica	42,5	4,21	4,21	4,21	1,7	3,32	3,32	43,11	48,11	25
Amônia	144,1	7562,07	831,83	831,83	774	655,68	242,60	140,91	56,36	68,8
Sulfeto	140,7	7242,08	14,48	14,48	1092,2	11,42	0,03	136,75	13,68	970,82
Cloreto	75,4	68,82	68,82	68,82	28,6	54,25	54,25	80,15	1380,15	6500
Cianeto	1,8	38,55	0,27	0,27	41,1	0,21	0,11	1,75	3,75	36,512
Fenol	23,6	135,66	108,53	108,53	44,8	85,55	85,55	23,28	2,33	39,8

Tabela D.29 – Balanço hídrico do processo para o cenário 18b (continuação)

Número da corrente	41	42	43	44	6	12	9	37’	37’’
Nome da corrente	Junção (33+39+40)	Junção (13+17+41)	Junção (14+42) / Entrada da ETDI	Saída da ETDI	Reposição da TR01 com reúso	Entrada para Uso Geral com reúso	Reposição da TR02 com reúso	Saída da Stripper II para a TR01	Saída da Stripper II para a TR02
Vazão (t/h)	45,78	170,08	327,30	327,30	42	50,00	325,00	34,19	50,81
pH	6,99	6,68	6,48	6,48	5,76	6,32	6,36	5,67	5,67
Concentração (mg/L)									
Cálcio	74,11	22,72	22,67	72,67	3,91	7,94	7,87	2,84	3,92
Sílica	34,48	11,95	17,68	17,68	2,84	7,59	8,34	1,34	2,62
Amônia	227,93	105,19	76,44	1,91	183,77	124,26	29,96	225,73	191,23
Sulfeto	181,11	105,03	57,69	0,58	2,12	175,58	0,09	2,58	0,03
Cloreto	1988,39	572,51	370,59	37,06	20,16	12,00	14,87	22,54	42,76
Cianeto	8,71	4,28	2,46	0,25	13,19	6,59	0,01	16,20	0,08
Fenol	32,07	12,14	8,93	0,45	28,76	11,92	10,58	35,31	67,43

Cenário 19

Dados de Entrada 19a

DFA 19a

Fluxograma 19a

Fluxograma 19b

Balanço 19b

Tabela D.30 – Dados de entrada para a aplicação do DFA (componente Cianeto)

Operação	Vazão (t/h)	Cin (mg/L)	Cout (mg/L)	Δm (g/h)
OP1 (TR01)	42,00	2,96	4,96	84,00
OP2 (TR02)	325,00	0,00	0,00	0,00
OP3 (Purga da ETA)	13,00	0,00	0,00	0,00
OP4 (Uso Geral)	50,00	0,00	0,00	0,00
OP5 (Udasf)	6,00	0,00	0,10	0,60
OP6 (Destilação Atmosférica)	21,00	0,00	3,30	69,30
OP7 (Destilação a vácuo)	27,00	0,00	1,80	48,60
OP8 (Stripper I)	10,00	0,27	0,27	0,00
OP9 (Stripper II)	85,00	2,04	2,04	0,00
OP10 (Dessalgadora)	112,00	1,98	3,98	224,00
OP11 (Fonte Dessalgadora)	112,00	0,00	1,98	221,76
OP12 (Pré-Flash)	8,00	0,00	41,10	328,80
OP13 (Tanque de Petróleo)	8,00	0,00	36,51	292,08
OP14 (ETDI)	414,00	0,19	0,19	0,00
Fonte externa				
1 – Água Desmineralizada	264,00	0,00		
2 – Água Bruta	517,00	0,00		

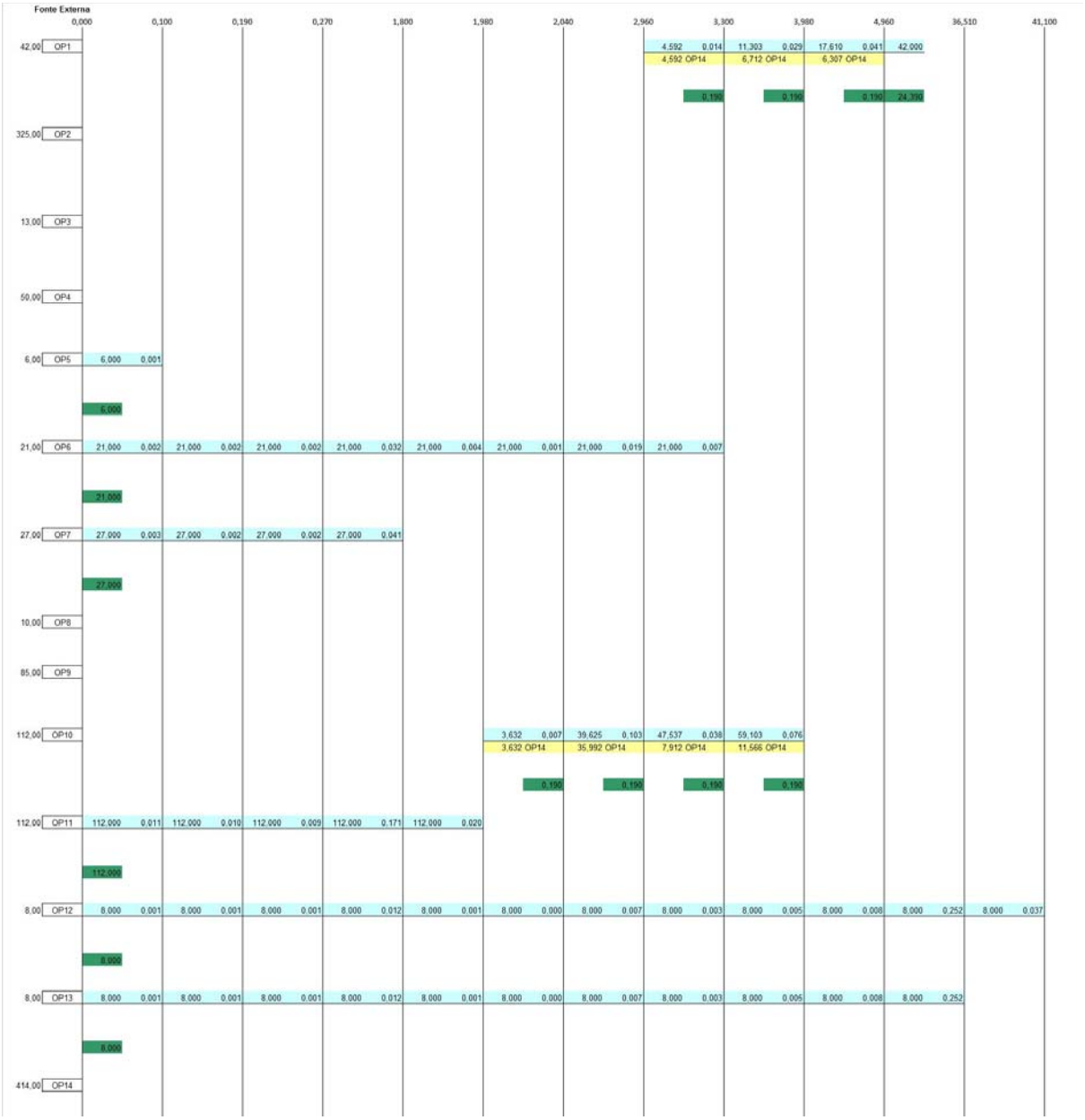


Figura D.39 – Diagrama de fontes de água do processo para limite de 16 ciclos de concentração da TR – Cenário 19a: contaminante Cianeto

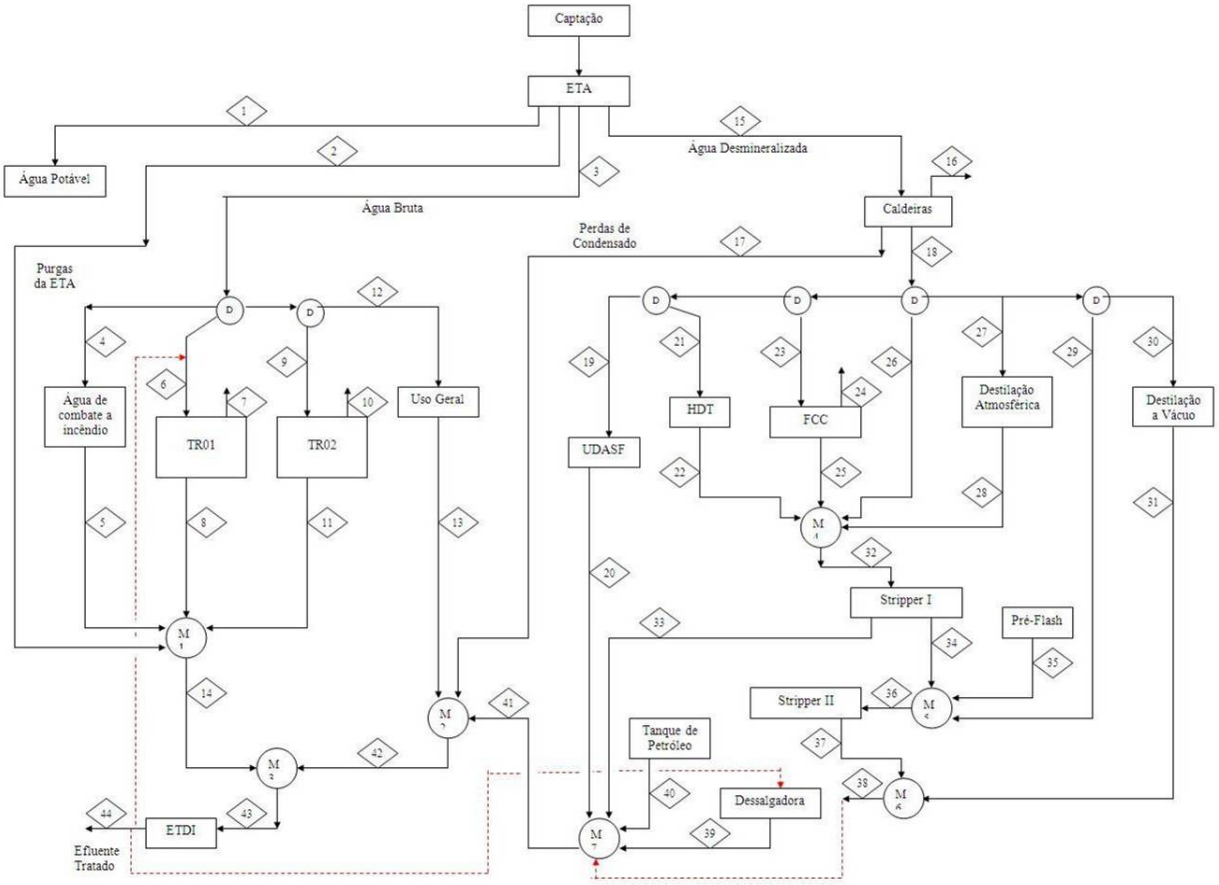


Figura D.40 – Diagrama de blocos do processo para limite de 16 ciclos de concentração da TR – Cenário 19a: contaminante Cianeto

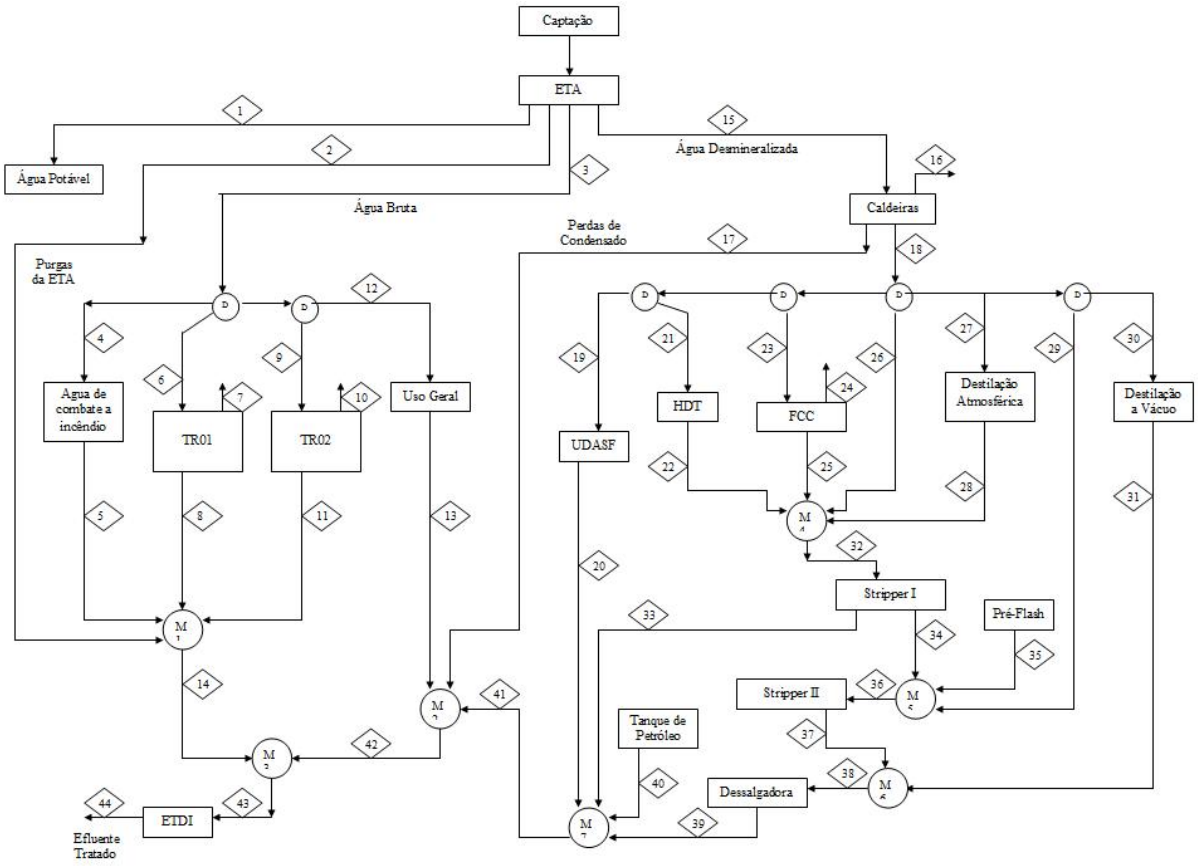


Figura D.41 – Diagrama de blocos do processo para limite de 16 ciclos de concentração da TR – Cenário 19b: contaminante Cianeto

Tabela D.31 – Balanço hídrico do processo para o cenário 19b

Número da corrente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nome da corrente	Água Potável	Purga da ETA	Água Bruta	Entrada (Pressurização) da água de combate a incêndios	Saída da água de combate a incêndios	Reposição da TR01	Perda da TR01	Purga da TR01	Reposição da TR02	Perda da TR02
Vazão (t/h)	21	13	517	100	100	42	37	5	325	285
pH	7,50	5,40	6,90	6,90	6,90	6,90		8,00	6,90	
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	14,8	8,6	8,6	8,6	8,6	55,90	55,90	8,6	66,22
Sílica	0	15,6	9,4	9,4	9,4	9,4	61,10	61,10	9,4	72,38
Amônia	0	0,36	0,07	0,07	50,07	0,07	0,57	0,57	0,07	0,57
Sulfeto	0	0,32	0,1	0,1	10,10	0,1	0,06	0,06	0,1	0,06
Cloreto	0	170	9,7	9,7	109,7	9,7	163,05	163,05	9,7	204,69
Cianeto	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0
Fenol	0	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,13	0,13	0,05	0,06

Número da corrente	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Nome da corrente	Purga da TR02	Entrada para Uso Geral	Saída do Uso Geral	Junção (2 + 5 + 8 + 11)	Água Desmineralizada (Entrada da Caldeira)	Perda de vapor (Caldeira)	Perda de condensado (Caldeira)	Vapor de processo (Caldeira)	Entrada da UDASF	Saída da UDASF
Vazão (t/h)	40	50	50	158	264	64	70	130	6	6
pH	7,30	6,90	6,90	6,38	7,00		7,00	7,00	7,00	5,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	66,22	8,6	8,6	25,19	0	0	1	0	0	9,8
Sílica	72,38	9,4	9,4	27,49	0	0	1	0	0	4,6
Amônia	0,57	0,07	10,07	31,88	0	0	10	0	0	3,1
Sulfeto	0,06	0,1	1,10	6,44	0	0	10	0	0	6,3
Cloreto	204,69	9,7	109,7	140,40	0	0	10	0	0	3,7
Cianeto	0	0	0	0,06	0	0	0	0	0	0,1
Fenol	0,06	0,05	0,05	0,06	0	0	0	0	0	39,3

Tabela D.31 – Balanço hídrico do processo para o cenário 19b (continuação)

Número da corrente	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Nome da corrente	Entrada da HDT	Saída da HDT	Entrada da FCC	Perda de vapor (FCC)	Saída da FCC	Vapor de processo (para *Stripper* I)	Entrada da Destila-ção Atmosféri ca	Saída da Destilação Atmosférica	Vapor de processo (para *Stripper* II)	Entrada da Destilação a Vácuo
Vazão (t/h)	6	6	50	10	40	10	21	21	10	27
pH	7,00	7,70	7,00		8,90	7,00	7,00	6,90	7,00	7,00
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	10,7	0	0	8,4	0	0	4,1	0	0
Sílica	0	1,3	0	0	3,5	0	0	8,4	0	0
Amônia	0	7708	0	0	13300,4	0	0	191,2	0	0
Sulfeto	0	22838,3	0	0	10374,4	0	0	268,3	0	0
Cloreto	0	75,4	0	0	51,5	0	0	132,7	0	0
Cianeto	0	33,8	0	0	67,4	0	0	3,3	0	0
Fenol	0	54,7	0	0	193,2	0	0	113,8	0	0

Número da corrente	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Nome da corrente	Saída da Destilação a Vácuo (para a entrada da Dessalgadora)	Afluente da *Stripper* I	Excedente (saída) da *Stripper* I	Saída da *Stripper* I (para *stripper* II)	Saída do Vaso de Pré-flash	Afluente da *Stripper* II	Saída da *Stripper* II	Entrada da Dessalgadora (31+37)	Saída da Dessalga-dora	Dreno do Tanque de Petróleo
Vazão (t/h)	27	77	10	67	8	85	85	112	112	8
pH	6,80	7,31	10,31	10,31	7,50	7,83	5,83	5,94	5,94	7,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	8,6	6,32	6,32	6,32	3,6	5,32	5,32	6,11	51,11	225
Sílica	42,5	4,21	4,21	4,21	1,7	3,48	3,48	12,89	17,89	25
Amônia	144,1	7562,07	831,83	831,83	774	728,52	269,55	239,31	95,72	68,8
Sulfeto	140,7	7242,08	14,48	14,48	1092,2	114,21	0,34	34,18	3,42	970,82
Cloreto	75,4	68,82	68,82	68,82	28,6	56,94	56,94	61,39	1361,39	6500
Cianeto	1,8	38,55	0,27	0,27	41,1	4,08	2,04	1,98	3,98	36,512
Fenol	23,6	135,66	108,53	108,53	44,8	89,76	89,76	73,81	7,38	39,8

Tabela D.31 – Balanço hídrico do processo para o cenário 19b (continuação)

Número da corrente	41	42	43	44
Nome da corrente	Junção (20 +33+39+40)	Junção (13+17+41)	Junção (14+42) / Entrada da ETDI	Saída da ETDI
Vazão (t/h)	136	256	414	414
pH	5,96	6,20	6,26	6,26
Concentração (mg/L)				
Cálcio	56,22	31,82	29,29	79,29
Sílica	16,71	10,99	17,29	17,29
Amônia	144,18	81,30	62,44	1,56
Sulfeto	61,26	35,50	24,41	0,24
Cloreto	1508,72	825,67	564,14	56,41
Cianeto	5,45	2,90	1,82	0,18
Fenol	18,13	9,64	5,98	0,30

Cenário 20

Dados de Entrada 20a

DFA 20a

Fluxograma 20a

Fluxograma 20b

Balanço 20b

Tabela D.32 – Dados de entrada para a aplicação do DFA (componente Fenol)

Operação	Vazão (t/h)	Cin (mg/L)	Cout (mg/L)	Δm (g/h)
OP1 (TR01)	42,00	0,12	0,31	7,98
OP2 (TR02)	325,00	0,11	0,13	6,18
OP3 (Purga da ETA)	13,00	0,06	0,06	0,00
OP4 (Uso Geral)	50,00	0,05	0,05	0,00
OP5 (Udasf)	6,00	0,00	39,30	235,80
OP6 (Destilação Atmosférica)	21,00	0,00	113,80	2389,80
OP7 (Destilação a Vácuo)	27,00	0,00	23,60	637,20
OP8 (Stripper I)	10,00	108,53	108,53	0,00
OP9 (Stripper II)	85,00	89,76	89,76	0,00
OP10 (Dessalgadora)	112,00	73,81	10000	1111733,28
OP11 (Fonte Dessalgadora)	112,00	0,00	73,81	8266,72
OP12 (Pré-Flash)	8,00	0,00	44,80	358,40
OP13 (Tanque de Petróleo)	8,00	0,00	39,80	318,40
OP14 (ETDI)	414,00	0,30	0,30	0,00
OP15 (Dessalgadora Reúso)	112,00	0,00	7,38	826,56
Fonte externa				
1 – Água Desmineralizada	264,00	0,00		
2 – Água Bruta	517,00	0,05		

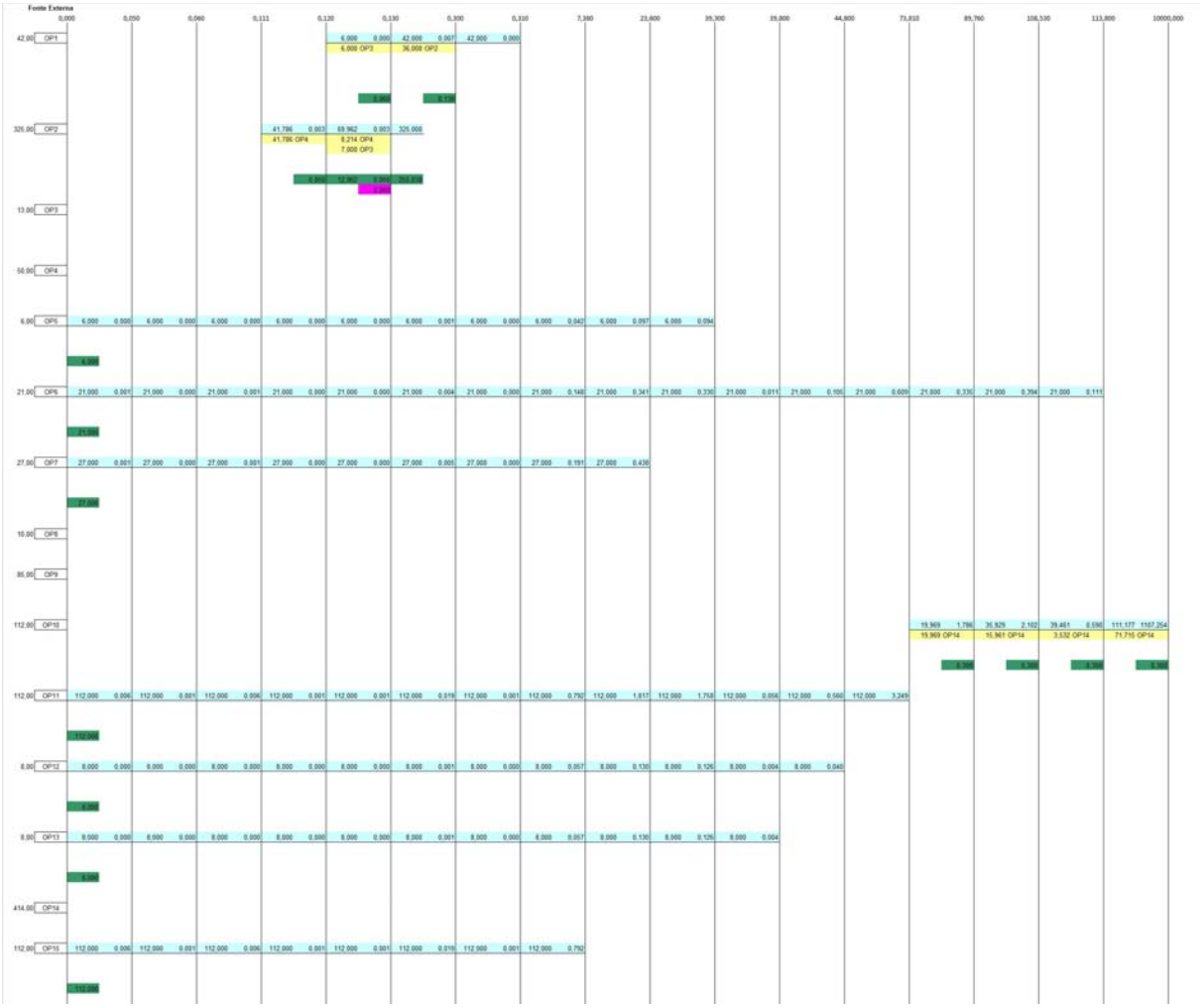


Figura D.42 – Diagrama de fontes de água do processo para limite de 16 ciclos de concentração da TR – Cenário 20a: contaminante Fenol

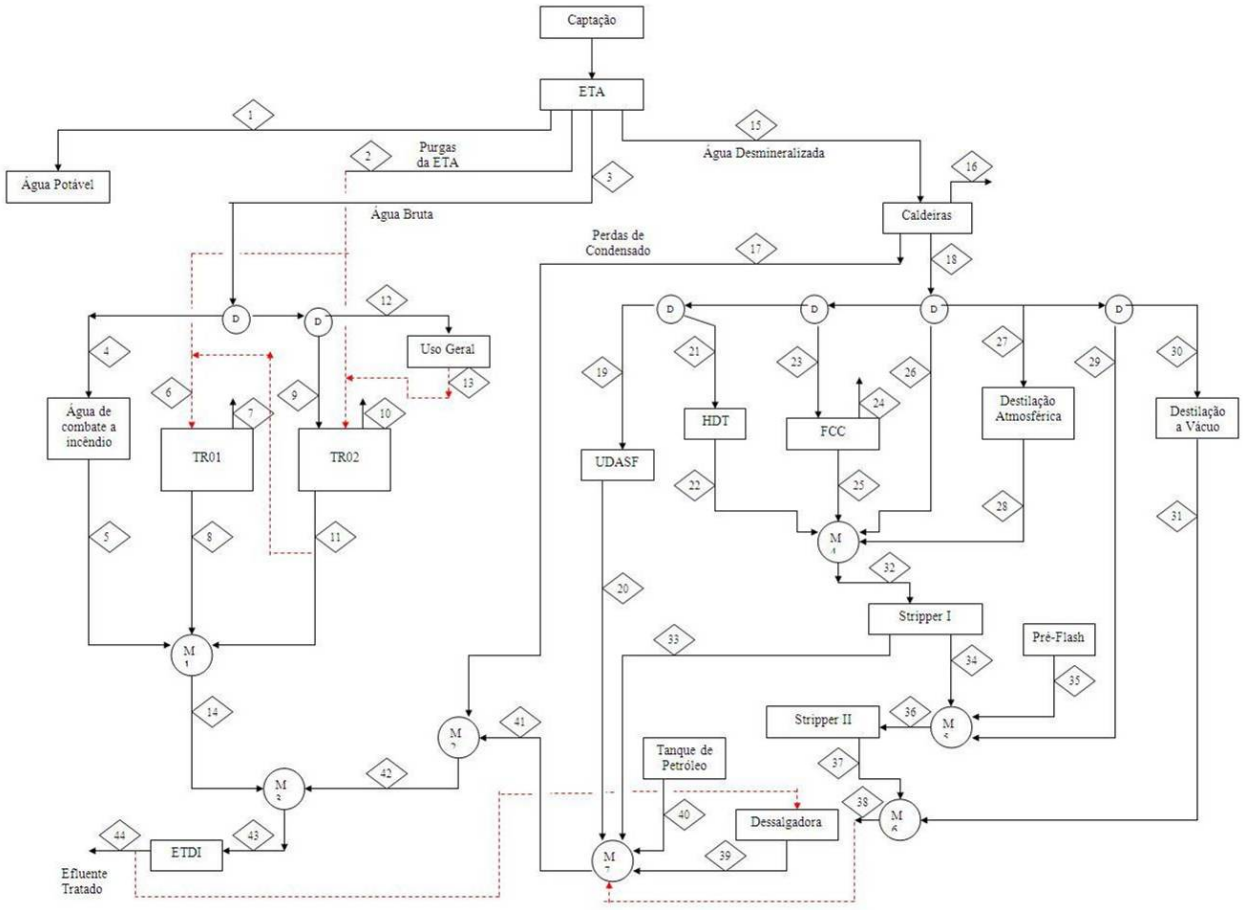


Figura D.43 – Diagrama de blocos do processo para limite de 16 ciclos de concentração da TR – Cenário 20a: contaminante Fenol

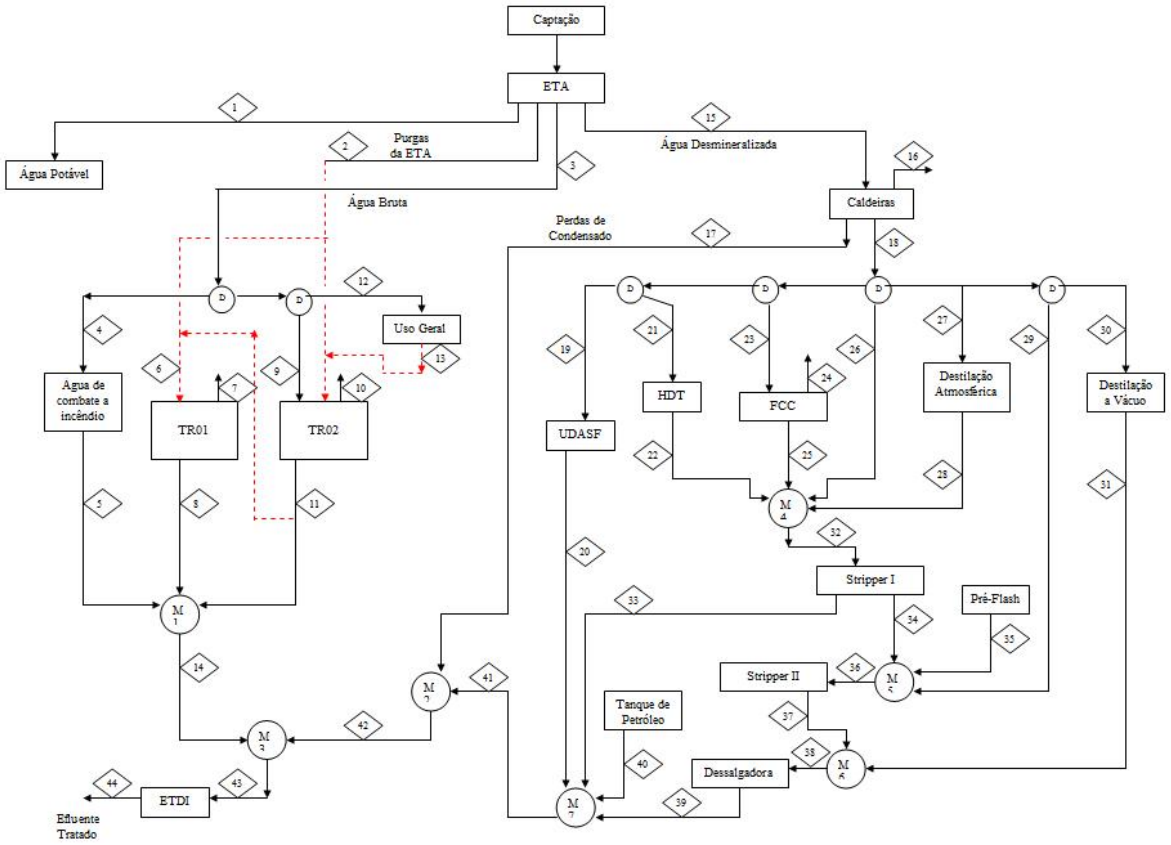


Figura D.44 – Diagrama de blocos do processo para limite de 16 ciclos de concentração da TR – Cenário 20b: contaminante Fenol

Tabela D.33 – Balanço hídrico do processo para o cenário 20b

Número da corrente	1	2	3	4	5	6	7	8	9''	10
Nome da corrente	Água Potável	Purga da ETA	Água Bruta	Entrada (Pressurização) da água de combate a incêndios	Saída da água de combate a incêndios	Reposição da TR01	Perda da TR01	Purga da TR01	Reposição da TR02	Perda da TR02
Vazão (t/h)	21	13	418	100	100	42	37	5	268	285
pH	7,50	5,40	6,90	6,90	6,90	6,19		7,29	6,90	
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	14,8	8,6	8,6	8,6	59,76	388,41	388,41	8,60	67,25
Sílica	0	15,6	9,4	9,4	9,4	65,15	423,47	423,47	9,40	73,41
Amônia	0	0,36	0,07	0,07	50,07	1,86	2,36	2,36	0,07	2,11
Sulfeto	0	0,32	0,1	0,1	10,10	0,11	0,06	0,06	0,10	0,07
Cloreto	0	170	9,7	9,7	109,7	324,06	2206,39	2206,39	9,70	349,74
Cianeto	0	0	0	0	0	0,00	2,00	2,00	0,00	0,00
Fenol	0	0,06	0,05	0,05	0,05	0,06	0,15	0,15	0,05	0,06

Número da corrente	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Nome da corrente	Purga da TR02	Entrada para Uso Geral	Saída do Uso Geral para reúso na TR02	Junção (2 + 5 + 8 + 11')	Água Desmineralizada (Entrada da Caldeira)	Perda de vapor (Caldeira)	Perda de condensado (Caldeira)	Vapor de processo (Caldeira)	Entrada da UDASF	Saída da UDASF
Vazão (t/h)	40	50	50	122	264	64	70	130	6	6
pH	7,08	6,90	6,90	6,27	7,00		7,00	7,00	7,00	5,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	67,25	8,6	8,6	26,75	0	0	1	0	0	9,8
Sílica	73,41	9,4	9,4	29,13	0	0	1	0	0	4,6
Amônia	2,11	0,07	10,07	41,25	0	0	10	0	0	3,1
Sulfeto	0,07	0,1	1,1	8,32	0	0	10	0	0	6,3
Cloreto	349,74	9,7	109,7	209,93	0	0	10	0	0	3,7
Cianeto	0,00	0	0	0,08	0	0	0	0	0	0,1
Fenol	0,06	0,05	0,05	0,06	0	0	0	0	0	39,3

Tabela D.33 – Balanço hídrico do processo para o cenário 20b (continuação)

Número da corrente	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Nome da corrente	Entrada da HDT	Saída da HDT	Entrada da FCC	Perda de vapor (FCC)	Saída da FCC	Vapor de processo (para *Stripper* I)	Entrada da Destila-ção Atmosféri ca	Saída da Destilação Atmosférica	Vapor de processo (para *Stripper* II)	Entrada da Destilação a Vácuo
Vazão (t/h)	6	6	50	10	40	10	21	21	10	27
pH	7,00	7,70	7,00		8,90	7,00	7,00	6,90	7,00	7,00
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	10,7	0	0	8,4	0	0	4,1	0	0
Sílica	0	1,3	0	0	3,5	0	0	8,4	0	0
Amônia	0	7708	0	0	13300,4	0	0	191,2	0	0
Sulfeto	0	22838,3	0	0	10374,4	0	0	268,3	0	0
Cloreto	0	75,4	0	0	51,5	0	0	132,7	0	0
Cianeto	0	33,8	0	0	67,4	0	0	3,3	0	0
Fenol	0	54,7	0	0	193,2	0	0	113,8	0	0

Número da corrente	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Nome da corrente	Saída da Destilação a Vácuo (para a entrada da Dessalgadora)	Afluente da *Stripper* I	Excedente (saída) da *Stripper* I	Saída da *Stripper* I (para *stripper* II)	Saída do Vaso de Pré-flash	Afluente da *Stripper* II	Saída da *Stripper* II	Entrada da Dessalgadora (31+37)	Saída da Dessalga-dora	Dreno do Tanque de Petróleo
Vazão (t/h)	27	77	10	67	8	85	85	112	112	8
pH	6,80	7,31	10,31	10,31	7,50	7,83	5,83	5,94	5,94	7,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	8,6	6,32	6,32	6,32	3,6	5,32	5,32	6,11	51,11	225
Sílica	42,5	4,21	4,21	4,21	1,7	3,48	3,48	12,89	17,89	25
Amônia	144,1	7562,07	831,83	831,83	774	728,52	269,55	239,31	95,72	68,8
Sulfeto	140,7	7242,08	14,48	14,48	1092,2	114,21	0,34	34,18	3,42	970,82
Cloreto	75,4	68,82	68,82	68,82	28,6	56,94	56,94	61,39	1361,39	6500
Cianeto	1,8	38,55	0,27	0,27	41,1	4,08	2,04	1,98	3,98	36,512
Fenol	23,6	135,66	108,53	108,53	44,8	89,76	89,76	73,81	7,38	39,8

Tabela D.33 – Balanço hídrico do processo para o cenário 20b (continuação)

Número da corrente	41	42	43	44	6’	9	9’	11’	11’’
Nome da corrente	Junção (20+33+39+40)	Junção (13+17+41)	Junção (14+42) / Entrada da ETDI	Saída da ETDI	Reúso da purga da ETA para a TR01	Reposição da TR02 com reúso	Reúso da purga da ETA para a TR02	Saída da TR02 após reúso	Purga da TR02 para TR01
Vazão (t/h)	136	256	378	378	6	325	7	4	36
pH	5,96	6,20	6,22	6,22	5,40	6,68	5,40	7,08	7,08
Concentração (mg/L)									
Cálcio	56,22	31,82	30,18	80,18	14,80	8,73	14,80	67,25	67,25
Sílica	16,71	10,99	16,84	16,84	15,60	9,53	15,60	73,41	73,41
Amônia	144,18	81,30	68,37	1,71	0,36	1,61	0,36	2,11	2,11
Sulfeto	61,26	35,50	26,72	0,27	0,32	0,26	0,32	0,07	0,07
Cloreto	1508,72	825,67	626,94	62,69	170,00	28,54	170,00	349,74	349,74
Cianeto	5,45	2,90	1,99	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fenol	18,13	9,64	6,55	0,33	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06

Cenário 3

Balanço 3a

Tabela D.34 – Balanço hídrico do processo para o cenário 3a

Número da corrente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nome da corrente	Água Potável	Purga da ETA	Água Bruta	Entrada (Pressurização) da água de combate a incêndios	Saída da água de combate a incêndios	Reposição da TR01	Perda da TR01	Purga da TR01	Reposição da TR02	Perda da TR02
Vazão (t/h)	21	13	497,9	100	100	42	37	5	325	285
pH	7,50	5,40	6,90	6,90	6,90	6,06		7,16	6,74	
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	14,8	8,6	8,6	8,6	9,81	63,77	63,77	8,69	66,93
Sílica	0	15,6	9,4	9,4	9,4	10,61	68,97	68,97	9,49	73,09
Amônia	0	0,36	0,07	0,07	50,07	0,13	0,63	0,63	0,07	0,57
Sulfeto	0	0,32	0,1	0,1	10,10	0,14	0,06	0,06	0,10	0,06
Cloreto	0	170	9,7	9,7	109,7	41,00	366,48	366,48	12,07	222,92
Cianeto	0	0	0	0	0	0	2,00	2,00	0	0
Fenol	0	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,14	0,14	0,05	0,06

Número da corrente	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Nome da corrente	Purga da TR02	Entrada (água bruta) para Uso Geral	Saída do Uso Geral	Junção (5 + 8 + parte 11)	Água Desmineralizada (Entrada da Caldeira)	Perda de vapor (Caldeira)	Perda de condensado (Caldeira)	Vapor de processo (Caldeira)	Entrada da UDASF	Saída da UDASF
Vazão (t/h)	40	43,9	50	138,9	154,66	64	70	130	6	6
pH	7,14	6,90	6,92	6,96	7,00		7,00	7,00	7,00	5,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	66,93	8,6	15,72	24,82	0	0	1	0	0	9,8
Sílica	73,09	9,4	17,17	27,09	0	0	1	0	0	4,6
Amônia	0,57	0,07	10,13	36,21	0	0	10	0	0	3,1
Sulfeto	0,06	0,1	1,09	7,29	0	0	10	0	0	6,3
Cloreto	222,92	9,7	135,71	146,58	0	0	10	0	0	3,7
Cianeto	0	0	0	0,07	0	0	0	0	0	0,1
Fenol	0,06	0,05	0,05	0,05	0	0	0	0	0	39,3

Tabela D.34 – Balanço hídrico do processo para o cenário 3a (continuação)

Número da corrente	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Nome da corrente	Entrada da HDT	Saída da HDT	Entrada da FCC	Perda de vapor (FCC)	Saída da FCC	Vapor de processo (para *Stripper* I)	Entrada da Destila-ção Atmosféri ca	Saída da Destilação Atmosférica	Vapor de processo (para *Stripper* II)	Entrada da Destilação a Vácuo
Vazão (t/h)	6	6	50	10	40	10	21	21	10	27
pH	7,00	7,70	7,00		8,90	7,00	7,00	6,90	7,00	7,00
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	10,7	0	0	8,4	0	0	4,1	0	0
Sílica	0	1,3	0	0	3,5	0	0	8,4	0	0
Amônia	0	7708	0	0	13300,4	0	0	191,2	0	0
Sulfeto	0	22838,3	0	0	10374,4	0	0	268,3	0	0
Cloreto	0	75,4	0	0	51,5	0	0	132,7	0	0
Cianeto	0	33,8	0	0	67,4	0	0	3,3	0	0
Fenol	0	54,7	0	0	193,2	0	0	113,8	0	0

Número da corrente	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Nome da corrente	Saída da Destilação a Vácuo (para a entrada da Dessalgadora)	Afluente da *Stripper* I	Excedente (saída) da *Stripper* I	Saída da *Stripper* I (para *stripper* II)	Saída do Vaso de Pré-flash	Afluente da *Stripper* II	Saída da *Stripper* II	Junção (31+37)	Saída da Dessalga-dora	Dreno do Tanque de Petróleo
Vazão (t/h)	27	77	10	67	8	85	85	112	112	8
pH	6,80	7,31	10,31	10,31	7,50	7,83	5,83	5,94	6,35	7,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	8,6	6,32	6,32	6,32	3,6	5,32	5,32	6,11	139,44	225
Sílica	42,5	4,21	4,21	4,21	1,7	3,48	3,48	12,89	22,63	25
Amônia	144,1	7562,07	831,83	831,83	774	728,52	269,55	239,31	0,83	68,8
Sulfeto	140,7	7242,08	14,48	14,48	1092,2	114,21	0,34	34,18	0,03	970,82
Cloreto	75,4	68,82	68,82	68,82	28,6	56,94	56,94	61,39	1347,01	6500
Cianeto	1,8	38,55	0,27	0,27	41,1	4,08	2,04	1,98	2,15	36,512
Fenol	23,6	135,66	108,53	108,53	44,8	89,76	89,76	73,81	0,10	39,8

Tabela D.34 – Balanço hídrico do processo para o cenário 3a (continuação)

Número da corrente	41	42	43	44	45	44
Nome da corrente	Junção (20 +33+39+40+38)	Junção (13+17+41)	Junção (14+42) / Entrada da ETDI	Saída da ETDI	Entrada para Uso Geral	Entrada da dessalgadora
Vazão (t/h)	248	368	506,9	394,9	50	112
pH	6,10	6,24	6,35	6,35	6,92	6,35
Concentração (mg/L)						
Cálcio	73,48	51,85	44,44	94,44	15,72	94,44
Sílica	17,13	14,07	17,63	17,63	17,17	17,63
Amônia	144,29	100,51	82,89	2,07	0,13	2,07
Sulfeto	47,50	34,06	26,73	0,27	0,09	0,27
Cloreto	848,59	592,22	470,10	47,01	35,71	47,01
Cianeto	3,06	2,06	1,52	0,15	0,00	0,15
Fenol	39,99	26,96	19,59	0,98	0,05	0,98

Cenário 3

Balanço 3a

(Nova Configuração)

Tabela D.35 – Balanço hídrico do processo para o cenário 3a (nova configuração)

Número da corrente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nome da corrente	Água Potável	Purga da ETA	Água Bruta	Entrada (Pressurização) da água de combate a incêndios	Saída da água de combate a incêndios	Reposição da TR01	Perda da TR01	Purga da TR01	Reposição da TR02	Perda da TR02
Vazão (t/h)	21	13	497,9	100	100	42	37	5	325	285
pH	7,50	5,40	6,90	6,90	6,90	6,90		8,00	6,90	
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	14,8	8,6	8,6	8,6	8,6	55,90	55,90	8,6	66,22
Sílica	0	15,6	9,4	9,4	9,4	9,4	61,10	61,10	9,4	72,38
Amônia	0	0,36	0,07	0,07	50,07	0,07	0,57	0,57	0,07	0,57
Sulfeto	0	0,32	0,1	0,1	10,10	0,1	0,06	0,06	0,1	0,06
Cloreto	0	170	9,7	9,7	109,7	9,7	163,05	163,05	9,7	204,69
Cianeto	0	0	0	0	0	0	2,00	2,00	0	0
Fenol	0	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,13	0,13	0,05	0,06

Número da corrente	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Nome da corrente	Purga da TR02	Entrada (água bruta) para Uso Geral	Saída do Uso Geral	Junção (5 + 8 + parte 11)	Água Desmineralizada (Entrada da Caldeira)	Perda de vapor (Caldeira)	Perda de condensado (Caldeira)	Vapor de processo (Caldeira)	Entrada da UDASF	Saída da UDASF
Vazão (t/h)	40	43,9	50	151,9	154,66	64	70	130	6	6
pH	7,30	6,90	6,93	6,36	7,00		7,00	7,00	7,00	5,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	66,22	8,6	15,63	23,55	0	0	1	0	0	9,8
Sílica	72,38	9,4	17,08	25,69	0	0	1	0	0	4,6
Amônia	0,57	0,07	10,13	33,14	0	0	10	0	0	3,1
Sulfeto	0,06	0,1	1,09	6,69	0	0	10	0	0	6,3
Cloreto	204,69	9,7	133,49	137,82	0	0	10	0	0	3,7
Cianeto	0	0	0	0,07	0	0	0	0	0	0,1
Fenol	0,06	0,05	0,05	0,06	0	0	0	0	0	39,3

Tabela D.35 – Balanço hídrico do processo para o cenário 3a (continuação)

Número da corrente	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Nome da corrente	Entrada da HDT	Saída da HDT	Entrada da FCC	Perda de vapor (FCC)	Saída da FCC	Vapor de processo (para *Stripper* I)	Entrada da Destila-ção Atmosféri ca	Saída da Destilação Atmosférica	Vapor de processo (para *Stripper* II)	Entrada da Destilação a Vácuo
Vazão (t/h)	6	6	50	10	40	10	21	21	10	27
pH	7,00	7,70	7,00		8,90	7,00	7,00	6,90	7,00	7,00
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	10,7	0	0	8,4	0	0	4,1	0	0
Sílica	0	1,3	0	0	3,5	0	0	8,4	0	0
Amônia	0	7708	0	0	13300,4	0	0	191,2	0	0
Sulfeto	0	22838,3	0	0	10374,4	0	0	268,3	0	0
Cloreto	0	75,4	0	0	51,5	0	0	132,7	0	0
Cianeto	0	33,8	0	0	67,4	0	0	3,3	0	0
Fenol	0	54,7	0	0	193,2	0	0	113,8	0	0

Número da corrente	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Nome da corrente	Saída da Destilação a Vácuo (para a entrada da Dessalgadora)	Afluente da *Stripper* I	Excedente (saída) da *Stripper* I	Saída da *Stripper* I (para *stripper* II)	Saída do Vaso de Pré-flash	Afluente da *Stripper* II	Saída da *Stripper* II	Junção (31+37)	Saída da Dessalga-dora	Dreno do Tanque de Petróleo
Vazão (t/h)	27	77	10	67	8	85	85	112	112	8
pH	6,80	7,31	10,31	10,31	7,50	7,83	5,83	5,94	6,25	7,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	8,6	6,32	6,32	6,32	3,6	5,32	5,32	6,11	139,44	225
Sílica	42,5	4,21	4,21	4,21	1,7	3,48	3,48	12,89	22,63	25
Amônia	144,1	7562,07	831,83	831,83	774	728,52	269,55	239,31	0,83	68,8
Sulfeto	140,7	7242,08	14,48	14,48	1092,2	114,21	0,34	34,18	0,03	970,82
Cloreto	75,4	68,82	68,82	68,82	28,6	56,94	56,94	61,39	1347,01	6500
Cianeto	1,8	38,55	0,27	0,27	41,1	4,08	2,04	1,98	2,15	36,512
Fenol	23,6	135,66	108,53	108,53	44,8	89,76	89,76	73,81	0,10	39,8

Tabela D.35 – Balanço hídrico do processo para o cenário 3a (continuação)

Número da corrente	41	42	43	44	45	44
Nome da corrente	Junção (20 +33+39+40+38)	Junção (13+17+41)	Junção (14+42) / Entrada da ETDI	Saída da ETDI	Entrada para Uso Geral	Entrada da dessalgadora
Vazão (t/h)	248	368	519,9	407,9	50	112
pH	6,07	6,22	6,25	6,25	6,93	6,25
Concentração (mg/L)						
Cálcio	73,48	51,85	44,44	94,44	15,63	94,44
Sílica	17,13	14,07	17,63	17,63	17,08	17,63
Amônia	144,29	100,51	82,89	2,07	0,13	2,07
Sulfeto	47,50	34,06	26,73	0,27	0,09	0,27
Cloreto	848,59	592,22	470,10	47,01	33,49	47,01
Cianeto	3,06	2,06	1,52	0,15	0	0,15
Fenol	39,99	26,96	19,59	0,98	0,05	0,98

Cenário 11

Balanço 11a

Tabela D.36 – Balanço hídrico do processo para o cenário 11a

Número da corrente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nome da corrente	Água Potável	Purga da ETA	Água Bruta	Entrada (Pressurização) da água de combate a incêndios	Saída da água de combate a incêndios	Reposição da TR01	Perda da TR01	Purga da TR01	Reposição da TR02	Perda da TR02
Vazão (t/h)	21	13	466,99	100	100	42	37	5	325	285
pH	7,50	5,40	6,90	6,90	6,90	6,90		8,00	6,90	
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	14,8	8,6	8,6	8,6	8,6	55,90	55,90	8,6	66,22
Sílica	0	15,6	9,4	9,4	9,4	9,4	61,10	61,10	9,4	72,38
Amônia	0	0,36	0,07	0,07	50,07	0,07	0,57	0,57	0,07	0,57
Sulfeto	0	0,32	0,1	0,1	10,10	0,1	0,06	0,06	0,1	0,06
Cloreto	0	170	9,7	9,7	109,7	9,7	163,05	163,05	9,7	204,69
Cianeto	0	0	0	0	0	0	2,00	2,00	0	0
Fenol	0	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,13	0,13	0,05	0,06

Número da corrente	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Nome da corrente	Purga da TR02	Junção (11+44) / Entrada Uso Geral	Saída do Uso Geral	Junção (2 + 5 + 8 + parte 11)	Água Desmineralizada (Entrada da Caldeira)	Perda de vapor (Caldeira)	Perda de condensado (Caldeira)	Vapor de processo (Caldeira)	Entrada da UDASF	Saída da UDASF
Vazão (t/h)	40	50	50	119,1	152,38	64	70	130	6	6
pH	7,30	6,79	6,79	6,27	7,00		7,00	7,00	7,00	5,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	66,22	70,00	70,00	11,79	0	0	1	0	0	9,8
Sílica	72,38	61,30	61,30	12,83	0	0	1	0	0	4,6
Amônia	0,57	0,89	10,89	42,11	0	0	10	0	0	3,1
Sulfeto	0,06	0,10	1,10	8,52	0	0	10	0	0	6,3
Cloreto	204,69	167,45	267,45	119,40	0	0	10	0	0	3,7
Cianeto	0	0,02	0,02	0,08	0	0	0	0	0	0,1
Fenol	0,06	0,25	0,05	0,05	0	0	0	0	0	39,3

Tabela D.36 – Balanço hídrico do processo para o cenário 11a (continuação)

Número da corrente	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Nome da corrente	Entrada da HDT	Saída da HDT	Entrada da FCC	Perda de vapor (FCC)	Saída da FCC	Vapor de processo (para *Stripper* I)	Entrada da Destila-ção Atmosféri ca	Saída da Destilação Atmosférica	Vapor de processo (para *Stripper* II)	Entrada da Destilação a Vácuo
Vazão (t/h)	6	6	50	10	40	10	21	21	10	27
pH	7,00	7,70	7,00		8,90	7,00	7,00	6,90	7,00	7,00
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	10,7	0	0	8,4	0	0	4,1	0	0
Sílica	0	1,3	0	0	3,5	0	0	8,4	0	0
Amônia	0	7708	0	0	13300,4	0	0	191,2	0	0
Sulfeto	0	22838,3	0	0	10374,4	0	0	268,3	0	0
Cloreto	0	75,4	0	0	51,5	0	0	132,7	0	0
Cianeto	0	33,8	0	0	67,4	0	0	3,3	0	0
Fenol	0	54,7	0	0	193,2	0	0	113,8	0	0

Número da corrente	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Nome da corrente	Saída da Destilação a Vácuo (para a entrada da Dessalgadora)	Afluente da *Stripper* I	Excedente (saída) da *Stripper* I	Saída da *Stripper* I (para *stripper* II)	Saída do Vaso de Pré-flash	Afluente da *Stripper* II	Saída da *Stripper* II	Junção (31+37)	Saída da Dessalga-dora	Dreno do Tanque de Petróleo
Vazão (t/h)	27	77	10	67	8	85	85	112	112	8
pH	6,80	7,31	10,31	10,31	7,50	7,83	5,83	5,94	6,21	7,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	8,6	6,32	6,32	6,32	3,6	5,32	5,32	6,11	85,14	225
Sílica	42,5	4,21	4,21	4,21	1,7	3,48	3,48	12,89	17,00	25
Amônia	144,1	7562,07	831,83	831,83	774	728,52	269,55	239,31	2,17	68,8
Sulfeto	140,7	7242,08	14,48	14,48	1092,2	114,21	0,34	34,18	0,28	970,82
Cloreto	75,4	68,82	68,82	68,82	28,6	56,94	56,94	61,39	18,47	6500
Cianeto	1,8	38,55	0,27	0,27	41,1	4,08	2,04	1,98	0,11	36,512
Fenol	23,6	135,66	108,53	108,53	44,8	89,76	89,76	73,81	1,03	39,8

Tabela D.36 – Balanço hídrico do processo para o cenário 11a (continuação)

Número da corrente	41	42	43	44	44
Nome da corrente	Junção (20 +33+39+40+38)	Junção (13+17+41)	Junção (14+42) / Entrada da ETDI	Saída da ETDI	Entrada da dessalgadora
Vazão (t/h)	248	368	487,1	375,1	112
pH	6,06	6,20	6,21	6,21	6,21
Concentração (mg/L)					
Cálcio	48,96	42,70	35,14	85,14	85,14
Sílica	14,58	18,35	17,00	17,00	17,00
Amônia	144,89	101,02	86,62	2,17	2,17
Sulfeto	47,61	34,14	27,88	0,28	0,28
Cloreto	248,61	205,78	184,66	18,47	18,47
Cianeto	2,14	1,44	1,11	0,11	0,11
Fenol	40,41	27,27	20,61	1,03	1,03

Cenário 17

Balanço 17a

Tabela D.37 – Balanço hídrico do processo para o cenário 17a

Número da corrente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nome da corrente	Água Potável	Purga da ETA	Água Bruta	Entrada (Pressurização) da água de combate a incêndios	Saída da água de combate a incêndios	Reposição da TR01	Perda da TR01	Purga da TR01	Reposição da TR02	Perda da TR02
Vazão (t/h)	21	13	478,5	100	100	42	37	5	325	285
pH	7,50	5,40	6,90	6,90	6,90	6,90		8,00	6,90	
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	14,8	8,6	8,6	8,6	8,6	55,90	55,90	8,6	66,22
Sílica	0	15,6	9,4	9,4	9,4	9,4	61,10	61,10	9,4	72,38
Amônia	0	0,36	0,07	0,07	50,07	0,07	0,57	0,57	0,07	0,57
Sulfeto	0	0,32	0,1	0,1	10,10	0,1	0,06	0,06	0,1	0,06
Cloreto	0	170	9,7	9,7	109,7	9,7	163,05	163,05	9,7	204,69
Cianeto	0	0	0	0	0	0	2,00	2,00	0	0,00
Fenol	0	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,13	0,13	0,05	0,06

Número da corrente	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Nome da corrente	Purga da TR02	Entrada (água bruta) para Uso Geral	Saída do Uso Geral	Junção (2 + 5 + 8 + parte 11)	Água Desmineralizada (Entrada da Caldeira)	Perda de vapor (Caldeira)	Perda de condensado (Caldeira)	Vapor de processo (Caldeira)	Entrada da UDASF	Saída da UDASF
Vazão (t/h)	40	11,5	50	119,5	152,38	64	70	130	6	6
pH	7,30	6,90	7,17	6,27	7,00		7,00	7,00	7,00	5,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	66,22	8,6	52,97	11,98	0	0	1	0	0	9,8
Sílica	72,38	9,4	57,89	13,03	0	0	1	0	0	4,6
Amônia	0,57	0,07	10,46	41,97	0	0	10	0	0	3,1
Sulfeto	0,06	0,1	1,07	8,49	0	0	10	0	0	6,3
Cloreto	204,69	9,7	259,84	119,68	0	0	10	0	0	3,7
Cianeto	0,00	0	0,00	0,08	0	0	0	0	0	0,1
Fenol	0,06	0,05	0,06	0,05	0	0	0	0	0	39,3

Tabela D.37 – Balanço hídrico do processo para o cenário 17a (continuação)

Número da corrente	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Nome da corrente	Entrada da HDT	Saída da HDT	Entrada da FCC	Perda de vapor (FCC)	Saída da FCC	Vapor de processo (para *Stripper* I)	Entrada da Destila-ção Atmosféri ca	Saída da Destilação Atmosférica	Vapor de processo (para *Stripper* II)	Entrada da Destilação a Vácuo
Vazão (t/h)	6	6	50	10	40	10	21	21	10	27
pH	7,00	7,70	7,00		8,90	7,00	7,00	6,90	7,00	7,00
Concentração (mg/L)										
Cálcio	0	10,7	0	0	8,4	0	0	4,1	0	0
Sílica	0	1,3	0	0	3,5	0	0	8,4	0	0
Amônia	0	7708	0	0	13300,4	0	0	191,2	0	0
Sulfeto	0	22838,3	0	0	10374,4	0	0	268,3	0	0
Cloreto	0	75,4	0	0	51,5	0	0	132,7	0	0
Cianeto	0	33,8	0	0	67,4	0	0	3,3	0	0
Fenol	0	54,7	0	0	193,2	0	0	113,8	0	0

Número da corrente	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Nome da corrente	Saída da Destilação a Vácuo (para a entrada da Dessalgadora)	Afluente da *Stripper* I	Excedente (saída) da *Stripper* I	Saída da *Stripper* I (para *stripper* II)	Saída do Vaso de Pré-flash	Afluente da *Stripper* II	Saída da *Stripper* II	Junção (31+37)	Saída da Dessalga-dora	Dreno do Tanque de Petróleo
Vazão (t/h)	27	77	10	67	8	85	85	112	112	8
pH	6,80	7,31	10,31	10,31	7,50	7,83	5,83	5,94	6,22	7,50
Concentração (mg/L)										
Cálcio	8,6	6,32	6,32	6,32	3,6	5,32	5,32	6,11	141,33	225
Sílica	42,5	4,21	4,21	4,21	1,7	3,48	3,48	12,89	23,09	25
Amônia	144,1	7562,07	831,83	831,83	774	728,52	269,55	239,31	0,86	68,8
Sulfeto	140,7	7242,08	14,48	14,48	1092,2	114,21	0,34	34,18	0,03	970,82
Cloreto	75,4	68,82	68,82	68,82	28,6	56,94	56,94	61,39	1348,96	6500
Cianeto	1,8	38,55	0,27	0,27	41,1	4,08	2,04	1,98	2,16	36,512
Fenol	23,6	135,66	108,53	108,53	44,8	89,76	89,76	73,81	0,10	39,8

Tabela D.37 – Balanço hídrico do processo para o cenário 17a (continuação)

Número da corrente	41	42	43	44	45	44
Nome da corrente	Junção (20 +33+39+40+38)	Junção (13+17+41)	Junção (14+42) / Entrada da ETDI	Saída da ETDI	Entrada para Uso Geral (11+12)	Entrada da dessalgadora
Vazão (t/h)	248	368	487,5	375,5	50	112
pH	6,06	6,21	6,22	6,22	7,17	6,22
Concentração (mg/L)						
Cálcio	74,33	57,48	46,33	96,33	52,97	96,33
Sílica	17,34	19,74	18,09	18,09	57,89	18,09
Amônia	144,30	100,57	86,20	2,16	0,46	2,16
Sulfeto	47,50	34,06	27,79	0,28	0,07	0,28
Cloreto	849,47	609,68	489,57	48,96	159,84	48,96
Cianeto	3,06	2,06	1,58	0,16	0,00	0,16
Fenol	39,99	26,96	20,36	1,02	0,06	1,02

APÊNDICE 5

Resultados da Análise do Sistema de Resfriamento e de Índices de Estabilidade da Água

Tabela E.1 – Dosagem de produto químico em função do ciclo de concentração (CC) – TR01

	Dosagem de produto (kg/h)							
	100	200	400	600	800	1000	1500	2000
CC								
6,5	0,6727	1,3455	2,6909	4,0364	5,3818	6,7273	10,0909	13,4545
6,6	0,6607	1,3214	2,6429	3,9643	5,2857	6,6071	9,9107	13,2143
6,7	0,6491	1,2982	2,5965	3,8947	5,1930	6,4912	9,7368	12,9825
6,8	0,6379	1,2759	2,5517	3,8276	5,1034	6,3793	9,5690	12,7586
6,9	0,6271	1,2542	2,5085	3,7627	5,0169	6,2712	9,4068	12,5424
7	0,6167	1,2333	2,4667	3,7000	4,9333	6,1667	9,2500	12,3333
7,1	0,6066	1,2131	2,4262	3,6393	4,8525	6,0656	9,0984	12,1311
7,2	0,5968	1,1935	2,3871	3,5806	4,7742	5,9677	8,9516	11,9355
7,3	0,5873	1,1746	2,3492	3,5238	4,6984	5,8730	8,8095	11,7460
7,4	0,5781	1,1563	2,3125	3,4688	4,6250	5,7813	8,6719	11,5625
7,5	0,5692	1,1385	2,2769	3,4154	4,5538	5,6923	8,5385	11,3846
7,6	0,5606	1,1212	2,2424	3,3636	4,4848	5,6061	8,4091	11,2121
7,7	0,5522	1,1045	2,2090	3,3134	4,4179	5,5224	8,2836	11,0448
7,8	0,5441	1,0882	2,1765	3,2647	4,3529	5,4412	8,1618	10,8824
7,9	0,5362	1,0725	2,1449	3,2174	4,2899	5,3623	8,0435	10,7246
8	0,5286	1,0571	2,1143	3,1714	4,2286	5,2857	7,9286	10,5714
8,1	0,5211	1,0423	2,0845	3,1268	4,1690	5,2113	7,8169	10,4225
8,2	0,5139	1,0278	2,0556	3,0833	4,1111	5,1389	7,7083	10,2778
8,3	0,5068	1,0137	2,0274	3,0411	4,0548	5,0685	7,6027	10,1370
8,4	0,5000	1,0000	2,0000	3,0000	4,0000	5,0000	7,5000	10,0000
8,5	0,4933	0,9867	1,9733	2,9600	3,9467	4,9333	7,4000	9,8667
8,6	0,4868	0,9737	1,9474	2,9211	3,8947	4,8684	7,3026	9,7368
8,7	0,4805	0,9610	1,9221	2,8831	3,8442	4,8052	7,2078	9,6104
8,8	0,4744	0,9487	1,8974	2,8462	3,7949	4,7436	7,1154	9,4872
8,9	0,4684	0,9367	1,8734	2,8101	3,7468	4,6835	7,0253	9,3671
9	0,4625	0,9250	1,8500	2,7750	3,7000	4,6250	6,9375	9,2500
9,1	0,4568	0,9136	1,8272	2,7407	3,6543	4,5679	6,8519	9,1358
9,2	0,4512	0,9024	1,8049	2,7073	3,6098	4,5122	6,7683	9,0244
9,3	0,4458	0,8916	1,7831	2,6747	3,5663	4,4578	6,6867	8,9157
9,4	0,4405	0,8810	1,7619	2,6429	3,5238	4,4048	6,6071	8,8095
9,5	0,4353	0,8706	1,7412	2,6118	3,4824	4,3529	6,5294	8,7059
9,6	0,4302	0,8605	1,7209	2,5814	3,4419	4,3023	6,4535	8,6047
9,7	0,4253	0,8506	1,7011	2,5517	3,4023	4,2529	6,3793	8,5057
9,8	0,4205	0,8409	1,6818	2,5227	3,3636	4,2045	6,3068	8,4091
9,9	0,4157	0,8315	1,6629	2,4944	3,3258	4,1573	6,2360	8,3146
10	0,4111	0,8222	1,6444	2,4667	3,2889	4,1111	6,1667	8,2222
10,1	0,4066	0,8132	1,6264	2,4396	3,2527	4,0659	6,0989	8,1319
10,2	0,4022	0,8043	1,6087	2,4130	3,2174	4,0217	6,0326	8,0435
10,3	0,3978	0,7957	1,5914	2,3871	3,1828	3,9785	5,9677	7,9570
10,4	0,3936	0,7872	1,5745	2,3617	3,1489	3,9362	5,9043	7,8723
10,5	0,3895	0,7789	1,5579	2,3368	3,1158	3,8947	5,8421	7,7895
10,6	0,3854	0,7708	1,5417	2,3125	3,0833	3,8542	5,7813	7,7083
10,7	0,3814	0,7629	1,5258	2,2887	3,0515	3,8144	5,7216	7,6289
10,8	0,3776	0,7551	1,5102	2,2653	3,0204	3,7755	5,6633	7,5510
10,9	0,3737	0,7475	1,4949	2,2424	2,9899	3,7374	5,6061	7,4747
11	0,3700	0,7400	1,4800	2,2200	2,9600	3,7000	5,5500	7,4000
11,1	0,3663	0,7327	1,4653	2,1980	2,9307	3,6634	5,4950	7,3267
11,2	0,3627	0,7255	1,4510	2,1765	2,9020	3,6275	5,4412	7,2549

Tabela E.1 – Dosagem de produto químico em função do ciclo de concentração (CC) – TR01 (continuação)

	Dosagem de produto (kg/h)							
	100	200	400	600	800	1000	1500	2000
CC								
11,3	0,3592	0,7184	1,4369	2,1553	2,8738	3,5922	5,3883	7,1845
11,4	0,3558	0,7115	1,4231	2,1346	2,8462	3,5577	5,3365	7,1154
11,5	0,3524	0,7048	1,4095	2,1143	2,8190	3,5238	5,2857	7,0476
11,6	0,3491	0,6981	1,3962	2,0943	2,7925	3,4906	5,2358	6,9811
11,7	0,3458	0,6916	1,3832	2,0748	2,7664	3,4579	5,1869	6,9159
11,8	0,3426	0,6852	1,3704	2,0556	2,7407	3,4259	5,1389	6,8519
11,9	0,3394	0,6789	1,3578	2,0367	2,7156	3,3945	5,0917	6,7890
12	0,3364	0,6727	1,3455	2,0182	2,6909	3,3636	5,0455	6,7273
12,1	0,3333	0,6667	1,3333	2,0000	2,6667	3,3333	5,0000	6,6667
12,2	0,3304	0,6607	1,3214	1,9821	2,6429	3,3036	4,9554	6,6071
12,3	0,3274	0,6549	1,3097	1,9646	2,6195	3,2743	4,9115	6,5487
12,4	0,3246	0,6491	1,2982	1,9474	2,5965	3,2456	4,8684	6,4912
12,5	0,3217	0,6435	1,2870	1,9304	2,5739	3,2174	4,8261	6,4348
12,6	0,3190	0,6379	1,2759	1,9138	2,5517	3,1897	4,7845	6,3793
12,7	0,3162	0,6325	1,2650	1,8974	2,5299	3,1624	4,7436	6,3248
12,8	0,3136	0,6271	1,2542	1,8814	2,5085	3,1356	4,7034	6,2712
12,9	0,3109	0,6218	1,2437	1,8655	2,4874	3,1092	4,6639	6,2185
13	0,3083	0,6167	1,2333	1,8500	2,4667	3,0833	4,6250	6,1667
13,1	0,3058	0,6116	1,2231	1,8347	2,4463	3,0579	4,5868	6,1157
13,2	0,3033	0,6066	1,2131	1,8197	2,4262	3,0328	4,5492	6,0656
13,3	0,3008	0,6016	1,2033	1,8049	2,4065	3,0081	4,5122	6,0163
13,4	0,2984	0,5968	1,1935	1,7903	2,3871	2,9839	4,4758	5,9677
13,5	0,2960	0,5920	1,1840	1,7760	2,3680	2,9600	4,4400	5,9200
13,6	0,2937	0,5873	1,1746	1,7619	2,3492	2,9365	4,4048	5,8730
13,7	0,2913	0,5827	1,1654	1,7480	2,3307	2,9134	4,3701	5,8268
13,8	0,2891	0,5781	1,1563	1,7344	2,3125	2,8906	4,3359	5,7813
13,9	0,2868	0,5736	1,1473	1,7209	2,2946	2,8682	4,3023	5,7364
14	0,2846	0,5692	1,1385	1,7077	2,2769	2,8462	4,2692	5,6923
14,1	0,2824	0,5649	1,1298	1,6947	2,2595	2,8244	4,2366	5,6489
14,2	0,2803	0,5606	1,1212	1,6818	2,2424	2,8030	4,2045	5,6061
14,3	0,2782	0,5564	1,1128	1,6692	2,2256	2,7820	4,1729	5,5639
14,4	0,2761	0,5522	1,1045	1,6567	2,2090	2,7612	4,1418	5,5224
14,5	0,2741	0,5481	1,0963	1,6444	2,1926	2,7407	4,1111	5,4815
14,6	0,2721	0,5441	1,0882	1,6324	2,1765	2,7206	4,0809	5,4412
14,7	0,2701	0,5401	1,0803	1,6204	2,1606	2,7007	4,0511	5,4015
14,8	0,2681	0,5362	1,0725	1,6087	2,1449	2,6812	4,0217	5,3623
14,9	0,2662	0,5324	1,0647	1,5971	2,1295	2,6619	3,9928	5,3237
15	0,2643	0,5286	1,0571	1,5857	2,1143	2,6429	3,9643	5,2857
15,1	0,2624	0,5248	1,0496	1,5745	2,0993	2,6241	3,9362	5,2482
15,2	0,2606	0,5211	1,0423	1,5634	2,0845	2,6056	3,9085	5,2113
15,3	0,2587	0,5175	1,0350	1,5524	2,0699	2,5874	3,8811	5,1748
15,4	0,2569	0,5139	1,0278	1,5417	2,0556	2,5694	3,8542	5,1389
15,5	0,2552	0,5103	1,0207	1,5310	2,0414	2,5517	3,8276	5,1034
15,6	0,2534	0,5068	1,0137	1,5205	2,0274	2,5342	3,8014	5,0685
15,7	0,2517	0,5034	1,0068	1,5102	2,0136	2,5170	3,7755	5,0340
15,8	0,2500	0,5000	1,0000	1,5000	2,0000	2,5000	3,7500	5,0000
15,9	0,2483	0,4966	0,9933	1,4899	1,9866	2,4832	3,7248	4,9664
16	0,2467	0,4933	0,9867	1,4800	1,9733	2,4667	3,7000	4,9333

Tabela E.2 – Dosagem de produto químico em função do ciclo de concentração (CC) – TR02

	Dosagem de produto (kg/h)							
	100	200	400	600	800	1000	1500	2000
CC								
6,5	5,1818	10,3636	20,7273	31,0909	41,4545	51,8182	77,7273	103,6364
6,6	5,0893	10,1786	20,3571	30,5357	40,7143	50,8929	76,3393	101,7857
6,7	5,0000	10,0000	20,0000	30,0000	40,0000	50,0000	75,0000	100,0000
6,8	4,9138	9,8276	19,6552	29,4828	39,3103	49,1379	73,7069	98,2759
6,9	4,8305	9,6610	19,3220	28,9831	38,6441	48,3051	72,4576	96,6102
7	4,7500	9,5000	19,0000	28,5000	38,0000	47,5000	71,2500	95,0000
7,1	4,6721	9,3443	18,6885	28,0328	37,3770	46,7213	70,0820	93,4426
7,2	4,5968	9,1935	18,3871	27,5806	36,7742	45,9677	68,9516	91,9355
7,3	4,5238	9,0476	18,0952	27,1429	36,1905	45,2381	67,8571	90,4762
7,4	4,4531	8,9063	17,8125	26,7188	35,6250	44,5313	66,7969	89,0625
7,5	4,3846	8,7692	17,5385	26,3077	35,0769	43,8462	65,7692	87,6923
7,6	4,3182	8,6364	17,2727	25,9091	34,5455	43,1818	64,7727	86,3636
7,7	4,2537	8,5075	17,0149	25,5224	34,0299	42,5373	63,8060	85,0746
7,8	4,1912	8,3824	16,7647	25,1471	33,5294	41,9118	62,8676	83,8235
7,9	4,1304	8,2609	16,5217	24,7826	33,0435	41,3043	61,9565	82,6087
8	4,0714	8,1429	16,2857	24,4286	32,5714	40,7143	61,0714	81,4286
8,1	4,0141	8,0282	16,0563	24,0845	32,1127	40,1408	60,2113	80,2817
8,2	3,9583	7,9167	15,8333	23,7500	31,6667	39,5833	59,3750	79,1667
8,3	3,9041	7,8082	15,6164	23,4247	31,2329	39,0411	58,5616	78,0822
8,4	3,8514	7,7027	15,4054	23,1081	30,8108	38,5135	57,7703	77,0270
8,5	3,8000	7,6000	15,2000	22,8000	30,4000	38,0000	57,0000	76,0000
8,6	3,7500	7,5000	15,0000	22,5000	30,0000	37,5000	56,2500	75,0000
8,7	3,7013	7,4026	14,8052	22,2078	29,6104	37,0130	55,5195	74,0260
8,8	3,6538	7,3077	14,6154	21,9231	29,2308	36,5385	54,8077	73,0769
8,9	3,6076	7,2152	14,4304	21,6456	28,8608	36,0759	54,1139	72,1519
9	3,5625	7,1250	14,2500	21,3750	28,5000	35,6250	53,4375	71,2500
9,1	3,5185	7,0370	14,0741	21,1111	28,1481	35,1852	52,7778	70,3704
9,2	3,4756	6,9512	13,9024	20,8537	27,8049	34,7561	52,1341	69,5122
9,3	3,4337	6,8675	13,7349	20,6024	27,4699	34,3373	51,5060	68,6747
9,4	3,3929	6,7857	13,5714	20,3571	27,1429	33,9286	50,8929	67,8571
9,5	3,3529	6,7059	13,4118	20,1176	26,8235	33,5294	50,2941	67,0588
9,6	3,3140	6,6279	13,2558	19,8837	26,5116	33,1395	49,7093	66,2791
9,7	3,2759	6,5517	13,1034	19,6552	26,2069	32,7586	49,1379	65,5172
9,8	3,2386	6,4773	12,9545	19,4318	25,9091	32,3864	48,5795	64,7727
9,9	3,2022	6,4045	12,8090	19,2135	25,6180	32,0225	48,0337	64,0449
10	3,1667	6,3333	12,6667	19,0000	25,3333	31,6667	47,5000	63,3333
10,1	3,1319	6,2637	12,5275	18,7912	25,0549	31,3187	46,9780	62,6374
10,2	3,0978	6,1957	12,3913	18,5870	24,7826	30,9783	46,4674	61,9565
10,3	3,0645	6,1290	12,2581	18,3871	24,5161	30,6452	45,9677	61,2903
10,4	3,0319	6,0638	12,1277	18,1915	24,2553	30,3191	45,4787	60,6383
10,5	3,0000	6,0000	12,0000	18,0000	24,0000	30,0000	45,0000	60,0000
10,6	2,9688	5,9375	11,8750	17,8125	23,7500	29,6875	44,5313	59,3750
10,7	2,9381	5,8763	11,7526	17,6289	23,5052	29,3814	44,0722	58,7629
10,8	2,9082	5,8163	11,6327	17,4490	23,2653	29,0816	43,6224	58,1633
10,9	2,8788	5,7576	11,5152	17,2727	23,0303	28,7879	43,1818	57,5758
11	2,8500	5,7000	11,4000	17,1000	22,8000	28,5000	42,7500	57,0000
11,1	2,8218	5,6436	11,2871	16,9307	22,5743	28,2178	42,3267	56,4356
11,2	2,7941	5,5882	11,1765	16,7647	22,3529	27,9412	41,9118	55,8824

Tabela E.2 – Dosagem de produto químico em função do ciclo de concentração (CC) – TR02 (continuação)

	Dosagem de produto (kg/h)							
	100	200	400	600	800	1000	1500	2000
CC								
11,3	2,7670	5,5340	11,0680	16,6019	22,1359	27,6699	41,5049	55,3398
11,4	2,7404	5,4808	10,9615	16,4423	21,9231	27,4038	41,1058	54,8077
11,5	2,7143	5,4286	10,8571	16,2857	21,7143	27,1429	40,7143	54,2857
11,6	2,6887	5,3774	10,7547	16,1321	21,5094	26,8868	40,3302	53,7736
11,7	2,6636	5,3271	10,6542	15,9813	21,3084	26,6355	39,9533	53,2710
11,8	2,6389	5,2778	10,5556	15,8333	21,1111	26,3889	39,5833	52,7778
11,9	2,6147	5,2294	10,4587	15,6881	20,9174	26,1468	39,2202	52,2936
12	2,5909	5,1818	10,3636	15,5455	20,7273	25,9091	38,8636	51,8182
12,1	2,5676	5,1351	10,2703	15,4054	20,5405	25,6757	38,5135	51,3514
12,2	2,5446	5,0893	10,1786	15,2679	20,3571	25,4464	38,1696	50,8929
12,3	2,5221	5,0442	10,0885	15,1327	20,1770	25,2212	37,8319	50,4425
12,4	2,5000	5,0000	10,0000	15,0000	20,0000	25,0000	37,5000	50,0000
12,5	2,4783	4,9565	9,9130	14,8696	19,8261	24,7826	37,1739	49,5652
12,6	2,4569	4,9138	9,8276	14,7414	19,6552	24,5690	36,8534	49,1379
12,7	2,4359	4,8718	9,7436	14,6154	19,4872	24,3590	36,5385	48,7179
12,8	2,4153	4,8305	9,6610	14,4915	19,3220	24,1525	36,2288	48,3051
12,9	2,3950	4,7899	9,5798	14,3697	19,1597	23,9496	35,9244	47,8992
13	2,3750	4,7500	9,5000	14,2500	19,0000	23,7500	35,6250	47,5000
13,1	2,3554	4,7107	9,4215	14,1322	18,8430	23,5537	35,3306	47,1074
13,2	2,3361	4,6721	9,3443	14,0164	18,6885	23,3607	35,0410	46,7213
13,3	2,3171	4,6341	9,2683	13,9024	18,5366	23,1707	34,7561	46,3415
13,4	2,2984	4,5968	9,1935	13,7903	18,3871	22,9839	34,4758	45,9677
13,5	2,2800	4,5600	9,1200	13,6800	18,2400	22,8000	34,2000	45,6000
13,6	2,2619	4,5238	9,0476	13,5714	18,0952	22,6190	33,9286	45,2381
13,7	2,2441	4,4882	8,9764	13,4646	17,9528	22,4409	33,6614	44,8819
13,8	2,2266	4,4531	8,9063	13,3594	17,8125	22,2656	33,3984	44,5313
13,9	2,2093	4,4186	8,8372	13,2558	17,6744	22,0930	33,1395	44,1860
14	2,1923	4,3846	8,7692	13,1538	17,5385	21,9231	32,8846	43,8462
14,1	2,1756	4,3511	8,7023	13,0534	17,4046	21,7557	32,6336	43,5115
14,2	2,1591	4,3182	8,6364	12,9545	17,2727	21,5909	32,3864	43,1818
14,3	2,1429	4,2857	8,5714	12,8571	17,1429	21,4286	32,1429	42,8571
14,4	2,1269	4,2537	8,5075	12,7612	17,0149	21,2687	31,9030	42,5373
14,5	2,1111	4,2222	8,4444	12,6667	16,8889	21,1111	31,6667	42,2222
14,6	2,0956	4,1912	8,3824	12,5735	16,7647	20,9559	31,4338	41,9118
14,7	2,0803	4,1606	8,3212	12,4818	16,6423	20,8029	31,2044	41,6058
14,8	2,0652	4,1304	8,2609	12,3913	16,5217	20,6522	30,9783	41,3043
14,9	2,0504	4,1007	8,2014	12,3022	16,4029	20,5036	30,7554	41,0072
15	2,0357	4,0714	8,1429	12,2143	16,2857	20,3571	30,5357	40,7143
15,1	2,0213	4,0426	8,0851	12,1277	16,1702	20,2128	30,3191	40,4255
15,2	2,0070	4,0141	8,0282	12,0423	16,0563	20,0704	30,1056	40,1408
15,3	1,9930	3,9860	7,9720	11,9580	15,9441	19,9301	29,8951	39,8601
15,4	1,9792	3,9583	7,9167	11,8750	15,8333	19,7917	29,6875	39,5833
15,5	1,9655	3,9310	7,8621	11,7931	15,7241	19,6552	29,4828	39,3103
15,6	1,9521	3,9041	7,8082	11,7123	15,6164	19,5205	29,2808	39,0411
15,7	1,9388	3,8776	7,7551	11,6327	15,5102	19,3878	29,0816	38,7755
15,8	1,9257	3,8514	7,7027	11,5541	15,4054	19,2568	28,8851	38,5135
15,9	1,9128	3,8255	7,6510	11,4765	15,3020	19,1275	28,6913	38,2550
16	1,9000	3,8000	7,6000	11,4000	15,2000	19,0000	28,5000	38,0000

Tabela E.3 – Dosagem de produto químico e reposição em função do ciclo de concentração – TR01 (Considerando concentração desejada (mg/L) de produto a base de Nitrito - Perda por evaporação constante (E): 37,00 m³/h)

Ciclo de Concentração (CC)	Reposição (R) (m³/h)	Dosagem de produto (kg/h)							
		100 mg/L	200 mg/L	400 mg/L	600 mg/L	800 mg/L	1000 mg/L	1500 mg/L	2000 mg/L
6,50	43,7273	0,6727	1,3455	2,6909	4,0364	5,3818	6,7273	10,0909	13,4545
6,60	43,6071	0,6607	1,3214	2,6429	3,9643	5,2857	6,6071	9,9107	13,2143
6,70	43,4912	0,6491	1,2982	2,5965	3,8947	5,1930	6,4912	9,7368	12,9825
6,80	43,3793	0,6379	1,2759	2,5517	3,8276	5,1034	6,3793	9,5690	12,7586
6,90	43,2712	0,6271	1,2542	2,5085	3,7627	5,0169	6,2712	9,4068	12,5424
7,00	43,1667	0,6167	1,2333	2,4667	3,7000	4,9333	6,1667	9,2500	12,3333
7,10	43,0656	0,6066	1,2131	2,4262	3,6393	4,8525	6,0656	9,0984	12,1311
7,20	42,9677	0,5968	1,1935	2,3871	3,5806	4,7742	5,9677	8,9516	11,9355
7,30	42,8730	0,5873	1,1746	2,3492	3,5238	4,6984	5,8730	8,8095	11,7460
7,40	42,7813	0,5781	1,1563	2,3125	3,4688	4,6250	5,7813	8,6719	11,5625
7,50	42,6923	0,5692	1,1385	2,2769	3,4154	4,5538	5,6923	8,5385	11,3846
7,60	42,6061	0,5606	1,1212	2,2424	3,3636	4,4848	5,6061	8,4091	11,2121
7,70	42,5224	0,5522	1,1045	2,2090	3,3134	4,4179	5,5224	8,2836	11,0448
7,80	42,4412	0,5441	1,0882	2,1765	3,2647	4,3529	5,4412	8,1618	10,8824
7,90	42,3623	0,5362	1,0725	2,1449	3,2174	4,2899	5,3623	8,0435	10,7246
8,00	42,2857	0,5286	1,0571	2,1143	3,1714	4,2286	5,2857	7,9286	10,5714
8,10	42,2113	0,5211	1,0423	2,0845	3,1268	4,1690	5,2113	7,8169	10,4225
8,20	42,1389	0,5139	1,0278	2,0556	3,0833	4,1111	5,1389	7,7083	10,2778
8,30	42,0685	0,5068	1,0137	2,0274	3,0411	4,0548	5,0685	7,6027	10,1370
8,40	42,0000	0,5000	1,0000	2,0000	3,0000	4,0000	5,0000	7,5000	10,0000
8,50	41,9333	0,4933	0,9867	1,9733	2,9600	3,9467	4,9333	7,4000	9,8667
8,60	41,8684	0,4868	0,9737	1,9474	2,9211	3,8947	4,8684	7,3026	9,7368
8,70	41,8052	0,4805	0,9610	1,9221	2,8831	3,8442	4,8052	7,2078	9,6104
8,80	41,7436	0,4744	0,9487	1,8974	2,8462	3,7949	4,7436	7,1154	9,4872
8,90	41,6835	0,4684	0,9367	1,8734	2,8101	3,7468	4,6835	7,0253	9,3671
9,00	41,6250	0,4625	0,9250	1,8500	2,7750	3,7000	4,6250	6,9375	9,2500

Tabela E.3 – Dosagem de produto químico e reposição em função do ciclo de concentração – TR01 (Considerando concentração desejada (mg/L) de produto a base de Nitrito - Perda por evaporação constante (E): 37,00 m³/h) (continuação)

Ciclo de Concentração (CC)	Reposição (R) (m³/h)	Dosagem de produto (kg/h)							
		100 mg/L	200 mg/L	400 mg/L	600 mg/L	800 mg/L	1000 mg/L	1500 mg/L	2000 mg/L
9,10	41,5679	0,4568	0,9136	1,8272	2,7407	3,6543	4,5679	6,8519	9,1358
9,20	41,5122	0,4512	0,9024	1,8049	2,7073	3,6098	4,5122	6,7683	9,0244
9,30	41,4578	0,4458	0,8916	1,7831	2,6747	3,5663	4,4578	6,6867	8,9157
9,40	41,4048	0,4405	0,8810	1,7619	2,6429	3,5238	4,4048	6,6071	8,8095
9,50	41,3529	0,4353	0,8706	1,7412	2,6118	3,4824	4,3529	6,5294	8,7059
9,60	41,3023	0,4302	0,8605	1,7209	2,5814	3,4419	4,3023	6,4535	8,6047
9,70	41,2529	0,4253	0,8506	1,7011	2,5517	3,4023	4,2529	6,3793	8,5057
9,80	41,2045	0,4205	0,8409	1,6818	2,5227	3,3636	4,2045	6,3068	8,4091
9,90	41,1573	0,4157	0,8315	1,6629	2,4944	3,3258	4,1573	6,2360	8,3146
10,00	41,1111	0,4111	0,8222	1,6444	2,4667	3,2889	4,1111	6,1667	8,2222
10,10	41,0659	0,4066	0,8132	1,6264	2,4396	3,2527	4,0659	6,0989	8,1319
10,20	41,0217	0,4022	0,8043	1,6087	2,4130	3,2174	4,0217	6,0326	8,0435
10,30	40,9785	0,3978	0,7957	1,5914	2,3871	3,1828	3,9785	5,9677	7,9570
10,40	40,9362	0,3936	0,7872	1,5745	2,3617	3,1489	3,9362	5,9043	7,8723
10,50	40,8947	0,3895	0,7789	1,5579	2,3368	3,1158	3,8947	5,8421	7,7895
10,60	40,8542	0,3854	0,7708	1,5417	2,3125	3,0833	3,8542	5,7813	7,7083
10,70	40,8144	0,3814	0,7629	1,5258	2,2887	3,0515	3,8144	5,7216	7,6289
10,80	40,7755	0,3776	0,7551	1,5102	2,2653	3,0204	3,7755	5,6633	7,5510
10,90	40,7374	0,3737	0,7475	1,4949	2,2424	2,9899	3,7374	5,6061	7,4747
11,00	40,7000	0,3700	0,7400	1,4800	2,2200	2,9600	3,7000	5,5500	7,4000
11,10	40,6634	0,3663	0,7327	1,4653	2,1980	2,9307	3,6634	5,4950	7,3267
11,20	40,6275	0,3627	0,7255	1,4510	2,1765	2,9020	3,6275	5,4412	7,2549
11,30	40,5922	0,3592	0,7184	1,4369	2,1553	2,8738	3,5922	5,3883	7,1845
11,40	40,5577	0,3558	0,7115	1,4231	2,1346	2,8462	3,5577	5,3365	7,1154
11,50	40,5238	0,3524	0,7048	1,4095	2,1143	2,8190	3,5238	5,2857	7,0476
11,60	40,4906	0,3491	0,6981	1,3962	2,0943	2,7925	3,4906	5,2358	6,9811
11,70	40,4579	0,3458	0,6916	1,3832	2,0748	2,7664	3,4579	5,1869	6,9159

Tabela E.3 – Dosagem de produto químico e reposição em função do ciclo de concentração – TR01 (Considerando concentração desejada (mg/L) de produto a base de Nitrito - Perda por evaporação constante (E): 37,00 m³/h) (continuação)

Ciclo de Concentração (CC)	Reposição (R) (m³/h)	Dosagem de produto (kg/h)							
		100 mg/L	200 mg/L	400 mg/L	600 mg/L	800 mg/L	1000 mg/L	1500 mg/L	2000 mg/L
11,8	40,4259	0,3426	0,6852	1,3704	2,0556	2,7407	3,4259	5,1389	6,8519
11,9	40,3945	0,3394	0,6789	1,3578	2,0367	2,7156	3,3945	5,0917	6,7890
12	40,3636	0,3364	0,6727	1,3455	2,0182	2,6909	3,3636	5,0455	6,7273
12,1	40,3333	0,3333	0,6667	1,3333	2,0000	2,6667	3,3333	5,0000	6,6667
12,2	40,3036	0,3304	0,6607	1,3214	1,9821	2,6429	3,3036	4,9554	6,6071
12,3	40,2743	0,3274	0,6549	1,3097	1,9646	2,6195	3,2743	4,9115	6,5487
12,4	40,2456	0,3246	0,6491	1,2982	1,9474	2,5965	3,2456	4,8684	6,4912
12,5	40,2174	0,3217	0,6435	1,2870	1,9304	2,5739	3,2174	4,8261	6,4348
12,6	40,1897	0,3190	0,6379	1,2759	1,9138	2,5517	3,1897	4,7845	6,3793
12,7	40,1624	0,3162	0,6325	1,2650	1,8974	2,5299	3,1624	4,7436	6,3248
12,8	40,1356	0,3136	0,6271	1,2542	1,8814	2,5085	3,1356	4,7034	6,2712
12,9	40,1092	0,3109	0,6218	1,2437	1,8655	2,4874	3,1092	4,6639	6,2185
13	40,0833	0,3083	0,6167	1,2333	1,8500	2,4667	3,0833	4,6250	6,1667
13,1	40,0579	0,3058	0,6116	1,2231	1,8347	2,4463	3,0579	4,5868	6,1157
13,2	40,0328	0,3033	0,6066	1,2131	1,8197	2,4262	3,0328	4,5492	6,0656
13,3	40,0081	0,3008	0,6016	1,2033	1,8049	2,4065	3,0081	4,5122	6,0163
13,4	39,9839	0,2984	0,5968	1,1935	1,7903	2,3871	2,9839	4,4758	5,9677
13,5	39,9600	0,2960	0,5920	1,1840	1,7760	2,3680	2,9600	4,4400	5,9200
13,6	39,9365	0,2937	0,5873	1,1746	1,7619	2,3492	2,9365	4,4048	5,8730
13,7	39,9134	0,2913	0,5827	1,1654	1,7480	2,3307	2,9134	4,3701	5,8268
13,8	39,8906	0,2891	0,5781	1,1563	1,7344	2,3125	2,8906	4,3359	5,7813
13,9	39,8682	0,2868	0,5736	1,1473	1,7209	2,2946	2,8682	4,3023	5,7364
14	39,8462	0,2846	0,5692	1,1385	1,7077	2,2769	2,8462	4,2692	5,6923
14,1	39,8244	0,2824	0,5649	1,1298	1,6947	2,2595	2,8244	4,2366	5,6489
14,2	39,8030	0,2803	0,5606	1,1212	1,6818	2,2424	2,8030	4,2045	5,6061
14,3	39,7820	0,2782	0,5564	1,1128	1,6692	2,2256	2,7820	4,1729	5,5639
14,4	39,7612	0,2761	0,5522	1,1045	1,6567	2,2090	2,7612	4,1418	5,5224
14,5	39,7407	0,2741	0,5481	1,0963	1,6444	2,1926	2,7407	4,1111	5,4815

Tabela E.3 – Dosagem de produto químico e reposição em função do ciclo de concentração – TR01 (Considerando concentração desejada (mg/L) de produto a base de Nitrito - Perda por evaporação constante (E): 37,00 m³/h) (continuação)

Ciclo de Concentração (CC)	Reposição (R) (m³/h)	Dosagem de produto (kg/h)							
		100 mg/L	200 mg/L	400 mg/L	600 mg/L	800 mg/L	1000 mg/L	1500 mg/L	2000 mg/L
14,6	39,7206	0,2721	0,5441	1,0882	1,6324	2,1765	2,7206	4,0809	5,4412
14,7	39,7007	0,2701	0,5401	1,0803	1,6204	2,1606	2,7007	4,0511	5,4015
14,8	39,6812	0,2681	0,5362	1,0725	1,6087	2,1449	2,6812	4,0217	5,3623
14,9	39,6619	0,2662	0,5324	1,0647	1,5971	2,1295	2,6619	3,9928	5,3237
15	39,6429	0,2643	0,5286	1,0571	1,5857	2,1143	2,6429	3,9643	5,2857
15,1	39,6241	0,2624	0,5248	1,0496	1,5745	2,0993	2,6241	3,9362	5,2482
15,2	39,6056	0,2606	0,5211	1,0423	1,5634	2,0845	2,6056	3,9085	5,2113
15,3	39,5874	0,2587	0,5175	1,0350	1,5524	2,0699	2,5874	3,8811	5,1748
15,4	39,5694	0,2569	0,5139	1,0278	1,5417	2,0556	2,5694	3,8542	5,1389
15,5	39,5517	0,2552	0,5103	1,0207	1,5310	2,0414	2,5517	3,8276	5,1034
15,6	39,5342	0,2534	0,5068	1,0137	1,5205	2,0274	2,5342	3,8014	5,0685
15,7	39,5170	0,2517	0,5034	1,0068	1,5102	2,0136	2,5170	3,7755	5,0340
15,8	39,5000	0,2500	0,5000	1,0000	1,5000	2,0000	2,5000	3,7500	5,0000
15,9	39,4832	0,2483	0,4966	0,9933	1,4899	1,9866	2,4832	3,7248	4,9664
16	39,4667	0,2467	0,4933	0,9867	1,4800	1,9733	2,4667	3,7000	4,9333

Tabela E.4 – Dosagem de produto químico e reposição em função do ciclo de concentração – TR02 (Considerando concentração desejada (mg/L) de produto a base de Nitrito - Perda por evaporação constante (E): 285 m³/h)

Ciclo de Concentração (CC)	Reposição (R) (m³/h)	Dosagem de produto (kg/h)							
		100 mg/L	200 mg/L	400 mg/L	600 mg/L	800 mg/L	1000 mg/L	1500 mg/L	2000 mg/L
6,50	336,8182	5,1818	10,3636	20,7273	31,0909	41,4545	51,8182	77,7273	103,6364
6,60	335,8929	5,0893	10,1786	20,3571	30,5357	40,7143	50,8929	76,3393	101,7857
6,70	335,0000	5,0000	10,0000	20,0000	30,0000	40,0000	50,0000	75,0000	100,0000
6,80	334,1379	4,9138	9,8276	19,6552	29,4828	39,3103	49,1379	73,7069	98,2759
6,90	333,3051	4,8305	9,6610	19,3220	28,9831	38,6441	48,3051	72,4576	96,6102
7,00	332,5000	4,7500	9,5000	19,0000	28,5000	38,0000	47,5000	71,2500	95,0000
7,10	331,7213	4,6721	9,3443	18,6885	28,0328	37,3770	46,7213	70,0820	93,4426
7,20	330,9677	4,5968	9,1935	18,3871	27,5806	36,7742	45,9677	68,9516	91,9355
7,30	330,2381	4,5238	9,0476	18,0952	27,1429	36,1905	45,2381	67,8571	90,4762
7,40	329,5313	4,4531	8,9063	17,8125	26,7188	35,6250	44,5313	66,7969	89,0625
7,50	328,8462	4,3846	8,7692	17,5385	26,3077	35,0769	43,8462	65,7692	87,6923
7,60	328,1818	4,3182	8,6364	17,2727	25,9091	34,5455	43,1818	64,7727	86,3636
7,70	327,5373	4,2537	8,5075	17,0149	25,5224	34,0299	42,5373	63,8060	85,0746
7,80	326,9118	4,1912	8,3824	16,7647	25,1471	33,5294	41,9118	62,8676	83,8235
7,90	326,3043	4,1304	8,2609	16,5217	24,7826	33,0435	41,3043	61,9565	82,6087
8,00	325,7143	4,0714	8,1429	16,2857	24,4286	32,5714	40,7143	61,0714	81,4286
8,10	325,1408	4,0141	8,0282	16,0563	24,0845	32,1127	40,1408	60,2113	80,2817
8,20	324,5833	3,9583	7,9167	15,8333	23,7500	31,6667	39,5833	59,3750	79,1667
8,30	324,0411	3,9041	7,8082	15,6164	23,4247	31,2329	39,0411	58,5616	78,0822
8,40	323,5135	3,8514	7,7027	15,4054	23,1081	30,8108	38,5135	57,7703	77,0270
8,50	323,0000	3,8000	7,6000	15,2000	22,8000	30,4000	38,0000	57,0000	76,0000
8,60	322,5000	3,7500	7,5000	15,0000	22,5000	30,0000	37,5000	56,2500	75,0000
8,70	322,0130	3,7013	7,4026	14,8052	22,2078	29,6104	37,0130	55,5195	74,0260
8,80	321,5385	3,6538	7,3077	14,6154	21,9231	29,2308	36,5385	54,8077	73,0769
8,90	321,0759	3,6076	7,2152	14,4304	21,6456	28,8608	36,0759	54,1139	72,1519
9,00	320,6250	3,5625	7,1250	14,2500	21,3750	28,5000	35,6250	53,4375	71,2500

Tabela E.4 – Dosagem de produto químico e reposição em função do ciclo de concentração – TR02 (Considerando concentração desejada (mg/L) de produto a base de Nitrito - Perda por evaporação constante (E): 285 m³/h) (continuação)

Ciclo de Concentração (CC)	Reposição (R) (m³/h)	Dosagem de produto (kg/h)							
		100 mg/L	200 mg/L	400 mg/L	600 mg/L	800 mg/L	1000 mg/L	1500 mg/L	2000 mg/L
9,10	320,1852	3,5185	7,0370	14,0741	21,1111	28,1481	35,1852	52,7778	70,3704
9,20	319,7561	3,4756	6,9512	13,9024	20,8537	27,8049	34,7561	52,1341	69,5122
9,30	319,3373	3,4337	6,8675	13,7349	20,6024	27,4699	34,3373	51,5060	68,6747
9,40	318,9286	3,3929	6,7857	13,5714	20,3571	27,1429	33,9286	50,8929	67,8571
9,50	318,5294	3,3529	6,7059	13,4118	20,1176	26,8235	33,5294	50,2941	67,0588
9,60	318,1395	3,3140	6,6279	13,2558	19,8837	26,5116	33,1395	49,7093	66,2791
9,70	317,7586	3,2759	6,5517	13,1034	19,6552	26,2069	32,7586	49,1379	65,5172
9,80	317,3864	3,2386	6,4773	12,9545	19,4318	25,9091	32,3864	48,5795	64,7727
9,90	317,0225	3,2022	6,4045	12,8090	19,2135	25,6180	32,0225	48,0337	64,0449
10,00	316,6667	3,1667	6,3333	12,6667	19,0000	25,3333	31,6667	47,5000	63,3333
10,10	316,3187	3,1319	6,2637	12,5275	18,7912	25,0549	31,3187	46,9780	62,6374
10,20	315,9783	3,0978	6,1957	12,3913	18,5870	24,7826	30,9783	46,4674	61,9565
10,30	315,6452	3,0645	6,1290	12,2581	18,3871	24,5161	30,6452	45,9677	61,2903
10,40	315,3191	3,0319	6,0638	12,1277	18,1915	24,2553	30,3191	45,4787	60,6383
10,50	315,0000	3,0000	6,0000	12,0000	18,0000	24,0000	30,0000	45,0000	60,0000
10,60	314,6875	2,9688	5,9375	11,8750	17,8125	23,7500	29,6875	44,5313	59,3750
10,70	314,3814	2,9381	5,8763	11,7526	17,6289	23,5052	29,3814	44,0722	58,7629
10,80	314,0816	2,9082	5,8163	11,6327	17,4490	23,2653	29,0816	43,6224	58,1633
10,90	313,7879	2,8788	5,7576	11,5152	17,2727	23,0303	28,7879	43,1818	57,5758
11,00	313,5000	2,8500	5,7000	11,4000	17,1000	22,8000	28,5000	42,7500	57,0000
11,10	313,2178	2,8218	5,6436	11,2871	16,9307	22,5743	28,2178	42,3267	56,4356
11,20	312,9412	2,7941	5,5882	11,1765	16,7647	22,3529	27,9412	41,9118	55,8824
11,30	312,6699	2,7670	5,5340	11,0680	16,6019	22,1359	27,6699	41,5049	55,3398
11,40	312,4038	2,7404	5,4808	10,9615	16,4423	21,9231	27,4038	41,1058	54,8077
11,50	312,1429	2,7143	5,4286	10,8571	16,2857	21,7143	27,1429	40,7143	54,2857
11,60	311,8868	2,6887	5,3774	10,7547	16,1321	21,5094	26,8868	40,3302	53,7736
11,70	311,6355	2,6636	5,3271	10,6542	15,9813	21,3084	26,6355	39,9533	53,2710

Tabela E.4 – Dosagem de produto químico e reposição em função do ciclo de concentração – TR02 (Considerando concentração desejada (mg/L) de produto a base de Nitrito - Perda por evaporação constante (E): 285 m³/h) (continuação)

Ciclo de Concentração (CC)	Reposição (R) (m³/h)	Dosagem de produto (kg/h)							
		100 mg/L	200 mg/L	400 mg/L	600 mg/L	800 mg/L	1000 mg/L	1500 mg/L	2000 mg/L
11,8	311,3889	2,6389	5,2778	10,5556	15,8333	21,1111	26,3889	39,5833	52,7778
11,9	311,1468	2,6147	5,2294	10,4587	15,6881	20,9174	26,1468	39,2202	52,2936
12	310,9091	2,5909	5,1818	10,3636	15,5455	20,7273	25,9091	38,8636	51,8182
12,1	310,6757	2,5676	5,1351	10,2703	15,4054	20,5405	25,6757	38,5135	51,3514
12,2	310,4464	2,5446	5,0893	10,1786	15,2679	20,3571	25,4464	38,1696	50,8929
12,3	310,2212	2,5221	5,0442	10,0885	15,1327	20,1770	25,2212	37,8319	50,4425
12,4	310,0000	2,5000	5,0000	10,0000	15,0000	20,0000	25,0000	37,5000	50,0000
12,5	309,7826	2,4783	4,9565	9,9130	14,8696	19,8261	24,7826	37,1739	49,5652
12,6	309,5690	2,4569	4,9138	9,8276	14,7414	19,6552	24,5690	36,8534	49,1379
12,7	309,3590	2,4359	4,8718	9,7436	14,6154	19,4872	24,3590	36,5385	48,7179
12,8	309,1525	2,4153	4,8305	9,6610	14,4915	19,3220	24,1525	36,2288	48,3051
12,9	308,9496	2,3950	4,7899	9,5798	14,3697	19,1597	23,9496	35,9244	47,8992
13	308,7500	2,3750	4,7500	9,5000	14,2500	19,0000	23,7500	35,6250	47,5000
13,1	308,5537	2,3554	4,7107	9,4215	14,1322	18,8430	23,5537	35,3306	47,1074
13,2	308,3607	2,3361	4,6721	9,3443	14,0164	18,6885	23,3607	35,0410	46,7213
13,3	308,1707	2,3171	4,6341	9,2683	13,9024	18,5366	23,1707	34,7561	46,3415
13,4	307,9839	2,2984	4,5968	9,1935	13,7903	18,3871	22,9839	34,4758	45,9677
13,5	307,8000	2,2800	4,5600	9,1200	13,6800	18,2400	22,8000	34,2000	45,6000
13,6	307,6190	2,2619	4,5238	9,0476	13,5714	18,0952	22,6190	33,9286	45,2381
13,7	307,4409	2,2441	4,4882	8,9764	13,4646	17,9528	22,4409	33,6614	44,8819
13,8	307,2656	2,2266	4,4531	8,9063	13,3594	17,8125	22,2656	33,3984	44,5313
13,9	307,0930	2,2093	4,4186	8,8372	13,2558	17,6744	22,0930	33,1395	44,1860
14	306,9231	2,1923	4,3846	8,7692	13,1538	17,5385	21,9231	32,8846	43,8462
14,1	306,7557	2,1756	4,3511	8,7023	13,0534	17,4046	21,7557	32,6336	43,5115
14,2	306,5909	2,1591	4,3182	8,6364	12,9545	17,2727	21,5909	32,3864	43,1818
14,3	306,4286	2,1429	4,2857	8,5714	12,8571	17,1429	21,4286	32,1429	42,8571
14,4	306,2687	2,1269	4,2537	8,5075	12,7612	17,0149	21,2687	31,9030	42,5373
14,5	306,1111	2,1111	4,2222	8,4444	12,6667	16,8889	21,1111	31,6667	42,2222

Tabela E.4 – Dosagem de produto químico e reposição em função do ciclo de concentração – TR02 (Considerando concentração desejada (mg/L) de produto a base de Nitrito - Perda por evaporação constante (E): 285 m³/h) (continuação)

Ciclo de Concentração (CC)	Reposição (R) (m³/h)	Dosagem de produto (kg/h)							
		100 mg/L	200 mg/L	400 mg/L	600 mg/L	800 mg/L	1000 mg/L	1500 mg/L	2000 mg/L
14,6	305,9559	2,0956	4,1912	8,3824	12,5735	16,7647	20,9559	31,4338	41,9118
14,7	305,8029	2,0803	4,1606	8,3212	12,4818	16,6423	20,8029	31,2044	41,6058
14,8	305,6522	2,0652	4,1304	8,2609	12,3913	16,5217	20,6522	30,9783	41,3043
14,9	305,5036	2,0504	4,1007	8,2014	12,3022	16,4029	20,5036	30,7554	41,0072
15	305,3571	2,0357	4,0714	8,1429	12,2143	16,2857	20,3571	30,5357	40,7143
15,1	305,2128	2,0213	4,0426	8,0851	12,1277	16,1702	20,2128	30,3191	40,4255
15,2	305,0704	2,0070	4,0141	8,0282	12,0423	16,0563	20,0704	30,1056	40,1408
15,3	304,9301	1,9930	3,9860	7,9720	11,9580	15,9441	19,9301	29,8951	39,8601
15,4	304,7917	1,9792	3,9583	7,9167	11,8750	15,8333	19,7917	29,6875	39,5833
15,5	304,6552	1,9655	3,9310	7,8621	11,7931	15,7241	19,6552	29,4828	39,3103
15,6	304,5205	1,9521	3,9041	7,8082	11,7123	15,6164	19,5205	29,2808	39,0411
15,7	304,3878	1,9388	3,8776	7,7551	11,6327	15,5102	19,3878	29,0816	38,7755
15,8	304,2568	1,9257	3,8514	7,7027	11,5541	15,4054	19,2568	28,8851	38,5135
15,9	304,1275	1,9128	3,8255	7,6510	11,4765	15,3020	19,1275	28,6913	38,2550
16	304,0000	1,9000	3,8000	7,6000	11,4000	15,2000	19,0000	28,5000	38,0000

Tabela E.5 – Variação da purga do sistema de resfriamento em função do ciclo de concentração (a uma dada temperatura) – TR01 (limitada a 16 ciclos)

	Reposição (mg/L)	Purga (mg/L)								
CC		6,5	6,6	6,7	6,8	6,9	7	7,1	7,2	7,3
Cálcio	8,6	55,9000	56,7600	57,6200	58,4800	59,3400	60,2000	61,0600	61,9200	62,7800
Sílica	9,4	61,1000	62,0400	62,9800	63,9200	64,8600	65,8000	66,7400	67,6800	68,6200
Amônia	0,088	0,5720	0,5808	0,5896	0,5984	0,6072	0,6160	0,6248	0,6336	0,6424
Sulfeto	0,009	0,0585	0,0594	0,0603	0,0612	0,0621	0,0630	0,0639	0,0648	0,0657
Cloreto	25,08	163,0200	165,5280	168,0360	170,5440	173,0520	175,5600	178,0680	180,5760	183,0840
Cianeto	0,31	2,0150	2,0460	2,0770	2,1080	2,1390	2,1700	2,2010	2,2320	2,2630
Fenol	0,02	0,1300	0,1320	0,1340	0,1360	0,1380	0,1400	0,1420	0,1440	0,1460

CC	7,4	7,5	7,6	7,7	7,8	7,9	8	8,1	8,2	8,3
Cálcio	63,6400	64,5000	65,3600	66,2200	67,0800	67,9400	68,8000	69,6600	70,5200	71,3800
Sílica	69,5600	70,5000	71,4400	72,3800	73,3200	74,2600	75,2000	76,1400	77,0800	78,0200
Amônia	0,6512	0,6600	0,6688	0,6776	0,6864	0,6952	0,7040	0,7128	0,7216	0,7304
Sulfeto	0,0666	0,0675	0,0684	0,0693	0,0702	0,0711	0,0720	0,0729	0,0738	0,0747
Cloreto	185,5920	188,1000	190,6080	193,1160	195,6240	198,1320	200,6400	203,1480	205,6560	208,1640
Cianeto	2,2940	2,3250	2,3560	2,3870	2,4180	2,4490	2,4800	2,5110	2,5420	2,5730
Fenol	0,1480	0,1500	0,1520	0,1540	0,1560	0,1580	0,1600	0,1620	0,1640	0,1660

CC	8,4	8,5	8,6	8,7	8,8	8,9	9	9,1	9,2	9,3
Cálcio	72,2400	73,1000	73,9600	74,8200	75,6800	76,5400	77,4000	78,2600	79,1200	79,9800
Sílica	78,9600	79,9000	80,8400	81,7800	82,7200	83,6600	84,6000	85,5400	86,4800	87,4200
Amônia	0,7392	0,7480	0,7568	0,7656	0,7744	0,7832	0,7920	0,8008	0,8096	0,8184
Sulfeto	0,0756	0,0765	0,0774	0,0783	0,0792	0,0801	0,0810	0,0819	0,0828	0,0837
Cloreto	210,6720	213,1800	215,6880	218,1960	220,7040	223,2120	225,7200	228,2280	230,7360	233,2440
Cianeto	2,6040	2,6350	2,6660	2,6970	2,7280	2,7590	2,7900	2,8210	2,8520	2,8830
Fenol	0,1680	0,1700	0,1720	0,1740	0,1760	0,1780	0,1800	0,1820	0,1840	0,1860

Tabela E.5 – Variação da purga do sistema de resfriamento em função do ciclo de concentração (a uma dada temperatura) – TR01 (limitada a 16 ciclos) (continuação)

	Reposição (mg/L)	Purga (mg/L)								
CC	9,4	9,5	9,6	9,7	9,8	9,9	10	10,1	10,2	10,3
Cálcio	80,8400	81,7000	82,5600	83,4200	84,2800	85,1400	86,0000	86,8600	87,7200	88,5800
Sílica	88,3600	89,3000	90,2400	91,1800	92,1200	93,0600	94,0000	94,9400	95,8800	96,8200
Amônia	0,8272	0,8360	0,8448	0,8536	0,8624	0,8712	0,8800	0,8888	0,8976	0,9064
Sulfeto	0,0846	0,0855	0,0864	0,0873	0,0882	0,0891	0,0900	0,0909	0,0918	0,0927
Cloreto	235,7520	238,2600	240,7680	243,2760	245,7840	248,2920	250,8000	253,3080	255,8160	258,3240
Cianeto	2,9140	2,9450	2,9760	3,0070	3,0380	3,0690	3,1000	3,1310	3,1620	3,1930
Fenol	0,1880	0,1900	0,1920	0,1940	0,1960	0,1980	0,2000	0,2020	0,2040	0,2060

CC	10,4	10,5	10,6	10,7	10,8	10,9	11	11,1	11,2	11,3
Cálcio	89,4400	90,3000	91,1600	92,0200	92,8800	93,7400	94,6000	95,4600	96,3200	97,1800
Sílica	97,7600	98,7000	99,6400	100,5800	101,5200	102,4600	103,4000	104,3400	105,2800	106,2200
Amônia	0,9152	0,9240	0,9328	0,9416	0,9504	0,9592	0,9680	0,9768	0,9856	0,9944
Sulfeto	0,0936	0,0945	0,0954	0,0963	0,0972	0,0981	0,0990	0,0999	0,1008	0,1017
Cloreto	260,8320	263,3400	265,8480	268,3560	270,8640	273,3720	275,8800	278,3880	280,8960	283,4040
Cianeto	3,2240	3,2550	3,2860	3,3170	3,3480	3,3790	3,4100	3,4410	3,4720	3,5030
Fenol	0,2080	0,2100	0,2120	0,2140	0,2160	0,2180	0,2200	0,2220	0,2240	0,2260

CC	11,4	11,5	11,6	11,7	11,8	11,9	12	12,1	12,2	12,3
Cálcio	98,0400	98,9000	99,7600	100,6200	101,4800	102,3400	103,2000	104,0600	104,9200	105,7800
Sílica	107,1600	108,1000	109,0400	109,9800	110,9200	111,8600	112,8000	113,7400	114,6800	115,6200
Amônia	1,0032	1,0120	1,0208	1,0296	1,0384	1,0472	1,0560	1,0648	1,0736	1,0824
Sulfeto	0,1026	0,1035	0,1044	0,1053	0,1062	0,1071	0,1080	0,1089	0,1098	0,1107
Cloreto	285,9120	288,4200	290,9280	293,4360	295,9440	298,4520	300,9600	303,4680	305,9760	308,4840
Cianeto	3,5340	3,5650	3,5960	3,6270	3,6580	3,6890	3,7200	3,7510	3,7820	3,8130
Fenol	0,2280	0,2300	0,2320	0,2340	0,2360	0,2380	0,2400	0,2420	0,2440	0,2460

Tabela E.5 – Variação da purga do sistema de resfriamento em função do ciclo de concentração (a uma dada temperatura) – TR01 (limitada a 16 ciclos) (continuação)

	Reposição (mg/L)	Purga (mg/L)								
CC	12,4	12,5	12,6	12,7	12,8	12,9	13	13,1	13,2	13,3
Cálcio	106,6400	107,5000	108,3600	109,2200	110,0800	110,9400	111,8000	112,6600	113,5200	114,3800
Sílica	116,5600	117,5000	118,4400	119,3800	120,3200	121,2600	122,2000	123,1400	124,0800	125,0200
Amônia	1,0912	1,1000	1,1088	1,1176	1,1264	1,1352	1,1440	1,1528	1,1616	1,1704
Sulfeto	0,1116	0,1125	0,1134	0,1143	0,1152	0,1161	0,1170	0,1179	0,1188	0,1197
Cloreto	310,9920	313,5000	316,0080	318,5160	321,0240	323,5320	326,0400	328,5480	331,0560	333,5640
Cianeto	3,8440	3,8750	3,9060	3,9370	3,9680	3,9990	4,0300	4,0610	4,0920	4,1230
Fenol	0,2480	0,2500	0,2520	0,2540	0,2560	0,2580	0,2600	0,2620	0,2640	0,2660

CC	13,4	13,5	13,6	13,7	13,8	13,9	14	14,1	14,2	14,3
Cálcio	115,2400	116,1000	116,9600	117,8200	118,6800	119,5400	120,4000	121,2600	122,1200	122,9800
Sílica	125,9600	126,9000	127,8400	128,7800	129,7200	130,6600	131,6000	132,5400	133,4800	134,4200
Amônia	1,1792	1,1880	1,1968	1,2056	1,2144	1,2232	1,2320	1,2408	1,2496	1,2584
Sulfeto	0,1206	0,1215	0,1224	0,1233	0,1242	0,1251	0,1260	0,1269	0,1278	0,1287
Cloreto	336,0720	338,5800	341,0880	343,5960	346,1040	348,6120	351,1200	353,6280	356,1360	358,6440
Cianeto	4,1540	4,1850	4,2160	4,2470	4,2780	4,3090	4,3400	4,3710	4,4020	4,4330
Fenol	0,2680	0,2700	0,2720	0,2740	0,2760	0,2780	0,2800	0,2820	0,2840	0,2860

CC	14,4	14,5	14,6	14,7	14,8	14,9	15	15,1	15,2	15,3
Cálcio	123,8400	124,7000	125,5600	126,4200	127,2800	128,1400	129,0000	129,8600	130,7200	131,5800
Sílica	135,3600	136,3000	137,2400	138,1800	139,1200	140,0600	141,0000	141,9400	142,8800	143,8200
Amônia	1,2672	1,2760	1,2848	1,2936	1,3024	1,3112	1,3200	1,3288	1,3376	1,3464
Sulfeto	0,1296	0,1305	0,1314	0,1323	0,1332	0,1341	0,1350	0,1359	0,1368	0,1377
Cloreto	361,1520	363,6600	366,1680	368,6760	371,1840	373,6920	376,2000	378,7080	381,2160	383,7240
Cianeto	4,4640	4,4950	4,5260	4,5570	4,5880	4,6190	4,6500	4,6810	4,7120	4,7430
Fenol	0,2880	0,2900	0,2920	0,2940	0,2960	0,2980	0,3000	0,3020	0,3040	0,3060

Tabela E.5 – Variação da purga do sistema de resfriamento em função do ciclo de concentração (a uma dada temperatura) – TR01 (limitada a 16 ciclos) (continuação)

	Reposição (mg/L)	Purga (mg/L)					
CC	15,4	15,5	15,6	15,7	15,8	15,9	**16**
Cálcio	132,44	133,3	134,16	135,02	135,88	136,74	137,6
Sílica	144,76	145,7	146,64	147,58	148,52	149,46	150,4
Amônia	1,3552	1,364	1,3728	1,3816	1,3904	1,3992	1,408
Sulfeto	0,1386	0,1395	0,1404	0,1413	0,1422	0,1431	0,144
Cloreto	386,232	388,74	391,248	393,756	396,264	398,772	401,28
Cianeto	4,774	4,805	4,836	4,867	4,898	4,929	4,96
Fenol	0,308	0,31	0,312	0,314	0,316	0,318	0,32

Tabela E.6 – Variação da purga do sistema de resfriamento em função do ciclo de concentração (a uma dada temperatura) – TR02 (limitada a 16 ciclos)

	Reposição (mg/L)	Purga (mg/L)								
CC		6,5	6,6	6,7	6,8	6,9	7	7,1	7,2	7,3
Cálcio	8,6	55,9000	56,7600	57,6200	58,4800	59,3400	60,2000	61,0600	61,9200	62,7800
Sílica	9,4	61,1000	62,0400	62,9800	63,9200	64,8600	65,8000	66,7400	67,6800	68,6200
Amônia	0,074	0,4810	0,4884	0,4958	0,5032	0,5106	0,5180	0,5254	0,5328	0,5402
Sulfeto	0,008	0,0520	0,0528	0,0536	0,0544	0,0552	0,0560	0,0568	0,0576	0,0584
Cloreto	26,58	172,7700	175,4280	178,0860	180,7440	183,4020	186,0600	188,7180	191,3760	194,0340
Cianeto	0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Fenol	0,008	0,0520	0,0528	0,0536	0,0544	0,0552	0,0560	0,0568	0,0576	0,0584

CC	7,4	7,5	7,6	7,7	7,8	7,9	8	8,1	8,2	8,3
Cálcio	63,6400	64,5000	65,3600	66,2200	67,0800	67,9400	68,8000	69,6600	70,5200	71,3800
Sílica	69,5600	70,5000	71,4400	72,3800	73,3200	74,2600	75,2000	76,1400	77,0800	78,0200
Amônia	0,5476	0,5550	0,5624	0,5698	0,5772	0,5846	0,5920	0,5994	0,6068	0,6142
Sulfeto	0,0592	0,0600	0,0608	0,0616	0,0624	0,0632	0,0640	0,0648	0,0656	0,0664
Cloreto	196,6920	199,3500	202,0080	204,6660	207,3240	209,9820	212,6400	215,2980	217,9560	220,6140
Cianeto	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Fenol	0,0592	0,0600	0,0608	0,0616	0,0624	0,0632	0,0640	0,0648	0,0656	0,0664

CC	8,4	8,5	8,6	8,7	8,8	8,9	9	9,1	9,2	9,3
Cálcio	72,2400	73,1000	73,9600	74,8200	75,6800	76,5400	77,4000	78,2600	79,1200	79,9800
Sílica	78,9600	79,9000	80,8400	81,7800	82,7200	83,6600	84,6000	85,5400	86,4800	87,4200
Amônia	0,6216	0,6290	0,6364	0,6438	0,6512	0,6586	0,6660	0,6734	0,6808	0,6882
Sulfeto	0,0672	0,0680	0,0688	0,0696	0,0704	0,0712	0,0720	0,0728	0,0736	0,0744
Cloreto	223,2720	225,9300	228,5880	231,2460	233,9040	236,5620	239,2200	241,8780	244,5360	247,1940
Cianeto	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Fenol	0,0672	0,0680	0,0688	0,0696	0,0704	0,0712	0,0720	0,0728	0,0736	0,0744

Tabela E.6 – Variação da purga do sistema de resfriamento em função do ciclo de concentração (a uma dada temperatura) – TR02 (limitada a 16 ciclos) (continuação)

	Reposição (mg/L)	Purga (mg/L)								
CC	9,4	9,5	9,6	9,7	9,8	9,9	10	10,1	10,2	10,3
Cálcio	80,8400	81,7000	82,5600	83,4200	84,2800	85,1400	86,0000	86,8600	87,7200	88,5800
Sílica	88,3600	89,3000	90,2400	91,1800	92,1200	93,0600	94,0000	94,9400	95,8800	96,8200
Amônia	0,6956	0,7030	0,7104	0,7178	0,7252	0,7326	0,7400	0,7474	0,7548	0,7622
Sulfeto	0,0752	0,0760	0,0768	0,0776	0,0784	0,0792	0,0800	0,0808	0,0816	0,0824
Cloreto	249,8520	252,5100	255,1680	257,8260	260,4840	263,1420	265,8000	268,4580	271,1160	273,7740
Cianeto	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Fenol	0,0752	0,0760	0,0768	0,0776	0,0784	0,0792	0,0800	0,0808	0,0816	0,0824

CC	10,4	10,5	10,6	10,7	10,8	10,9	11	11,1	11,2	11,3
Cálcio	89,4400	90,3000	91,1600	92,0200	92,8800	93,7400	94,6000	95,4600	96,3200	97,1800
Sílica	97,7600	98,7000	99,6400	100,5800	101,5200	102,4600	103,4000	104,3400	105,2800	106,2200
Amônia	0,7696	0,7770	0,7844	0,7918	0,7992	0,8066	0,8140	0,8214	0,8288	0,8362
Sulfeto	0,0832	0,0840	0,0848	0,0856	0,0864	0,0872	0,0880	0,0888	0,0896	0,0904
Cloreto	276,4320	279,0900	281,7480	284,4060	287,0640	289,7220	292,3800	295,0380	297,6960	300,3540
Cianeto	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Fenol	0,0832	0,0840	0,0848	0,0856	0,0864	0,0872	0,0880	0,0888	0,0896	0,0904

CC	11,4	11,5	11,6	11,7	11,8	11,9	12	12,1	12,2	12,3
Cálcio	98,0400	98,9000	99,7600	100,6200	101,4800	102,3400	103,2000	104,0600	104,9200	105,7800
Sílica	107,1600	108,1000	109,0400	109,9800	110,9200	111,8600	112,8000	113,7400	114,6800	115,6200
Amônia	0,8436	0,8510	0,8584	0,8658	0,8732	0,8806	0,8880	0,8954	0,9028	0,9102
Sulfeto	0,0912	0,0920	0,0928	0,0936	0,0944	0,0952	0,0960	0,0968	0,0976	0,0984
Cloreto	303,0120	305,6700	308,3280	310,9860	313,6440	316,3020	318,9600	321,6180	324,2760	326,9340
Cianeto	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Fenol	0,0912	0,0920	0,0928	0,0936	0,0944	0,0952	0,0960	0,0968	0,0976	0,0984

Tabela E.6 – Variação da purga do sistema de resfriamento em função do ciclo de concentração (a uma dada temperatura) – TR02 (limitada a 16 ciclos) (continuação)

	Reposição (mg/L)				Purga (mg/L)					
CC	12,4	12,5	12,6	12,7	12,8	12,9	13	13,1	13,2	13,3
Cálcio	106,6400	107,5000	108,3600	109,2200	110,0800	110,9400	111,8000	112,6600	113,5200	114,3800
Sílica	116,5600	117,5000	118,4400	119,3800	120,3200	121,2600	122,2000	123,1400	124,0800	125,0200
Amônia	0,9176	0,9250	0,9324	0,9398	0,9472	0,9546	0,9620	0,9694	0,9768	0,9842
Sulfeto	0,0992	0,1000	0,1008	0,1016	0,1024	0,1032	0,1040	0,1048	0,1056	0,1064
Cloreto	329,5920	332,2500	334,9080	337,5660	340,2240	342,8820	345,5400	348,1980	350,8560	353,5140
Cianeto	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Fenol	0,0992	0,1000	0,1008	0,1016	0,1024	0,1032	0,1040	0,1048	0,1056	0,1064

CC	13,4	13,5	13,6	13,7	13,8	13,9	14	14,1	14,2	14,3
Cálcio	115,2400	116,1000	116,9600	117,8200	118,6800	119,5400	120,4000	121,2600	122,1200	122,9800
Sílica	125,9600	126,9000	127,8400	128,7800	129,7200	130,6600	131,6000	132,5400	133,4800	134,4200
Amônia	0,9916	0,9990	1,0064	1,0138	1,0212	1,0286	1,0360	1,0434	1,0508	1,0582
Sulfeto	0,1072	0,1080	0,1088	0,1096	0,1104	0,1112	0,1120	0,1128	0,1136	0,1144
Cloreto	356,1720	358,8300	361,4880	364,1460	366,8040	369,4620	372,1200	374,7780	377,4360	380,0940
Cianeto	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Fenol	0,1072	0,1080	0,1088	0,1096	0,1104	0,1112	0,1120	0,1128	0,1136	0,1144

CC	14,4	14,5	14,6	14,7	14,8	14,9	15	15,1	15,2	15,3
Cálcio	123,8400	124,7000	125,5600	126,4200	127,2800	128,1400	129,0000	129,8600	130,7200	131,5800
Sílica	135,3600	136,3000	137,2400	138,1800	139,1200	140,0600	141,0000	141,9400	142,8800	143,8200
Amônia	1,0656	1,0730	1,0804	1,0878	1,0952	1,1026	1,1100	1,1174	1,1248	1,1322
Sulfeto	0,1152	0,1160	0,1168	0,1176	0,1184	0,1192	0,1200	0,1208	0,1216	0,1224
Cloreto	382,7520	385,4100	388,0680	390,7260	393,3840	396,0420	398,7000	401,3580	404,0160	406,6740
Cianeto	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Fenol	0,1152	0,1160	0,1168	0,1176	0,1184	0,1192	0,1200	0,1208	0,1216	0,1224

Tabela E.6 – Variação da purga do sistema de resfriamento em função do ciclo de concentração (a uma dada temperatura) – TR02 (limitada a 16 ciclos) (continuação)

	Reposição (mg/L)	Purga (mg/L)					
CC	15,4	15,5	15,6	15,7	15,8	15,9	16
Cálcio	132,44	133,3	134,16	135,02	135,88	136,74	137,6
Sílica	144,7600	145,7000	146,6400	147,5800	148,5200	149,4600	150,4000
Amônia	1,1396	1,1470	1,1544	1,1618	1,1692	1,1766	1,1840
Sulfeto	0,1232	0,1240	0,1248	0,1256	0,1264	0,1272	0,1280
Cloreto	409,3320	411,9900	414,6480	417,3060	419,9640	422,6220	425,2800
Cianeto	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Fenol	0,1232	0,1240	0,1248	0,1256	0,1264	0,1272	0,1280

Tabela E.7 - Redução da vazão das purgas das torres em função do ciclo de concentração – TR01

Perda por evaporação		Ciclo de concentração	Purga (m³/h)	Redução da Purga (m³/h)	Redução (%)
E (m³/h)	37	6,50	6,7273	0,0000	0,0000
	37	6,60	6,6071	0,1201	1,7857
	37	6,70	6,4912	0,2360	3,5088
	37	6,80	6,3793	0,3480	5,1724
	37	6,90	6,2712	0,4561	6,7797
	37	7,00	6,1667	0,5606	8,3333
	37	7,10	6,0656	0,6617	9,8361
	37	7,20	5,9677	0,7595	11,2903
	37	7,30	5,8730	0,8543	12,6984
	37	7,40	5,7813	0,9460	14,0625
	37	7,50	5,6923	1,0350	15,3846
	37	7,60	5,6061	1,1212	16,6667
	37	7,70	5,5224	1,2049	17,9104
	37	7,80	5,4412	1,2861	19,1176
	37	7,90	5,3623	1,3650	20,2899
	37	8,00	5,2857	1,4416	21,4286
	37	8,10	5,2113	1,5160	22,5352
	37	8,20	5,1389	1,5884	23,6111
	37	8,30	5,0685	1,6588	24,6575
	37	8,40	5,0000	1,7273	25,6757
	37	8,50	4,9333	1,7939	26,6667
	37	8,60	4,8684	1,8589	27,6316
	37	8,70	4,8052	1,9221	28,5714
	37	8,80	4,7436	1,9837	29,4872
	37	8,90	4,6835	2,0437	30,3797
	37	9,00	4,6250	2,1023	31,2500
	37	9,10	4,5679	2,1594	32,0988
	37	9,20	4,5122	2,2151	32,9268
	37	9,30	4,4578	2,2694	33,7349
	37	9,40	4,4048	2,3225	34,5238
	37	9,50	4,3529	2,3743	35,2941
	37	9,60	4,3023	2,4249	36,0465
	37	9,70	4,2529	2,4744	36,7816
	37	9,80	4,2045	2,5227	37,5000
	37	9,90	4,1573	2,5700	38,2022
	37	10,00	4,1111	2,6162	38,8889
	37	10,10	4,0659	2,6613	39,5604
	37	10,20	4,0217	2,7055	40,2174
	37	10,30	3,9785	2,7488	40,8602
	37	10,40	3,9362	2,7911	41,4894
	37	10,50	3,8947	2,8325	42,1053
	37	10,60	3,8542	2,8731	42,7083
	37	10,70	3,8144	2,9128	43,2990
	37	10,80	3,7755	2,9518	43,8776
	37	10,90	3,7374	2,9899	44,4444
	37	11,00	3,7000	3,0273	45,0000
	37	11,10	3,6634	3,0639	45,5446
	37	11,20	3,6275	3,0998	46,0784
	37	11,30	3,5922	3,1350	46,6019

Tabela E.7 - Redução da vazão das purgas das torres em função do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

Perda por evaporação		Ciclo de concentração	Purga (m³/h)	Redução da Purga (m³/h)	Redução (%)
E (m³/h)	37	11,40	3,5577	3,1696	47,1154
	37	11,50	3,5238	3,2035	47,6190
	37	11,60	3,4906	3,2367	48,1132
	37	11,70	3,4579	3,2693	48,5981
	37	11,8	3,4259	3,3013	49,0741
	37	11,9	3,3945	3,3328	49,5413
	37	12	3,3636	3,3636	50,0000
	37	12,1	3,3333	3,3939	50,4505
	37	12,2	3,3036	3,4237	50,8929
	37	12,3	3,2743	3,4529	51,3274
	37	12,4	3,2456	3,4817	51,7544
	37	12,5	3,2174	3,5099	52,1739
	37	12,6	3,1897	3,5376	52,5862
	37	12,7	3,1624	3,5649	52,9915
	37	12,8	3,1356	3,5917	53,3898
	37	12,9	3,1092	3,6180	53,7815
	37	13	3,0833	3,6439	54,1667
	37	13,1	3,0579	3,6694	54,5455
	37	13,2	3,0328	3,6945	54,9180
	37	13,3	3,0081	3,7191	55,2846
	37	13,4	2,9839	3,7434	55,6452
	37	13,5	2,9600	3,7673	56,0000
	37	13,6	2,9365	3,7908	56,3492
	37	13,7	2,9134	3,8139	56,6929
	37	13,8	2,8906	3,8366	57,0313
	37	13,9	2,8682	3,8591	57,3643
	37	14	2,8462	3,8811	57,6923
	37	14,1	2,8244	3,9028	58,0153
	37	14,2	2,8030	3,9242	58,3333
	37	14,3	2,7820	3,9453	58,6466
	37	14,4	2,7612	3,9661	58,9552
	37	14,5	2,7407	3,9865	59,2593
	37	14,6	2,7206	4,0067	59,5588
	37	14,7	2,7007	4,0265	59,8540
	37	14,8	2,6812	4,0461	60,1449
	37	14,9	2,6619	4,0654	60,4317
	37	15	2,6429	4,0844	60,7143
	37	15,1	2,6241	4,1032	60,9929
	37	15,2	2,6056	4,1216	61,2676
	37	15,3	2,5874	4,1399	61,5385
	37	15,4	2,5694	4,1578	61,8056
	37	15,5	2,5517	4,1755	62,0690
	37	15,6	2,5342	4,1930	62,3288
	37	15,7	2,5170	4,2103	62,5850
	37	15,8	2,5000	4,2273	62,8378
	37	15,9	2,4832	4,2441	63,0872
	37	16	2,4667	4,2606	63,3333

Tabela E.8 - Redução da vazão das purgas das torres em função do ciclo de concentração – TR02

Perda por evaporação		Ciclo de concentração	Purga (m³/h)	Redução da Purga (m³/h)	Redução (%)
E (m³/h)	285	6,50	51,8182	0,0000	0,0000
	285	6,60	50,8929	0,9253	1,7857
	285	6,70	50,0000	1,8182	3,5088
	285	6,80	49,1379	2,6803	5,1724
	285	6,90	48,3051	3,5131	6,7797
	285	7,00	47,5000	4,3182	8,3333
	285	7,10	46,7213	5,0969	9,8361
	285	7,20	45,9677	5,8504	11,2903
	285	7,30	45,2381	6,5801	12,6984
	285	7,40	44,5313	7,2869	14,0625
	285	7,50	43,8462	7,9720	15,3846
	285	7,60	43,1818	8,6364	16,6667
	285	7,70	42,5373	9,2809	17,9104
	285	7,80	41,9118	9,9064	19,1176
	285	7,90	41,3043	10,5138	20,2899
	285	8,00	40,7143	11,1039	21,4286
	285	8,10	40,1408	11,6773	22,5352
	285	8,20	39,5833	12,2348	23,6111
	285	8,30	39,0411	12,7771	24,6575
	285	8,40	38,5135	13,3047	25,6757
	285	8,50	38,0000	13,8182	26,6667
	285	8,60	37,5000	14,3182	27,6316
	285	8,70	37,0130	14,8052	28,5714
	285	8,80	36,5385	15,2797	29,4872
	285	8,90	36,0759	15,7422	30,3797
	285	9,00	35,6250	16,1932	31,2500
	285	9,10	35,1852	16,6330	32,0988
	285	9,20	34,7561	17,0621	32,9268
	285	9,30	34,3373	17,4808	33,7349
	285	9,40	33,9286	17,8896	34,5238
	285	9,50	33,5294	18,2888	35,2941
	285	9,60	33,1395	18,6786	36,0465
	285	9,70	32,7586	19,0596	36,7816
	285	9,80	32,3864	19,4318	37,5000
	285	9,90	32,0225	19,7957	38,2022
	285	10,00	31,6667	20,1515	38,8889
	285	10,10	31,3187	20,4995	39,5604
	285	10,20	30,9783	20,8399	40,2174
	285	10,30	30,6452	21,1730	40,8602
	285	10,40	30,3191	21,4990	41,4894
	285	10,50	30,0000	21,8182	42,1053
	285	10,60	29,6875	22,1307	42,7083
	285	10,70	29,3814	22,4367	43,2990
	285	10,80	29,0816	22,7365	43,8776
	285	10,90	28,7879	23,0303	44,4444
	285	11,00	28,5000	23,3182	45,0000
	285	11,10	28,2178	23,6004	45,5446
	285	11,20	27,9412	23,8770	46,0784
	285	11,30	27,6699	24,1483	46,6019

Tabela E.8 - Redução da vazão das purgas das torres em função do ciclo de concentração – TR02 (continuação)

Perda por evaporação		Ciclo de concentração	Purga (m³/h)	Redução da Purga (m³/h)	Redução (%)
E (m³/h)	285	11,40	27,4038	24,4143	47,1154
	285	11,50	27,1429	24,6753	47,6190
	285	11,60	26,8868	24,9314	48,1132
	285	11,70	26,6355	25,1827	48,5981
	285	11,8	26,3889	25,4293	49,0741
	285	11,9	26,1468	25,6714	49,5413
	285	12	25,9091	25,9091	50,0000
	285	12,1	25,6757	26,1425	50,4505
	285	12,2	25,4464	26,3718	50,8929
	285	12,3	25,2212	26,5969	51,3274
	285	12,4	25,0000	26,8182	51,7544
	285	12,5	24,7826	27,0356	52,1739
	285	12,6	24,5690	27,2492	52,5862
	285	12,7	24,3590	27,4592	52,9915
	285	12,8	24,1525	27,6656	53,3898
	285	12,9	23,9496	27,8686	53,7815
	285	13	23,7500	28,0682	54,1667
	285	13,1	23,5537	28,2645	54,5455
	285	13,2	23,3607	28,4575	54,9180
	285	13,3	23,1707	28,6475	55,2846
	285	13,4	22,9839	28,8343	55,6452
	285	13,5	22,8000	29,0182	56,0000
	285	13,6	22,6190	29,1991	56,3492
	285	13,7	22,4409	29,3772	56,6929
	285	13,8	22,2656	29,5526	57,0313
	285	13,9	22,0930	29,7252	57,3643
	285	14	21,9231	29,8951	57,6923
	285	14,1	21,7557	30,0625	58,0153
	285	14,2	21,5909	30,2273	58,3333
	285	14,3	21,4286	30,3896	58,6466
	285	14,4	21,2687	30,5495	58,9552
	285	14,5	21,1111	30,7071	59,2593
	285	14,6	20,9559	30,8623	59,5588
	285	14,7	20,8029	31,0153	59,8540
	285	14,8	20,6522	31,1660	60,1449
	285	14,9	20,5036	31,3146	60,4317
	285	15	20,3571	31,4610	60,7143
	285	15,1	20,2128	31,6054	60,9929
	285	15,2	20,0704	31,7478	61,2676
	285	15,3	19,9301	31,8881	61,5385
	285	15,4	19,7917	32,0265	61,8056
	285	15,5	19,6552	32,1630	62,0690
	285	15,6	19,5205	32,2976	62,3288
	285	15,7	19,3878	32,4304	62,5850
	285	15,8	19,2568	32,5614	62,8378
	285	15,9	19,1275	32,6907	63,0872
	285	16	19,0000	32,8182	63,3333

Tabela E.8 - Variação do índice de Langelier em função do pH e do ciclo de concentração – TR01

CC	6,5	6,6	6,7	6,8	6,9	7	7,1	7,2
Ca (mg/L)	55,9	56,76	57,62	58,48	59,34	60,2	61,06	61,92
pHs	7,95	7,94	7,93	7,93	7,92	7,91	7,91	7,90
pH				IL				
6,12	-1,8253	-1,8187	-1,8122	-1,8057	-1,7994	-1,7931	-1,7870	-1,7809
6,17	-1,7753	-1,7687	-1,7622	-1,7557	-1,7494	-1,7431	-1,7370	-1,7309
6,22	-1,7253	-1,7187	-1,7122	-1,7057	-1,6994	-1,6931	-1,6870	-1,6809
6,27	-1,6753	-1,6687	-1,6622	-1,6557	-1,6494	-1,6431	-1,6370	-1,6309
6,32	-1,6253	-1,6187	-1,6122	-1,6057	-1,5994	-1,5931	-1,5870	-1,5809
6,37	-1,5753	-1,5687	-1,5622	-1,5557	-1,5494	-1,5431	-1,5370	-1,5309
6,42	-1,5253	-1,5187	-1,5122	-1,5057	-1,4994	-1,4931	-1,4870	-1,4809
6,47	-1,4753	-1,4687	-1,4622	-1,4557	-1,4494	-1,4431	-1,4370	-1,4309
6,52	-1,4253	-1,4187	-1,4122	-1,4057	-1,3994	-1,3931	-1,3870	-1,3809
6,57	-1,3753	-1,3687	-1,3622	-1,3557	-1,3494	-1,3431	-1,3370	-1,3309
6,62	-1,3253	-1,3187	-1,3122	-1,3057	-1,2994	-1,2931	-1,2870	-1,2809
6,67	-1,2753	-1,2687	-1,2622	-1,2557	-1,2494	-1,2431	-1,2370	-1,2309
6,72	-1,2253	-1,2187	-1,2122	-1,2057	-1,1994	-1,1931	-1,1870	-1,1809
6,77	-1,1753	-1,1687	-1,1622	-1,1557	-1,1494	-1,1431	-1,1370	-1,1309
6,82	-1,1253	-1,1187	-1,1122	-1,1057	-1,0994	-1,0931	-1,0870	-1,0809
6,87	-1,0753	-1,0687	-1,0622	-1,0557	-1,0494	-1,0431	-1,0370	-1,0309
6,92	-1,0253	-1,0187	-1,0122	-1,0057	-0,9994	-0,9931	-0,9870	-0,9809
6,97	-0,9753	-0,9687	-0,9622	-0,9557	-0,9494	-0,9431	-0,9370	-0,9309
7,02	-0,9253	-0,9187	-0,9122	-0,9057	-0,8994	-0,8931	-0,8870	-0,8809
7,07	-0,8753	-0,8687	-0,8622	-0,8557	-0,8494	-0,8431	-0,8370	-0,8309
7,12	-0,8253	-0,8187	-0,8122	-0,8057	-0,7994	-0,7931	-0,7870	-0,7809
7,17	-0,7753	-0,7687	-0,7622	-0,7557	-0,7494	-0,7431	-0,7370	-0,7309
7,22	-0,7253	-0,7187	-0,7122	-0,7057	-0,6994	-0,6931	-0,6870	-0,6809
7,27	-0,6753	-0,6687	-0,6622	-0,6557	-0,6494	-0,6431	-0,6370	-0,6309
7,32	-0,6253	-0,6187	-0,6122	-0,6057	-0,5994	-0,5931	-0,5870	-0,5809
7,37	-0,5753	-0,5687	-0,5622	-0,5557	-0,5494	-0,5431	-0,5370	-0,5309
7,42	-0,5253	-0,5187	-0,5122	-0,5057	-0,4994	-0,4931	-0,4870	-0,4809
7,47	-0,4753	-0,4687	-0,4622	-0,4557	-0,4494	-0,4431	-0,4370	-0,4309
7,52	-0,4253	-0,4187	-0,4122	-0,4057	-0,3994	-0,3931	-0,3870	-0,3809
7,57	-0,3753	-0,3687	-0,3622	-0,3557	-0,3494	-0,3431	-0,3370	-0,3309
7,62	-0,3253	-0,3187	-0,3122	-0,3057	-0,2994	-0,2931	-0,2870	-0,2809
7,67	-0,2753	-0,2687	-0,2622	-0,2557	-0,2494	-0,2431	-0,2370	-0,2309
7,72	-0,2253	-0,2187	-0,2122	-0,2057	-0,1994	-0,1931	-0,1870	-0,1809
7,77	-0,1753	-0,1687	-0,1622	-0,1557	-0,1494	-0,1431	-0,1370	-0,1309
7,82	-0,1253	-0,1187	-0,1122	-0,1057	-0,0994	-0,0931	-0,0870	-0,0809
7,87	-0,0753	-0,0687	-0,0622	-0,0557	-0,0494	-0,0431	-0,0370	-0,0309
7,92	-0,0253	-0,0187	-0,0122	-0,0057	0,0006	0,0069	0,0130	0,0191
7,97	0,0247	0,0313	0,0378	0,0443	0,0506	0,0569	0,0630	0,0691
8,02	0,0747	0,0813	0,0878	0,0943	0,1006	0,1069	0,1130	0,1191
8,07	0,1247	0,1313	0,1378	0,1443	0,1506	0,1569	0,1630	0,1691
8,12	0,1747	0,1813	0,1878	0,1943	0,2006	0,2069	0,2130	0,2191
8,17	0,2247	0,2313	0,2378	0,2443	0,2506	0,2569	0,2630	0,2691
8,22	0,2747	0,2813	0,2878	0,2943	0,3006	0,3069	0,3130	0,3191
8,27	0,3247	0,3313	0,3378	0,3443	0,3506	0,3569	0,3630	0,3691
8,32	0,3747	0,3813	0,3878	0,3943	0,4006	0,4069	0,4130	0,4191

Tabela E.8 - Variação do índice de Langelier em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

CC	6,5	6,6	6,7	6,8	6,9	7	7,1	7,2
Ca (mg/L)	55,9	56,76	57,62	58,48	59,34	60,2	61,06	61,92
pHs	7,95	7,94	7,93	7,93	7,92	7,91	7,91	7,90
pH				IL				
8,37	0,4247	0,4313	0,4378	0,4443	0,4506	0,4569	0,4630	0,4691
8,42	0,4747	0,4813	0,4878	0,4943	0,5006	0,5069	0,5130	0,5191
8,47	0,5247	0,5313	0,5378	0,5443	0,5506	0,5569	0,5630	0,5691
8,52	0,5747	0,5813	0,5878	0,5943	0,6006	0,6069	0,6130	0,6191
8,57	0,6247	0,6313	0,6378	0,6443	0,6506	0,6569	0,6630	0,6691
8,62	0,6747	0,6813	0,6878	0,6943	0,7006	0,7069	0,7130	0,7191

Tabela E.8 - Variação do índice de Langelier em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

CC	7,3	7,4	7,5	7,6	7,7	7,8	7,9	8
Ca (mg/L)	62,78	63,64	64,5	65,36	66,22	67,08	67,94	68,8
pHs	7,89	7,89	7,88	7,88	7,87	7,87	7,86	7,86
pH				IL				
6,12	-1,7749	-1,7690	-1,7632	-1,7574	-1,7518	-1,7461	-1,7406	-1,7352
6,17	-1,7249	-1,7190	-1,7132	-1,7074	-1,7018	-1,6961	-1,6906	-1,6852
6,22	-1,6749	-1,6690	-1,6632	-1,6574	-1,6518	-1,6461	-1,6406	-1,6352
6,27	-1,6249	-1,6190	-1,6132	-1,6074	-1,6018	-1,5961	-1,5906	-1,5852
6,32	-1,5749	-1,5690	-1,5632	-1,5574	-1,5518	-1,5461	-1,5406	-1,5352
6,37	-1,5249	-1,5190	-1,5132	-1,5074	-1,5018	-1,4961	-1,4906	-1,4852
6,42	-1,4749	-1,4690	-1,4632	-1,4574	-1,4518	-1,4461	-1,4406	-1,4352
6,47	-1,4249	-1,4190	-1,4132	-1,4074	-1,4018	-1,3961	-1,3906	-1,3852
6,52	-1,3749	-1,3690	-1,3632	-1,3574	-1,3518	-1,3461	-1,3406	-1,3352
6,57	-1,3249	-1,3190	-1,3132	-1,3074	-1,3018	-1,2961	-1,2906	-1,2852
6,62	-1,2749	-1,2690	-1,2632	-1,2574	-1,2518	-1,2461	-1,2406	-1,2352
6,67	-1,2249	-1,2190	-1,2132	-1,2074	-1,2018	-1,1961	-1,1906	-1,1852
6,72	-1,1749	-1,1690	-1,1632	-1,1574	-1,1518	-1,1461	-1,1406	-1,1352
6,77	-1,1249	-1,1190	-1,1132	-1,1074	-1,1018	-1,0961	-1,0906	-1,0852
6,82	-1,0749	-1,0690	-1,0632	-1,0574	-1,0518	-1,0461	-1,0406	-1,0352
6,87	-1,0249	-1,0190	-1,0132	-1,0074	-1,0018	-0,9961	-0,9906	-0,9852
6,92	-0,9749	-0,9690	-0,9632	-0,9574	-0,9518	-0,9461	-0,9406	-0,9352
6,97	-0,9249	-0,9190	-0,9132	-0,9074	-0,9018	-0,8961	-0,8906	-0,8852
7,02	-0,8749	-0,8690	-0,8632	-0,8574	-0,8518	-0,8461	-0,8406	-0,8352
7,07	-0,8249	-0,8190	-0,8132	-0,8074	-0,8018	-0,7961	-0,7906	-0,7852
7,12	-0,7749	-0,7690	-0,7632	-0,7574	-0,7518	-0,7461	-0,7406	-0,7352
7,17	-0,7249	-0,7190	-0,7132	-0,7074	-0,7018	-0,6961	-0,6906	-0,6852
7,22	-0,6749	-0,6690	-0,6632	-0,6574	-0,6518	-0,6461	-0,6406	-0,6352
7,27	-0,6249	-0,6190	-0,6132	-0,6074	-0,6018	-0,5961	-0,5906	-0,5852
7,32	-0,5749	-0,5690	-0,5632	-0,5574	-0,5518	-0,5461	-0,5406	-0,5352
7,37	-0,5249	-0,5190	-0,5132	-0,5074	-0,5018	-0,4961	-0,4906	-0,4852
7,42	-0,4749	-0,4690	-0,4632	-0,4574	-0,4518	-0,4461	-0,4406	-0,4352
7,47	-0,4249	-0,4190	-0,4132	-0,4074	-0,4018	-0,3961	-0,3906	-0,3852
7,52	-0,3749	-0,3690	-0,3632	-0,3574	-0,3518	-0,3461	-0,3406	-0,3352
7,57	-0,3249	-0,3190	-0,3132	-0,3074	-0,3018	-0,2961	-0,2906	-0,2852
7,62	-0,2749	-0,2690	-0,2632	-0,2574	-0,2518	-0,2461	-0,2406	-0,2352
7,67	-0,2249	-0,2190	-0,2132	-0,2074	-0,2018	-0,1961	-0,1906	-0,1852
7,72	-0,1749	-0,1690	-0,1632	-0,1574	-0,1518	-0,1461	-0,1406	-0,1352
7,77	-0,1249	-0,1190	-0,1132	-0,1074	-0,1018	-0,0961	-0,0906	-0,0852
7,82	-0,0749	-0,0690	-0,0632	-0,0574	-0,0518	-0,0461	-0,0406	-0,0352
7,87	-0,0249	-0,0190	-0,0132	-0,0074	-0,0018	0,0039	0,0094	0,0148
7,92	0,0251	0,0310	0,0368	0,0426	0,0482	0,0539	0,0594	0,0648
7,97	0,0751	0,0810	0,0868	0,0926	0,0982	0,1039	0,1094	0,1148
8,02	0,1251	0,1310	0,1368	0,1426	0,1482	0,1539	0,1594	0,1648
8,07	0,1751	0,1810	0,1868	0,1926	0,1982	0,2039	0,2094	0,2148
8,12	0,2251	0,2310	0,2368	0,2426	0,2482	0,2539	0,2594	0,2648
8,17	0,2751	0,2810	0,2868	0,2926	0,2982	0,3039	0,3094	0,3148
8,22	0,3251	0,3310	0,3368	0,3426	0,3482	0,3539	0,3594	0,3648
8,27	0,3751	0,3810	0,3868	0,3926	0,3982	0,4039	0,4094	0,4148
8,32	0,4251	0,4310	0,4368	0,4426	0,4482	0,4539	0,4594	0,4648

Tabela E.8 - Variação do índice de Langelier em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

CC	7,3	7,4	7,5	7,6	7,7	7,8	7,9	8
Ca (mg/L)	62,78	63,64	64,5	65,36	66,22	67,08	67,94	68,8
pHs	7,89	7,89	7,88	7,88	7,87	7,87	7,86	7,86
pH				IL				
8,37	0,4751	0,4810	0,4868	0,4926	0,4982	0,5039	0,5094	0,5148
8,42	0,5251	0,5310	0,5368	0,5426	0,5482	0,5539	0,5594	0,5648
8,47	0,5751	0,5810	0,5868	0,5926	0,5982	0,6039	0,6094	0,6148
8,52	0,6251	0,6310	0,6368	0,6426	0,6482	0,6539	0,6594	0,6648
8,57	0,6751	0,6810	0,6868	0,6926	0,6982	0,7039	0,7094	0,7148
8,62	0,7251	0,7310	0,7368	0,7426	0,7482	0,7539	0,7594	0,7648

Tabela E.8 - Variação do índice de Langelier em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

CC	8,1	8,2	8,3	8,4	8,5	8,6	8,7	8,8
Ca (mg/L)	69,66	70,52	71,38	72,24	73,1	73,96	74,82	75,68
pHs	7,85	7,84	7,84	7,83	7,83	7,82	7,82	7,81
pH				IL				
6,12	-1,7298	-1,7244	-1,7192	-1,7140	-1,7088	-1,7037	-1,6987	-1,6938
6,17	-1,6798	-1,6744	-1,6692	-1,6640	-1,6588	-1,6537	-1,6487	-1,6438
6,22	-1,6298	-1,6244	-1,6192	-1,6140	-1,6088	-1,6037	-1,5987	-1,5938
6,27	-1,5798	-1,5744	-1,5692	-1,5640	-1,5588	-1,5537	-1,5487	-1,5438
6,32	-1,5298	-1,5244	-1,5192	-1,5140	-1,5088	-1,5037	-1,4987	-1,4938
6,37	-1,4798	-1,4744	-1,4692	-1,4640	-1,4588	-1,4537	-1,4487	-1,4438
6,42	-1,4298	-1,4244	-1,4192	-1,4140	-1,4088	-1,4037	-1,3987	-1,3938
6,47	-1,3798	-1,3744	-1,3692	-1,3640	-1,3588	-1,3537	-1,3487	-1,3438
6,52	-1,3298	-1,3244	-1,3192	-1,3140	-1,3088	-1,3037	-1,2987	-1,2938
6,57	-1,2798	-1,2744	-1,2692	-1,2640	-1,2588	-1,2537	-1,2487	-1,2438
6,62	-1,2298	-1,2244	-1,2192	-1,2140	-1,2088	-1,2037	-1,1987	-1,1938
6,67	-1,1798	-1,1744	-1,1692	-1,1640	-1,1588	-1,1537	-1,1487	-1,1438
6,72	-1,1298	-1,1244	-1,1192	-1,1140	-1,1088	-1,1037	-1,0987	-1,0938
6,77	-1,0798	-1,0744	-1,0692	-1,0640	-1,0588	-1,0537	-1,0487	-1,0438
6,82	-1,0298	-1,0244	-1,0192	-1,0140	-1,0088	-1,0037	-0,9987	-0,9938
6,87	-0,9798	-0,9744	-0,9692	-0,9640	-0,9588	-0,9537	-0,9487	-0,9438
6,92	-0,9298	-0,9244	-0,9192	-0,9140	-0,9088	-0,9037	-0,8987	-0,8938
6,97	-0,8798	-0,8744	-0,8692	-0,8640	-0,8588	-0,8537	-0,8487	-0,8438
7,02	-0,8298	-0,8244	-0,8192	-0,8140	-0,8088	-0,8037	-0,7987	-0,7938
7,07	-0,7798	-0,7744	-0,7692	-0,7640	-0,7588	-0,7537	-0,7487	-0,7438
7,12	-0,7298	-0,7244	-0,7192	-0,7140	-0,7088	-0,7037	-0,6987	-0,6938
7,17	-0,6798	-0,6744	-0,6692	-0,6640	-0,6588	-0,6537	-0,6487	-0,6438
7,22	-0,6298	-0,6244	-0,6192	-0,6140	-0,6088	-0,6037	-0,5987	-0,5938
7,27	-0,5798	-0,5744	-0,5692	-0,5640	-0,5588	-0,5537	-0,5487	-0,5438
7,32	-0,5298	-0,5244	-0,5192	-0,5140	-0,5088	-0,5037	-0,4987	-0,4938
7,37	-0,4798	-0,4744	-0,4692	-0,4640	-0,4588	-0,4537	-0,4487	-0,4438
7,42	-0,4298	-0,4244	-0,4192	-0,4140	-0,4088	-0,4037	-0,3987	-0,3938
7,47	-0,3798	-0,3744	-0,3692	-0,3640	-0,3588	-0,3537	-0,3487	-0,3438
7,52	-0,3298	-0,3244	-0,3192	-0,3140	-0,3088	-0,3037	-0,2987	-0,2938
7,57	-0,2798	-0,2744	-0,2692	-0,2640	-0,2588	-0,2537	-0,2487	-0,2438
7,62	-0,2298	-0,2244	-0,2192	-0,2140	-0,2088	-0,2037	-0,1987	-0,1938
7,67	-0,1798	-0,1744	-0,1692	-0,1640	-0,1588	-0,1537	-0,1487	-0,1438
7,72	-0,1298	-0,1244	-0,1192	-0,1140	-0,1088	-0,1037	-0,0987	-0,0938
7,77	-0,0798	-0,0744	-0,0692	-0,0640	-0,0588	-0,0537	-0,0487	-0,0438
7,82	-0,0298	-0,0244	-0,0192	-0,0140	-0,0088	-0,0037	0,0013	0,0062
7,87	0,0202	0,0256	0,0308	0,0360	0,0412	0,0463	0,0513	0,0562
7,92	0,0702	0,0756	0,0808	0,0860	0,0912	0,0963	0,1013	0,1062
7,97	0,1202	0,1256	0,1308	0,1360	0,1412	0,1463	0,1513	0,1562
8,02	0,1702	0,1756	0,1808	0,1860	0,1912	0,1963	0,2013	0,2062
8,07	0,2202	0,2256	0,2308	0,2360	0,2412	0,2463	0,2513	0,2562
8,12	0,2702	0,2756	0,2808	0,2860	0,2912	0,2963	0,3013	0,3062
8,17	0,3202	0,3256	0,3308	0,3360	0,3412	0,3463	0,3513	0,3562
8,22	0,3702	0,3756	0,3808	0,3860	0,3912	0,3963	0,4013	0,4062
8,27	0,4202	0,4256	0,4308	0,4360	0,4412	0,4463	0,4513	0,4562
8,32	0,4702	0,4756	0,4808	0,4860	0,4912	0,4963	0,5013	0,5062

Tabela E.8 - Variação do índice de Langelier em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

CC	8,1	8,2	8,3	8,4	8,5	8,6	8,7	8,8
Ca (mg/L)	69,66	70,52	71,38	72,24	73,1	73,96	74,82	75,68
pHs	7,85	7,84	7,84	7,83	7,83	7,82	7,82	7,81
pH				IL				
8,37	0,5202	0,5256	0,5308	0,5360	0,5412	0,5463	0,5513	0,5562
8,42	0,5702	0,5756	0,5808	0,5860	0,5912	0,5963	0,6013	0,6062
8,47	0,6202	0,6256	0,6308	0,6360	0,6412	0,6463	0,6513	0,6562
8,52	0,6702	0,6756	0,6808	0,6860	0,6912	0,6963	0,7013	0,7062
8,57	0,7202	0,7256	0,7308	0,7360	0,7412	0,7463	0,7513	0,7562
8,62	0,7702	0,7756	0,7808	0,7860	0,7912	0,7963	0,8013	0,8062

Tabela E.8 - Variação do índice de Langelier em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

CC	8,9	9	9,1	9,2	9,3	9,4	9,5	9,6
Ca (mg/L)	76,54	77,4	78,26	79,12	79,98	80,84	81,7	82,56
pHs	7,81	7,80	7,80	7,79	7,79	7,79	7,78	7,78
pH				IL				
6,12	-1,6889	-1,6840	-1,6792	-1,6745	-1,6698	-1,6651	-1,6605	-1,6560
6,17	-1,6389	-1,6340	-1,6292	-1,6245	-1,6198	-1,6151	-1,6105	-1,6060
6,22	-1,5889	-1,5840	-1,5792	-1,5745	-1,5698	-1,5651	-1,5605	-1,5560
6,27	-1,5389	-1,5340	-1,5292	-1,5245	-1,5198	-1,5151	-1,5105	-1,5060
6,32	-1,4889	-1,4840	-1,4792	-1,4745	-1,4698	-1,4651	-1,4605	-1,4560
6,37	-1,4389	-1,4340	-1,4292	-1,4245	-1,4198	-1,4151	-1,4105	-1,4060
6,42	-1,3889	-1,3840	-1,3792	-1,3745	-1,3698	-1,3651	-1,3605	-1,3560
6,47	-1,3389	-1,3340	-1,3292	-1,3245	-1,3198	-1,3151	-1,3105	-1,3060
6,52	-1,2889	-1,2840	-1,2792	-1,2745	-1,2698	-1,2651	-1,2605	-1,2560
6,57	-1,2389	-1,2340	-1,2292	-1,2245	-1,2198	-1,2151	-1,2105	-1,2060
6,62	-1,1889	-1,1840	-1,1792	-1,1745	-1,1698	-1,1651	-1,1605	-1,1560
6,67	-1,1389	-1,1340	-1,1292	-1,1245	-1,1198	-1,1151	-1,1105	-1,1060
6,72	-1,0889	-1,0840	-1,0792	-1,0745	-1,0698	-1,0651	-1,0605	-1,0560
6,77	-1,0389	-1,0340	-1,0292	-1,0245	-1,0198	-1,0151	-1,0105	-1,0060
6,82	-0,9889	-0,9840	-0,9792	-0,9745	-0,9698	-0,9651	-0,9605	-0,9560
6,87	-0,9389	-0,9340	-0,9292	-0,9245	-0,9198	-0,9151	-0,9105	-0,9060
6,92	-0,8889	-0,8840	-0,8792	-0,8745	-0,8698	-0,8651	-0,8605	-0,8560
6,97	-0,8389	-0,8340	-0,8292	-0,8245	-0,8198	-0,8151	-0,8105	-0,8060
7,02	-0,7889	-0,7840	-0,7792	-0,7745	-0,7698	-0,7651	-0,7605	-0,7560
7,07	-0,7389	-0,7340	-0,7292	-0,7245	-0,7198	-0,7151	-0,7105	-0,7060
7,12	-0,6889	-0,6840	-0,6792	-0,6745	-0,6698	-0,6651	-0,6605	-0,6560
7,17	-0,6389	-0,6340	-0,6292	-0,6245	-0,6198	-0,6151	-0,6105	-0,6060
7,22	-0,5889	-0,5840	-0,5792	-0,5745	-0,5698	-0,5651	-0,5605	-0,5560
7,27	-0,5389	-0,5340	-0,5292	-0,5245	-0,5198	-0,5151	-0,5105	-0,5060
7,32	-0,4889	-0,4840	-0,4792	-0,4745	-0,4698	-0,4651	-0,4605	-0,4560
7,37	-0,4389	-0,4340	-0,4292	-0,4245	-0,4198	-0,4151	-0,4105	-0,4060
7,42	-0,3889	-0,3840	-0,3792	-0,3745	-0,3698	-0,3651	-0,3605	-0,3560
7,47	-0,3389	-0,3340	-0,3292	-0,3245	-0,3198	-0,3151	-0,3105	-0,3060
7,52	-0,2889	-0,2840	-0,2792	-0,2745	-0,2698	-0,2651	-0,2605	-0,2560
7,57	-0,2389	-0,2340	-0,2292	-0,2245	-0,2198	-0,2151	-0,2105	-0,2060
7,62	-0,1889	-0,1840	-0,1792	-0,1745	-0,1698	-0,1651	-0,1605	-0,1560
7,67	-0,1389	-0,1340	-0,1292	-0,1245	-0,1198	-0,1151	-0,1105	-0,1060
7,72	-0,0889	-0,0840	-0,0792	-0,0745	-0,0698	-0,0651	-0,0605	-0,0560
7,77	-0,0389	-0,0340	-0,0292	-0,0245	-0,0198	-0,0151	-0,0105	-0,0060
7,82	0,0111	0,0160	0,0208	0,0255	0,0302	0,0349	0,0395	0,0440
7,87	0,0611	0,0660	0,0708	0,0755	0,0802	0,0849	0,0895	0,0940
7,92	0,1111	0,1160	0,1208	0,1255	0,1302	0,1349	0,1395	0,1440
7,97	0,1611	0,1660	0,1708	0,1755	0,1802	0,1849	0,1895	0,1940
8,02	0,2111	0,2160	0,2208	0,2255	0,2302	0,2349	0,2395	0,2440
8,07	0,2611	0,2660	0,2708	0,2755	0,2802	0,2849	0,2895	0,2940
8,12	0,3111	0,3160	0,3208	0,3255	0,3302	0,3349	0,3395	0,3440
8,17	0,3611	0,3660	0,3708	0,3755	0,3802	0,3849	0,3895	0,3940
8,22	0,4111	0,4160	0,4208	0,4255	0,4302	0,4349	0,4395	0,4440
8,27	0,4611	0,4660	0,4708	0,4755	0,4802	0,4849	0,4895	0,4940
8,32	0,5111	0,5160	0,5208	0,5255	0,5302	0,5349	0,5395	0,5440

Tabela E.8 - Variação do índice de Langelier em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

CC	8,9	9	9,1	9,2	9,3	9,4	9,5	9,6
Ca (mg/L)	76,54	77,4	78,26	79,12	79,98	80,84	81,7	82,56
pHs	7,81	7,80	7,80	7,79	7,79	7,79	7,78	7,78
pH				IL				
8,37	0,5611	0,5660	0,5708	0,5755	0,5802	0,5849	0,5895	0,5940
8,42	0,6111	0,6160	0,6208	0,6255	0,6302	0,6349	0,6395	0,6440
8,47	0,6611	0,6660	0,6708	0,6755	0,6802	0,6849	0,6895	0,6940
8,52	0,7111	0,7160	0,7208	0,7255	0,7302	0,7349	0,7395	0,7440
8,57	0,7611	0,7660	0,7708	0,7755	0,7802	0,7849	0,7895	0,7940
8,62	0,8111	0,8160	0,8208	0,8255	0,8302	0,8349	0,8395	0,8440

Tabela E.8 - Variação do índice de Langelier em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

CC	9,7	9,8	9,9	10	10,1	10,2	10,3	10,4
Ca (mg/L)	83,42	84,28	85,14	86	86,86	87,72	88,58	89,44
pHs	7,77	7,77	7,76	7,76	7,75	7,75	7,75	7,74
pH				IL				
6,12	-1,6515	-1,6470	-1,6426	-1,6382	-1,6339	-1,6296	-1,6254	-1,6212
6,17	-1,6015	-1,5970	-1,5926	-1,5882	-1,5839	-1,5796	-1,5754	-1,5712
6,22	-1,5515	-1,5470	-1,5426	-1,5382	-1,5339	-1,5296	-1,5254	-1,5212
6,27	-1,5015	-1,4970	-1,4926	-1,4882	-1,4839	-1,4796	-1,4754	-1,4712
6,32	-1,4515	-1,4470	-1,4426	-1,4382	-1,4339	-1,4296	-1,4254	-1,4212
6,37	-1,4015	-1,3970	-1,3926	-1,3882	-1,3839	-1,3796	-1,3754	-1,3712
6,42	-1,3515	-1,3470	-1,3426	-1,3382	-1,3339	-1,3296	-1,3254	-1,3212
6,47	-1,3015	-1,2970	-1,2926	-1,2882	-1,2839	-1,2796	-1,2754	-1,2712
6,52	-1,2515	-1,2470	-1,2426	-1,2382	-1,2339	-1,2296	-1,2254	-1,2212
6,57	-1,2015	-1,1970	-1,1926	-1,1882	-1,1839	-1,1796	-1,1754	-1,1712
6,62	-1,1515	-1,1470	-1,1426	-1,1382	-1,1339	-1,1296	-1,1254	-1,1212
6,67	-1,1015	-1,0970	-1,0926	-1,0882	-1,0839	-1,0796	-1,0754	-1,0712
6,72	-1,0515	-1,0470	-1,0426	-1,0382	-1,0339	-1,0296	-1,0254	-1,0212
6,77	-1,0015	-0,9970	-0,9926	-0,9882	-0,9839	-0,9796	-0,9754	-0,9712
6,82	-0,9515	-0,9470	-0,9426	-0,9382	-0,9339	-0,9296	-0,9254	-0,9212
6,87	-0,9015	-0,8970	-0,8926	-0,8882	-0,8839	-0,8796	-0,8754	-0,8712
6,92	-0,8515	-0,8470	-0,8426	-0,8382	-0,8339	-0,8296	-0,8254	-0,8212
6,97	-0,8015	-0,7970	-0,7926	-0,7882	-0,7839	-0,7796	-0,7754	-0,7712
7,02	-0,7515	-0,7470	-0,7426	-0,7382	-0,7339	-0,7296	-0,7254	-0,7212
7,07	-0,7015	-0,6970	-0,6926	-0,6882	-0,6839	-0,6796	-0,6754	-0,6712
7,12	-0,6515	-0,6470	-0,6426	-0,6382	-0,6339	-0,6296	-0,6254	-0,6212
7,17	-0,6015	-0,5970	-0,5926	-0,5882	-0,5839	-0,5796	-0,5754	-0,5712
7,22	-0,5515	-0,5470	-0,5426	-0,5382	-0,5339	-0,5296	-0,5254	-0,5212
7,27	-0,5015	-0,4970	-0,4926	-0,4882	-0,4839	-0,4796	-0,4754	-0,4712
7,32	-0,4515	-0,4470	-0,4426	-0,4382	-0,4339	-0,4296	-0,4254	-0,4212
7,37	-0,4015	-0,3970	-0,3926	-0,3882	-0,3839	-0,3796	-0,3754	-0,3712
7,42	-0,3515	-0,3470	-0,3426	-0,3382	-0,3339	-0,3296	-0,3254	-0,3212
7,47	-0,3015	-0,2970	-0,2926	-0,2882	-0,2839	-0,2796	-0,2754	-0,2712
7,52	-0,2515	-0,2470	-0,2426	-0,2382	-0,2339	-0,2296	-0,2254	-0,2212
7,57	-0,2015	-0,1970	-0,1926	-0,1882	-0,1839	-0,1796	-0,1754	-0,1712
7,62	-0,1515	-0,1470	-0,1426	-0,1382	-0,1339	-0,1296	-0,1254	-0,1212
7,67	-0,1015	-0,0970	-0,0926	-0,0882	-0,0839	-0,0796	-0,0754	-0,0712
7,72	-0,0515	-0,0470	-0,0426	-0,0382	-0,0339	-0,0296	-0,0254	-0,0212
7,77	-0,0015	0,0030	0,0074	0,0118	0,0161	0,0204	0,0246	0,0288
7,82	0,0485	0,0530	0,0574	0,0618	0,0661	0,0704	0,0746	0,0788
7,87	0,0985	0,1030	0,1074	0,1118	0,1161	0,1204	0,1246	0,1288
7,92	0,1485	0,1530	0,1574	0,1618	0,1661	0,1704	0,1746	0,1788
7,97	0,1985	0,2030	0,2074	0,2118	0,2161	0,2204	0,2246	0,2288
8,02	0,2485	0,2530	0,2574	0,2618	0,2661	0,2704	0,2746	0,2788
8,07	0,2985	0,3030	0,3074	0,3118	0,3161	0,3204	0,3246	0,3288
8,12	0,3485	0,3530	0,3574	0,3618	0,3661	0,3704	0,3746	0,3788
8,17	0,3985	0,4030	0,4074	0,4118	0,4161	0,4204	0,4246	0,4288
8,22	0,4485	0,4530	0,4574	0,4618	0,4661	0,4704	0,4746	0,4788
8,27	0,4985	0,5030	0,5074	0,5118	0,5161	0,5204	0,5246	0,5288
8,32	0,5485	0,5530	0,5574	0,5618	0,5661	0,5704	0,5746	0,5788

Tabela E.8 - Variação do índice de Langelier em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

CC	9,7	9,8	9,9	10	10,1	10,2	10,3	10,4
Ca (mg/L)	83,42	84,28	85,14	86	86,86	87,72	88,58	89,44
pHs	7,77	7,77	7,76	7,76	7,75	7,75	7,75	7,74
pH				IL				
8,37	0,5985	0,6030	0,6074	0,6118	0,6161	0,6204	0,6246	0,6288
8,42	0,6485	0,6530	0,6574	0,6618	0,6661	0,6704	0,6746	0,6788
8,47	0,6985	0,7030	0,7074	0,7118	0,7161	0,7204	0,7246	0,7288
8,52	0,7485	0,7530	0,7574	0,7618	0,7661	0,7704	0,7746	0,7788
8,57	0,7985	0,8030	0,8074	0,8118	0,8161	0,8204	0,8246	0,8288
8,62	0,8485	0,8530	0,8574	0,8618	0,8661	0,8704	0,8746	0,8788

Tabela E.8 - Variação do índice de Langelier em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

CC	10,5	10,6	10,7	10,8	10,9	11	11,1	11,2
Ca (mg/L)	90,3	91,16	92,02	92,88	93,74	94,6	95,46	96,32
pHs	7,74	7,73	7,73	7,72	7,72	7,72	7,71	7,71
pH				IL				
6,12	-1,6171	-1,6129	-1,6089	-1,6048	-1,6008	-1,5969	-1,5929	-1,5890
6,17	-1,5671	-1,5629	-1,5589	-1,5548	-1,5508	-1,5469	-1,5429	-1,5390
6,22	-1,5171	-1,5129	-1,5089	-1,5048	-1,5008	-1,4969	-1,4929	-1,4890
6,27	-1,4671	-1,4629	-1,4589	-1,4548	-1,4508	-1,4469	-1,4429	-1,4390
6,32	-1,4171	-1,4129	-1,4089	-1,4048	-1,4008	-1,3969	-1,3929	-1,3890
6,37	-1,3671	-1,3629	-1,3589	-1,3548	-1,3508	-1,3469	-1,3429	-1,3390
6,42	-1,3171	-1,3129	-1,3089	-1,3048	-1,3008	-1,2969	-1,2929	-1,2890
6,47	-1,2671	-1,2629	-1,2589	-1,2548	-1,2508	-1,2469	-1,2429	-1,2390
6,52	-1,2171	-1,2129	-1,2089	-1,2048	-1,2008	-1,1969	-1,1929	-1,1890
6,57	-1,1671	-1,1629	-1,1589	-1,1548	-1,1508	-1,1469	-1,1429	-1,1390
6,62	-1,1171	-1,1129	-1,1089	-1,1048	-1,1008	-1,0969	-1,0929	-1,0890
6,67	-1,0671	-1,0629	-1,0589	-1,0548	-1,0508	-1,0469	-1,0429	-1,0390
6,72	-1,0171	-1,0129	-1,0089	-1,0048	-1,0008	-0,9969	-0,9929	-0,9890
6,77	-0,9671	-0,9629	-0,9589	-0,9548	-0,9508	-0,9469	-0,9429	-0,9390
6,82	-0,9171	-0,9129	-0,9089	-0,9048	-0,9008	-0,8969	-0,8929	-0,8890
6,87	-0,8671	-0,8629	-0,8589	-0,8548	-0,8508	-0,8469	-0,8429	-0,8390
6,92	-0,8171	-0,8129	-0,8089	-0,8048	-0,8008	-0,7969	-0,7929	-0,7890
6,97	-0,7671	-0,7629	-0,7589	-0,7548	-0,7508	-0,7469	-0,7429	-0,7390
7,02	-0,7171	-0,7129	-0,7089	-0,7048	-0,7008	-0,6969	-0,6929	-0,6890
7,07	-0,6671	-0,6629	-0,6589	-0,6548	-0,6508	-0,6469	-0,6429	-0,6390
7,12	-0,6171	-0,6129	-0,6089	-0,6048	-0,6008	-0,5969	-0,5929	-0,5890
7,17	-0,5671	-0,5629	-0,5589	-0,5548	-0,5508	-0,5469	-0,5429	-0,5390
7,22	-0,5171	-0,5129	-0,5089	-0,5048	-0,5008	-0,4969	-0,4929	-0,4890
7,27	-0,4671	-0,4629	-0,4589	-0,4548	-0,4508	-0,4469	-0,4429	-0,4390
7,32	-0,4171	-0,4129	-0,4089	-0,4048	-0,4008	-0,3969	-0,3929	-0,3890
7,37	-0,3671	-0,3629	-0,3589	-0,3548	-0,3508	-0,3469	-0,3429	-0,3390
7,42	-0,3171	-0,3129	-0,3089	-0,3048	-0,3008	-0,2969	-0,2929	-0,2890
7,47	-0,2671	-0,2629	-0,2589	-0,2548	-0,2508	-0,2469	-0,2429	-0,2390
7,52	-0,2171	-0,2129	-0,2089	-0,2048	-0,2008	-0,1969	-0,1929	-0,1890
7,57	-0,1671	-0,1629	-0,1589	-0,1548	-0,1508	-0,1469	-0,1429	-0,1390
7,62	-0,1171	-0,1129	-0,1089	-0,1048	-0,1008	-0,0969	-0,0929	-0,0890
7,67	-0,0671	-0,0629	-0,0589	-0,0548	-0,0508	-0,0469	-0,0429	-0,0390
7,72	-0,0171	-0,0129	-0,0089	-0,0048	-0,0008	0,0031	0,0071	0,0110
7,77	0,0329	0,0371	0,0411	0,0452	0,0492	0,0531	0,0571	0,0610
7,82	0,0829	0,0871	0,0911	0,0952	0,0992	0,1031	0,1071	0,1110
7,87	0,1329	0,1371	0,1411	0,1452	0,1492	0,1531	0,1571	0,1610
7,92	0,1829	0,1871	0,1911	0,1952	0,1992	0,2031	0,2071	0,2110
7,97	0,2329	0,2371	0,2411	0,2452	0,2492	0,2531	0,2571	0,2610
8,02	0,2829	0,2871	0,2911	0,2952	0,2992	0,3031	0,3071	0,3110
8,07	0,3329	0,3371	0,3411	0,3452	0,3492	0,3531	0,3571	0,3610
8,12	0,3829	0,3871	0,3911	0,3952	0,3992	0,4031	0,4071	0,4110
8,17	0,4329	0,4371	0,4411	0,4452	0,4492	0,4531	0,4571	0,4610
8,22	0,4829	0,4871	0,4911	0,4952	0,4992	0,5031	0,5071	0,5110
8,27	0,5329	0,5371	0,5411	0,5452	0,5492	0,5531	0,5571	0,5610
8,32	0,5829	0,5871	0,5911	0,5952	0,5992	0,6031	0,6071	0,6110

Tabela E.8 - Variação do índice de Langelier em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

CC	10,5	10,6	10,7	10,8	10,9	11	11,1	11,2
Ca (mg/L)	90,3	91,16	92,02	92,88	93,74	94,6	95,46	96,32
pHs	7,74	7,73	7,73	7,72	7,72	7,72	7,71	7,71
pH				IL				
8,37	0,6329	0,6371	0,6411	0,6452	0,6492	0,6531	0,6571	0,6610
8,42	0,6829	0,6871	0,6911	0,6952	0,6992	0,7031	0,7071	0,7110
8,47	0,7329	0,7371	0,7411	0,7452	0,7492	0,7531	0,7571	0,7610
8,52	0,7829	0,7871	0,7911	0,7952	0,7992	0,8031	0,8071	0,8110
8,57	0,8329	0,8371	0,8411	0,8452	0,8492	0,8531	0,8571	0,8610
8,62	0,8829	0,8871	0,8911	0,8952	0,8992	0,9031	0,9071	0,9110

Tabela E.8 - Variação do índice de Langelier em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

CC	11,3	11,4	11,5	11,6	11,7	11,8	11,9	12
Ca (mg/L)	97,18	98,04	98,9	99,76	100,62	101,48	102,34	103,2
pHs	7,71	7,70	7,70	7,69	7,69	7,69	7,68	7,68
pH				IL				
6,12	-1,5852	-1,5813	-1,5775	-1,5738	-1,5701	-1,5664	-1,5627	-1,5591
6,17	-1,5352	-1,5313	-1,5275	-1,5238	-1,5201	-1,5164	-1,5127	-1,5091
6,22	-1,4852	-1,4813	-1,4775	-1,4738	-1,4701	-1,4664	-1,4627	-1,4591
6,27	-1,4352	-1,4313	-1,4275	-1,4238	-1,4201	-1,4164	-1,4127	-1,4091
6,32	-1,3852	-1,3813	-1,3775	-1,3738	-1,3701	-1,3664	-1,3627	-1,3591
6,37	-1,3352	-1,3313	-1,3275	-1,3238	-1,3201	-1,3164	-1,3127	-1,3091
6,42	-1,2852	-1,2813	-1,2775	-1,2738	-1,2701	-1,2664	-1,2627	-1,2591
6,47	-1,2352	-1,2313	-1,2275	-1,2238	-1,2201	-1,2164	-1,2127	-1,2091
6,52	-1,1852	-1,1813	-1,1775	-1,1738	-1,1701	-1,1664	-1,1627	-1,1591
6,57	-1,1352	-1,1313	-1,1275	-1,1238	-1,1201	-1,1164	-1,1127	-1,1091
6,62	-1,0852	-1,0813	-1,0775	-1,0738	-1,0701	-1,0664	-1,0627	-1,0591
6,67	-1,0352	-1,0313	-1,0275	-1,0238	-1,0201	-1,0164	-1,0127	-1,0091
6,72	-0,9852	-0,9813	-0,9775	-0,9738	-0,9701	-0,9664	-0,9627	-0,9591
6,77	-0,9352	-0,9313	-0,9275	-0,9238	-0,9201	-0,9164	-0,9127	-0,9091
6,82	-0,8852	-0,8813	-0,8775	-0,8738	-0,8701	-0,8664	-0,8627	-0,8591
6,87	-0,8352	-0,8313	-0,8275	-0,8238	-0,8201	-0,8164	-0,8127	-0,8091
6,92	-0,7852	-0,7813	-0,7775	-0,7738	-0,7701	-0,7664	-0,7627	-0,7591
6,97	-0,7352	-0,7313	-0,7275	-0,7238	-0,7201	-0,7164	-0,7127	-0,7091
7,02	-0,6852	-0,6813	-0,6775	-0,6738	-0,6701	-0,6664	-0,6627	-0,6591
7,07	-0,6352	-0,6313	-0,6275	-0,6238	-0,6201	-0,6164	-0,6127	-0,6091
7,12	-0,5852	-0,5813	-0,5775	-0,5738	-0,5701	-0,5664	-0,5627	-0,5591
7,17	-0,5352	-0,5313	-0,5275	-0,5238	-0,5201	-0,5164	-0,5127	-0,5091
7,22	-0,4852	-0,4813	-0,4775	-0,4738	-0,4701	-0,4664	-0,4627	-0,4591
7,27	-0,4352	-0,4313	-0,4275	-0,4238	-0,4201	-0,4164	-0,4127	-0,4091
7,32	-0,3852	-0,3813	-0,3775	-0,3738	-0,3701	-0,3664	-0,3627	-0,3591
7,37	-0,3352	-0,3313	-0,3275	-0,3238	-0,3201	-0,3164	-0,3127	-0,3091
7,42	-0,2852	-0,2813	-0,2775	-0,2738	-0,2701	-0,2664	-0,2627	-0,2591
7,47	-0,2352	-0,2313	-0,2275	-0,2238	-0,2201	-0,2164	-0,2127	-0,2091
7,52	-0,1852	-0,1813	-0,1775	-0,1738	-0,1701	-0,1664	-0,1627	-0,1591
7,57	-0,1352	-0,1313	-0,1275	-0,1238	-0,1201	-0,1164	-0,1127	-0,1091
7,62	-0,0852	-0,0813	-0,0775	-0,0738	-0,0701	-0,0664	-0,0627	-0,0591
7,67	-0,0352	-0,0313	-0,0275	-0,0238	-0,0201	-0,0164	-0,0127	-0,0091
7,72	0,0148	0,0187	0,0225	0,0262	0,0299	0,0336	0,0373	0,0409
7,77	0,0648	0,0687	0,0725	0,0762	0,0799	0,0836	0,0873	0,0909
7,82	0,1148	0,1187	0,1225	0,1262	0,1299	0,1336	0,1373	0,1409
7,87	0,1648	0,1687	0,1725	0,1762	0,1799	0,1836	0,1873	0,1909
7,92	0,2148	0,2187	0,2225	0,2262	0,2299	0,2336	0,2373	0,2409
7,97	0,2648	0,2687	0,2725	0,2762	0,2799	0,2836	0,2873	0,2909
8,02	0,3148	0,3187	0,3225	0,3262	0,3299	0,3336	0,3373	0,3409
8,07	0,3648	0,3687	0,3725	0,3762	0,3799	0,3836	0,3873	0,3909
8,12	0,4148	0,4187	0,4225	0,4262	0,4299	0,4336	0,4373	0,4409
8,17	0,4648	0,4687	0,4725	0,4762	0,4799	0,4836	0,4873	0,4909
8,22	0,5148	0,5187	0,5225	0,5262	0,5299	0,5336	0,5373	0,5409
8,27	0,5648	0,5687	0,5725	0,5762	0,5799	0,5836	0,5873	0,5909
8,32	0,6148	0,6187	0,6225	0,6262	0,6299	0,6336	0,6373	0,6409

Tabela E.8 - Variação do índice de Langelier em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

CC	11,3	11,4	11,5	11,6	11,7	11,8	11,9	12
Ca (mg/L)	97,18	98,04	98,9	99,76	100,62	101,48	102,34	103,2
pHs	7,71	7,70	7,70	7,69	7,69	7,69	7,68	7,68
pH				IL				
8,37	0,6648	0,6687	0,6725	0,6762	0,6799	0,6836	0,6873	0,6909
8,42	0,7148	0,7187	0,7225	0,7262	0,7299	0,7336	0,7373	0,7409
8,47	0,7648	0,7687	0,7725	0,7762	0,7799	0,7836	0,7873	0,7909
8,52	0,8148	0,8187	0,8225	0,8262	0,8299	0,8336	0,8373	0,8409
8,57	0,8648	0,8687	0,8725	0,8762	0,8799	0,8836	0,8873	0,8909
8,62	0,9148	0,9187	0,9225	0,9262	0,9299	0,9336	0,9373	0,9409

Tabela E.8 - Variação do índice de Langelier em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

CC	12,1	12,2	12,3	12,4	12,5	12,6	12,7	12,8
Ca (mg/L)	104,06	104,92	105,78	106,64	107,5	108,36	109,22	110,08
pHs	7,68	7,67	7,67	7,66	7,66	7,66	7,65	7,65
pH				IL				
6,12	-1,5555	-1,5519	-1,5483	-1,5448	-1,5413	-1,5379	-1,5344	-1,5310
6,17	-1,5055	-1,5019	-1,4983	-1,4948	-1,4913	-1,4879	-1,4844	-1,4810
6,22	-1,4555	-1,4519	-1,4483	-1,4448	-1,4413	-1,4379	-1,4344	-1,4310
6,27	-1,4055	-1,4019	-1,3983	-1,3948	-1,3913	-1,3879	-1,3844	-1,3810
6,32	-1,3555	-1,3519	-1,3483	-1,3448	-1,3413	-1,3379	-1,3344	-1,3310
6,37	-1,3055	-1,3019	-1,2983	-1,2948	-1,2913	-1,2879	-1,2844	-1,2810
6,42	-1,2555	-1,2519	-1,2483	-1,2448	-1,2413	-1,2379	-1,2344	-1,2310
6,47	-1,2055	-1,2019	-1,1983	-1,1948	-1,1913	-1,1879	-1,1844	-1,1810
6,52	-1,1555	-1,1519	-1,1483	-1,1448	-1,1413	-1,1379	-1,1344	-1,1310
6,57	-1,1055	-1,1019	-1,0983	-1,0948	-1,0913	-1,0879	-1,0844	-1,0810
6,62	-1,0555	-1,0519	-1,0483	-1,0448	-1,0413	-1,0379	-1,0344	-1,0310
6,67	-1,0055	-1,0019	-0,9983	-0,9948	-0,9913	-0,9879	-0,9844	-0,9810
6,72	-0,9555	-0,9519	-0,9483	-0,9448	-0,9413	-0,9379	-0,9344	-0,9310
6,77	-0,9055	-0,9019	-0,8983	-0,8948	-0,8913	-0,8879	-0,8844	-0,8810
6,82	-0,8555	-0,8519	-0,8483	-0,8448	-0,8413	-0,8379	-0,8344	-0,8310
6,87	-0,8055	-0,8019	-0,7983	-0,7948	-0,7913	-0,7879	-0,7844	-0,7810
6,92	-0,7555	-0,7519	-0,7483	-0,7448	-0,7413	-0,7379	-0,7344	-0,7310
6,97	-0,7055	-0,7019	-0,6983	-0,6948	-0,6913	-0,6879	-0,6844	-0,6810
7,02	-0,6555	-0,6519	-0,6483	-0,6448	-0,6413	-0,6379	-0,6344	-0,6310
7,07	-0,6055	-0,6019	-0,5983	-0,5948	-0,5913	-0,5879	-0,5844	-0,5810
7,12	-0,5555	-0,5519	-0,5483	-0,5448	-0,5413	-0,5379	-0,5344	-0,5310
7,17	-0,5055	-0,5019	-0,4983	-0,4948	-0,4913	-0,4879	-0,4844	-0,4810
7,22	-0,4555	-0,4519	-0,4483	-0,4448	-0,4413	-0,4379	-0,4344	-0,4310
7,27	-0,4055	-0,4019	-0,3983	-0,3948	-0,3913	-0,3879	-0,3844	-0,3810
7,32	-0,3555	-0,3519	-0,3483	-0,3448	-0,3413	-0,3379	-0,3344	-0,3310
7,37	-0,3055	-0,3019	-0,2983	-0,2948	-0,2913	-0,2879	-0,2844	-0,2810
7,42	-0,2555	-0,2519	-0,2483	-0,2448	-0,2413	-0,2379	-0,2344	-0,2310
7,47	-0,2055	-0,2019	-0,1983	-0,1948	-0,1913	-0,1879	-0,1844	-0,1810
7,52	-0,1555	-0,1519	-0,1483	-0,1448	-0,1413	-0,1379	-0,1344	-0,1310
7,57	-0,1055	-0,1019	-0,0983	-0,0948	-0,0913	-0,0879	-0,0844	-0,0810
7,62	-0,0555	-0,0519	-0,0483	-0,0448	-0,0413	-0,0379	-0,0344	-0,0310
7,67	-0,0055	-0,0019	0,0017	0,0052	0,0087	0,0121	0,0156	0,0190
7,72	0,0445	0,0481	0,0517	0,0552	0,0587	0,0621	0,0656	0,0690
7,77	0,0945	0,0981	0,1017	0,1052	0,1087	0,1121	0,1156	0,1190
7,82	0,1445	0,1481	0,1517	0,1552	0,1587	0,1621	0,1656	0,1690
7,87	0,1945	0,1981	0,2017	0,2052	0,2087	0,2121	0,2156	0,2190
7,92	0,2445	0,2481	0,2517	0,2552	0,2587	0,2621	0,2656	0,2690
7,97	0,2945	0,2981	0,3017	0,3052	0,3087	0,3121	0,3156	0,3190
8,02	0,3445	0,3481	0,3517	0,3552	0,3587	0,3621	0,3656	0,3690
8,07	0,3945	0,3981	0,4017	0,4052	0,4087	0,4121	0,4156	0,4190
8,12	0,4445	0,4481	0,4517	0,4552	0,4587	0,4621	0,4656	0,4690
8,17	0,4945	0,4981	0,5017	0,5052	0,5087	0,5121	0,5156	0,5190
8,22	0,5445	0,5481	0,5517	0,5552	0,5587	0,5621	0,5656	0,5690
8,27	0,5945	0,5981	0,6017	0,6052	0,6087	0,6121	0,6156	0,6190
8,32	0,6445	0,6481	0,6517	0,6552	0,6587	0,6621	0,6656	0,6690

Tabela E.8 - Variação do índice de Langelier em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

CC	12,1	12,2	12,3	12,4	12,5	12,6	12,7	12,8
Ca (mg/L)	104,06	104,92	105,78	106,64	107,5	108,36	109,22	110,08
pHs	7,68	7,67	7,67	7,66	7,66	7,66	7,65	7,65
pH				IL				
8,37	0,6945	0,6981	0,7017	0,7052	0,7087	0,7121	0,7156	0,7190
8,42	0,7445	0,7481	0,7517	0,7552	0,7587	0,7621	0,7656	0,7690
8,47	0,7945	0,7981	0,8017	0,8052	0,8087	0,8121	0,8156	0,8190
8,52	0,8445	0,8481	0,8517	0,8552	0,8587	0,8621	0,8656	0,8690
8,57	0,8945	0,8981	0,9017	0,9052	0,9087	0,9121	0,9156	0,9190
8,62	0,9445	0,9481	0,9517	0,9552	0,9587	0,9621	0,9656	0,9690

Tabela E.8 - Variação do índice de Langelier em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

CC	12,9	13	13,1	13,2	13,3	13,4	13,5	13,6
Ca (mg/L)	110,94	111,8	112,66	113,52	114,38	115,24	116,1	116,96
pHs	7,65	7,64	7,64	7,64	7,63	7,63	7,63	7,62
pH				IL				
6,12	-1,5277	-1,5243	-1,5210	-1,5177	-1,5144	-1,5111	-1,5079	-1,5047
6,17	-1,4777	-1,4743	-1,4710	-1,4677	-1,4644	-1,4611	-1,4579	-1,4547
6,22	-1,4277	-1,4243	-1,4210	-1,4177	-1,4144	-1,4111	-1,4079	-1,4047
6,27	-1,3777	-1,3743	-1,3710	-1,3677	-1,3644	-1,3611	-1,3579	-1,3547
6,32	-1,3277	-1,3243	-1,3210	-1,3177	-1,3144	-1,3111	-1,3079	-1,3047
6,37	-1,2777	-1,2743	-1,2710	-1,2677	-1,2644	-1,2611	-1,2579	-1,2547
6,42	-1,2277	-1,2243	-1,2210	-1,2177	-1,2144	-1,2111	-1,2079	-1,2047
6,47	-1,1777	-1,1743	-1,1710	-1,1677	-1,1644	-1,1611	-1,1579	-1,1547
6,52	-1,1277	-1,1243	-1,1210	-1,1177	-1,1144	-1,1111	-1,1079	-1,1047
6,57	-1,0777	-1,0743	-1,0710	-1,0677	-1,0644	-1,0611	-1,0579	-1,0547
6,62	-1,0277	-1,0243	-1,0210	-1,0177	-1,0144	-1,0111	-1,0079	-1,0047
6,67	-0,9777	-0,9743	-0,9710	-0,9677	-0,9644	-0,9611	-0,9579	-0,9547
6,72	-0,9277	-0,9243	-0,9210	-0,9177	-0,9144	-0,9111	-0,9079	-0,9047
6,77	-0,8777	-0,8743	-0,8710	-0,8677	-0,8644	-0,8611	-0,8579	-0,8547
6,82	-0,8277	-0,8243	-0,8210	-0,8177	-0,8144	-0,8111	-0,8079	-0,8047
6,87	-0,7777	-0,7743	-0,7710	-0,7677	-0,7644	-0,7611	-0,7579	-0,7547
6,92	-0,7277	-0,7243	-0,7210	-0,7177	-0,7144	-0,7111	-0,7079	-0,7047
6,97	-0,6777	-0,6743	-0,6710	-0,6677	-0,6644	-0,6611	-0,6579	-0,6547
7,02	-0,6277	-0,6243	-0,6210	-0,6177	-0,6144	-0,6111	-0,6079	-0,6047
7,07	-0,5777	-0,5743	-0,5710	-0,5677	-0,5644	-0,5611	-0,5579	-0,5547
7,12	-0,5277	-0,5243	-0,5210	-0,5177	-0,5144	-0,5111	-0,5079	-0,5047
7,17	-0,4777	-0,4743	-0,4710	-0,4677	-0,4644	-0,4611	-0,4579	-0,4547
7,22	-0,4277	-0,4243	-0,4210	-0,4177	-0,4144	-0,4111	-0,4079	-0,4047
7,27	-0,3777	-0,3743	-0,3710	-0,3677	-0,3644	-0,3611	-0,3579	-0,3547
7,32	-0,3277	-0,3243	-0,3210	-0,3177	-0,3144	-0,3111	-0,3079	-0,3047
7,37	-0,2777	-0,2743	-0,2710	-0,2677	-0,2644	-0,2611	-0,2579	-0,2547
7,42	-0,2277	-0,2243	-0,2210	-0,2177	-0,2144	-0,2111	-0,2079	-0,2047
7,47	-0,1777	-0,1743	-0,1710	-0,1677	-0,1644	-0,1611	-0,1579	-0,1547
7,52	-0,1277	-0,1243	-0,1210	-0,1177	-0,1144	-0,1111	-0,1079	-0,1047
7,57	-0,0777	-0,0743	-0,0710	-0,0677	-0,0644	-0,0611	-0,0579	-0,0547
7,62	-0,0277	-0,0243	-0,0210	-0,0177	-0,0144	-0,0111	-0,0079	-0,0047
7,67	0,0223	0,0257	0,0290	0,0323	0,0356	0,0389	0,0421	0,0453
7,72	0,0723	0,0757	0,0790	0,0823	0,0856	0,0889	0,0921	0,0953
7,77	0,1223	0,1257	0,1290	0,1323	0,1356	0,1389	0,1421	0,1453
7,82	0,1723	0,1757	0,1790	0,1823	0,1856	0,1889	0,1921	0,1953
7,87	0,2223	0,2257	0,2290	0,2323	0,2356	0,2389	0,2421	0,2453
7,92	0,2723	0,2757	0,2790	0,2823	0,2856	0,2889	0,2921	0,2953
7,97	0,3223	0,3257	0,3290	0,3323	0,3356	0,3389	0,3421	0,3453
8,02	0,3723	0,3757	0,3790	0,3823	0,3856	0,3889	0,3921	0,3953
8,07	0,4223	0,4257	0,4290	0,4323	0,4356	0,4389	0,4421	0,4453
8,12	0,4723	0,4757	0,4790	0,4823	0,4856	0,4889	0,4921	0,4953
8,17	0,5223	0,5257	0,5290	0,5323	0,5356	0,5389	0,5421	0,5453
8,22	0,5723	0,5757	0,5790	0,5823	0,5856	0,5889	0,5921	0,5953
8,27	0,6223	0,6257	0,6290	0,6323	0,6356	0,6389	0,6421	0,6453
8,32	0,6723	0,6757	0,6790	0,6823	0,6856	0,6889	0,6921	0,6953

Tabela E.8 - Variação do índice de Langelier em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

CC	12,9	13	13,1	13,2	13,3	13,4	13,5	13,6
Ca (mg/L)	110,94	111,8	112,66	113,52	114,38	115,24	116,1	116,96
pHs	7,65	7,64	7,64	7,64	7,63	7,63	7,63	7,62
pH				IL				
8,37	0,7223	0,7257	0,7290	0,7323	0,7356	0,7389	0,7421	0,7453
8,42	0,7723	0,7757	0,7790	0,7823	0,7856	0,7889	0,7921	0,7953
8,47	0,8223	0,8257	0,8290	0,8323	0,8356	0,8389	0,8421	0,8453
8,52	0,8723	0,8757	0,8790	0,8823	0,8856	0,8889	0,8921	0,8953
8,57	0,9223	0,9257	0,9290	0,9323	0,9356	0,9389	0,9421	0,9453
8,62	0,9723	0,9757	0,9790	0,9823	0,9856	0,9889	0,9921	0,9953

Tabela E.8 - Variação do índice de Langelier em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

CC	13,7	13,8	13,9	14	14,1	14,2	14,3	14,4
Ca (mg/L)	117,82	118,68	119,54	120,4	121,26	122,12	122,98	123,84
pHs	7,62	7,62	7,62	7,61	7,61	7,61	7,60	7,60
pH				IL				
6,12	-1,5015	-1,4984	-1,4952	-1,4921	-1,4890	-1,4860	-1,4829	-1,4799
6,17	-1,4515	-1,4484	-1,4452	-1,4421	-1,4390	-1,4360	-1,4329	-1,4299
6,22	-1,4015	-1,3984	-1,3952	-1,3921	-1,3890	-1,3860	-1,3829	-1,3799
6,27	-1,3515	-1,3484	-1,3452	-1,3421	-1,3390	-1,3360	-1,3329	-1,3299
6,32	-1,3015	-1,2984	-1,2952	-1,2921	-1,2890	-1,2860	-1,2829	-1,2799
6,37	-1,2515	-1,2484	-1,2452	-1,2421	-1,2390	-1,2360	-1,2329	-1,2299
6,42	-1,2015	-1,1984	-1,1952	-1,1921	-1,1890	-1,1860	-1,1829	-1,1799
6,47	-1,1515	-1,1484	-1,1452	-1,1421	-1,1390	-1,1360	-1,1329	-1,1299
6,52	-1,1015	-1,0984	-1,0952	-1,0921	-1,0890	-1,0860	-1,0829	-1,0799
6,57	-1,0515	-1,0484	-1,0452	-1,0421	-1,0390	-1,0360	-1,0329	-1,0299
6,62	-1,0015	-0,9984	-0,9952	-0,9921	-0,9890	-0,9860	-0,9829	-0,9799
6,67	-0,9515	-0,9484	-0,9452	-0,9421	-0,9390	-0,9360	-0,9329	-0,9299
6,72	-0,9015	-0,8984	-0,8952	-0,8921	-0,8890	-0,8860	-0,8829	-0,8799
6,77	-0,8515	-0,8484	-0,8452	-0,8421	-0,8390	-0,8360	-0,8329	-0,8299
6,82	-0,8015	-0,7984	-0,7952	-0,7921	-0,7890	-0,7860	-0,7829	-0,7799
6,87	-0,7515	-0,7484	-0,7452	-0,7421	-0,7390	-0,7360	-0,7329	-0,7299
6,92	-0,7015	-0,6984	-0,6952	-0,6921	-0,6890	-0,6860	-0,6829	-0,6799
6,97	-0,6515	-0,6484	-0,6452	-0,6421	-0,6390	-0,6360	-0,6329	-0,6299
7,02	-0,6015	-0,5984	-0,5952	-0,5921	-0,5890	-0,5860	-0,5829	-0,5799
7,07	-0,5515	-0,5484	-0,5452	-0,5421	-0,5390	-0,5360	-0,5329	-0,5299
7,12	-0,5015	-0,4984	-0,4952	-0,4921	-0,4890	-0,4860	-0,4829	-0,4799
7,17	-0,4515	-0,4484	-0,4452	-0,4421	-0,4390	-0,4360	-0,4329	-0,4299
7,22	-0,4015	-0,3984	-0,3952	-0,3921	-0,3890	-0,3860	-0,3829	-0,3799
7,27	-0,3515	-0,3484	-0,3452	-0,3421	-0,3390	-0,3360	-0,3329	-0,3299
7,32	-0,3015	-0,2984	-0,2952	-0,2921	-0,2890	-0,2860	-0,2829	-0,2799
7,37	-0,2515	-0,2484	-0,2452	-0,2421	-0,2390	-0,2360	-0,2329	-0,2299
7,42	-0,2015	-0,1984	-0,1952	-0,1921	-0,1890	-0,1860	-0,1829	-0,1799
7,47	-0,1515	-0,1484	-0,1452	-0,1421	-0,1390	-0,1360	-0,1329	-0,1299
7,52	-0,1015	-0,0984	-0,0952	-0,0921	-0,0890	-0,0860	-0,0829	-0,0799
7,57	-0,0515	-0,0484	-0,0452	-0,0421	-0,0390	-0,0360	-0,0329	-0,0299
7,62	-0,0015	0,0016	0,0048	0,0079	0,0110	0,0140	0,0171	0,0201
7,67	0,0485	0,0516	0,0548	0,0579	0,0610	0,0640	0,0671	0,0701
7,72	0,0985	0,1016	0,1048	0,1079	0,1110	0,1140	0,1171	0,1201
7,77	0,1485	0,1516	0,1548	0,1579	0,1610	0,1640	0,1671	0,1701
7,82	0,1985	0,2016	0,2048	0,2079	0,2110	0,2140	0,2171	0,2201
7,87	0,2485	0,2516	0,2548	0,2579	0,2610	0,2640	0,2671	0,2701
7,92	0,2985	0,3016	0,3048	0,3079	0,3110	0,3140	0,3171	0,3201
7,97	0,3485	0,3516	0,3548	0,3579	0,3610	0,3640	0,3671	0,3701
8,02	0,3985	0,4016	0,4048	0,4079	0,4110	0,4140	0,4171	0,4201
8,07	0,4485	0,4516	0,4548	0,4579	0,4610	0,4640	0,4671	0,4701
8,12	0,4985	0,5016	0,5048	0,5079	0,5110	0,5140	0,5171	0,5201
8,17	0,5485	0,5516	0,5548	0,5579	0,5610	0,5640	0,5671	0,5701
8,22	0,5985	0,6016	0,6048	0,6079	0,6110	0,6140	0,6171	0,6201
8,27	0,6485	0,6516	0,6548	0,6579	0,6610	0,6640	0,6671	0,6701
8,32	0,6985	0,7016	0,7048	0,7079	0,7110	0,7140	0,7171	0,7201

Tabela E.8 - Variação do índice de Langelier em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

CC	13,7	13,8	13,9	14	14,1	14,2	14,3	14,4
Ca (mg/L)	117,82	118,68	119,54	120,4	121,26	122,12	122,98	123,84
pHs	7,62	7,62	7,62	7,61	7,61	7,61	7,60	7,60
pH				IL				
8,37	0,7485	0,7516	0,7548	0,7579	0,7610	0,7640	0,7671	0,7701
8,42	0,7985	0,8016	0,8048	0,8079	0,8110	0,8140	0,8171	0,8201
8,47	0,8485	0,8516	0,8548	0,8579	0,8610	0,8640	0,8671	0,8701
8,52	0,8985	0,9016	0,9048	0,9079	0,9110	0,9140	0,9171	0,9201
8,57	0,9485	0,9516	0,9548	0,9579	0,9610	0,9640	0,9671	0,9701
8,62	0,9985	1,0016	1,0048	1,0079	1,0110	1,0140	1,0171	1,0201

Tabela E.8 - Variação do índice de Langelier em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

CC	14,5	14,6	14,7	14,8	14,9	15	15,1	15,2
Ca (mg/L)	124,7	125,56	126,42	127,28	128,14	129	129,86	130,72
pHs	7,60	7,59	7,59	7,59	7,59	7,58	7,58	7,58
pH				IL				
6,12	-1,4769	-1,4739	-1,4709	-1,4680	-1,4651	-1,4622	-1,4593	-1,4564
6,17	-1,4269	-1,4239	-1,4209	-1,4180	-1,4151	-1,4122	-1,4093	-1,4064
6,22	-1,3769	-1,3739	-1,3709	-1,3680	-1,3651	-1,3622	-1,3593	-1,3564
6,27	-1,3269	-1,3239	-1,3209	-1,3180	-1,3151	-1,3122	-1,3093	-1,3064
6,32	-1,2769	-1,2739	-1,2709	-1,2680	-1,2651	-1,2622	-1,2593	-1,2564
6,37	-1,2269	-1,2239	-1,2209	-1,2180	-1,2151	-1,2122	-1,2093	-1,2064
6,42	-1,1769	-1,1739	-1,1709	-1,1680	-1,1651	-1,1622	-1,1593	-1,1564
6,47	-1,1269	-1,1239	-1,1209	-1,1180	-1,1151	-1,1122	-1,1093	-1,1064
6,52	-1,0769	-1,0739	-1,0709	-1,0680	-1,0651	-1,0622	-1,0593	-1,0564
6,57	-1,0269	-1,0239	-1,0209	-1,0180	-1,0151	-1,0122	-1,0093	-1,0064
6,62	-0,9769	-0,9739	-0,9709	-0,9680	-0,9651	-0,9622	-0,9593	-0,9564
6,67	-0,9269	-0,9239	-0,9209	-0,9180	-0,9151	-0,9122	-0,9093	-0,9064
6,72	-0,8769	-0,8739	-0,8709	-0,8680	-0,8651	-0,8622	-0,8593	-0,8564
6,77	-0,8269	-0,8239	-0,8209	-0,8180	-0,8151	-0,8122	-0,8093	-0,8064
6,82	-0,7769	-0,7739	-0,7709	-0,7680	-0,7651	-0,7622	-0,7593	-0,7564
6,87	-0,7269	-0,7239	-0,7209	-0,7180	-0,7151	-0,7122	-0,7093	-0,7064
6,92	-0,6769	-0,6739	-0,6709	-0,6680	-0,6651	-0,6622	-0,6593	-0,6564
6,97	-0,6269	-0,6239	-0,6209	-0,6180	-0,6151	-0,6122	-0,6093	-0,6064
7,02	-0,5769	-0,5739	-0,5709	-0,5680	-0,5651	-0,5622	-0,5593	-0,5564
7,07	-0,5269	-0,5239	-0,5209	-0,5180	-0,5151	-0,5122	-0,5093	-0,5064
7,12	-0,4769	-0,4739	-0,4709	-0,4680	-0,4651	-0,4622	-0,4593	-0,4564
7,17	-0,4269	-0,4239	-0,4209	-0,4180	-0,4151	-0,4122	-0,4093	-0,4064
7,22	-0,3769	-0,3739	-0,3709	-0,3680	-0,3651	-0,3622	-0,3593	-0,3564
7,27	-0,3269	-0,3239	-0,3209	-0,3180	-0,3151	-0,3122	-0,3093	-0,3064
7,32	-0,2769	-0,2739	-0,2709	-0,2680	-0,2651	-0,2622	-0,2593	-0,2564
7,37	-0,2269	-0,2239	-0,2209	-0,2180	-0,2151	-0,2122	-0,2093	-0,2064
7,42	-0,1769	-0,1739	-0,1709	-0,1680	-0,1651	-0,1622	-0,1593	-0,1564
7,47	-0,1269	-0,1239	-0,1209	-0,1180	-0,1151	-0,1122	-0,1093	-0,1064
7,52	-0,0769	-0,0739	-0,0709	-0,0680	-0,0651	-0,0622	-0,0593	-0,0564
7,57	-0,0269	-0,0239	-0,0209	-0,0180	-0,0151	-0,0122	-0,0093	-0,0064
7,62	0,0231	0,0261	0,0291	0,0320	0,0349	0,0378	0,0407	0,0436
7,67	0,0731	0,0761	0,0791	0,0820	0,0849	0,0878	0,0907	0,0936
7,72	0,1231	0,1261	0,1291	0,1320	0,1349	0,1378	0,1407	0,1436
7,77	0,1731	0,1761	0,1791	0,1820	0,1849	0,1878	0,1907	0,1936
7,82	0,2231	0,2261	0,2291	0,2320	0,2349	0,2378	0,2407	0,2436
7,87	0,2731	0,2761	0,2791	0,2820	0,2849	0,2878	0,2907	0,2936
7,92	0,3231	0,3261	0,3291	0,3320	0,3349	0,3378	0,3407	0,3436
7,97	0,3731	0,3761	0,3791	0,3820	0,3849	0,3878	0,3907	0,3936
8,02	0,4231	0,4261	0,4291	0,4320	0,4349	0,4378	0,4407	0,4436
8,07	0,4731	0,4761	0,4791	0,4820	0,4849	0,4878	0,4907	0,4936
8,12	0,5231	0,5261	0,5291	0,5320	0,5349	0,5378	0,5407	0,5436
8,17	0,5731	0,5761	0,5791	0,5820	0,5849	0,5878	0,5907	0,5936
8,22	0,6231	0,6261	0,6291	0,6320	0,6349	0,6378	0,6407	0,6436
8,27	0,6731	0,6761	0,6791	0,6820	0,6849	0,6878	0,6907	0,6936
8,32	0,7231	0,7261	0,7291	0,7320	0,7349	0,7378	0,7407	0,7436

Tabela E.8 - Variação do índice de Langelier em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

CC	14,5	14,6	14,7	14,8	14,9	15	15,1	15,2
Ca (mg/L)	124,7	125,56	126,42	127,28	128,14	129	129,86	130,72
pHs	7,60	7,59	7,59	7,59	7,59	7,58	7,58	7,58
pH				IL				
8,37	0,7731	0,7761	0,7791	0,7820	0,7849	0,7878	0,7907	0,7936
8,42	0,8231	0,8261	0,8291	0,8320	0,8349	0,8378	0,8407	0,8436
8,47	0,8731	0,8761	0,8791	0,8820	0,8849	0,8878	0,8907	0,8936
8,52	0,9231	0,9261	0,9291	0,9320	0,9349	0,9378	0,9407	0,9436
8,57	0,9731	0,9761	0,9791	0,9820	0,9849	0,9878	0,9907	0,9936
8,62	1,0231	1,0261	1,0291	1,0320	1,0349	1,0378	1,0407	1,0436

Tabela E.8 - Variação do índice de Langelier em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

CC	15,3	15,4	15,5	15,6	15,7	15,8	15,9	16
Ca (mg/L)	131,58	132,44	133,3	134,16	135,02	135,88	136,74	137,6
pHs	7,57	7,57	7,57	7,57	7,56	7,56	7,56	7,55
pH				IL				
6,12	-1,4536	-1,4507	-1,4479	-1,4451	-1,4423	-1,4396	-1,4368	-1,4341
6,17	-1,4036	-1,4007	-1,3979	-1,3951	-1,3923	-1,3896	-1,3868	-1,3841
6,22	-1,3536	-1,3507	-1,3479	-1,3451	-1,3423	-1,3396	-1,3368	-1,3341
6,27	-1,3036	-1,3007	-1,2979	-1,2951	-1,2923	-1,2896	-1,2868	-1,2841
6,32	-1,2536	-1,2507	-1,2479	-1,2451	-1,2423	-1,2396	-1,2368	-1,2341
6,37	-1,2036	-1,2007	-1,1979	-1,1951	-1,1923	-1,1896	-1,1868	-1,1841
6,42	-1,1536	-1,1507	-1,1479	-1,1451	-1,1423	-1,1396	-1,1368	-1,1341
6,47	-1,1036	-1,1007	-1,0979	-1,0951	-1,0923	-1,0896	-1,0868	-1,0841
6,52	-1,0536	-1,0507	-1,0479	-1,0451	-1,0423	-1,0396	-1,0368	-1,0341
6,57	-1,0036	-1,0007	-0,9979	-0,9951	-0,9923	-0,9896	-0,9868	-0,9841
6,62	-0,9536	-0,9507	-0,9479	-0,9451	-0,9423	-0,9396	-0,9368	-0,9341
6,67	-0,9036	-0,9007	-0,8979	-0,8951	-0,8923	-0,8896	-0,8868	-0,8841
6,72	-0,8536	-0,8507	-0,8479	-0,8451	-0,8423	-0,8396	-0,8368	-0,8341
6,77	-0,8036	-0,8007	-0,7979	-0,7951	-0,7923	-0,7896	-0,7868	-0,7841
6,82	-0,7536	-0,7507	-0,7479	-0,7451	-0,7423	-0,7396	-0,7368	-0,7341
6,87	-0,7036	-0,7007	-0,6979	-0,6951	-0,6923	-0,6896	-0,6868	-0,6841
6,92	-0,6536	-0,6507	-0,6479	-0,6451	-0,6423	-0,6396	-0,6368	-0,6341
6,97	-0,6036	-0,6007	-0,5979	-0,5951	-0,5923	-0,5896	-0,5868	-0,5841
7,02	-0,5536	-0,5507	-0,5479	-0,5451	-0,5423	-0,5396	-0,5368	-0,5341
7,07	-0,5036	-0,5007	-0,4979	-0,4951	-0,4923	-0,4896	-0,4868	-0,4841
7,12	-0,4536	-0,4507	-0,4479	-0,4451	-0,4423	-0,4396	-0,4368	-0,4341
7,17	-0,4036	-0,4007	-0,3979	-0,3951	-0,3923	-0,3896	-0,3868	-0,3841
7,22	-0,3536	-0,3507	-0,3479	-0,3451	-0,3423	-0,3396	-0,3368	-0,3341
7,27	-0,3036	-0,3007	-0,2979	-0,2951	-0,2923	-0,2896	-0,2868	-0,2841
7,32	-0,2536	-0,2507	-0,2479	-0,2451	-0,2423	-0,2396	-0,2368	-0,2341
7,37	-0,2036	-0,2007	-0,1979	-0,1951	-0,1923	-0,1896	-0,1868	-0,1841
7,42	-0,1536	-0,1507	-0,1479	-0,1451	-0,1423	-0,1396	-0,1368	-0,1341
7,47	-0,1036	-0,1007	-0,0979	-0,0951	-0,0923	-0,0896	-0,0868	-0,0841
7,52	-0,0536	-0,0507	-0,0479	-0,0451	-0,0423	-0,0396	-0,0368	-0,0341
7,57	-0,0036	-0,0007	0,0021	0,0049	0,0077	0,0104	0,0132	0,0159
7,62	0,0464	0,0493	0,0521	0,0549	0,0577	0,0604	0,0632	0,0659
7,67	0,0964	0,0993	0,1021	0,1049	0,1077	0,1104	0,1132	0,1159
7,72	0,1464	0,1493	0,1521	0,1549	0,1577	0,1604	0,1632	0,1659
7,77	0,1964	0,1993	0,2021	0,2049	0,2077	0,2104	0,2132	0,2159
7,82	0,2464	0,2493	0,2521	0,2549	0,2577	0,2604	0,2632	0,2659
7,87	0,2964	0,2993	0,3021	0,3049	0,3077	0,3104	0,3132	0,3159
7,92	0,3464	0,3493	0,3521	0,3549	0,3577	0,3604	0,3632	0,3659
7,97	0,3964	0,3993	0,4021	0,4049	0,4077	0,4104	0,4132	0,4159
8,02	0,4464	0,4493	0,4521	0,4549	0,4577	0,4604	0,4632	0,4659
8,07	0,4964	0,4993	0,5021	0,5049	0,5077	0,5104	0,5132	0,5159
8,12	0,5464	0,5493	0,5521	0,5549	0,5577	0,5604	0,5632	0,5659
8,17	0,5964	0,5993	0,6021	0,6049	0,6077	0,6104	0,6132	0,6159
8,22	0,6464	0,6493	0,6521	0,6549	0,6577	0,6604	0,6632	0,6659
8,27	0,6964	0,6993	0,7021	0,7049	0,7077	0,7104	0,7132	0,7159
8,32	0,7464	0,7493	0,7521	0,7549	0,7577	0,7604	0,7632	0,7659

Tabela E.8 - Variação do índice de Langelier em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

CC	15,3	15,4	15,5	15,6	15,7	15,8	15,9	16
Ca (mg/L)	131,58	132,44	133,3	134,16	135,02	135,88	136,74	137,6
pHs	7,57	7,57	7,57	7,57	7,56	7,56	7,56	7,55
pH				IL				
8,37	0,7964	0,7993	0,8021	0,8049	0,8077	0,8104	0,8132	0,8159
8,42	0,8464	0,8493	0,8521	0,8549	0,8577	0,8604	0,8632	0,8659
8,47	0,8964	0,8993	0,9021	0,9049	0,9077	0,9104	0,9132	0,9159
8,52	0,9464	0,9493	0,9521	0,9549	0,9577	0,9604	0,9632	0,9659
8,57	0,9964	0,9993	1,0021	1,0049	1,0077	1,0104	1,0132	1,0159
8,62	1,0464	1,0493	1,0521	1,0549	1,0577	1,0604	1,0632	1,0659

Tabela E.9 - Variação do índice de Langelier em função do pH e do ciclo de concentração – TR02

CC	6,5	6,6	6,7	6,8	6,9	7	7,1	7,2
Ca (mg/L)	55,9	56,76	57,62	58,48	59,34	60,2	61,06	61,92
pHs	7,95	7,94	7,93	7,93	7,92	7,91	7,91	7,90
pH				IL				
6,55	-1,3953	-1,3887	-1,3822	-1,3757	-1,3694	-1,3631	-1,3570	-1,3509
6,6	-1,3453	-1,3387	-1,3322	-1,3257	-1,3194	-1,3131	-1,3070	-1,3009
6,65	-1,2953	-1,2887	-1,2822	-1,2757	-1,2694	-1,2631	-1,2570	-1,2509
6,7	-1,2453	-1,2387	-1,2322	-1,2257	-1,2194	-1,2131	-1,2070	-1,2009
6,75	-1,1953	-1,1887	-1,1822	-1,1757	-1,1694	-1,1631	-1,1570	-1,1509
6,8	-1,1453	-1,1387	-1,1322	-1,1257	-1,1194	-1,1131	-1,1070	-1,1009
6,85	-1,0953	-1,0887	-1,0822	-1,0757	-1,0694	-1,0631	-1,0570	-1,0509
6,9	-1,0453	-1,0387	-1,0322	-1,0257	-1,0194	-1,0131	-1,0070	-1,0009
6,95	-0,9953	-0,9887	-0,9822	-0,9757	-0,9694	-0,9631	-0,9570	-0,9509
7	-0,9453	-0,9387	-0,9322	-0,9257	-0,9194	-0,9131	-0,9070	-0,9009
7,05	-0,8953	-0,8887	-0,8822	-0,8757	-0,8694	-0,8631	-0,8570	-0,8509
7,1	-0,8453	-0,8387	-0,8322	-0,8257	-0,8194	-0,8131	-0,8070	-0,8009
7,15	-0,7953	-0,7887	-0,7822	-0,7757	-0,7694	-0,7631	-0,7570	-0,7509
7,2	-0,7453	-0,7387	-0,7322	-0,7257	-0,7194	-0,7131	-0,7070	-0,7009
7,25	-0,6953	-0,6887	-0,6822	-0,6757	-0,6694	-0,6631	-0,6570	-0,6509
7,3	-0,6453	-0,6387	-0,6322	-0,6257	-0,6194	-0,6131	-0,6070	-0,6009
7,35	-0,5953	-0,5887	-0,5822	-0,5757	-0,5694	-0,5631	-0,5570	-0,5509
7,4	-0,5453	-0,5387	-0,5322	-0,5257	-0,5194	-0,5131	-0,5070	-0,5009
7,45	-0,4953	-0,4887	-0,4822	-0,4757	-0,4694	-0,4631	-0,4570	-0,4509
7,5	-0,4453	-0,4387	-0,4322	-0,4257	-0,4194	-0,4131	-0,4070	-0,4009
7,55	-0,3953	-0,3887	-0,3822	-0,3757	-0,3694	-0,3631	-0,3570	-0,3509
7,6	-0,3453	-0,3387	-0,3322	-0,3257	-0,3194	-0,3131	-0,3070	-0,3009
7,65	-0,2953	-0,2887	-0,2822	-0,2757	-0,2694	-0,2631	-0,2570	-0,2509
7,7	-0,2453	-0,2387	-0,2322	-0,2257	-0,2194	-0,2131	-0,2070	-0,2009

Tabela E.9 - Variação do índice de Langelier em função do pH e do ciclo de concentração – TR02 (continuação)

CC	7,3	7,4	7,5	7,6	7,7	7,8	7,9	8
Ca (mg/L)	62,78	63,64	64,5	65,36	66,22	67,08	67,94	68,8
pHs	7,90	7,89	7,88	7,88	7,87	7,87	7,86	7,86
pH				IL				
6,55	-1,3449	-1,3390	-1,3332	-1,3274	-1,3218	-1,3161	-1,3106	-1,3052
6,6	-1,2949	-1,2890	-1,2832	-1,2774	-1,2718	-1,2661	-1,2606	-1,2552
6,65	-1,2449	-1,2390	-1,2332	-1,2274	-1,2218	-1,2161	-1,2106	-1,2052
6,7	-1,1949	-1,1890	-1,1832	-1,1774	-1,1718	-1,1661	-1,1606	-1,1552
6,75	-1,1449	-1,1390	-1,1332	-1,1274	-1,1218	-1,1161	-1,1106	-1,1052
6,8	-1,0949	-1,0890	-1,0832	-1,0774	-1,0718	-1,0661	-1,0606	-1,0552
6,85	-1,0449	-1,0390	-1,0332	-1,0274	-1,0218	-1,0161	-1,0106	-1,0052
6,9	-0,9949	-0,9890	-0,9832	-0,9774	-0,9718	-0,9661	-0,9606	-0,9552
6,95	-0,9449	-0,9390	-0,9332	-0,9274	-0,9218	-0,9161	-0,9106	-0,9052
7	-0,8949	-0,8890	-0,8832	-0,8774	-0,8718	-0,8661	-0,8606	-0,8552
7,05	-0,8449	-0,8390	-0,8332	-0,8274	-0,8218	-0,8161	-0,8106	-0,8052
7,1	-0,7949	-0,7890	-0,7832	-0,7774	-0,7718	-0,7661	-0,7606	-0,7552
7,15	-0,7449	-0,7390	-0,7332	-0,7274	-0,7218	-0,7161	-0,7106	-0,7052
7,2	-0,6949	-0,6890	-0,6832	-0,6774	-0,6718	-0,6661	-0,6606	-0,6552
7,25	-0,6449	-0,6390	-0,6332	-0,6274	-0,6218	-0,6161	-0,6106	-0,6052
7,3	-0,5949	-0,5890	-0,5832	-0,5774	-0,5718	-0,5661	-0,5606	-0,5552
7,35	-0,5449	-0,5390	-0,5332	-0,5274	-0,5218	-0,5161	-0,5106	-0,5052
7,4	-0,4949	-0,4890	-0,4832	-0,4774	-0,4718	-0,4661	-0,4606	-0,4552
7,45	-0,4449	-0,4390	-0,4332	-0,4274	-0,4218	-0,4161	-0,4106	-0,4052
7,5	-0,3949	-0,3890	-0,3832	-0,3774	-0,3718	-0,3661	-0,3606	-0,3552
7,55	-0,3449	-0,3390	-0,3332	-0,3274	-0,3218	-0,3161	-0,3106	-0,3052
7,6	-0,2949	-0,2890	-0,2832	-0,2774	-0,2718	-0,2661	-0,2606	-0,2552
7,65	-0,2449	-0,2390	-0,2332	-0,2274	-0,2218	-0,2161	-0,2106	-0,2052
7,7	-0,1949	-0,1890	-0,1832	-0,1774	-0,1718	-0,1661	-0,1606	-0,1552

Tabela E.9 - Variação do índice de Langelier em função do pH e do ciclo de concentração – TR02 (continuação)

CC	8,1	8,2	8,3	8,4	8,5	8,6	8,7	8,8
Ca (mg/L)	69,66	70,52	71,38	72,24	73,1	73,96	74,82	75,68
pHs	7,85	7,85	7,84	7,84	7,83	7,83	7,82	7,82
pH				IL				
6,55	-1,2998	-1,2944	-1,2892	-1,2840	-1,2788	-1,2737	-1,2687	-1,2638
6,6	-1,2498	-1,2444	-1,2392	-1,2340	-1,2288	-1,2237	-1,2187	-1,2138
6,65	-1,1998	-1,1944	-1,1892	-1,1840	-1,1788	-1,1737	-1,1687	-1,1638
6,7	-1,1498	-1,1444	-1,1392	-1,1340	-1,1288	-1,1237	-1,1187	-1,1138
6,75	-1,0998	-1,0944	-1,0892	-1,0840	-1,0788	-1,0737	-1,0687	-1,0638
6,8	-1,0498	-1,0444	-1,0392	-1,0340	-1,0288	-1,0237	-1,0187	-1,0138
6,85	-0,9998	-0,9944	-0,9892	-0,9840	-0,9788	-0,9737	-0,9687	-0,9638
6,9	-0,9498	-0,9444	-0,9392	-0,9340	-0,9288	-0,9237	-0,9187	-0,9138
6,95	-0,8998	-0,8944	-0,8892	-0,8840	-0,8788	-0,8737	-0,8687	-0,8638
7	-0,8498	-0,8444	-0,8392	-0,8340	-0,8288	-0,8237	-0,8187	-0,8138
7,05	-0,7998	-0,7944	-0,7892	-0,7840	-0,7788	-0,7737	-0,7687	-0,7638
7,1	-0,7498	-0,7444	-0,7392	-0,7340	-0,7288	-0,7237	-0,7187	-0,7138
7,15	-0,6998	-0,6944	-0,6892	-0,6840	-0,6788	-0,6737	-0,6687	-0,6638
7,2	-0,6498	-0,6444	-0,6392	-0,6340	-0,6288	-0,6237	-0,6187	-0,6138
7,25	-0,5998	-0,5944	-0,5892	-0,5840	-0,5788	-0,5737	-0,5687	-0,5638
7,3	-0,5498	-0,5444	-0,5392	-0,5340	-0,5288	-0,5237	-0,5187	-0,5138
7,35	-0,4998	-0,4944	-0,4892	-0,4840	-0,4788	-0,4737	-0,4687	-0,4638
7,4	-0,4498	-0,4444	-0,4392	-0,4340	-0,4288	-0,4237	-0,4187	-0,4138
7,45	-0,3998	-0,3944	-0,3892	-0,3840	-0,3788	-0,3737	-0,3687	-0,3638
7,5	-0,3498	-0,3444	-0,3392	-0,3340	-0,3288	-0,3237	-0,3187	-0,3138
7,55	-0,2998	-0,2944	-0,2892	-0,2840	-0,2788	-0,2737	-0,2687	-0,2638
7,6	-0,2498	-0,2444	-0,2392	-0,2340	-0,2288	-0,2237	-0,2187	-0,2138
7,65	-0,1998	-0,1944	-0,1892	-0,1840	-0,1788	-0,1737	-0,1687	-0,1638
7,7	-0,1498	-0,1444	-0,1392	-0,1340	-0,1288	-0,1237	-0,1187	-0,1138

Tabela E.9 - Variação do índice de Langelier em função do pH e do ciclo de concentração – TR02 (continuação)

CC	8,9	9	9,1	9,2	9,3	9,4	9,5	9,6
Ca (mg/L)	76,54	77,4	78,26	79,12	79,98	80,84	81,7	82,56
pHs	7,81	7,81	7,80	7,80	7,79	7,79	7,78	7,78
pH				IL				
6,55	-1,2589	-1,2540	-1,2492	-1,2445	-1,2398	-1,2351	-1,2305	-1,2260
6,6	-1,2089	-1,2040	-1,1992	-1,1945	-1,1898	-1,1851	-1,1805	-1,1760
6,65	-1,1589	-1,1540	-1,1492	-1,1445	-1,1398	-1,1351	-1,1305	-1,1260
6,7	-1,1089	-1,1040	-1,0992	-1,0945	-1,0898	-1,0851	-1,0805	-1,0760
6,75	-1,0589	-1,0540	-1,0492	-1,0445	-1,0398	-1,0351	-1,0305	-1,0260
6,8	-1,0089	-1,0040	-0,9992	-0,9945	-0,9898	-0,9851	-0,9805	-0,9760
6,85	-0,9589	-0,9540	-0,9492	-0,9445	-0,9398	-0,9351	-0,9305	-0,9260
6,9	-0,9089	-0,9040	-0,8992	-0,8945	-0,8898	-0,8851	-0,8805	-0,8760
6,95	-0,8589	-0,8540	-0,8492	-0,8445	-0,8398	-0,8351	-0,8305	-0,8260
7	-0,8089	-0,8040	-0,7992	-0,7945	-0,7898	-0,7851	-0,7805	-0,7760
7,05	-0,7589	-0,7540	-0,7492	-0,7445	-0,7398	-0,7351	-0,7305	-0,7260
7,1	-0,7089	-0,7040	-0,6992	-0,6945	-0,6898	-0,6851	-0,6805	-0,6760
7,15	-0,6589	-0,6540	-0,6492	-0,6445	-0,6398	-0,6351	-0,6305	-0,6260
7,2	-0,6089	-0,6040	-0,5992	-0,5945	-0,5898	-0,5851	-0,5805	-0,5760
7,25	-0,5589	-0,5540	-0,5492	-0,5445	-0,5398	-0,5351	-0,5305	-0,5260
7,3	-0,5089	-0,5040	-0,4992	-0,4945	-0,4898	-0,4851	-0,4805	-0,4760
7,35	-0,4589	-0,4540	-0,4492	-0,4445	-0,4398	-0,4351	-0,4305	-0,4260
7,4	-0,4089	-0,4040	-0,3992	-0,3945	-0,3898	-0,3851	-0,3805	-0,3760
7,45	-0,3589	-0,3540	-0,3492	-0,3445	-0,3398	-0,3351	-0,3305	-0,3260
7,5	-0,3089	-0,3040	-0,2992	-0,2945	-0,2898	-0,2851	-0,2805	-0,2760
7,55	-0,2589	-0,2540	-0,2492	-0,2445	-0,2398	-0,2351	-0,2305	-0,2260
7,6	-0,2089	-0,2040	-0,1992	-0,1945	-0,1898	-0,1851	-0,1805	-0,1760
7,65	-0,1589	-0,1540	-0,1492	-0,1445	-0,1398	-0,1351	-0,1305	-0,1260
7,7	-0,1089	-0,1040	-0,0992	-0,0945	-0,0898	-0,0851	-0,0805	-0,0760

Tabela E.9 - Variação do índice de Langelier em função do pH e do ciclo de concentração – TR02 (continuação)

CC	9,7	9,8	9,9	10	10,1	10,2	10,3	10,4
Ca (mg/L)	83,42	84,28	85,14	86	86,86	87,72	88,58	89,44
pHs	7,77	7,77	7,76	7,76	7,76	7,75	7,75	7,74
pH				IL				
6,55	-1,2215	-1,2170	-1,2126	-1,2082	-1,2039	-1,1996	-1,1954	-1,1912
6,6	-1,1715	-1,1670	-1,1626	-1,1582	-1,1539	-1,1496	-1,1454	-1,1412
6,65	-1,1215	-1,1170	-1,1126	-1,1082	-1,1039	-1,0996	-1,0954	-1,0912
6,7	-1,0715	-1,0670	-1,0626	-1,0582	-1,0539	-1,0496	-1,0454	-1,0412
6,75	-1,0215	-1,0170	-1,0126	-1,0082	-1,0039	-0,9996	-0,9954	-0,9912
6,8	-0,9715	-0,9670	-0,9626	-0,9582	-0,9539	-0,9496	-0,9454	-0,9412
6,85	-0,9215	-0,9170	-0,9126	-0,9082	-0,9039	-0,8996	-0,8954	-0,8912
6,9	-0,8715	-0,8670	-0,8626	-0,8582	-0,8539	-0,8496	-0,8454	-0,8412
6,95	-0,8215	-0,8170	-0,8126	-0,8082	-0,8039	-0,7996	-0,7954	-0,7912
7	-0,7715	-0,7670	-0,7626	-0,7582	-0,7539	-0,7496	-0,7454	-0,7412
7,05	-0,7215	-0,7170	-0,7126	-0,7082	-0,7039	-0,6996	-0,6954	-0,6912
7,1	-0,6715	-0,6670	-0,6626	-0,6582	-0,6539	-0,6496	-0,6454	-0,6412
7,15	-0,6215	-0,6170	-0,6126	-0,6082	-0,6039	-0,5996	-0,5954	-0,5912
7,2	-0,5715	-0,5670	-0,5626	-0,5582	-0,5539	-0,5496	-0,5454	-0,5412
7,25	-0,5215	-0,5170	-0,5126	-0,5082	-0,5039	-0,4996	-0,4954	-0,4912
7,3	-0,4715	-0,4670	-0,4626	-0,4582	-0,4539	-0,4496	-0,4454	-0,4412
7,35	-0,4215	-0,4170	-0,4126	-0,4082	-0,4039	-0,3996	-0,3954	-0,3912
7,4	-0,3715	-0,3670	-0,3626	-0,3582	-0,3539	-0,3496	-0,3454	-0,3412
7,45	-0,3215	-0,3170	-0,3126	-0,3082	-0,3039	-0,2996	-0,2954	-0,2912
7,5	-0,2715	-0,2670	-0,2626	-0,2582	-0,2539	-0,2496	-0,2454	-0,2412
7,55	-0,2215	-0,2170	-0,2126	-0,2082	-0,2039	-0,1996	-0,1954	-0,1912
7,6	-0,1715	-0,1670	-0,1626	-0,1582	-0,1539	-0,1496	-0,1454	-0,1412
7,65	-0,1215	-0,1170	-0,1126	-0,1082	-0,1039	-0,0996	-0,0954	-0,0912
7,7	-0,0715	-0,0670	-0,0626	-0,0582	-0,0539	-0,0496	-0,0454	-0,0412

Tabela E.9 - Variação do índice de Langelier em função do pH e do ciclo de concentração – TR02 (continuação)

CC	10,5	10,6	10,7	10,8	10,9	11	11,1	11,2
Ca (mg/L)	90,3	91,16	92,02	92,88	93,74	94,6	95,46	96,32
pHs	7,74	7,73	7,73	7,73	7,72	7,72	7,71	7,71
pH				IL				
6,55	-1,1871	-1,1829	-1,1789	-1,1748	-1,1708	-1,1669	-1,1629	-1,1590
6,6	-1,1371	-1,1329	-1,1289	-1,1248	-1,1208	-1,1169	-1,1129	-1,1090
6,65	-1,0871	-1,0829	-1,0789	-1,0748	-1,0708	-1,0669	-1,0629	-1,0590
6,7	-1,0371	-1,0329	-1,0289	-1,0248	-1,0208	-1,0169	-1,0129	-1,0090
6,75	-0,9871	-0,9829	-0,9789	-0,9748	-0,9708	-0,9669	-0,9629	-0,9590
6,8	-0,9371	-0,9329	-0,9289	-0,9248	-0,9208	-0,9169	-0,9129	-0,9090
6,85	-0,8871	-0,8829	-0,8789	-0,8748	-0,8708	-0,8669	-0,8629	-0,8590
6,9	-0,8371	-0,8329	-0,8289	-0,8248	-0,8208	-0,8169	-0,8129	-0,8090
6,95	-0,7871	-0,7829	-0,7789	-0,7748	-0,7708	-0,7669	-0,7629	-0,7590
7	-0,7371	-0,7329	-0,7289	-0,7248	-0,7208	-0,7169	-0,7129	-0,7090
7,05	-0,6871	-0,6829	-0,6789	-0,6748	-0,6708	-0,6669	-0,6629	-0,6590
7,1	-0,6371	-0,6329	-0,6289	-0,6248	-0,6208	-0,6169	-0,6129	-0,6090
7,15	-0,5871	-0,5829	-0,5789	-0,5748	-0,5708	-0,5669	-0,5629	-0,5590
7,2	-0,5371	-0,5329	-0,5289	-0,5248	-0,5208	-0,5169	-0,5129	-0,5090
7,25	-0,4871	-0,4829	-0,4789	-0,4748	-0,4708	-0,4669	-0,4629	-0,4590
7,3	-0,4371	-0,4329	-0,4289	-0,4248	-0,4208	-0,4169	-0,4129	-0,4090
7,35	-0,3871	-0,3829	-0,3789	-0,3748	-0,3708	-0,3669	-0,3629	-0,3590
7,4	-0,3371	-0,3329	-0,3289	-0,3248	-0,3208	-0,3169	-0,3129	-0,3090
7,45	-0,2871	-0,2829	-0,2789	-0,2748	-0,2708	-0,2669	-0,2629	-0,2590
7,5	-0,2371	-0,2329	-0,2289	-0,2248	-0,2208	-0,2169	-0,2129	-0,2090
7,55	-0,1871	-0,1829	-0,1789	-0,1748	-0,1708	-0,1669	-0,1629	-0,1590
7,6	-0,1371	-0,1329	-0,1289	-0,1248	-0,1208	-0,1169	-0,1129	-0,1090
7,65	-0,0871	-0,0829	-0,0789	-0,0748	-0,0708	-0,0669	-0,0629	-0,0590
7,7	-0,0371	-0,0329	-0,0289	-0,0248	-0,0208	-0,0169	-0,0129	-0,0090

Tabela E.9 - Variação do índice de Langelier em função do pH e do ciclo de concentração – TR02 (continuação)

CC	11,3	11,4	11,5	11,6	11,7	11,8	11,9	12
Ca (mg/L)	97,18	98,04	98,9	99,76	100,62	101,48	102,34	103,2
pHs	7,71	7,70	7,70	7,70	7,69	7,69	7,68	7,68
pH				IL				
6,55	-1,1552	-1,1513	-1,1475	-1,1438	-1,1401	-1,1364	-1,1327	-1,1291
6,6	-1,1052	-1,1013	-1,0975	-1,0938	-1,0901	-1,0864	-1,0827	-1,0791
6,65	-1,0552	-1,0513	-1,0475	-1,0438	-1,0401	-1,0364	-1,0327	-1,0291
6,7	-1,0052	-1,0013	-0,9975	-0,9938	-0,9901	-0,9864	-0,9827	-0,9791
6,75	-0,9552	-0,9513	-0,9475	-0,9438	-0,9401	-0,9364	-0,9327	-0,9291
6,8	-0,9052	-0,9013	-0,8975	-0,8938	-0,8901	-0,8864	-0,8827	-0,8791
6,85	-0,8552	-0,8513	-0,8475	-0,8438	-0,8401	-0,8364	-0,8327	-0,8291
6,9	-0,8052	-0,8013	-0,7975	-0,7938	-0,7901	-0,7864	-0,7827	-0,7791
6,95	-0,7552	-0,7513	-0,7475	-0,7438	-0,7401	-0,7364	-0,7327	-0,7291
7	-0,7052	-0,7013	-0,6975	-0,6938	-0,6901	-0,6864	-0,6827	-0,6791
7,05	-0,6552	-0,6513	-0,6475	-0,6438	-0,6401	-0,6364	-0,6327	-0,6291
7,1	-0,6052	-0,6013	-0,5975	-0,5938	-0,5901	-0,5864	-0,5827	-0,5791
7,15	-0,5552	-0,5513	-0,5475	-0,5438	-0,5401	-0,5364	-0,5327	-0,5291
7,2	-0,5052	-0,5013	-0,4975	-0,4938	-0,4901	-0,4864	-0,4827	-0,4791
7,25	-0,4552	-0,4513	-0,4475	-0,4438	-0,4401	-0,4364	-0,4327	-0,4291
7,3	-0,4052	-0,4013	-0,3975	-0,3938	-0,3901	-0,3864	-0,3827	-0,3791
7,35	-0,3552	-0,3513	-0,3475	-0,3438	-0,3401	-0,3364	-0,3327	-0,3291
7,4	-0,3052	-0,3013	-0,2975	-0,2938	-0,2901	-0,2864	-0,2827	-0,2791
7,45	-0,2552	-0,2513	-0,2475	-0,2438	-0,2401	-0,2364	-0,2327	-0,2291
7,5	-0,2052	-0,2013	-0,1975	-0,1938	-0,1901	-0,1864	-0,1827	-0,1791
7,55	-0,1552	-0,1513	-0,1475	-0,1438	-0,1401	-0,1364	-0,1327	-0,1291
7,6	-0,1052	-0,1013	-0,0975	-0,0938	-0,0901	-0,0864	-0,0827	-0,0791
7,65	-0,0552	-0,0513	-0,0475	-0,0438	-0,0401	-0,0364	-0,0327	-0,0291
7,7	-0,0052	-0,0013	0,0025	0,0062	0,0099	0,0136	0,0173	0,0209

Tabela E.9 - Variação do índice de Langelier em função do pH e do ciclo de concentração – TR02 (continuação)

CC	12,1	12,2	12,3	12,4	12,5	12,6	12,7	12,8
Ca (mg/L)	104,06	104,92	105,78	106,64	107,5	108,36	109,22	110,08
pHs	7,68	7,67	7,67	7,67	7,66	7,66	7,66	7,65
pH				IL				
6,55	-1,1255	-1,1219	-1,1183	-1,1148	-1,1113	-1,1079	-1,1044	-1,1010
6,6	-1,0755	-1,0719	-1,0683	-1,0648	-1,0613	-1,0579	-1,0544	-1,0510
6,65	-1,0255	-1,0219	-1,0183	-1,0148	-1,0113	-1,0079	-1,0044	-1,0010
6,7	-0,9755	-0,9719	-0,9683	-0,9648	-0,9613	-0,9579	-0,9544	-0,9510
6,75	-0,9255	-0,9219	-0,9183	-0,9148	-0,9113	-0,9079	-0,9044	-0,9010
6,8	-0,8755	-0,8719	-0,8683	-0,8648	-0,8613	-0,8579	-0,8544	-0,8510
6,85	-0,8255	-0,8219	-0,8183	-0,8148	-0,8113	-0,8079	-0,8044	-0,8010
6,9	-0,7755	-0,7719	-0,7683	-0,7648	-0,7613	-0,7579	-0,7544	-0,7510
6,95	-0,7255	-0,7219	-0,7183	-0,7148	-0,7113	-0,7079	-0,7044	-0,7010
7	-0,6755	-0,6719	-0,6683	-0,6648	-0,6613	-0,6579	-0,6544	-0,6510
7,05	-0,6255	-0,6219	-0,6183	-0,6148	-0,6113	-0,6079	-0,6044	-0,6010
7,1	-0,5755	-0,5719	-0,5683	-0,5648	-0,5613	-0,5579	-0,5544	-0,5510
7,15	-0,5255	-0,5219	-0,5183	-0,5148	-0,5113	-0,5079	-0,5044	-0,5010
7,2	-0,4755	-0,4719	-0,4683	-0,4648	-0,4613	-0,4579	-0,4544	-0,4510
7,25	-0,4255	-0,4219	-0,4183	-0,4148	-0,4113	-0,4079	-0,4044	-0,4010
7,3	-0,3755	-0,3719	-0,3683	-0,3648	-0,3613	-0,3579	-0,3544	-0,3510
7,35	-0,3255	-0,3219	-0,3183	-0,3148	-0,3113	-0,3079	-0,3044	-0,3010
7,4	-0,2755	-0,2719	-0,2683	-0,2648	-0,2613	-0,2579	-0,2544	-0,2510
7,45	-0,2255	-0,2219	-0,2183	-0,2148	-0,2113	-0,2079	-0,2044	-0,2010
7,5	-0,1755	-0,1719	-0,1683	-0,1648	-0,1613	-0,1579	-0,1544	-0,1510
7,55	-0,1255	-0,1219	-0,1183	-0,1148	-0,1113	-0,1079	-0,1044	-0,1010
7,6	-0,0755	-0,0719	-0,0683	-0,0648	-0,0613	-0,0579	-0,0544	-0,0510
7,65	-0,0255	-0,0219	-0,0183	-0,0148	-0,0113	-0,0079	-0,0044	-0,0010
7,7	0,0245	0,0281	0,0317	0,0352	0,0387	0,0421	0,0456	0,0490

Tabela E.9 - Variação do índice de Langelier em função do pH e do ciclo de concentração – TR02 (continuação)

CC	12,9	13	13,1	13,2	13,3	13,4	13,5	13,6
Ca (mg/L)	110,94	111,8	112,66	113,52	114,38	115,24	116,1	116,96
pHs	7,65	7,65	7,64	7,64	7,64	7,63	7,63	7,63
pH				IL				
6,55	-1,0977	-1,0943	-1,0910	-1,0877	-1,0844	-1,0811	-1,0779	-1,0747
6,6	-1,0477	-1,0443	-1,0410	-1,0377	-1,0344	-1,0311	-1,0279	-1,0247
6,65	-0,9977	-0,9943	-0,9910	-0,9877	-0,9844	-0,9811	-0,9779	-0,9747
6,7	-0,9477	-0,9443	-0,9410	-0,9377	-0,9344	-0,9311	-0,9279	-0,9247
6,75	-0,8977	-0,8943	-0,8910	-0,8877	-0,8844	-0,8811	-0,8779	-0,8747
6,8	-0,8477	-0,8443	-0,8410	-0,8377	-0,8344	-0,8311	-0,8279	-0,8247
6,85	-0,7977	-0,7943	-0,7910	-0,7877	-0,7844	-0,7811	-0,7779	-0,7747
6,9	-0,7477	-0,7443	-0,7410	-0,7377	-0,7344	-0,7311	-0,7279	-0,7247
6,95	-0,6977	-0,6943	-0,6910	-0,6877	-0,6844	-0,6811	-0,6779	-0,6747
7	-0,6477	-0,6443	-0,6410	-0,6377	-0,6344	-0,6311	-0,6279	-0,6247
7,05	-0,5977	-0,5943	-0,5910	-0,5877	-0,5844	-0,5811	-0,5779	-0,5747
7,1	-0,5477	-0,5443	-0,5410	-0,5377	-0,5344	-0,5311	-0,5279	-0,5247
7,15	-0,4977	-0,4943	-0,4910	-0,4877	-0,4844	-0,4811	-0,4779	-0,4747
7,2	-0,4477	-0,4443	-0,4410	-0,4377	-0,4344	-0,4311	-0,4279	-0,4247
7,25	-0,3977	-0,3943	-0,3910	-0,3877	-0,3844	-0,3811	-0,3779	-0,3747
7,3	-0,3477	-0,3443	-0,3410	-0,3377	-0,3344	-0,3311	-0,3279	-0,3247
7,35	-0,2977	-0,2943	-0,2910	-0,2877	-0,2844	-0,2811	-0,2779	-0,2747
7,4	-0,2477	-0,2443	-0,2410	-0,2377	-0,2344	-0,2311	-0,2279	-0,2247
7,45	-0,1977	-0,1943	-0,1910	-0,1877	-0,1844	-0,1811	-0,1779	-0,1747
7,5	-0,1477	-0,1443	-0,1410	-0,1377	-0,1344	-0,1311	-0,1279	-0,1247
7,55	-0,0977	-0,0943	-0,0910	-0,0877	-0,0844	-0,0811	-0,0779	-0,0747
7,6	-0,0477	-0,0443	-0,0410	-0,0377	-0,0344	-0,0311	-0,0279	-0,0247
7,65	0,0023	0,0057	0,0090	0,0123	0,0156	0,0189	0,0221	0,0253
7,7	0,0523	0,0557	0,0590	0,0623	0,0656	0,0689	0,0721	0,0753

Tabela E.9 - Variação do índice de Langelier em função do pH e do ciclo de concentração – TR02 (continuação)

CC	13,7	13,8	13,9	14	14,1	14,2	14,3	14,4
Ca (mg/L)	117,82	118,68	119,54	120,4	121,26	122,12	122,98	123,84
pHs	7,62	7,62	7,62	7,61	7,61	7,61	7,60	7,60
pH				IL				
6,55	-1,0715	-1,0684	-1,0652	-1,0621	-1,0590	-1,0560	-1,0529	-1,0499
6,6	-1,0215	-1,0184	-1,0152	-1,0121	-1,0090	-1,0060	-1,0029	-0,9999
6,65	-0,9715	-0,9684	-0,9652	-0,9621	-0,9590	-0,9560	-0,9529	-0,9499
6,7	-0,9215	-0,9184	-0,9152	-0,9121	-0,9090	-0,9060	-0,9029	-0,8999
6,75	-0,8715	-0,8684	-0,8652	-0,8621	-0,8590	-0,8560	-0,8529	-0,8499
6,8	-0,8215	-0,8184	-0,8152	-0,8121	-0,8090	-0,8060	-0,8029	-0,7999
6,85	-0,7715	-0,7684	-0,7652	-0,7621	-0,7590	-0,7560	-0,7529	-0,7499
6,9	-0,7215	-0,7184	-0,7152	-0,7121	-0,7090	-0,7060	-0,7029	-0,6999
6,95	-0,6715	-0,6684	-0,6652	-0,6621	-0,6590	-0,6560	-0,6529	-0,6499
7	-0,6215	-0,6184	-0,6152	-0,6121	-0,6090	-0,6060	-0,6029	-0,5999
7,05	-0,5715	-0,5684	-0,5652	-0,5621	-0,5590	-0,5560	-0,5529	-0,5499
7,1	-0,5215	-0,5184	-0,5152	-0,5121	-0,5090	-0,5060	-0,5029	-0,4999
7,15	-0,4715	-0,4684	-0,4652	-0,4621	-0,4590	-0,4560	-0,4529	-0,4499
7,2	-0,4215	-0,4184	-0,4152	-0,4121	-0,4090	-0,4060	-0,4029	-0,3999
7,25	-0,3715	-0,3684	-0,3652	-0,3621	-0,3590	-0,3560	-0,3529	-0,3499
7,3	-0,3215	-0,3184	-0,3152	-0,3121	-0,3090	-0,3060	-0,3029	-0,2999
7,35	-0,2715	-0,2684	-0,2652	-0,2621	-0,2590	-0,2560	-0,2529	-0,2499
7,4	-0,2215	-0,2184	-0,2152	-0,2121	-0,2090	-0,2060	-0,2029	-0,1999
7,45	-0,1715	-0,1684	-0,1652	-0,1621	-0,1590	-0,1560	-0,1529	-0,1499
7,5	-0,1215	-0,1184	-0,1152	-0,1121	-0,1090	-0,1060	-0,1029	-0,0999
7,55	-0,0715	-0,0684	-0,0652	-0,0621	-0,0590	-0,0560	-0,0529	-0,0499
7,6	-0,0215	-0,0184	-0,0152	-0,0121	-0,0090	-0,0060	-0,0029	0,0001
7,65	0,0285	0,0316	0,0348	0,0379	0,0410	0,0440	0,0471	0,0501
7,7	0,0785	0,0816	0,0848	0,0879	0,0910	0,0940	0,0971	0,1001

Tabela E.9 - Variação do índice de Langelier em função do pH e do ciclo de concentração – TR02 (continuação)

CC	14,5	14,6	14,7	14,8	14,9	15	15,1	15,2
Ca (mg/L)	124,7	125,56	126,42	127,28	128,14	129	129,86	130,72
pHs	7,60	7,60	7,59	7,59	7,59	7,58	7,58	7,58
pH				IL				
6,55	-1,0469	-1,0439	-1,0409	-1,0380	-1,0351	-1,0322	-1,0293	-1,0264
6,6	-0,9969	-0,9939	-0,9909	-0,9880	-0,9851	-0,9822	-0,9793	-0,9764
6,65	-0,9469	-0,9439	-0,9409	-0,9380	-0,9351	-0,9322	-0,9293	-0,9264
6,7	-0,8969	-0,8939	-0,8909	-0,8880	-0,8851	-0,8822	-0,8793	-0,8764
6,75	-0,8469	-0,8439	-0,8409	-0,8380	-0,8351	-0,8322	-0,8293	-0,8264
6,8	-0,7969	-0,7939	-0,7909	-0,7880	-0,7851	-0,7822	-0,7793	-0,7764
6,85	-0,7469	-0,7439	-0,7409	-0,7380	-0,7351	-0,7322	-0,7293	-0,7264
6,9	-0,6969	-0,6939	-0,6909	-0,6880	-0,6851	-0,6822	-0,6793	-0,6764
6,95	-0,6469	-0,6439	-0,6409	-0,6380	-0,6351	-0,6322	-0,6293	-0,6264
7	-0,5969	-0,5939	-0,5909	-0,5880	-0,5851	-0,5822	-0,5793	-0,5764
7,05	-0,5469	-0,5439	-0,5409	-0,5380	-0,5351	-0,5322	-0,5293	-0,5264
7,1	-0,4969	-0,4939	-0,4909	-0,4880	-0,4851	-0,4822	-0,4793	-0,4764
7,15	-0,4469	-0,4439	-0,4409	-0,4380	-0,4351	-0,4322	-0,4293	-0,4264
7,2	-0,3969	-0,3939	-0,3909	-0,3880	-0,3851	-0,3822	-0,3793	-0,3764
7,25	-0,3469	-0,3439	-0,3409	-0,3380	-0,3351	-0,3322	-0,3293	-0,3264
7,3	-0,2969	-0,2939	-0,2909	-0,2880	-0,2851	-0,2822	-0,2793	-0,2764
7,35	-0,2469	-0,2439	-0,2409	-0,2380	-0,2351	-0,2322	-0,2293	-0,2264
7,4	-0,1969	-0,1939	-0,1909	-0,1880	-0,1851	-0,1822	-0,1793	-0,1764
7,45	-0,1469	-0,1439	-0,1409	-0,1380	-0,1351	-0,1322	-0,1293	-0,1264
7,5	-0,0969	-0,0939	-0,0909	-0,0880	-0,0851	-0,0822	-0,0793	-0,0764
7,55	-0,0469	-0,0439	-0,0409	-0,0380	-0,0351	-0,0322	-0,0293	-0,0264
7,6	0,0031	0,0061	0,0091	0,0120	0,0149	0,0178	0,0207	0,0236
7,65	0,0531	0,0561	0,0591	0,0620	0,0649	0,0678	0,0707	0,0736
7,7	0,1031	0,1061	0,1091	0,1120	0,1149	0,1178	0,1207	0,1236

Tabela E.9 - Variação do índice de Langelier em função do pH e do ciclo de concentração – TR02 (continuação)

CC	15,3	15,4	15,5	15,6	15,7	15,8	15,9	16
Ca (mg/L)	131,58	132,44	133,3	134,16	135,02	135,88	136,74	137,6
pHs	7,58	7,57	7,57	7,57	7,56	7,56	7,56	7,56
pH				IL				
6,55	-1,0236	-1,0207	-1,0179	-1,0151	-1,0123	-1,0096	-1,0068	-1,0041
6,6	-0,9736	-0,9707	-0,9679	-0,9651	-0,9623	-0,9596	-0,9568	-0,9541
6,65	-0,9236	-0,9207	-0,9179	-0,9151	-0,9123	-0,9096	-0,9068	-0,9041
6,7	-0,8736	-0,8707	-0,8679	-0,8651	-0,8623	-0,8596	-0,8568	-0,8541
6,75	-0,8236	-0,8207	-0,8179	-0,8151	-0,8123	-0,8096	-0,8068	-0,8041
6,8	-0,7736	-0,7707	-0,7679	-0,7651	-0,7623	-0,7596	-0,7568	-0,7541
6,85	-0,7236	-0,7207	-0,7179	-0,7151	-0,7123	-0,7096	-0,7068	-0,7041
6,9	-0,6736	-0,6707	-0,6679	-0,6651	-0,6623	-0,6596	-0,6568	-0,6541
6,95	-0,6236	-0,6207	-0,6179	-0,6151	-0,6123	-0,6096	-0,6068	-0,6041
7	-0,5736	-0,5707	-0,5679	-0,5651	-0,5623	-0,5596	-0,5568	-0,5541
7,05	-0,5236	-0,5207	-0,5179	-0,5151	-0,5123	-0,5096	-0,5068	-0,5041
7,1	-0,4736	-0,4707	-0,4679	-0,4651	-0,4623	-0,4596	-0,4568	-0,4541
7,15	-0,4236	-0,4207	-0,4179	-0,4151	-0,4123	-0,4096	-0,4068	-0,4041
7,2	-0,3736	-0,3707	-0,3679	-0,3651	-0,3623	-0,3596	-0,3568	-0,3541
7,25	-0,3236	-0,3207	-0,3179	-0,3151	-0,3123	-0,3096	-0,3068	-0,3041
7,3	-0,2736	-0,2707	-0,2679	-0,2651	-0,2623	-0,2596	-0,2568	-0,2541
7,35	-0,2236	-0,2207	-0,2179	-0,2151	-0,2123	-0,2096	-0,2068	-0,2041
7,4	-0,1736	-0,1707	-0,1679	-0,1651	-0,1623	-0,1596	-0,1568	-0,1541
7,45	-0,1236	-0,1207	-0,1179	-0,1151	-0,1123	-0,1096	-0,1068	-0,1041
7,5	-0,0736	-0,0707	-0,0679	-0,0651	-0,0623	-0,0596	-0,0568	-0,0541
7,55	-0,0236	-0,0207	-0,0179	-0,0151	-0,0123	-0,0096	-0,0068	-0,0041
7,6	0,0264	0,0293	0,0321	0,0349	0,0377	0,0404	0,0432	0,0459
7,65	0,0764	0,0793	0,0821	0,0849	0,0877	0,0904	0,0932	0,0959
7,7	0,1264	0,1293	0,1321	0,1349	0,1377	0,1404	0,1432	0,1459

Tabela E.10 - Variação do índice de Ryznar em função do pH e do ciclo de concentração – TR01

	CC							
	6,5	6,6	6,7	6,8	6,9	7	7,1	7,2
pH	IR							
6,12	9,7707	9,7574	9,7443	9,7315	9,7188	9,7063	9,6940	9,6818
6,17	9,7207	9,7074	9,6943	9,6815	9,6688	9,6563	9,6440	9,6318
6,22	9,6707	9,6574	9,6443	9,6315	9,6188	9,6063	9,5940	9,5818
6,27	9,6207	9,6074	9,5943	9,5815	9,5688	9,5563	9,5440	9,5318
6,32	9,5707	9,5574	9,5443	9,5315	9,5188	9,5063	9,4940	9,4818
6,37	9,5207	9,5074	9,4943	9,4815	9,4688	9,4563	9,4440	9,4318
6,42	9,4707	9,4574	9,4443	9,4315	9,4188	9,4063	9,3940	9,3818
6,47	9,4207	9,4074	9,3943	9,3815	9,3688	9,3563	9,3440	9,3318
6,52	9,3707	9,3574	9,3443	9,3315	9,3188	9,3063	9,2940	9,2818
6,57	9,3207	9,3074	9,2943	9,2815	9,2688	9,2563	9,2440	9,2318
6,62	9,2707	9,2574	9,2443	9,2315	9,2188	9,2063	9,1940	9,1818
6,67	9,2207	9,2074	9,1943	9,1815	9,1688	9,1563	9,1440	9,1318
6,72	9,1707	9,1574	9,1443	9,1315	9,1188	9,1063	9,0940	9,0818
6,77	9,1207	9,1074	9,0943	9,0815	9,0688	9,0563	9,0440	9,0318
6,82	9,0707	9,0574	9,0443	9,0315	9,0188	9,0063	8,9940	8,9818
6,87	9,0207	9,0074	8,9943	8,9815	8,9688	8,9563	8,9440	8,9318
6,92	8,9707	8,9574	8,9443	8,9315	8,9188	8,9063	8,8940	8,8818
6,97	8,9207	8,9074	8,8943	8,8815	8,8688	8,8563	8,8440	8,8318
7,02	8,8707	8,8574	8,8443	8,8315	8,8188	8,8063	8,7940	8,7818
7,07	8,8207	8,8074	8,7943	8,7815	8,7688	8,7563	8,7440	8,7318
7,12	8,7707	8,7574	8,7443	8,7315	8,7188	8,7063	8,6940	8,6818
7,17	8,7207	8,7074	8,6943	8,6815	8,6688	8,6563	8,6440	8,6318
7,22	8,6707	8,6574	8,6443	8,6315	8,6188	8,6063	8,5940	8,5818
7,27	8,6207	8,6074	8,5943	8,5815	8,5688	8,5563	8,5440	8,5318
7,32	8,5707	8,5574	8,5443	8,5315	8,5188	8,5063	8,4940	8,4818
7,37	8,5207	8,5074	8,4943	8,4815	8,4688	8,4563	8,4440	8,4318
7,42	8,4707	8,4574	8,4443	8,4315	8,4188	8,4063	8,3940	8,3818
7,47	8,4207	8,4074	8,3943	8,3815	8,3688	8,3563	8,3440	8,3318
7,52	8,3707	8,3574	8,3443	8,3315	8,3188	8,3063	8,2940	8,2818
7,57	8,3207	8,3074	8,2943	8,2815	8,2688	8,2563	8,2440	8,2318
7,62	8,2707	8,2574	8,2443	8,2315	8,2188	8,2063	8,1940	8,1818
7,67	8,2207	8,2074	8,1943	8,1815	8,1688	8,1563	8,1440	8,1318
7,72	8,1707	8,1574	8,1443	8,1315	8,1188	8,1063	8,0940	8,0818
7,77	8,1207	8,1074	8,0943	8,0815	8,0688	8,0563	8,0440	8,0318
7,82	8,0707	8,0574	8,0443	8,0315	8,0188	8,0063	7,9940	7,9818
7,87	8,0207	8,0074	7,9943	7,9815	7,9688	7,9563	7,9440	7,9318
7,92	7,9707	7,9574	7,9443	7,9315	7,9188	7,9063	7,8940	7,8818
7,97	7,9207	7,9074	7,8943	7,8815	7,8688	7,8563	7,8440	7,8318
8,02	7,8707	7,8574	7,8443	7,8315	7,8188	7,8063	7,7940	7,7818
8,07	7,8207	7,8074	7,7943	7,7815	7,7688	7,7563	7,7440	7,7318
8,12	7,7707	7,7574	7,7443	7,7315	7,7188	7,7063	7,6940	7,6818
8,17	7,7207	7,7074	7,6943	7,6815	7,6688	7,6563	7,6440	7,6318
8,22	7,6707	7,6574	7,6443	7,6315	7,6188	7,6063	7,5940	7,5818
8,27	7,6207	7,6074	7,5943	7,5815	7,5688	7,5563	7,5440	7,5318
8,32	7,5707	7,5574	7,5443	7,5315	7,5188	7,5063	7,4940	7,4818

Tabela E.10 - Variação do índice de Ryznar em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (Continuação)

	CC							
	6,5	6,6	6,7	6,8	6,9	7	7,1	7,2
pH	IR							
8,37	7,5207	7,5074	7,4943	7,4815	7,4688	7,4563	7,4440	7,4318
8,42	7,4707	7,4574	7,4443	7,4315	7,4188	7,4063	7,3940	7,3818
8,47	7,4207	7,4074	7,3943	7,3815	7,3688	7,3563	7,3440	7,3318
8,52	7,3707	7,3574	7,3443	7,3315	7,3188	7,3063	7,2940	7,2818
8,57	7,3207	7,3074	7,2943	7,2815	7,2688	7,2563	7,2440	7,2318
8,62	7,2707	7,2574	7,2443	7,2315	7,2188	7,2063	7,1940	7,1818

Tabela E.10 - Variação do índice de Ryznar em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

	CC							
	7,3	7,4	7,5	7,6	7,7	7,8	7,9	8
pH	IR							
6,12	9,6698	9,6580	9,6464	9,6349	9,6235	9,6123	9,6012	9,5903
6,17	9,6198	9,6080	9,5964	9,5849	9,5735	9,5623	9,5512	9,5403
6,22	9,5698	9,5580	9,5464	9,5349	9,5235	9,5123	9,5012	9,4903
6,27	9,5198	9,5080	9,4964	9,4849	9,4735	9,4623	9,4512	9,4403
6,32	9,4698	9,4580	9,4464	9,4349	9,4235	9,4123	9,4012	9,3903
6,37	9,4198	9,4080	9,3964	9,3849	9,3735	9,3623	9,3512	9,3403
6,42	9,3698	9,3580	9,3464	9,3349	9,3235	9,3123	9,3012	9,2903
6,47	9,3198	9,3080	9,2964	9,2849	9,2735	9,2623	9,2512	9,2403
6,52	9,2698	9,2580	9,2464	9,2349	9,2235	9,2123	9,2012	9,1903
6,57	9,2198	9,2080	9,1964	9,1849	9,1735	9,1623	9,1512	9,1403
6,62	9,1698	9,1580	9,1464	9,1349	9,1235	9,1123	9,1012	9,0903
6,67	9,1198	9,1080	9,0964	9,0849	9,0735	9,0623	9,0512	9,0403
6,72	9,0698	9,0580	9,0464	9,0349	9,0235	9,0123	9,0012	8,9903
6,77	9,0198	9,0080	8,9964	8,9849	8,9735	8,9623	8,9512	8,9403
6,82	8,9698	8,9580	8,9464	8,9349	8,9235	8,9123	8,9012	8,8903
6,87	8,9198	8,9080	8,8964	8,8849	8,8735	8,8623	8,8512	8,8403
6,92	8,8698	8,8580	8,8464	8,8349	8,8235	8,8123	8,8012	8,7903
6,97	8,8198	8,8080	8,7964	8,7849	8,7735	8,7623	8,7512	8,7403
7,02	8,7698	8,7580	8,7464	8,7349	8,7235	8,7123	8,7012	8,6903
7,07	8,7198	8,7080	8,6964	8,6849	8,6735	8,6623	8,6512	8,6403
7,12	8,6698	8,6580	8,6464	8,6349	8,6235	8,6123	8,6012	8,5903
7,17	8,6198	8,6080	8,5964	8,5849	8,5735	8,5623	8,5512	8,5403
7,22	8,5698	8,5580	8,5464	8,5349	8,5235	8,5123	8,5012	8,4903
7,27	8,5198	8,5080	8,4964	8,4849	8,4735	8,4623	8,4512	8,4403
7,32	8,4698	8,4580	8,4464	8,4349	8,4235	8,4123	8,4012	8,3903
7,37	8,4198	8,4080	8,3964	8,3849	8,3735	8,3623	8,3512	8,3403
7,42	8,3698	8,3580	8,3464	8,3349	8,3235	8,3123	8,3012	8,2903
7,47	8,3198	8,3080	8,2964	8,2849	8,2735	8,2623	8,2512	8,2403
7,52	8,2698	8,2580	8,2464	8,2349	8,2235	8,2123	8,2012	8,1903
7,57	8,2198	8,2080	8,1964	8,1849	8,1735	8,1623	8,1512	8,1403
7,62	8,1698	8,1580	8,1464	8,1349	8,1235	8,1123	8,1012	8,0903
7,67	8,1198	8,1080	8,0964	8,0849	8,0735	8,0623	8,0512	8,0403
7,72	8,0698	8,0580	8,0464	8,0349	8,0235	8,0123	8,0012	7,9903
7,77	8,0198	8,0080	7,9964	7,9849	7,9735	7,9623	7,9512	7,9403
7,82	7,9698	7,9580	7,9464	7,9349	7,9235	7,9123	7,9012	7,8903
7,87	7,9198	7,9080	7,8964	7,8849	7,8735	7,8623	7,8512	7,8403
7,92	7,8698	7,8580	7,8464	7,8349	7,8235	7,8123	7,8012	7,7903
7,97	7,8198	7,8080	7,7964	7,7849	7,7735	7,7623	7,7512	7,7403
8,02	7,7698	7,7580	7,7464	7,7349	7,7235	7,7123	7,7012	7,6903
8,07	7,7198	7,7080	7,6964	7,6849	7,6735	7,6623	7,6512	7,6403
8,12	7,6698	7,6580	7,6464	7,6349	7,6235	7,6123	7,6012	7,5903
8,17	7,6198	7,6080	7,5964	7,5849	7,5735	7,5623	7,5512	7,5403
8,22	7,5698	7,5580	7,5464	7,5349	7,5235	7,5123	7,5012	7,4903
8,27	7,5198	7,5080	7,4964	7,4849	7,4735	7,4623	7,4512	7,4403
8,32	7,4698	7,4580	7,4464	7,4349	7,4235	7,4123	7,4012	7,3903

Tabela E.10 - Variação do índice de Ryznar em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

	CC							
	7,3	7,4	7,5	7,6	7,7	7,8	7,9	8
pH	IR							
8,37	7,4198	7,4080	7,3964	7,3849	7,3735	7,3623	7,3512	7,3403
8,42	7,3698	7,3580	7,3464	7,3349	7,3235	7,3123	7,3012	7,2903
8,47	7,3198	7,3080	7,2964	7,2849	7,2735	7,2623	7,2512	7,2403
8,52	7,2698	7,2580	7,2464	7,2349	7,2235	7,2123	7,2012	7,1903
8,57	7,2198	7,2080	7,1964	7,1849	7,1735	7,1623	7,1512	7,1403
8,62	7,1698	7,1580	7,1464	7,1349	7,1235	7,1123	7,1012	7,0903

Tabela E.10 - Variação do índice de Ryznar em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

	CC							
	8,1	8,2	8,3	8,4	8,5	8,6	8,7	8,8
pH	IR							
6,12	9,5795	9,5689	9,5583	9,5479	9,5376	9,5275	9,5174	9,5075
6,17	9,5295	9,5189	9,5083	9,4979	9,4876	9,4775	9,4674	9,4575
6,22	9,4795	9,4689	9,4583	9,4479	9,4376	9,4275	9,4174	9,4075
6,27	9,4295	9,4189	9,4083	9,3979	9,3876	9,3775	9,3674	9,3575
6,32	9,3795	9,3689	9,3583	9,3479	9,3376	9,3275	9,3174	9,3075
6,37	9,3295	9,3189	9,3083	9,2979	9,2876	9,2775	9,2674	9,2575
6,42	9,2795	9,2689	9,2583	9,2479	9,2376	9,2275	9,2174	9,2075
6,47	9,2295	9,2189	9,2083	9,1979	9,1876	9,1775	9,1674	9,1575
6,52	9,1795	9,1689	9,1583	9,1479	9,1376	9,1275	9,1174	9,1075
6,57	9,1295	9,1189	9,1083	9,0979	9,0876	9,0775	9,0674	9,0575
6,62	9,0795	9,0689	9,0583	9,0479	9,0376	9,0275	9,0174	9,0075
6,67	9,0295	9,0189	9,0083	8,9979	8,9876	8,9775	8,9674	8,9575
6,72	8,9795	8,9689	8,9583	8,9479	8,9376	8,9275	8,9174	8,9075
6,77	8,9295	8,9189	8,9083	8,8979	8,8876	8,8775	8,8674	8,8575
6,82	8,8795	8,8689	8,8583	8,8479	8,8376	8,8275	8,8174	8,8075
6,87	8,8295	8,8189	8,8083	8,7979	8,7876	8,7775	8,7674	8,7575
6,92	8,7795	8,7689	8,7583	8,7479	8,7376	8,7275	8,7174	8,7075
6,97	8,7295	8,7189	8,7083	8,6979	8,6876	8,6775	8,6674	8,6575
7,02	8,6795	8,6689	8,6583	8,6479	8,6376	8,6275	8,6174	8,6075
7,07	8,6295	8,6189	8,6083	8,5979	8,5876	8,5775	8,5674	8,5575
7,12	8,5795	8,5689	8,5583	8,5479	8,5376	8,5275	8,5174	8,5075
7,17	8,5295	8,5189	8,5083	8,4979	8,4876	8,4775	8,4674	8,4575
7,22	8,4795	8,4689	8,4583	8,4479	8,4376	8,4275	8,4174	8,4075
7,27	8,4295	8,4189	8,4083	8,3979	8,3876	8,3775	8,3674	8,3575
7,32	8,3795	8,3689	8,3583	8,3479	8,3376	8,3275	8,3174	8,3075
7,37	8,3295	8,3189	8,3083	8,2979	8,2876	8,2775	8,2674	8,2575
7,42	8,2795	8,2689	8,2583	8,2479	8,2376	8,2275	8,2174	8,2075
7,47	8,2295	8,2189	8,2083	8,1979	8,1876	8,1775	8,1674	8,1575
7,52	8,1795	8,1689	8,1583	8,1479	8,1376	8,1275	8,1174	8,1075
7,57	8,1295	8,1189	8,1083	8,0979	8,0876	8,0775	8,0674	8,0575
7,62	8,0795	8,0689	8,0583	8,0479	8,0376	8,0275	8,0174	8,0075
7,67	8,0295	8,0189	8,0083	7,9979	7,9876	7,9775	7,9674	7,9575
7,72	7,9795	7,9689	7,9583	7,9479	7,9376	7,9275	7,9174	7,9075
7,77	7,9295	7,9189	7,9083	7,8979	7,8876	7,8775	7,8674	7,8575
7,82	7,8795	7,8689	7,8583	7,8479	7,8376	7,8275	7,8174	7,8075
7,87	7,8295	7,8189	7,8083	7,7979	7,7876	7,7775	7,7674	7,7575
7,92	7,7795	7,7689	7,7583	7,7479	7,7376	7,7275	7,7174	7,7075
7,97	7,7295	7,7189	7,7083	7,6979	7,6876	7,6775	7,6674	7,6575
8,02	7,6795	7,6689	7,6583	7,6479	7,6376	7,6275	7,6174	7,6075
8,07	7,6295	7,6189	7,6083	7,5979	7,5876	7,5775	7,5674	7,5575
8,12	7,5795	7,5689	7,5583	7,5479	7,5376	7,5275	7,5174	7,5075
8,17	7,5295	7,5189	7,5083	7,4979	7,4876	7,4775	7,4674	7,4575
8,22	7,4795	7,4689	7,4583	7,4479	7,4376	7,4275	7,4174	7,4075
8,27	7,4295	7,4189	7,4083	7,3979	7,3876	7,3775	7,3674	7,3575
8,32	7,3795	7,3689	7,3583	7,3479	7,3376	7,3275	7,3174	7,3075

Tabela E.10 - Variação do índice de Ryznar em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

	CC							
	8,1	8,2	8,3	8,4	8,5	8,6	8,7	8,8
pH	IR							
8,37	7,3295	7,3189	7,3083	7,2979	7,2876	7,2775	7,2674	7,2575
8,42	7,2795	7,2689	7,2583	7,2479	7,2376	7,2275	7,2174	7,2075
8,47	7,2295	7,2189	7,2083	7,1979	7,1876	7,1775	7,1674	7,1575
8,52	7,1795	7,1689	7,1583	7,1479	7,1376	7,1275	7,1174	7,1075
8,57	7,1295	7,1189	7,1083	7,0979	7,0876	7,0775	7,0674	7,0575
8,62	7,0795	7,0689	7,0583	7,0479	7,0376	7,0275	7,0174	7,0075

Tabela E.10 - Variação do índice de Ryznar em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

	CC							
	8,9	9	9,1	9,2	9,3	9,4	9,5	9,6
pH	IR							
6,12	9,4977	9,4880	9,4784	9,4689	9,4595	9,4502	9,4410	9,4319
6,17	9,4477	9,4380	9,4284	9,4189	9,4095	9,4002	9,3910	9,3819
6,22	9,3977	9,3880	9,3784	9,3689	9,3595	9,3502	9,3410	9,3319
6,27	9,3477	9,3380	9,3284	9,3189	9,3095	9,3002	9,2910	9,2819
6,32	9,2977	9,2880	9,2784	9,2689	9,2595	9,2502	9,2410	9,2319
6,37	9,2477	9,2380	9,2284	9,2189	9,2095	9,2002	9,1910	9,1819
6,42	9,1977	9,1880	9,1784	9,1689	9,1595	9,1502	9,1410	9,1319
6,47	9,1477	9,1380	9,1284	9,1189	9,1095	9,1002	9,0910	9,0819
6,52	9,0977	9,0880	9,0784	9,0689	9,0595	9,0502	9,0410	9,0319
6,57	9,0477	9,0380	9,0284	9,0189	9,0095	9,0002	8,9910	8,9819
6,62	8,9977	8,9880	8,9784	8,9689	8,9595	8,9502	8,9410	8,9319
6,67	8,9477	8,9380	8,9284	8,9189	8,9095	8,9002	8,8910	8,8819
6,72	8,8977	8,8880	8,8784	8,8689	8,8595	8,8502	8,8410	8,8319
6,77	8,8477	8,8380	8,8284	8,8189	8,8095	8,8002	8,7910	8,7819
6,82	8,7977	8,7880	8,7784	8,7689	8,7595	8,7502	8,7410	8,7319
6,87	8,7477	8,7380	8,7284	8,7189	8,7095	8,7002	8,6910	8,6819
6,92	8,6977	8,6880	8,6784	8,6689	8,6595	8,6502	8,6410	8,6319
6,97	8,6477	8,6380	8,6284	8,6189	8,6095	8,6002	8,5910	8,5819
7,02	8,5977	8,5880	8,5784	8,5689	8,5595	8,5502	8,5410	8,5319
7,07	8,5477	8,5380	8,5284	8,5189	8,5095	8,5002	8,4910	8,4819
7,12	8,4977	8,4880	8,4784	8,4689	8,4595	8,4502	8,4410	8,4319
7,17	8,4477	8,4380	8,4284	8,4189	8,4095	8,4002	8,3910	8,3819
7,22	8,3977	8,3880	8,3784	8,3689	8,3595	8,3502	8,3410	8,3319
7,27	8,3477	8,3380	8,3284	8,3189	8,3095	8,3002	8,2910	8,2819
7,32	8,2977	8,2880	8,2784	8,2689	8,2595	8,2502	8,2410	8,2319
7,37	8,2477	8,2380	8,2284	8,2189	8,2095	8,2002	8,1910	8,1819
7,42	8,1977	8,1880	8,1784	8,1689	8,1595	8,1502	8,1410	8,1319
7,47	8,1477	8,1380	8,1284	8,1189	8,1095	8,1002	8,0910	8,0819
7,52	8,0977	8,0880	8,0784	8,0689	8,0595	8,0502	8,0410	8,0319
7,57	8,0477	8,0380	8,0284	8,0189	8,0095	8,0002	7,9910	7,9819
7,62	7,9977	7,9880	7,9784	7,9689	7,9595	7,9502	7,9410	7,9319
7,67	7,9477	7,9380	7,9284	7,9189	7,9095	7,9002	7,8910	7,8819
7,72	7,8977	7,8880	7,8784	7,8689	7,8595	7,8502	7,8410	7,8319
7,77	7,8477	7,8380	7,8284	7,8189	7,8095	7,8002	7,7910	7,7819
7,82	7,7977	7,7880	7,7784	7,7689	7,7595	7,7502	7,7410	7,7319
7,87	7,7477	7,7380	7,7284	7,7189	7,7095	7,7002	7,6910	7,6819
7,92	7,6977	7,6880	7,6784	7,6689	7,6595	7,6502	7,6410	7,6319
7,97	7,6477	7,6380	7,6284	7,6189	7,6095	7,6002	7,5910	7,5819
8,02	7,5977	7,5880	7,5784	7,5689	7,5595	7,5502	7,5410	7,5319
8,07	7,5477	7,5380	7,5284	7,5189	7,5095	7,5002	7,4910	7,4819
8,12	7,4977	7,4880	7,4784	7,4689	7,4595	7,4502	7,4410	7,4319
8,17	7,4477	7,4380	7,4284	7,4189	7,4095	7,4002	7,3910	7,3819
8,22	7,3977	7,3880	7,3784	7,3689	7,3595	7,3502	7,3410	7,3319
8,27	7,3477	7,3380	7,3284	7,3189	7,3095	7,3002	7,2910	7,2819
8,32	7,2977	7,2880	7,2784	7,2689	7,2595	7,2502	7,2410	7,2319

Tabela E.10 - Variação do índice de Ryznar em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

	CC							
	8,9	9	9,1	9,2	9,3	9,4	9,5	9,6
pH	IR							
8,37	7,2477	7,2380	7,2284	7,2189	7,2095	7,2002	7,1910	7,1819
8,42	7,1977	7,1880	7,1784	7,1689	7,1595	7,1502	7,1410	7,1319
8,47	7,1477	7,1380	7,1284	7,1189	7,1095	7,1002	7,0910	7,0819
8,52	7,0977	7,0880	7,0784	7,0689	7,0595	7,0502	7,0410	7,0319
8,57	7,0477	7,0380	7,0284	7,0189	7,0095	7,0002	6,9910	6,9819
8,62	6,9977	6,9880	6,9784	6,9689	6,9595	6,9502	6,9410	6,9319

Tabela E.10 - Variação do índice de Ryznar em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

	CC							
	9,7	9,8	9,9	10	10,1	10,2	10,3	10,4
pH	IR							
6,12	9,4229	9,4140	9,4052	9,3965	9,3878	9,3793	9,3708	9,3624
6,17	9,3729	9,3640	9,3552	9,3465	9,3378	9,3293	9,3208	9,3124
6,22	9,3229	9,3140	9,3052	9,2965	9,2878	9,2793	9,2708	9,2624
6,27	9,2729	9,2640	9,2552	9,2465	9,2378	9,2293	9,2208	9,2124
6,32	9,2229	9,2140	9,2052	9,1965	9,1878	9,1793	9,1708	9,1624
6,37	9,1729	9,1640	9,1552	9,1465	9,1378	9,1293	9,1208	9,1124
6,42	9,1229	9,1140	9,1052	9,0965	9,0878	9,0793	9,0708	9,0624
6,47	9,0729	9,0640	9,0552	9,0465	9,0378	9,0293	9,0208	9,0124
6,52	9,0229	9,0140	9,0052	8,9965	8,9878	8,9793	8,9708	8,9624
6,57	8,9729	8,9640	8,9552	8,9465	8,9378	8,9293	8,9208	8,9124
6,62	8,9229	8,9140	8,9052	8,8965	8,8878	8,8793	8,8708	8,8624
6,67	8,8729	8,8640	8,8552	8,8465	8,8378	8,8293	8,8208	8,8124
6,72	8,8229	8,8140	8,8052	8,7965	8,7878	8,7793	8,7708	8,7624
6,77	8,7729	8,7640	8,7552	8,7465	8,7378	8,7293	8,7208	8,7124
6,82	8,7229	8,7140	8,7052	8,6965	8,6878	8,6793	8,6708	8,6624
6,87	8,6729	8,6640	8,6552	8,6465	8,6378	8,6293	8,6208	8,6124
6,92	8,6229	8,6140	8,6052	8,5965	8,5878	8,5793	8,5708	8,5624
6,97	8,5729	8,5640	8,5552	8,5465	8,5378	8,5293	8,5208	8,5124
7,02	8,5229	8,5140	8,5052	8,4965	8,4878	8,4793	8,4708	8,4624
7,07	8,4729	8,4640	8,4552	8,4465	8,4378	8,4293	8,4208	8,4124
7,12	8,4229	8,4140	8,4052	8,3965	8,3878	8,3793	8,3708	8,3624
7,17	8,3729	8,3640	8,3552	8,3465	8,3378	8,3293	8,3208	8,3124
7,22	8,3229	8,3140	8,3052	8,2965	8,2878	8,2793	8,2708	8,2624
7,27	8,2729	8,2640	8,2552	8,2465	8,2378	8,2293	8,2208	8,2124
7,32	8,2229	8,2140	8,2052	8,1965	8,1878	8,1793	8,1708	8,1624
7,37	8,1729	8,1640	8,1552	8,1465	8,1378	8,1293	8,1208	8,1124
7,42	8,1229	8,1140	8,1052	8,0965	8,0878	8,0793	8,0708	8,0624
7,47	8,0729	8,0640	8,0552	8,0465	8,0378	8,0293	8,0208	8,0124
7,52	8,0229	8,0140	8,0052	7,9965	7,9878	7,9793	7,9708	7,9624
7,57	7,9729	7,9640	7,9552	7,9465	7,9378	7,9293	7,9208	7,9124
7,62	7,9229	7,9140	7,9052	7,8965	7,8878	7,8793	7,8708	7,8624
7,67	7,8729	7,8640	7,8552	7,8465	7,8378	7,8293	7,8208	7,8124
7,72	7,8229	7,8140	7,8052	7,7965	7,7878	7,7793	7,7708	7,7624
7,77	7,7729	7,7640	7,7552	7,7465	7,7378	7,7293	7,7208	7,7124
7,82	7,7229	7,7140	7,7052	7,6965	7,6878	7,6793	7,6708	7,6624
7,87	7,6729	7,6640	7,6552	7,6465	7,6378	7,6293	7,6208	7,6124
7,92	7,6229	7,6140	7,6052	7,5965	7,5878	7,5793	7,5708	7,5624
7,97	7,5729	7,5640	7,5552	7,5465	7,5378	7,5293	7,5208	7,5124
8,02	7,5229	7,5140	7,5052	7,4965	7,4878	7,4793	7,4708	7,4624
8,07	7,4729	7,4640	7,4552	7,4465	7,4378	7,4293	7,4208	7,4124
8,12	7,4229	7,4140	7,4052	7,3965	7,3878	7,3793	7,3708	7,3624
8,17	7,3729	7,3640	7,3552	7,3465	7,3378	7,3293	7,3208	7,3124
8,22	7,3229	7,3140	7,3052	7,2965	7,2878	7,2793	7,2708	7,2624
8,27	7,2729	7,2640	7,2552	7,2465	7,2378	7,2293	7,2208	7,2124
8,32	7,2229	7,2140	7,2052	7,1965	7,1878	7,1793	7,1708	7,1624

Tabela E.10 - Variação do índice de Ryznar em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

	CC							
	9,7	9,8	9,9	10	10,1	10,2	10,3	10,4
pH	IR							
8,37	7,1729	7,1640	7,1552	7,1465	7,1378	7,1293	7,1208	7,1124
8,42	7,1229	7,1140	7,1052	7,0965	7,0878	7,0793	7,0708	7,0624
8,47	7,0729	7,0640	7,0552	7,0465	7,0378	7,0293	7,0208	7,0124
8,52	7,0229	7,0140	7,0052	6,9965	6,9878	6,9793	6,9708	6,9624
8,57	6,9729	6,9640	6,9552	6,9465	6,9378	6,9293	6,9208	6,9124
8,62	6,9229	6,9140	6,9052	6,8965	6,8878	6,8793	6,8708	6,8624

Tabela E.10 - Variação do índice de Ryznar em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

	CC							
	10,5	10,6	10,7	10,8	10,9	11	11,1	11,2
pH	IR							
6,12	9,3541	9,3459	9,3377	9,3296	9,3216	9,3137	9,3058	9,2981
6,17	9,3041	9,2959	9,2877	9,2796	9,2716	9,2637	9,2558	9,2481
6,22	9,2541	9,2459	9,2377	9,2296	9,2216	9,2137	9,2058	9,1981
6,27	9,2041	9,1959	9,1877	9,1796	9,1716	9,1637	9,1558	9,1481
6,32	9,1541	9,1459	9,1377	9,1296	9,1216	9,1137	9,1058	9,0981
6,37	9,1041	9,0959	9,0877	9,0796	9,0716	9,0637	9,0558	9,0481
6,42	9,0541	9,0459	9,0377	9,0296	9,0216	9,0137	9,0058	8,9981
6,47	9,0041	8,9959	8,9877	8,9796	8,9716	8,9637	8,9558	8,9481
6,52	8,9541	8,9459	8,9377	8,9296	8,9216	8,9137	8,9058	8,8981
6,57	8,9041	8,8959	8,8877	8,8796	8,8716	8,8637	8,8558	8,8481
6,62	8,8541	8,8459	8,8377	8,8296	8,8216	8,8137	8,8058	8,7981
6,67	8,8041	8,7959	8,7877	8,7796	8,7716	8,7637	8,7558	8,7481
6,72	8,7541	8,7459	8,7377	8,7296	8,7216	8,7137	8,7058	8,6981
6,77	8,7041	8,6959	8,6877	8,6796	8,6716	8,6637	8,6558	8,6481
6,82	8,6541	8,6459	8,6377	8,6296	8,6216	8,6137	8,6058	8,5981
6,87	8,6041	8,5959	8,5877	8,5796	8,5716	8,5637	8,5558	8,5481
6,92	8,5541	8,5459	8,5377	8,5296	8,5216	8,5137	8,5058	8,4981
6,97	8,5041	8,4959	8,4877	8,4796	8,4716	8,4637	8,4558	8,4481
7,02	8,4541	8,4459	8,4377	8,4296	8,4216	8,4137	8,4058	8,3981
7,07	8,4041	8,3959	8,3877	8,3796	8,3716	8,3637	8,3558	8,3481
7,12	8,3541	8,3459	8,3377	8,3296	8,3216	8,3137	8,3058	8,2981
7,17	8,3041	8,2959	8,2877	8,2796	8,2716	8,2637	8,2558	8,2481
7,22	8,2541	8,2459	8,2377	8,2296	8,2216	8,2137	8,2058	8,1981
7,27	8,2041	8,1959	8,1877	8,1796	8,1716	8,1637	8,1558	8,1481
7,32	8,1541	8,1459	8,1377	8,1296	8,1216	8,1137	8,1058	8,0981
7,37	8,1041	8,0959	8,0877	8,0796	8,0716	8,0637	8,0558	8,0481
7,42	8,0541	8,0459	8,0377	8,0296	8,0216	8,0137	8,0058	7,9981
7,47	8,0041	7,9959	7,9877	7,9796	7,9716	7,9637	7,9558	7,9481
7,52	7,9541	7,9459	7,9377	7,9296	7,9216	7,9137	7,9058	7,8981
7,57	7,9041	7,8959	7,8877	7,8796	7,8716	7,8637	7,8558	7,8481
7,62	7,8541	7,8459	7,8377	7,8296	7,8216	7,8137	7,8058	7,7981
7,67	7,8041	7,7959	7,7877	7,7796	7,7716	7,7637	7,7558	7,7481
7,72	7,7541	7,7459	7,7377	7,7296	7,7216	7,7137	7,7058	7,6981
7,77	7,7041	7,6959	7,6877	7,6796	7,6716	7,6637	7,6558	7,6481
7,82	7,6541	7,6459	7,6377	7,6296	7,6216	7,6137	7,6058	7,5981
7,87	7,6041	7,5959	7,5877	7,5796	7,5716	7,5637	7,5558	7,5481
7,92	7,5541	7,5459	7,5377	7,5296	7,5216	7,5137	7,5058	7,4981
7,97	7,5041	7,4959	7,4877	7,4796	7,4716	7,4637	7,4558	7,4481
8,02	7,4541	7,4459	7,4377	7,4296	7,4216	7,4137	7,4058	7,3981
8,07	7,4041	7,3959	7,3877	7,3796	7,3716	7,3637	7,3558	7,3481
8,12	7,3541	7,3459	7,3377	7,3296	7,3216	7,3137	7,3058	7,2981
8,17	7,3041	7,2959	7,2877	7,2796	7,2716	7,2637	7,2558	7,2481
8,22	7,2541	7,2459	7,2377	7,2296	7,2216	7,2137	7,2058	7,1981
8,27	7,2041	7,1959	7,1877	7,1796	7,1716	7,1637	7,1558	7,1481
8,32	7,1541	7,1459	7,1377	7,1296	7,1216	7,1137	7,1058	7,0981

Tabela E.10 - Variação do índice de Ryznar em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

	CC							
	10,5	10,6	10,7	10,8	10,9	11	11,1	11,2
pH	IR							
8,37	7,1041	7,0959	7,0877	7,0796	7,0716	7,0637	7,0558	7,0481
8,42	7,0541	7,0459	7,0377	7,0296	7,0216	7,0137	7,0058	6,9981
8,47	7,0041	6,9959	6,9877	6,9796	6,9716	6,9637	6,9558	6,9481
8,52	6,9541	6,9459	6,9377	6,9296	6,9216	6,9137	6,9058	6,8981
8,57	6,9041	6,8959	6,8877	6,8796	6,8716	6,8637	6,8558	6,8481
8,62	6,8541	6,8459	6,8377	6,8296	6,8216	6,8137	6,8058	6,7981

Tabela E.10 - Variação do índice de Ryznar em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

	CC							
	11,3	11,4	11,5	11,6	11,7	11,8	11,9	12
pH	IR							
6,12	9,2903	9,2827	9,2751	9,2676	9,2601	9,2527	9,2454	9,2381
6,17	9,2403	9,2327	9,2251	9,2176	9,2101	9,2027	9,1954	9,1881
6,22	9,1903	9,1827	9,1751	9,1676	9,1601	9,1527	9,1454	9,1381
6,27	9,1403	9,1327	9,1251	9,1176	9,1101	9,1027	9,0954	9,0881
6,32	9,0903	9,0827	9,0751	9,0676	9,0601	9,0527	9,0454	9,0381
6,37	9,0403	9,0327	9,0251	9,0176	9,0101	9,0027	8,9954	8,9881
6,42	8,9903	8,9827	8,9751	8,9676	8,9601	8,9527	8,9454	8,9381
6,47	8,9403	8,9327	8,9251	8,9176	8,9101	8,9027	8,8954	8,8881
6,52	8,8903	8,8827	8,8751	8,8676	8,8601	8,8527	8,8454	8,8381
6,57	8,8403	8,8327	8,8251	8,8176	8,8101	8,8027	8,7954	8,7881
6,62	8,7903	8,7827	8,7751	8,7676	8,7601	8,7527	8,7454	8,7381
6,67	8,7403	8,7327	8,7251	8,7176	8,7101	8,7027	8,6954	8,6881
6,72	8,6903	8,6827	8,6751	8,6676	8,6601	8,6527	8,6454	8,6381
6,77	8,6403	8,6327	8,6251	8,6176	8,6101	8,6027	8,5954	8,5881
6,82	8,5903	8,5827	8,5751	8,5676	8,5601	8,5527	8,5454	8,5381
6,87	8,5403	8,5327	8,5251	8,5176	8,5101	8,5027	8,4954	8,4881
6,92	8,4903	8,4827	8,4751	8,4676	8,4601	8,4527	8,4454	8,4381
6,97	8,4403	8,4327	8,4251	8,4176	8,4101	8,4027	8,3954	8,3881
7,02	8,3903	8,3827	8,3751	8,3676	8,3601	8,3527	8,3454	8,3381
7,07	8,3403	8,3327	8,3251	8,3176	8,3101	8,3027	8,2954	8,2881
7,12	8,2903	8,2827	8,2751	8,2676	8,2601	8,2527	8,2454	8,2381
7,17	8,2403	8,2327	8,2251	8,2176	8,2101	8,2027	8,1954	8,1881
7,22	8,1903	8,1827	8,1751	8,1676	8,1601	8,1527	8,1454	8,1381
7,27	8,1403	8,1327	8,1251	8,1176	8,1101	8,1027	8,0954	8,0881
7,32	8,0903	8,0827	8,0751	8,0676	8,0601	8,0527	8,0454	8,0381
7,37	8,0403	8,0327	8,0251	8,0176	8,0101	8,0027	7,9954	7,9881
7,42	7,9903	7,9827	7,9751	7,9676	7,9601	7,9527	7,9454	7,9381
7,47	7,9403	7,9327	7,9251	7,9176	7,9101	7,9027	7,8954	7,8881
7,52	7,8903	7,8827	7,8751	7,8676	7,8601	7,8527	7,8454	7,8381
7,57	7,8403	7,8327	7,8251	7,8176	7,8101	7,8027	7,7954	7,7881
7,62	7,7903	7,7827	7,7751	7,7676	7,7601	7,7527	7,7454	7,7381
7,67	7,7403	7,7327	7,7251	7,7176	7,7101	7,7027	7,6954	7,6881
7,72	7,6903	7,6827	7,6751	7,6676	7,6601	7,6527	7,6454	7,6381
7,77	7,6403	7,6327	7,6251	7,6176	7,6101	7,6027	7,5954	7,5881
7,82	7,5903	7,5827	7,5751	7,5676	7,5601	7,5527	7,5454	7,5381
7,87	7,5403	7,5327	7,5251	7,5176	7,5101	7,5027	7,4954	7,4881
7,92	7,4903	7,4827	7,4751	7,4676	7,4601	7,4527	7,4454	7,4381
7,97	7,4403	7,4327	7,4251	7,4176	7,4101	7,4027	7,3954	7,3881
8,02	7,3903	7,3827	7,3751	7,3676	7,3601	7,3527	7,3454	7,3381
8,07	7,3403	7,3327	7,3251	7,3176	7,3101	7,3027	7,2954	7,2881
8,12	7,2903	7,2827	7,2751	7,2676	7,2601	7,2527	7,2454	7,2381
8,17	7,2403	7,2327	7,2251	7,2176	7,2101	7,2027	7,1954	7,1881
8,22	7,1903	7,1827	7,1751	7,1676	7,1601	7,1527	7,1454	7,1381
8,27	7,1403	7,1327	7,1251	7,1176	7,1101	7,1027	7,0954	7,0881
8,32	7,0903	7,0827	7,0751	7,0676	7,0601	7,0527	7,0454	7,0381

Tabela E.10 - Variação do índice de Ryznar em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

	CC							
	11,3	11,4	11,5	11,6	11,7	11,8	11,9	12
pH	IR							
8,37	7,0403	7,0327	7,0251	7,0176	7,0101	7,0027	6,9954	6,9881
8,42	6,9903	6,9827	6,9751	6,9676	6,9601	6,9527	6,9454	6,9381
8,47	6,9403	6,9327	6,9251	6,9176	6,9101	6,9027	6,8954	6,8881
8,52	6,8903	6,8827	6,8751	6,8676	6,8601	6,8527	6,8454	6,8381
8,57	6,8403	6,8327	6,8251	6,8176	6,8101	6,8027	6,7954	6,7881
8,62	6,7903	6,7827	6,7751	6,7676	6,7601	6,7527	6,7454	6,7381

Tabela E.10 - Variação do índice de Ryznar em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

	CC							
	12,1	12,2	12,3	12,4	12,5	12,6	12,7	12,8
pH	IR							
6,12	9,2309	9,2238	9,2167	9,2096	9,2027	9,1957	9,1889	9,1821
6,17	9,1809	9,1738	9,1667	9,1596	9,1527	9,1457	9,1389	9,1321
6,22	9,1309	9,1238	9,1167	9,1096	9,1027	9,0957	9,0889	9,0821
6,27	9,0809	9,0738	9,0667	9,0596	9,0527	9,0457	9,0389	9,0321
6,32	9,0309	9,0238	9,0167	9,0096	9,0027	8,9957	8,9889	8,9821
6,37	8,9809	8,9738	8,9667	8,9596	8,9527	8,9457	8,9389	8,9321
6,42	8,9309	8,9238	8,9167	8,9096	8,9027	8,8957	8,8889	8,8821
6,47	8,8809	8,8738	8,8667	8,8596	8,8527	8,8457	8,8389	8,8321
6,52	8,8309	8,8238	8,8167	8,8096	8,8027	8,7957	8,7889	8,7821
6,57	8,7809	8,7738	8,7667	8,7596	8,7527	8,7457	8,7389	8,7321
6,62	8,7309	8,7238	8,7167	8,7096	8,7027	8,6957	8,6889	8,6821
6,67	8,6809	8,6738	8,6667	8,6596	8,6527	8,6457	8,6389	8,6321
6,72	8,6309	8,6238	8,6167	8,6096	8,6027	8,5957	8,5889	8,5821
6,77	8,5809	8,5738	8,5667	8,5596	8,5527	8,5457	8,5389	8,5321
6,82	8,5309	8,5238	8,5167	8,5096	8,5027	8,4957	8,4889	8,4821
6,87	8,4809	8,4738	8,4667	8,4596	8,4527	8,4457	8,4389	8,4321
6,92	8,4309	8,4238	8,4167	8,4096	8,4027	8,3957	8,3889	8,3821
6,97	8,3809	8,3738	8,3667	8,3596	8,3527	8,3457	8,3389	8,3321
7,02	8,3309	8,3238	8,3167	8,3096	8,3027	8,2957	8,2889	8,2821
7,07	8,2809	8,2738	8,2667	8,2596	8,2527	8,2457	8,2389	8,2321
7,12	8,2309	8,2238	8,2167	8,2096	8,2027	8,1957	8,1889	8,1821
7,17	8,1809	8,1738	8,1667	8,1596	8,1527	8,1457	8,1389	8,1321
7,22	8,1309	8,1238	8,1167	8,1096	8,1027	8,0957	8,0889	8,0821
7,27	8,0809	8,0738	8,0667	8,0596	8,0527	8,0457	8,0389	8,0321
7,32	8,0309	8,0238	8,0167	8,0096	8,0027	7,9957	7,9889	7,9821
7,37	7,9809	7,9738	7,9667	7,9596	7,9527	7,9457	7,9389	7,9321
7,42	7,9309	7,9238	7,9167	7,9096	7,9027	7,8957	7,8889	7,8821
7,47	7,8809	7,8738	7,8667	7,8596	7,8527	7,8457	7,8389	7,8321
7,52	7,8309	7,8238	7,8167	7,8096	7,8027	7,7957	7,7889	7,7821
7,57	7,7809	7,7738	7,7667	7,7596	7,7527	7,7457	7,7389	7,7321
7,62	7,7309	7,7238	7,7167	7,7096	7,7027	7,6957	7,6889	7,6821
7,67	7,6809	7,6738	7,6667	7,6596	7,6527	7,6457	7,6389	7,6321
7,72	7,6309	7,6238	7,6167	7,6096	7,6027	7,5957	7,5889	7,5821
7,77	7,5809	7,5738	7,5667	7,5596	7,5527	7,5457	7,5389	7,5321
7,82	7,5309	7,5238	7,5167	7,5096	7,5027	7,4957	7,4889	7,4821
7,87	7,4809	7,4738	7,4667	7,4596	7,4527	7,4457	7,4389	7,4321
7,92	7,4309	7,4238	7,4167	7,4096	7,4027	7,3957	7,3889	7,3821
7,97	7,3809	7,3738	7,3667	7,3596	7,3527	7,3457	7,3389	7,3321
8,02	7,3309	7,3238	7,3167	7,3096	7,3027	7,2957	7,2889	7,2821
8,07	7,2809	7,2738	7,2667	7,2596	7,2527	7,2457	7,2389	7,2321
8,12	7,2309	7,2238	7,2167	7,2096	7,2027	7,1957	7,1889	7,1821
8,17	7,1809	7,1738	7,1667	7,1596	7,1527	7,1457	7,1389	7,1321
8,22	7,1309	7,1238	7,1167	7,1096	7,1027	7,0957	7,0889	7,0821
8,27	7,0809	7,0738	7,0667	7,0596	7,0527	7,0457	7,0389	7,0321
8,32	7,0309	7,0238	7,0167	7,0096	7,0027	6,9957	6,9889	6,9821

Tabela E.10 - Variação do índice de Ryznar em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

	CC							
	12,1	12,2	12,3	12,4	12,5	12,6	12,7	12,8
pH	IR							
8,37	6,9809	6,9738	6,9667	6,9596	6,9527	6,9457	6,9389	6,9321
8,42	6,9309	6,9238	6,9167	6,9096	6,9027	6,8957	6,8889	6,8821
8,47	6,8809	6,8738	6,8667	6,8596	6,8527	6,8457	6,8389	6,8321
8,52	6,8309	6,8238	6,8167	6,8096	6,8027	6,7957	6,7889	6,7821
8,57	6,7809	6,7738	6,7667	6,7596	6,7527	6,7457	6,7389	6,7321
8,62	6,7309	6,7238	6,7167	6,7096	6,7027	6,6957	6,6889	6,6821

Tabela E.10 - Variação do índice de Ryznar em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

	CC							
	12,9	13	13,1	13,2	13,3	13,4	13,5	13,6
pH	IR							
6,12	9,1753	9,1686	9,1619	9,1553	9,1488	9,1423	9,1358	9,1294
6,17	9,1253	9,1186	9,1119	9,1053	9,0988	9,0923	9,0858	9,0794
6,22	9,0753	9,0686	9,0619	9,0553	9,0488	9,0423	9,0358	9,0294
6,27	9,0253	9,0186	9,0119	9,0053	8,9988	8,9923	8,9858	8,9794
6,32	8,9753	8,9686	8,9619	8,9553	8,9488	8,9423	8,9358	8,9294
6,37	8,9253	8,9186	8,9119	8,9053	8,8988	8,8923	8,8858	8,8794
6,42	8,8753	8,8686	8,8619	8,8553	8,8488	8,8423	8,8358	8,8294
6,47	8,8253	8,8186	8,8119	8,8053	8,7988	8,7923	8,7858	8,7794
6,52	8,7753	8,7686	8,7619	8,7553	8,7488	8,7423	8,7358	8,7294
6,57	8,7253	8,7186	8,7119	8,7053	8,6988	8,6923	8,6858	8,6794
6,62	8,6753	8,6686	8,6619	8,6553	8,6488	8,6423	8,6358	8,6294
6,67	8,6253	8,6186	8,6119	8,6053	8,5988	8,5923	8,5858	8,5794
6,72	8,5753	8,5686	8,5619	8,5553	8,5488	8,5423	8,5358	8,5294
6,77	8,5253	8,5186	8,5119	8,5053	8,4988	8,4923	8,4858	8,4794
6,82	8,4753	8,4686	8,4619	8,4553	8,4488	8,4423	8,4358	8,4294
6,87	8,4253	8,4186	8,4119	8,4053	8,3988	8,3923	8,3858	8,3794
6,92	8,3753	8,3686	8,3619	8,3553	8,3488	8,3423	8,3358	8,3294
6,97	8,3253	8,3186	8,3119	8,3053	8,2988	8,2923	8,2858	8,2794
7,02	8,2753	8,2686	8,2619	8,2553	8,2488	8,2423	8,2358	8,2294
7,07	8,2253	8,2186	8,2119	8,2053	8,1988	8,1923	8,1858	8,1794
7,12	8,1753	8,1686	8,1619	8,1553	8,1488	8,1423	8,1358	8,1294
7,17	8,1253	8,1186	8,1119	8,1053	8,0988	8,0923	8,0858	8,0794
7,22	8,0753	8,0686	8,0619	8,0553	8,0488	8,0423	8,0358	8,0294
7,27	8,0253	8,0186	8,0119	8,0053	7,9988	7,9923	7,9858	7,9794
7,32	7,9753	7,9686	7,9619	7,9553	7,9488	7,9423	7,9358	7,9294
7,37	7,9253	7,9186	7,9119	7,9053	7,8988	7,8923	7,8858	7,8794
7,42	7,8753	7,8686	7,8619	7,8553	7,8488	7,8423	7,8358	7,8294
7,47	7,8253	7,8186	7,8119	7,8053	7,7988	7,7923	7,7858	7,7794
7,52	7,7753	7,7686	7,7619	7,7553	7,7488	7,7423	7,7358	7,7294
7,57	7,7253	7,7186	7,7119	7,7053	7,6988	7,6923	7,6858	7,6794
7,62	7,6753	7,6686	7,6619	7,6553	7,6488	7,6423	7,6358	7,6294
7,67	7,6253	7,6186	7,6119	7,6053	7,5988	7,5923	7,5858	7,5794
7,72	7,5753	7,5686	7,5619	7,5553	7,5488	7,5423	7,5358	7,5294
7,77	7,5253	7,5186	7,5119	7,5053	7,4988	7,4923	7,4858	7,4794
7,82	7,4753	7,4686	7,4619	7,4553	7,4488	7,4423	7,4358	7,4294
7,87	7,4253	7,4186	7,4119	7,4053	7,3988	7,3923	7,3858	7,3794
7,92	7,3753	7,3686	7,3619	7,3553	7,3488	7,3423	7,3358	7,3294
7,97	7,3253	7,3186	7,3119	7,3053	7,2988	7,2923	7,2858	7,2794
8,02	7,2753	7,2686	7,2619	7,2553	7,2488	7,2423	7,2358	7,2294
8,07	7,2253	7,2186	7,2119	7,2053	7,1988	7,1923	7,1858	7,1794
8,12	7,1753	7,1686	7,1619	7,1553	7,1488	7,1423	7,1358	7,1294
8,17	7,1253	7,1186	7,1119	7,1053	7,0988	7,0923	7,0858	7,0794
8,22	7,0753	7,0686	7,0619	7,0553	7,0488	7,0423	7,0358	7,0294
8,27	7,0253	7,0186	7,0119	7,0053	6,9988	6,9923	6,9858	6,9794
8,32	6,9753	6,9686	6,9619	6,9553	6,9488	6,9423	6,9358	6,9294

Tabela E.10 - Variação do índice de Ryznar em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

	CC							
	12,9	13	13,1	13,2	13,3	13,4	13,5	13,6
pH	IR							
8,37	6,9253	6,9186	6,9119	6,9053	6,8988	6,8923	6,8858	6,8794
8,42	6,8753	6,8686	6,8619	6,8553	6,8488	6,8423	6,8358	6,8294
8,47	6,8253	6,8186	6,8119	6,8053	6,7988	6,7923	6,7858	6,7794
8,52	6,7753	6,7686	6,7619	6,7553	6,7488	6,7423	6,7358	6,7294
8,57	6,7253	6,7186	6,7119	6,7053	6,6988	6,6923	6,6858	6,6794
8,62	6,6753	6,6686	6,6619	6,6553	6,6488	6,6423	6,6358	6,6294

Tabela E.10 - Variação do índice de Ryznar em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

	CC							
	13,7	13,8	13,9	14	14,1	14,2	14,3	14,4
pH	IR							
6,12	9,1230	9,1167	9,1105	9,1042	9,0980	9,0919	9,0858	9,0798
6,17	9,0730	9,0667	9,0605	9,0542	9,0480	9,0419	9,0358	9,0298
6,22	9,0230	9,0167	9,0105	9,0042	8,9980	8,9919	8,9858	8,9798
6,27	8,9730	8,9667	8,9605	8,9542	8,9480	8,9419	8,9358	8,9298
6,32	8,9230	8,9167	8,9105	8,9042	8,8980	8,8919	8,8858	8,8798
6,37	8,8730	8,8667	8,8605	8,8542	8,8480	8,8419	8,8358	8,8298
6,42	8,8230	8,8167	8,8105	8,8042	8,7980	8,7919	8,7858	8,7798
6,47	8,7730	8,7667	8,7605	8,7542	8,7480	8,7419	8,7358	8,7298
6,52	8,7230	8,7167	8,7105	8,7042	8,6980	8,6919	8,6858	8,6798
6,57	8,6730	8,6667	8,6605	8,6542	8,6480	8,6419	8,6358	8,6298
6,62	8,6230	8,6167	8,6105	8,6042	8,5980	8,5919	8,5858	8,5798
6,67	8,5730	8,5667	8,5605	8,5542	8,5480	8,5419	8,5358	8,5298
6,72	8,5230	8,5167	8,5105	8,5042	8,4980	8,4919	8,4858	8,4798
6,77	8,4730	8,4667	8,4605	8,4542	8,4480	8,4419	8,4358	8,4298
6,82	8,4230	8,4167	8,4105	8,4042	8,3980	8,3919	8,3858	8,3798
6,87	8,3730	8,3667	8,3605	8,3542	8,3480	8,3419	8,3358	8,3298
6,92	8,3230	8,3167	8,3105	8,3042	8,2980	8,2919	8,2858	8,2798
6,97	8,2730	8,2667	8,2605	8,2542	8,2480	8,2419	8,2358	8,2298
7,02	8,2230	8,2167	8,2105	8,2042	8,1980	8,1919	8,1858	8,1798
7,07	8,1730	8,1667	8,1605	8,1542	8,1480	8,1419	8,1358	8,1298
7,12	8,1230	8,1167	8,1105	8,1042	8,0980	8,0919	8,0858	8,0798
7,17	8,0730	8,0667	8,0605	8,0542	8,0480	8,0419	8,0358	8,0298
7,22	8,0230	8,0167	8,0105	8,0042	7,9980	7,9919	7,9858	7,9798
7,27	7,9730	7,9667	7,9605	7,9542	7,9480	7,9419	7,9358	7,9298
7,32	7,9230	7,9167	7,9105	7,9042	7,8980	7,8919	7,8858	7,8798
7,37	7,8730	7,8667	7,8605	7,8542	7,8480	7,8419	7,8358	7,8298
7,42	7,8230	7,8167	7,8105	7,8042	7,7980	7,7919	7,7858	7,7798
7,47	7,7730	7,7667	7,7605	7,7542	7,7480	7,7419	7,7358	7,7298
7,52	7,7230	7,7167	7,7105	7,7042	7,6980	7,6919	7,6858	7,6798
7,57	7,6730	7,6667	7,6605	7,6542	7,6480	7,6419	7,6358	7,6298
7,62	7,6230	7,6167	7,6105	7,6042	7,5980	7,5919	7,5858	7,5798
7,67	7,5730	7,5667	7,5605	7,5542	7,5480	7,5419	7,5358	7,5298
7,72	7,5230	7,5167	7,5105	7,5042	7,4980	7,4919	7,4858	7,4798
7,77	7,4730	7,4667	7,4605	7,4542	7,4480	7,4419	7,4358	7,4298
7,82	7,4230	7,4167	7,4105	7,4042	7,3980	7,3919	7,3858	7,3798
7,87	7,3730	7,3667	7,3605	7,3542	7,3480	7,3419	7,3358	7,3298
7,92	7,3230	7,3167	7,3105	7,3042	7,2980	7,2919	7,2858	7,2798
7,97	7,2730	7,2667	7,2605	7,2542	7,2480	7,2419	7,2358	7,2298
8,02	7,2230	7,2167	7,2105	7,2042	7,1980	7,1919	7,1858	7,1798
8,07	7,1730	7,1667	7,1605	7,1542	7,1480	7,1419	7,1358	7,1298
8,12	7,1230	7,1167	7,1105	7,1042	7,0980	7,0919	7,0858	7,0798
8,17	7,0730	7,0667	7,0605	7,0542	7,0480	7,0419	7,0358	7,0298
8,22	7,0230	7,0167	7,0105	7,0042	6,9980	6,9919	6,9858	6,9798
8,27	6,9730	6,9667	6,9605	6,9542	6,9480	6,9419	6,9358	6,9298
8,32	6,9230	6,9167	6,9105	6,9042	6,8980	6,8919	6,8858	6,8798

Tabela E.10 - Variação do índice de Ryznar em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

	CC							
	13,7	13,8	13,9	14	14,1	14,2	14,3	14,4
pH	IR							
8,37	6,8730	6,8667	6,8605	6,8542	6,8480	6,8419	6,8358	6,8298
8,42	6,8230	6,8167	6,8105	6,8042	6,7980	6,7919	6,7858	6,7798
8,47	6,7730	6,7667	6,7605	6,7542	6,7480	6,7419	6,7358	6,7298
8,52	6,7230	6,7167	6,7105	6,7042	6,6980	6,6919	6,6858	6,6798
8,57	6,6730	6,6667	6,6605	6,6542	6,6480	6,6419	6,6358	6,6298
8,62	6,6230	6,6167	6,6105	6,6042	6,5980	6,5919	6,5858	6,5798

Tabela E.10 - Variação do índice de Ryznar em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

	CC							
	14,5	14,6	14,7	14,8	14,9	15	15,1	15,2
pH	IR							
6,12	9,0738	9,0678	9,0619	9,0560	9,0501	9,0443	9,0385	9,0328
6,17	9,0238	9,0178	9,0119	9,0060	9,0001	8,9943	8,9885	8,9828
6,22	8,9738	8,9678	8,9619	8,9560	8,9501	8,9443	8,9385	8,9328
6,27	8,9238	8,9178	8,9119	8,9060	8,9001	8,8943	8,8885	8,8828
6,32	8,8738	8,8678	8,8619	8,8560	8,8501	8,8443	8,8385	8,8328
6,37	8,8238	8,8178	8,8119	8,8060	8,8001	8,7943	8,7885	8,7828
6,42	8,7738	8,7678	8,7619	8,7560	8,7501	8,7443	8,7385	8,7328
6,47	8,7238	8,7178	8,7119	8,7060	8,7001	8,6943	8,6885	8,6828
6,52	8,6738	8,6678	8,6619	8,6560	8,6501	8,6443	8,6385	8,6328
6,57	8,6238	8,6178	8,6119	8,6060	8,6001	8,5943	8,5885	8,5828
6,62	8,5738	8,5678	8,5619	8,5560	8,5501	8,5443	8,5385	8,5328
6,67	8,5238	8,5178	8,5119	8,5060	8,5001	8,4943	8,4885	8,4828
6,72	8,4738	8,4678	8,4619	8,4560	8,4501	8,4443	8,4385	8,4328
6,77	8,4238	8,4178	8,4119	8,4060	8,4001	8,3943	8,3885	8,3828
6,82	8,3738	8,3678	8,3619	8,3560	8,3501	8,3443	8,3385	8,3328
6,87	8,3238	8,3178	8,3119	8,3060	8,3001	8,2943	8,2885	8,2828
6,92	8,2738	8,2678	8,2619	8,2560	8,2501	8,2443	8,2385	8,2328
6,97	8,2238	8,2178	8,2119	8,2060	8,2001	8,1943	8,1885	8,1828
7,02	8,1738	8,1678	8,1619	8,1560	8,1501	8,1443	8,1385	8,1328
7,07	8,1238	8,1178	8,1119	8,1060	8,1001	8,0943	8,0885	8,0828
7,12	8,0738	8,0678	8,0619	8,0560	8,0501	8,0443	8,0385	8,0328
7,17	8,0238	8,0178	8,0119	8,0060	8,0001	7,9943	7,9885	7,9828
7,22	7,9738	7,9678	7,9619	7,9560	7,9501	7,9443	7,9385	7,9328
7,27	7,9238	7,9178	7,9119	7,9060	7,9001	7,8943	7,8885	7,8828
7,32	7,8738	7,8678	7,8619	7,8560	7,8501	7,8443	7,8385	7,8328
7,37	7,8238	7,8178	7,8119	7,8060	7,8001	7,7943	7,7885	7,7828
7,42	7,7738	7,7678	7,7619	7,7560	7,7501	7,7443	7,7385	7,7328
7,47	7,7238	7,7178	7,7119	7,7060	7,7001	7,6943	7,6885	7,6828
7,52	7,6738	7,6678	7,6619	7,6560	7,6501	7,6443	7,6385	7,6328
7,57	7,6238	7,6178	7,6119	7,6060	7,6001	7,5943	7,5885	7,5828
7,62	7,5738	7,5678	7,5619	7,5560	7,5501	7,5443	7,5385	7,5328
7,67	7,5238	7,5178	7,5119	7,5060	7,5001	7,4943	7,4885	7,4828
7,72	7,4738	7,4678	7,4619	7,4560	7,4501	7,4443	7,4385	7,4328
7,77	7,4238	7,4178	7,4119	7,4060	7,4001	7,3943	7,3885	7,3828
7,82	7,3738	7,3678	7,3619	7,3560	7,3501	7,3443	7,3385	7,3328
7,87	7,3238	7,3178	7,3119	7,3060	7,3001	7,2943	7,2885	7,2828
7,92	7,2738	7,2678	7,2619	7,2560	7,2501	7,2443	7,2385	7,2328
7,97	7,2238	7,2178	7,2119	7,2060	7,2001	7,1943	7,1885	7,1828
8,02	7,1738	7,1678	7,1619	7,1560	7,1501	7,1443	7,1385	7,1328
8,07	7,1238	7,1178	7,1119	7,1060	7,1001	7,0943	7,0885	7,0828
8,12	7,0738	7,0678	7,0619	7,0560	7,0501	7,0443	7,0385	7,0328
8,17	7,0238	7,0178	7,0119	7,0060	7,0001	6,9943	6,9885	6,9828
8,22	6,9738	6,9678	6,9619	6,9560	6,9501	6,9443	6,9385	6,9328
8,27	6,9238	6,9178	6,9119	6,9060	6,9001	6,8943	6,8885	6,8828
8,32	6,8738	6,8678	6,8619	6,8560	6,8501	6,8443	6,8385	6,8328

Tabela E.10 - Variação do índice de Ryznar em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

	CC							
	14,5	14,6	14,7	14,8	14,9	15	15,1	15,2
pH	IR							
8,37	6,8238	6,8178	6,8119	6,8060	6,8001	6,7943	6,7885	6,7828
8,42	6,7738	6,7678	6,7619	6,7560	6,7501	6,7443	6,7385	6,7328
8,47	6,7238	6,7178	6,7119	6,7060	6,7001	6,6943	6,6885	6,6828
8,52	6,6738	6,6678	6,6619	6,6560	6,6501	6,6443	6,6385	6,6328
8,57	6,6238	6,6178	6,6119	6,6060	6,6001	6,5943	6,5885	6,5828
8,62	6,5738	6,5678	6,5619	6,5560	6,5501	6,5443	6,5385	6,5328

Tabela E.10 - Variação do índice de Ryznar em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

	CC							
	15,3	15,4	15,5	15,6	15,7	15,8	15,9	16
pH	IR							
6,12	9,0271	9,0214	9,0158	9,0102	9,0047	8,9992	8,9937	8,9882
6,17	8,9771	8,9714	8,9658	8,9602	8,9547	8,9492	8,9437	8,9382
6,22	8,9271	8,9214	8,9158	8,9102	8,9047	8,8992	8,8937	8,8882
6,27	8,8771	8,8714	8,8658	8,8602	8,8547	8,8492	8,8437	8,8382
6,32	8,8271	8,8214	8,8158	8,8102	8,8047	8,7992	8,7937	8,7882
6,37	8,7771	8,7714	8,7658	8,7602	8,7547	8,7492	8,7437	8,7382
6,42	8,7271	8,7214	8,7158	8,7102	8,7047	8,6992	8,6937	8,6882
6,47	8,6771	8,6714	8,6658	8,6602	8,6547	8,6492	8,6437	8,6382
6,52	8,6271	8,6214	8,6158	8,6102	8,6047	8,5992	8,5937	8,5882
6,57	8,5771	8,5714	8,5658	8,5602	8,5547	8,5492	8,5437	8,5382
6,62	8,5271	8,5214	8,5158	8,5102	8,5047	8,4992	8,4937	8,4882
6,67	8,4771	8,4714	8,4658	8,4602	8,4547	8,4492	8,4437	8,4382
6,72	8,4271	8,4214	8,4158	8,4102	8,4047	8,3992	8,3937	8,3882
6,77	8,3771	8,3714	8,3658	8,3602	8,3547	8,3492	8,3437	8,3382
6,82	8,3271	8,3214	8,3158	8,3102	8,3047	8,2992	8,2937	8,2882
6,87	8,2771	8,2714	8,2658	8,2602	8,2547	8,2492	8,2437	8,2382
6,92	8,2271	8,2214	8,2158	8,2102	8,2047	8,1992	8,1937	8,1882
6,97	8,1771	8,1714	8,1658	8,1602	8,1547	8,1492	8,1437	8,1382
7,02	8,1271	8,1214	8,1158	8,1102	8,1047	8,0992	8,0937	8,0882
7,07	8,0771	8,0714	8,0658	8,0602	8,0547	8,0492	8,0437	8,0382
7,12	8,0271	8,0214	8,0158	8,0102	8,0047	7,9992	7,9937	7,9882
7,17	7,9771	7,9714	7,9658	7,9602	7,9547	7,9492	7,9437	7,9382
7,22	7,9271	7,9214	7,9158	7,9102	7,9047	7,8992	7,8937	7,8882
7,27	7,8771	7,8714	7,8658	7,8602	7,8547	7,8492	7,8437	7,8382
7,32	7,8271	7,8214	7,8158	7,8102	7,8047	7,7992	7,7937	7,7882
7,37	7,7771	7,7714	7,7658	7,7602	7,7547	7,7492	7,7437	7,7382
7,42	7,7271	7,7214	7,7158	7,7102	7,7047	7,6992	7,6937	7,6882
7,47	7,6771	7,6714	7,6658	7,6602	7,6547	7,6492	7,6437	7,6382
7,52	7,6271	7,6214	7,6158	7,6102	7,6047	7,5992	7,5937	7,5882
7,57	7,5771	7,5714	7,5658	7,5602	7,5547	7,5492	7,5437	7,5382
7,62	7,5271	7,5214	7,5158	7,5102	7,5047	7,4992	7,4937	7,4882
7,67	7,4771	7,4714	7,4658	7,4602	7,4547	7,4492	7,4437	7,4382
7,72	7,4271	7,4214	7,4158	7,4102	7,4047	7,3992	7,3937	7,3882
7,77	7,3771	7,3714	7,3658	7,3602	7,3547	7,3492	7,3437	7,3382
7,82	7,3271	7,3214	7,3158	7,3102	7,3047	7,2992	7,2937	7,2882
7,87	7,2771	7,2714	7,2658	7,2602	7,2547	7,2492	7,2437	7,2382
7,92	7,2271	7,2214	7,2158	7,2102	7,2047	7,1992	7,1937	7,1882
7,97	7,1771	7,1714	7,1658	7,1602	7,1547	7,1492	7,1437	7,1382
8,02	7,1271	7,1214	7,1158	7,1102	7,1047	7,0992	7,0937	7,0882
8,07	7,0771	7,0714	7,0658	7,0602	7,0547	7,0492	7,0437	7,0382
8,12	7,0271	7,0214	7,0158	7,0102	7,0047	6,9992	6,9937	6,9882
8,17	6,9771	6,9714	6,9658	6,9602	6,9547	6,9492	6,9437	6,9382
8,22	6,9271	6,9214	6,9158	6,9102	6,9047	6,8992	6,8937	6,8882
8,27	6,8771	6,8714	6,8658	6,8602	6,8547	6,8492	6,8437	6,8382
8,32	6,8271	6,8214	6,8158	6,8102	6,8047	6,7992	6,7937	6,7882

Tabela E.10 - Variação do índice de Ryznar em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

	CC							
	15,3	15,4	15,5	15,6	15,7	15,8	15,9	16
pH	IR							
8,37	6,7771	6,7714	6,7658	6,7602	6,7547	6,7492	6,7437	6,7382
8,42	6,7271	6,7214	6,7158	6,7102	6,7047	6,6992	6,6937	6,6882
8,47	6,6771	6,6714	6,6658	6,6602	6,6547	6,6492	6,6437	6,6382
8,52	6,6271	6,6214	6,6158	6,6102	6,6047	6,5992	6,5937	6,5882
8,57	6,5771	6,5714	6,5658	6,5602	6,5547	6,5492	6,5437	6,5382
8,62	6,5271	6,5214	6,5158	6,5102	6,5047	6,4992	6,4937	6,4882

Tabela E.11 - Variação do índice de Ryznar em função do pH e do ciclo de concentração – TR02

	CC							
	6,5	6,6	6,7	6,8	6,9	7	7,1	7,2
pH	IR							
6,55	9,3407	9,3274	9,3143	9,3015	9,2888	9,2763	9,2640	9,2518
6,6	9,2907	9,2774	9,2643	9,2515	9,2388	9,2263	9,2140	9,2018
6,65	9,2407	9,2274	9,2143	9,2015	9,1888	9,1763	9,1640	9,1518
6,7	9,1907	9,1774	9,1643	9,1515	9,1388	9,1263	9,1140	9,1018
6,75	9,1407	9,1274	9,1143	9,1015	9,0888	9,0763	9,0640	9,0518
6,8	9,0907	9,0774	9,0643	9,0515	9,0388	9,0263	9,0140	9,0018
6,85	9,0407	9,0274	9,0143	9,0015	8,9888	8,9763	8,9640	8,9518
6,9	8,9907	8,9774	8,9643	8,9515	8,9388	8,9263	8,9140	8,9018
6,95	8,9407	8,9274	8,9143	8,9015	8,8888	8,8763	8,8640	8,8518
7	8,8907	8,8774	8,8643	8,8515	8,8388	8,8263	8,8140	8,8018
7,05	8,8407	8,8274	8,8143	8,8015	8,7888	8,7763	8,7640	8,7518
7,1	8,7907	8,7774	8,7643	8,7515	8,7388	8,7263	8,7140	8,7018
7,15	8,7407	8,7274	8,7143	8,7015	8,6888	8,6763	8,6640	8,6518
7,2	8,6907	8,6774	8,6643	8,6515	8,6388	8,6263	8,6140	8,6018
7,25	8,6407	8,6274	8,6143	8,6015	8,5888	8,5763	8,5640	8,5518
7,3	8,5907	8,5774	8,5643	8,5515	8,5388	8,5263	8,5140	8,5018
7,35	8,5407	8,5274	8,5143	8,5015	8,4888	8,4763	8,4640	8,4518
7,4	8,4907	8,4774	8,4643	8,4515	8,4388	8,4263	8,4140	8,4018
7,45	8,4407	8,4274	8,4143	8,4015	8,3888	8,3763	8,3640	8,3518
7,5	8,3907	8,3774	8,3643	8,3515	8,3388	8,3263	8,3140	8,3018
7,55	8,3407	8,3274	8,3143	8,3015	8,2888	8,2763	8,2640	8,2518
7,6	8,2907	8,2774	8,2643	8,2515	8,2388	8,2263	8,2140	8,2018
7,65	8,2407	8,2274	8,2143	8,2015	8,1888	8,1763	8,1640	8,1518
7,7	8,1907	8,1774	8,1643	8,1515	8,1388	8,1263	8,1140	8,1018

Tabela E.11 - Variação do índice de Ryznar em função do pH e do ciclo de concentração – TR02 (continuação)

	CC							
	7,3	7,4	7,5	7,6	7,7	7,8	7,9	8
pH	IR							
6,55	9,2398	9,2280	9,2164	9,2049	9,1935	9,1823	9,1712	9,1603
6,6	9,1898	9,1780	9,1664	9,1549	9,1435	9,1323	9,1212	9,1103
6,65	9,1398	9,1280	9,1164	9,1049	9,0935	9,0823	9,0712	9,0603
6,7	9,0898	9,0780	9,0664	9,0549	9,0435	9,0323	9,0212	9,0103
6,75	9,0398	9,0280	9,0164	9,0049	8,9935	8,9823	8,9712	8,9603
6,8	8,9898	8,9780	8,9664	8,9549	8,9435	8,9323	8,9212	8,9103
6,85	8,9398	8,9280	8,9164	8,9049	8,8935	8,8823	8,8712	8,8603
6,9	8,8898	8,8780	8,8664	8,8549	8,8435	8,8323	8,8212	8,8103
6,95	8,8398	8,8280	8,8164	8,8049	8,7935	8,7823	8,7712	8,7603
7	8,7898	8,7780	8,7664	8,7549	8,7435	8,7323	8,7212	8,7103
7,05	8,7398	8,7280	8,7164	8,7049	8,6935	8,6823	8,6712	8,6603
7,1	8,6898	8,6780	8,6664	8,6549	8,6435	8,6323	8,6212	8,6103
7,15	8,6398	8,6280	8,6164	8,6049	8,5935	8,5823	8,5712	8,5603
7,2	8,5898	8,5780	8,5664	8,5549	8,5435	8,5323	8,5212	8,5103
7,25	8,5398	8,5280	8,5164	8,5049	8,4935	8,4823	8,4712	8,4603
7,3	8,4898	8,4780	8,4664	8,4549	8,4435	8,4323	8,4212	8,4103
7,35	8,4398	8,4280	8,4164	8,4049	8,3935	8,3823	8,3712	8,3603
7,4	8,3898	8,3780	8,3664	8,3549	8,3435	8,3323	8,3212	8,3103
7,45	8,3398	8,3280	8,3164	8,3049	8,2935	8,2823	8,2712	8,2603
7,5	8,2898	8,2780	8,2664	8,2549	8,2435	8,2323	8,2212	8,2103
7,55	8,2398	8,2280	8,2164	8,2049	8,1935	8,1823	8,1712	8,1603
7,6	8,1898	8,1780	8,1664	8,1549	8,1435	8,1323	8,1212	8,1103
7,65	8,1398	8,1280	8,1164	8,1049	8,0935	8,0823	8,0712	8,0603
7,7	8,0898	8,0780	8,0664	8,0549	8,0435	8,0323	8,0212	8,0103

Tabela E.11 - Variação do índice de Ryznar em função do pH e do ciclo de concentração – TR02 (continuação)

	CC							
	8,1	8,2	8,3	8,4	8,5	8,6	8,7	8,8
pH	IR							
6,55	9,1495	9,1389	9,1283	9,1179	9,1076	9,0975	9,0874	9,0775
6,6	9,0995	9,0889	9,0783	9,0679	9,0576	9,0475	9,0374	9,0275
6,65	9,0495	9,0389	9,0283	9,0179	9,0076	8,9975	8,9874	8,9775
6,7	8,9995	8,9889	8,9783	8,9679	8,9576	8,9475	8,9374	8,9275
6,75	8,9495	8,9389	8,9283	8,9179	8,9076	8,8975	8,8874	8,8775
6,8	8,8995	8,8889	8,8783	8,8679	8,8576	8,8475	8,8374	8,8275
6,85	8,8495	8,8389	8,8283	8,8179	8,8076	8,7975	8,7874	8,7775
6,9	8,7995	8,7889	8,7783	8,7679	8,7576	8,7475	8,7374	8,7275
6,95	8,7495	8,7389	8,7283	8,7179	8,7076	8,6975	8,6874	8,6775
7	8,6995	8,6889	8,6783	8,6679	8,6576	8,6475	8,6374	8,6275
7,05	8,6495	8,6389	8,6283	8,6179	8,6076	8,5975	8,5874	8,5775
7,1	8,5995	8,5889	8,5783	8,5679	8,5576	8,5475	8,5374	8,5275
7,15	8,5495	8,5389	8,5283	8,5179	8,5076	8,4975	8,4874	8,4775
7,2	8,4995	8,4889	8,4783	8,4679	8,4576	8,4475	8,4374	8,4275
7,25	8,4495	8,4389	8,4283	8,4179	8,4076	8,3975	8,3874	8,3775
7,3	8,3995	8,3889	8,3783	8,3679	8,3576	8,3475	8,3374	8,3275
7,35	8,3495	8,3389	8,3283	8,3179	8,3076	8,2975	8,2874	8,2775
7,4	8,2995	8,2889	8,2783	8,2679	8,2576	8,2475	8,2374	8,2275
7,45	8,2495	8,2389	8,2283	8,2179	8,2076	8,1975	8,1874	8,1775
7,5	8,1995	8,1889	8,1783	8,1679	8,1576	8,1475	8,1374	8,1275
7,55	8,1495	8,1389	8,1283	8,1179	8,1076	8,0975	8,0874	8,0775
7,6	8,0995	8,0889	8,0783	8,0679	8,0576	8,0475	8,0374	8,0275
7,65	8,0495	8,0389	8,0283	8,0179	8,0076	7,9975	7,9874	7,9775
7,7	7,9995	7,9889	7,9783	7,9679	7,9576	7,9475	7,9374	7,9275

Tabela E.11 - Variação do índice de Ryznar em função do pH e do ciclo de concentração – TR02 (continuação)

	CC							
	8,9	9	9,1	9,2	9,3	9,4	9,5	9,6
pH	IR							
6,55	9,0677	9,0580	9,0484	9,0389	9,0295	9,0202	9,0110	9,0019
6,6	9,0177	9,0080	8,9984	8,9889	8,9795	8,9702	8,9610	8,9519
6,65	8,9677	8,9580	8,9484	8,9389	8,9295	8,9202	8,9110	8,9019
6,7	8,9177	8,9080	8,8984	8,8889	8,8795	8,8702	8,8610	8,8519
6,75	8,8677	8,8580	8,8484	8,8389	8,8295	8,8202	8,8110	8,8019
6,8	8,8177	8,8080	8,7984	8,7889	8,7795	8,7702	8,7610	8,7519
6,85	8,7677	8,7580	8,7484	8,7389	8,7295	8,7202	8,7110	8,7019
6,9	8,7177	8,7080	8,6984	8,6889	8,6795	8,6702	8,6610	8,6519
6,95	8,6677	8,6580	8,6484	8,6389	8,6295	8,6202	8,6110	8,6019
7	8,6177	8,6080	8,5984	8,5889	8,5795	8,5702	8,5610	8,5519
7,05	8,5677	8,5580	8,5484	8,5389	8,5295	8,5202	8,5110	8,5019
7,1	8,5177	8,5080	8,4984	8,4889	8,4795	8,4702	8,4610	8,4519
7,15	8,4677	8,4580	8,4484	8,4389	8,4295	8,4202	8,4110	8,4019
7,2	8,4177	8,4080	8,3984	8,3889	8,3795	8,3702	8,3610	8,3519
7,25	8,3677	8,3580	8,3484	8,3389	8,3295	8,3202	8,3110	8,3019
7,3	8,3177	8,3080	8,2984	8,2889	8,2795	8,2702	8,2610	8,2519
7,35	8,2677	8,2580	8,2484	8,2389	8,2295	8,2202	8,2110	8,2019
7,4	8,2177	8,2080	8,1984	8,1889	8,1795	8,1702	8,1610	8,1519
7,45	8,1677	8,1580	8,1484	8,1389	8,1295	8,1202	8,1110	8,1019
7,5	8,1177	8,1080	8,0984	8,0889	8,0795	8,0702	8,0610	8,0519
7,55	8,0677	8,0580	8,0484	8,0389	8,0295	8,0202	8,0110	8,0019
7,6	8,0177	8,0080	7,9984	7,9889	7,9795	7,9702	7,9610	7,9519
7,65	7,9677	7,9580	7,9484	7,9389	7,9295	7,9202	7,9110	7,9019
7,7	7,9177	7,9080	7,8984	7,8889	7,8795	7,8702	7,8610	7,8519

Tabela E.11 - Variação do índice de Ryznar em função do pH e do ciclo de concentração – TR02 (continuação)

	CC							
	9,7	9,8	9,9	10	10,1	10,2	10,3	10,4
pH	IR							
6,55	8,9929	8,9840	8,9752	8,9665	8,9578	8,9493	8,9408	8,9324
6,6	8,9429	8,9340	8,9252	8,9165	8,9078	8,8993	8,8908	8,8824
6,65	8,8929	8,8840	8,8752	8,8665	8,8578	8,8493	8,8408	8,8324
6,7	8,8429	8,8340	8,8252	8,8165	8,8078	8,7993	8,7908	8,7824
6,75	8,7929	8,7840	8,7752	8,7665	8,7578	8,7493	8,7408	8,7324
6,8	8,7429	8,7340	8,7252	8,7165	8,7078	8,6993	8,6908	8,6824
6,85	8,6929	8,6840	8,6752	8,6665	8,6578	8,6493	8,6408	8,6324
6,9	8,6429	8,6340	8,6252	8,6165	8,6078	8,5993	8,5908	8,5824
6,95	8,5929	8,5840	8,5752	8,5665	8,5578	8,5493	8,5408	8,5324
7	8,5429	8,5340	8,5252	8,5165	8,5078	8,4993	8,4908	8,4824
7,05	8,4929	8,4840	8,4752	8,4665	8,4578	8,4493	8,4408	8,4324
7,1	8,4429	8,4340	8,4252	8,4165	8,4078	8,3993	8,3908	8,3824
7,15	8,3929	8,3840	8,3752	8,3665	8,3578	8,3493	8,3408	8,3324
7,2	8,3429	8,3340	8,3252	8,3165	8,3078	8,2993	8,2908	8,2824
7,25	8,2929	8,2840	8,2752	8,2665	8,2578	8,2493	8,2408	8,2324
7,3	8,2429	8,2340	8,2252	8,2165	8,2078	8,1993	8,1908	8,1824
7,35	8,1929	8,1840	8,1752	8,1665	8,1578	8,1493	8,1408	8,1324
7,4	8,1429	8,1340	8,1252	8,1165	8,1078	8,0993	8,0908	8,0824
7,45	8,0929	8,0840	8,0752	8,0665	8,0578	8,0493	8,0408	8,0324
7,5	8,0429	8,0340	8,0252	8,0165	8,0078	7,9993	7,9908	7,9824
7,55	7,9929	7,9840	7,9752	7,9665	7,9578	7,9493	7,9408	7,9324
7,6	7,9429	7,9340	7,9252	7,9165	7,9078	7,8993	7,8908	7,8824
7,65	7,8929	7,8840	7,8752	7,8665	7,8578	7,8493	7,8408	7,8324
7,7	7,8429	7,8340	7,8252	7,8165	7,8078	7,7993	7,7908	7,7824

Tabela E.11 - Variação do índice de Ryznar em função do pH e do ciclo de concentração – TR02 (continuação)

	CC							
	10,5	10,6	10,7	10,8	10,9	11	11,1	11,2
pH	IR							
6,55	8,9241	8,9159	8,9077	8,8996	8,8916	8,8837	8,8758	8,8681
6,6	8,8741	8,8659	8,8577	8,8496	8,8416	8,8337	8,8258	8,8181
6,65	8,8241	8,8159	8,8077	8,7996	8,7916	8,7837	8,7758	8,7681
6,7	8,7741	8,7659	8,7577	8,7496	8,7416	8,7337	8,7258	8,7181
6,75	8,7241	8,7159	8,7077	8,6996	8,6916	8,6837	8,6758	8,6681
6,8	8,6741	8,6659	8,6577	8,6496	8,6416	8,6337	8,6258	8,6181
6,85	8,6241	8,6159	8,6077	8,5996	8,5916	8,5837	8,5758	8,5681
6,9	8,5741	8,5659	8,5577	8,5496	8,5416	8,5337	8,5258	8,5181
6,95	8,5241	8,5159	8,5077	8,4996	8,4916	8,4837	8,4758	8,4681
7	8,4741	8,4659	8,4577	8,4496	8,4416	8,4337	8,4258	8,4181
7,05	8,4241	8,4159	8,4077	8,3996	8,3916	8,3837	8,3758	8,3681
7,1	8,3741	8,3659	8,3577	8,3496	8,3416	8,3337	8,3258	8,3181
7,15	8,3241	8,3159	8,3077	8,2996	8,2916	8,2837	8,2758	8,2681
7,2	8,2741	8,2659	8,2577	8,2496	8,2416	8,2337	8,2258	8,2181
7,25	8,2241	8,2159	8,2077	8,1996	8,1916	8,1837	8,1758	8,1681
7,3	8,1741	8,1659	8,1577	8,1496	8,1416	8,1337	8,1258	8,1181
7,35	8,1241	8,1159	8,1077	8,0996	8,0916	8,0837	8,0758	8,0681
7,4	8,0741	8,0659	8,0577	8,0496	8,0416	8,0337	8,0258	8,0181
7,45	8,0241	8,0159	8,0077	7,9996	7,9916	7,9837	7,9758	7,9681
7,5	7,9741	7,9659	7,9577	7,9496	7,9416	7,9337	7,9258	7,9181
7,55	7,9241	7,9159	7,9077	7,8996	7,8916	7,8837	7,8758	7,8681
7,6	7,8741	7,8659	7,8577	7,8496	7,8416	7,8337	7,8258	7,8181
7,65	7,8241	7,8159	7,8077	7,7996	7,7916	7,7837	7,7758	7,7681
7,7	7,7741	7,7659	7,7577	7,7496	7,7416	7,7337	7,7258	7,7181

Tabela E.11 - Variação do índice de Ryznar em função do pH e do ciclo de concentração – TR02 (continuação)

	CC							
	11,3	11,4	11,5	11,6	11,7	11,8	11,9	12
pH	IR							
6,55	8,8603	8,8527	8,8451	8,8376	8,8301	8,8227	8,8154	8,8081
6,6	8,8103	8,8027	8,7951	8,7876	8,7801	8,7727	8,7654	8,7581
6,65	8,7603	8,7527	8,7451	8,7376	8,7301	8,7227	8,7154	8,7081
6,7	8,7103	8,7027	8,6951	8,6876	8,6801	8,6727	8,6654	8,6581
6,75	8,6603	8,6527	8,6451	8,6376	8,6301	8,6227	8,6154	8,6081
6,8	8,6103	8,6027	8,5951	8,5876	8,5801	8,5727	8,5654	8,5581
6,85	8,5603	8,5527	8,5451	8,5376	8,5301	8,5227	8,5154	8,5081
6,9	8,5103	8,5027	8,4951	8,4876	8,4801	8,4727	8,4654	8,4581
6,95	8,4603	8,4527	8,4451	8,4376	8,4301	8,4227	8,4154	8,4081
7	8,4103	8,4027	8,3951	8,3876	8,3801	8,3727	8,3654	8,3581
7,05	8,3603	8,3527	8,3451	8,3376	8,3301	8,3227	8,3154	8,3081
7,1	8,3103	8,3027	8,2951	8,2876	8,2801	8,2727	8,2654	8,2581
7,15	8,2603	8,2527	8,2451	8,2376	8,2301	8,2227	8,2154	8,2081
7,2	8,2103	8,2027	8,1951	8,1876	8,1801	8,1727	8,1654	8,1581
7,25	8,1603	8,1527	8,1451	8,1376	8,1301	8,1227	8,1154	8,1081
7,3	8,1103	8,1027	8,0951	8,0876	8,0801	8,0727	8,0654	8,0581
7,35	8,0603	8,0527	8,0451	8,0376	8,0301	8,0227	8,0154	8,0081
7,4	8,0103	8,0027	7,9951	7,9876	7,9801	7,9727	7,9654	7,9581
7,45	7,9603	7,9527	7,9451	7,9376	7,9301	7,9227	7,9154	7,9081
7,5	7,9103	7,9027	7,8951	7,8876	7,8801	7,8727	7,8654	7,8581
7,55	7,8603	7,8527	7,8451	7,8376	7,8301	7,8227	7,8154	7,8081
7,6	7,8103	7,8027	7,7951	7,7876	7,7801	7,7727	7,7654	7,7581
7,65	7,7603	7,7527	7,7451	7,7376	7,7301	7,7227	7,7154	7,7081
7,7	7,7103	7,7027	7,6951	7,6876	7,6801	7,6727	7,6654	7,6581

Tabela E.11 - Variação do índice de Ryznar em função do pH e do ciclo de concentração – TR02 (continuação)

	CC							
	12,1	12,2	12,3	12,4	12,5	12,6	12,7	12,8
pH	IR							
6,55	8,8009	8,7938	8,7867	8,7796	8,7727	8,7657	8,7589	8,7521
6,6	8,7509	8,7438	8,7367	8,7296	8,7227	8,7157	8,7089	8,7021
6,65	8,7009	8,6938	8,6867	8,6796	8,6727	8,6657	8,6589	8,6521
6,7	8,6509	8,6438	8,6367	8,6296	8,6227	8,6157	8,6089	8,6021
6,75	8,6009	8,5938	8,5867	8,5796	8,5727	8,5657	8,5589	8,5521
6,8	8,5509	8,5438	8,5367	8,5296	8,5227	8,5157	8,5089	8,5021
6,85	8,5009	8,4938	8,4867	8,4796	8,4727	8,4657	8,4589	8,4521
6,9	8,4509	8,4438	8,4367	8,4296	8,4227	8,4157	8,4089	8,4021
6,95	8,4009	8,3938	8,3867	8,3796	8,3727	8,3657	8,3589	8,3521
7	8,3509	8,3438	8,3367	8,3296	8,3227	8,3157	8,3089	8,3021
7,05	8,3009	8,2938	8,2867	8,2796	8,2727	8,2657	8,2589	8,2521
7,1	8,2509	8,2438	8,2367	8,2296	8,2227	8,2157	8,2089	8,2021
7,15	8,2009	8,1938	8,1867	8,1796	8,1727	8,1657	8,1589	8,1521
7,2	8,1509	8,1438	8,1367	8,1296	8,1227	8,1157	8,1089	8,1021
7,25	8,1009	8,0938	8,0867	8,0796	8,0727	8,0657	8,0589	8,0521
7,3	8,0509	8,0438	8,0367	8,0296	8,0227	8,0157	8,0089	8,0021
7,35	8,0009	7,9938	7,9867	7,9796	7,9727	7,9657	7,9589	7,9521
7,4	7,9509	7,9438	7,9367	7,9296	7,9227	7,9157	7,9089	7,9021
7,45	7,9009	7,8938	7,8867	7,8796	7,8727	7,8657	7,8589	7,8521
7,5	7,8509	7,8438	7,8367	7,8296	7,8227	7,8157	7,8089	7,8021
7,55	7,8009	7,7938	7,7867	7,7796	7,7727	7,7657	7,7589	7,7521
7,6	7,7509	7,7438	7,7367	7,7296	7,7227	7,7157	7,7089	7,7021
7,65	7,7009	7,6938	7,6867	7,6796	7,6727	7,6657	7,6589	7,6521
7,7	7,6509	7,6438	7,6367	7,6296	7,6227	7,6157	7,6089	7,6021

Tabela E.11 - Variação do índice de Ryznar em função do pH e do ciclo de concentração – TR02 (continuação)

	CC							
	12,9	13	13,1	13,2	13,3	13,4	13,5	13,6
pH	IR							
6,55	8,7453	8,7386	8,7319	8,7253	8,7188	8,7123	8,7058	8,6994
6,6	8,6953	8,6886	8,6819	8,6753	8,6688	8,6623	8,6558	8,6494
6,65	8,6453	8,6386	8,6319	8,6253	8,6188	8,6123	8,6058	8,5994
6,7	8,5953	8,5886	8,5819	8,5753	8,5688	8,5623	8,5558	8,5494
6,75	8,5453	8,5386	8,5319	8,5253	8,5188	8,5123	8,5058	8,4994
6,8	8,4953	8,4886	8,4819	8,4753	8,4688	8,4623	8,4558	8,4494
6,85	8,4453	8,4386	8,4319	8,4253	8,4188	8,4123	8,4058	8,3994
6,9	8,3953	8,3886	8,3819	8,3753	8,3688	8,3623	8,3558	8,3494
6,95	8,3453	8,3386	8,3319	8,3253	8,3188	8,3123	8,3058	8,2994
7	8,2953	8,2886	8,2819	8,2753	8,2688	8,2623	8,2558	8,2494
7,05	8,2453	8,2386	8,2319	8,2253	8,2188	8,2123	8,2058	8,1994
7,1	8,1953	8,1886	8,1819	8,1753	8,1688	8,1623	8,1558	8,1494
7,15	8,1453	8,1386	8,1319	8,1253	8,1188	8,1123	8,1058	8,0994
7,2	8,0953	8,0886	8,0819	8,0753	8,0688	8,0623	8,0558	8,0494
7,25	8,0453	8,0386	8,0319	8,0253	8,0188	8,0123	8,0058	7,9994
7,3	7,9953	7,9886	7,9819	7,9753	7,9688	7,9623	7,9558	7,9494
7,35	7,9453	7,9386	7,9319	7,9253	7,9188	7,9123	7,9058	7,8994
7,4	7,8953	7,8886	7,8819	7,8753	7,8688	7,8623	7,8558	7,8494
7,45	7,8453	7,8386	7,8319	7,8253	7,8188	7,8123	7,8058	7,7994
7,5	7,7953	7,7886	7,7819	7,7753	7,7688	7,7623	7,7558	7,7494
7,55	7,7453	7,7386	7,7319	7,7253	7,7188	7,7123	7,7058	7,6994
7,6	7,6953	7,6886	7,6819	7,6753	7,6688	7,6623	7,6558	7,6494
7,65	7,6453	7,6386	7,6319	7,6253	7,6188	7,6123	7,6058	7,5994
7,7	7,5953	7,5886	7,5819	7,5753	7,5688	7,5623	7,5558	7,5494

Tabela E.11 - Variação do índice de Ryznar em função do pH e do ciclo de concentração – TR02 (continuação)

	CC							
	13,7	13,8	13,9	14	14,1	14,2	14,3	14,4
pH	IR							
6,55	8,6930	8,6867	8,6805	8,6742	8,6680	8,6619	8,6558	8,6498
6,6	8,6430	8,6367	8,6305	8,6242	8,6180	8,6119	8,6058	8,5998
6,65	8,5930	8,5867	8,5805	8,5742	8,5680	8,5619	8,5558	8,5498
6,7	8,5430	8,5367	8,5305	8,5242	8,5180	8,5119	8,5058	8,4998
6,75	8,4930	8,4867	8,4805	8,4742	8,4680	8,4619	8,4558	8,4498
6,8	8,4430	8,4367	8,4305	8,4242	8,4180	8,4119	8,4058	8,3998
6,85	8,3930	8,3867	8,3805	8,3742	8,3680	8,3619	8,3558	8,3498
6,9	8,3430	8,3367	8,3305	8,3242	8,3180	8,3119	8,3058	8,2998
6,95	8,2930	8,2867	8,2805	8,2742	8,2680	8,2619	8,2558	8,2498
7	8,2430	8,2367	8,2305	8,2242	8,2180	8,2119	8,2058	8,1998
7,05	8,1930	8,1867	8,1805	8,1742	8,1680	8,1619	8,1558	8,1498
7,1	8,1430	8,1367	8,1305	8,1242	8,1180	8,1119	8,1058	8,0998
7,15	8,0930	8,0867	8,0805	8,0742	8,0680	8,0619	8,0558	8,0498
7,2	8,0430	8,0367	8,0305	8,0242	8,0180	8,0119	8,0058	7,9998
7,25	7,9930	7,9867	7,9805	7,9742	7,9680	7,9619	7,9558	7,9498
7,3	7,9430	7,9367	7,9305	7,9242	7,9180	7,9119	7,9058	7,8998
7,35	7,8930	7,8867	7,8805	7,8742	7,8680	7,8619	7,8558	7,8498
7,4	7,8430	7,8367	7,8305	7,8242	7,8180	7,8119	7,8058	7,7998
7,45	7,7930	7,7867	7,7805	7,7742	7,7680	7,7619	7,7558	7,7498
7,5	7,7430	7,7367	7,7305	7,7242	7,7180	7,7119	7,7058	7,6998
7,55	7,6930	7,6867	7,6805	7,6742	7,6680	7,6619	7,6558	7,6498
7,6	7,6430	7,6367	7,6305	7,6242	7,6180	7,6119	7,6058	7,5998
7,65	7,5930	7,5867	7,5805	7,5742	7,5680	7,5619	7,5558	7,5498
7,7	7,5430	7,5367	7,5305	7,5242	7,5180	7,5119	7,5058	7,4998

Tabela E.11 - Variação do índice de Ryznar em função do pH e do ciclo de concentração – TR02 (continuação)

	CC							
	14,5	14,6	14,7	14,8	14,9	15	15,1	15,2
pH	IR							
6,55	8,6438	8,6378	8,6319	8,6260	8,6201	8,6143	8,6085	8,6028
6,6	8,5938	8,5878	8,5819	8,5760	8,5701	8,5643	8,5585	8,5528
6,65	8,5438	8,5378	8,5319	8,5260	8,5201	8,5143	8,5085	8,5028
6,7	8,4938	8,4878	8,4819	8,4760	8,4701	8,4643	8,4585	8,4528
6,75	8,4438	8,4378	8,4319	8,4260	8,4201	8,4143	8,4085	8,4028
6,8	8,3938	8,3878	8,3819	8,3760	8,3701	8,3643	8,3585	8,3528
6,85	8,3438	8,3378	8,3319	8,3260	8,3201	8,3143	8,3085	8,3028
6,9	8,2938	8,2878	8,2819	8,2760	8,2701	8,2643	8,2585	8,2528
6,95	8,2438	8,2378	8,2319	8,2260	8,2201	8,2143	8,2085	8,2028
7	8,1938	8,1878	8,1819	8,1760	8,1701	8,1643	8,1585	8,1528
7,05	8,1438	8,1378	8,1319	8,1260	8,1201	8,1143	8,1085	8,1028
7,1	8,0938	8,0878	8,0819	8,0760	8,0701	8,0643	8,0585	8,0528
7,15	8,0438	8,0378	8,0319	8,0260	8,0201	8,0143	8,0085	8,0028
7,2	7,9938	7,9878	7,9819	7,9760	7,9701	7,9643	7,9585	7,9528
7,25	7,9438	7,9378	7,9319	7,9260	7,9201	7,9143	7,9085	7,9028
7,3	7,8938	7,8878	7,8819	7,8760	7,8701	7,8643	7,8585	7,8528
7,35	7,8438	7,8378	7,8319	7,8260	7,8201	7,8143	7,8085	7,8028
7,4	7,7938	7,7878	7,7819	7,7760	7,7701	7,7643	7,7585	7,7528
7,45	7,7438	7,7378	7,7319	7,7260	7,7201	7,7143	7,7085	7,7028
7,5	7,6938	7,6878	7,6819	7,6760	7,6701	7,6643	7,6585	7,6528
7,55	7,6438	7,6378	7,6319	7,6260	7,6201	7,6143	7,6085	7,6028
7,6	7,5938	7,5878	7,5819	7,5760	7,5701	7,5643	7,5585	7,5528
7,65	7,5438	7,5378	7,5319	7,5260	7,5201	7,5143	7,5085	7,5028
7,7	7,4938	7,4878	7,4819	7,4760	7,4701	7,4643	7,4585	7,4528

Tabela E.11 - Variação do índice de Ryznar em função do pH e do ciclo de concentração – TR02 (continuação)

	CC							
	15,3	15,4	15,5	15,6	15,7	15,8	15,9	16
pH	IR							
6,55	8,5971	8,5914	8,5858	8,5802	8,5747	8,5692	8,5637	8,5582
6,6	8,5471	8,5414	8,5358	8,5302	8,5247	8,5192	8,5137	8,5082
6,65	8,4971	8,4914	8,4858	8,4802	8,4747	8,4692	8,4637	8,4582
6,7	8,4471	8,4414	8,4358	8,4302	8,4247	8,4192	8,4137	8,4082
6,75	8,3971	8,3914	8,3858	8,3802	8,3747	8,3692	8,3637	8,3582
6,8	8,3471	8,3414	8,3358	8,3302	8,3247	8,3192	8,3137	8,3082
6,85	8,2971	8,2914	8,2858	8,2802	8,2747	8,2692	8,2637	8,2582
6,9	8,2471	8,2414	8,2358	8,2302	8,2247	8,2192	8,2137	8,2082
6,95	8,1971	8,1914	8,1858	8,1802	8,1747	8,1692	8,1637	8,1582
7	8,1471	8,1414	8,1358	8,1302	8,1247	8,1192	8,1137	8,1082
7,05	8,0971	8,0914	8,0858	8,0802	8,0747	8,0692	8,0637	8,0582
7,1	8,0471	8,0414	8,0358	8,0302	8,0247	8,0192	8,0137	8,0082
7,15	7,9971	7,9914	7,9858	7,9802	7,9747	7,9692	7,9637	7,9582
7,2	7,9471	7,9414	7,9358	7,9302	7,9247	7,9192	7,9137	7,9082
7,25	7,8971	7,8914	7,8858	7,8802	7,8747	7,8692	7,8637	7,8582
7,3	7,8471	7,8414	7,8358	7,8302	7,8247	7,8192	7,8137	7,8082
7,35	7,7971	7,7914	7,7858	7,7802	7,7747	7,7692	7,7637	7,7582
7,4	7,7471	7,7414	7,7358	7,7302	7,7247	7,7192	7,7137	7,7082
7,45	7,6971	7,6914	7,6858	7,6802	7,6747	7,6692	7,6637	7,6582
7,5	7,6471	7,6414	7,6358	7,6302	7,6247	7,6192	7,6137	7,6082
7,55	7,5971	7,5914	7,5858	7,5802	7,5747	7,5692	7,5637	7,5582
7,6	7,5471	7,5414	7,5358	7,5302	7,5247	7,5192	7,5137	7,5082
7,65	7,4971	7,4914	7,4858	7,4802	7,4747	7,4692	7,4637	7,4582
7,7	7,4471	7,4414	7,4358	7,4302	7,4247	7,4192	7,4137	7,4082

Tabela E.12 - Variação do índice de Puckorius em função do pH e do ciclo de concentração – TR01

		CC							
		6,5	6,6	6,7	6,8	6,9	7	7,1	7,2
Alc (mg/L)	pHeq								
50	7,0375	8,8532	8,8399	8,8269	8,8140	8,8013	8,7888	8,7765	8,7643
60	7,1539	8,7368	8,7235	8,7105	8,6976	8,6849	8,6724	8,6601	8,6479
70	7,2523	8,6384	8,6251	8,6120	8,5992	8,5865	8,5740	8,5617	8,5495
80	7,3375	8,5531	8,5399	8,5268	8,5139	8,5012	8,4887	8,4764	8,4643
90	7,4127	8,4779	8,4647	8,4516	8,4387	8,4261	8,4136	8,4012	8,3891
100	7,4800	8,4107	8,3974	8,3843	8,3715	8,3588	8,3463	8,3340	8,3218
110	7,5408	8,3498	8,3366	8,3235	8,3106	8,2979	8,2854	8,2731	8,2610
120	7,5964	8,2943	8,2810	8,2679	8,2551	8,2424	8,2299	8,2176	8,2054
130	7,6475	8,2432	8,2299	8,2168	8,2040	8,1913	8,1788	8,1665	8,1543
140	7,6948	8,1959	8,1826	8,1695	8,1567	8,1440	8,1315	8,1192	8,1070
150	7,7389	8,1518	8,1385	8,1255	8,1126	8,0999	8,0874	8,0751	8,0630
160	7,7801	8,1106	8,0973	8,0843	8,0714	8,0587	8,0462	8,0339	8,0218
170	7,8188	8,0719	8,0586	8,0456	8,0327	8,0200	8,0075	7,9952	7,9831
180	7,8553	8,0354	8,0221	8,0091	7,9962	7,9835	7,9710	7,9587	7,9466
190	7,8898	8,0009	7,9876	7,9746	7,9617	7,9490	7,9365	7,9242	7,9121
200	7,9225	7,9681	7,9549	7,9418	7,9290	7,9163	7,9038	7,8915	7,8793
210	7,9537	7,9370	7,9237	7,9107	7,8978	7,8851	7,8726	7,8603	7,8482
220	7,9834	7,9073	7,8940	7,8810	7,8681	7,8554	7,8429	7,8306	7,8185
230	8,0117	7,8789	7,8657	7,8526	7,8397	7,8270	7,8146	7,8022	7,7901
240	8,0389	7,8517	7,8385	7,8254	7,8126	7,7999	7,7874	7,7751	7,7629
250	8,0650	7,8257	7,8124	7,7994	7,7865	7,7738	7,7613	7,7490	7,7369

Tabela E.12 - Variação do índice de Puckorius em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

		CC							
		7,3	7,4	7,5	7,6	7,7	7,8	7,9	8
Alc (mg/L)	pHeq								
50	7,0375	8,7524	8,7405	8,7289	8,7174	8,7060	8,6948	8,6837	8,6728
60	7,1539	8,6360	8,6241	8,6125	8,6010	8,5896	8,5784	8,5674	8,5564
70	7,2523	8,5375	8,5257	8,5141	8,5026	8,4912	8,4800	8,4689	8,4580
80	7,3375	8,4523	8,4405	8,4288	8,4173	8,4060	8,3948	8,3837	8,3728
90	7,4127	8,3771	8,3653	8,3536	8,3421	8,3308	8,3196	8,3085	8,2976
100	7,4800	8,3098	8,2980	8,2864	8,2749	8,2635	8,2523	8,2412	8,2303
110	7,5408	8,2490	8,2372	8,2255	8,2140	8,2027	8,1915	8,1804	8,1695
120	7,5964	8,1934	8,1816	8,1700	8,1585	8,1471	8,1359	8,1248	8,1139
130	7,6475	8,1423	8,1305	8,1189	8,1074	8,0960	8,0848	8,0737	8,0628
140	7,6948	8,0950	8,0832	8,0716	8,0601	8,0487	8,0375	8,0264	8,0155
150	7,7389	8,0510	8,0392	8,0275	8,0160	8,0047	7,9934	7,9824	7,9715
160	7,7801	8,0098	7,9980	7,9863	7,9748	7,9634	7,9522	7,9412	7,9303
170	7,8188	7,9711	7,9593	7,9476	7,9361	7,9247	7,9135	7,9025	7,8915
180	7,8553	7,9346	7,9228	7,9111	7,8996	7,8883	7,8770	7,8660	7,8551
190	7,8898	7,9001	7,8883	7,8766	7,8651	7,8537	7,8425	7,8315	7,8205
200	7,9225	7,8673	7,8555	7,8439	7,8323	7,8210	7,8098	7,7987	7,7878
210	7,9537	7,8362	7,8244	7,8127	7,8012	7,7898	7,7786	7,7676	7,7566
220	7,9834	7,8065	7,7947	7,7830	7,7715	7,7601	7,7489	7,7379	7,7269
230	8,0117	7,7781	7,7663	7,7546	7,7431	7,7318	7,7206	7,7095	7,6986
240	8,0389	7,7509	7,7391	7,7275	7,7159	7,7046	7,6934	7,6823	7,6714
250	8,0650	7,7249	7,7131	7,7014	7,6899	7,6785	7,6673	7,6563	7,6453

Tabela E.12 - Variação do índice de Puckorius em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

		CC							
		8,1	8,2	8,3	8,4	8,5	8,6	8,7	8,8
Alc (mg/L)	pHeq								
50	7,0375	8,6620	8,6514	8,6408	8,6304	8,6202	8,6100	8,6000	8,5900
60	7,1539	8,5456	8,5350	8,5244	8,5140	8,5038	8,4936	8,4836	8,4736
70	7,2523	8,4472	8,4366	8,4260	8,4156	8,4054	8,3952	8,3852	8,3752
80	7,3375	8,3620	8,3513	8,3408	8,3304	8,3201	8,3099	8,2999	8,2900
90	7,4127	8,2868	8,2761	8,2656	8,2552	8,2449	8,2348	8,2247	8,2148
100	7,4800	8,2195	8,2089	8,1983	8,1879	8,1776	8,1675	8,1574	8,1475
110	7,5408	8,1587	8,1480	8,1375	8,1271	8,1168	8,1066	8,0966	8,0867
120	7,5964	8,1031	8,0925	8,0819	8,0715	8,0613	8,0511	8,0411	8,0311
130	7,6475	8,0520	8,0414	8,0308	8,0204	8,0102	8,0000	7,9900	7,9800
140	7,6948	8,0047	7,9941	7,9835	7,9731	7,9628	7,9527	7,9426	7,9327
150	7,7389	7,9607	7,9500	7,9395	7,9291	7,9188	7,9086	7,8986	7,8887
160	7,7801	7,9195	7,9088	7,8983	7,8879	7,8776	7,8674	7,8574	7,8475
170	7,8188	7,8808	7,8701	7,8596	7,8492	7,8389	7,8287	7,8187	7,8088
180	7,8553	7,8443	7,8336	7,8231	7,8127	7,8024	7,7922	7,7822	7,7723
190	7,8898	7,8097	7,7991	7,7886	7,7782	7,7679	7,7577	7,7477	7,7378
200	7,9225	7,7770	7,7663	7,7558	7,7454	7,7351	7,7250	7,7149	7,7050
210	7,9537	7,7459	7,7352	7,7247	7,7143	7,7040	7,6938	7,6838	7,6739
220	7,9834	7,7162	7,7055	7,6950	7,6846	7,6743	7,6641	7,6541	7,6442
230	8,0117	7,6878	7,6771	7,6666	7,6562	7,6459	7,6358	7,6257	7,6158
240	8,0389	7,6606	7,6499	7,6394	7,6290	7,6187	7,6086	7,5985	7,5886
250	8,0650	7,6345	7,6239	7,6134	7,6030	7,5927	7,5825	7,5725	7,5626

Tabela E.12 - Variação do índice de Puckorius em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

		CC							
		8,9	9	9,1	9,2	9,3	9,4	9,5	9,6
Alc (mg/L)	pHeq								
50	7,0375	8,5802	8,5705	8,5609	8,5514	8,5420	8,5327	8,5236	8,5145
60	7,1539	8,4638	8,4541	8,4445	8,4350	8,4256	8,4163	8,4072	8,3981
70	7,2523	8,3654	8,3557	8,3461	8,3366	8,3272	8,3179	8,3087	8,2997
80	7,3375	8,2802	8,2705	8,2609	8,2514	8,2420	8,2327	8,2235	8,2144
90	7,4127	8,2050	8,1953	8,1857	8,1762	8,1668	8,1575	8,1483	8,1392
100	7,4800	8,1377	8,1280	8,1184	8,1089	8,0995	8,0902	8,0810	8,0719
110	7,5408	8,0769	8,0672	8,0576	8,0481	8,0387	8,0294	8,0202	8,0111
120	7,5964	8,0213	8,0116	8,0020	7,9925	7,9831	7,9738	7,9646	7,9555
130	7,6475	7,9702	7,9605	7,9509	7,9414	7,9320	7,9227	7,9135	7,9044
140	7,6948	7,9229	7,9132	7,9036	7,8941	7,8847	7,8754	7,8662	7,8571
150	7,7389	7,8789	7,8691	7,8596	7,8501	7,8407	7,8314	7,8222	7,8131
160	7,7801	7,8377	7,8279	7,8183	7,8089	7,7995	7,7902	7,7810	7,7719
170	7,8188	7,7989	7,7892	7,7796	7,7702	7,7608	7,7515	7,7423	7,7332
180	7,8553	7,7625	7,7528	7,7432	7,7337	7,7243	7,7150	7,7058	7,6967
190	7,8898	7,7279	7,7182	7,7086	7,6991	7,6898	7,6805	7,6713	7,6622
200	7,9225	7,6952	7,6855	7,6759	7,6664	7,6570	7,6477	7,6385	7,6294
210	7,9537	7,6640	7,6543	7,6447	7,6352	7,6259	7,6166	7,6074	7,5983
220	7,9834	7,6343	7,6246	7,6150	7,6056	7,5962	7,5869	7,5777	7,5686
230	8,0117	7,6060	7,5963	7,5867	7,5772	7,5678	7,5585	7,5493	7,5402
240	8,0389	7,5788	7,5691	7,5595	7,5500	7,5406	7,5313	7,5221	7,5130
250	8,0650	7,5527	7,5430	7,5334	7,5239	7,5145	7,5053	7,4961	7,4870

Tabela E.12 - Variação do índice de Puckorius em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

		CC							
		9,7	9,8	9,9	10	10,1	10,2	10,3	10,4
Alc	pHeq								
50	7,0375	8,5055	8,4965	8,4877	8,4790	8,4704	8,4618	8,4533	8,4449
60	7,1539	8,3891	8,3802	8,3713	8,3626	8,3540	8,3454	8,3369	8,3285
70	7,2523	8,2906	8,2817	8,2729	8,2642	8,2556	8,2470	8,2385	8,2301
80	7,3375	8,2054	8,1965	8,1877	8,1789	8,1703	8,1617	8,1533	8,1449
90	7,4127	8,1302	8,1213	8,1125	8,1038	8,0951	8,0866	8,0781	8,0697
100	7,4800	8,0629	8,0540	8,0452	8,0365	8,0278	8,0193	8,0108	8,0024
110	7,5408	8,0021	7,9932	7,9844	7,9756	7,9670	7,9584	7,9500	7,9416
120	7,5964	7,9465	7,9376	7,9288	7,9201	7,9114	7,9029	7,8944	7,8860
130	7,6475	7,8954	7,8865	7,8777	7,8690	7,8603	7,8518	7,8433	7,8349
140	7,6948	7,8481	7,8392	7,8304	7,8217	7,8130	7,8045	7,7960	7,7876
150	7,7389	7,8041	7,7952	7,7864	7,7776	7,7690	7,7604	7,7520	7,7436
160	7,7801	7,7629	7,7540	7,7452	7,7364	7,7278	7,7192	7,7108	7,7024
170	7,8188	7,7242	7,7153	7,7065	7,6977	7,6891	7,6805	7,6721	7,6637
180	7,8553	7,6877	7,6788	7,6700	7,6612	7,6526	7,6440	7,6356	7,6272
190	7,8898	7,6532	7,6443	7,6354	7,6267	7,6181	7,6095	7,6010	7,5927
200	7,9225	7,6204	7,6115	7,6027	7,5940	7,5853	7,5768	7,5683	7,5599
210	7,9537	7,5893	7,5804	7,5716	7,5628	7,5542	7,5456	7,5372	7,5288
220	7,9834	7,5596	7,5507	7,5419	7,5331	7,5245	7,5159	7,5075	7,4991
230	8,0117	7,5312	7,5223	7,5135	7,5047	7,4961	7,4875	7,4791	7,4707
240	8,0389	7,5040	7,4951	7,4863	7,4776	7,4689	7,4604	7,4519	7,4435
250	8,0650	7,4780	7,4691	7,4602	7,4515	7,4429	7,4343	7,4258	7,4174

Tabela E.12 - Variação do índice de Puckorius em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

		CC							
		10,5	10,6	10,7	10,8	10,9	11	11,1	11,2
Alc (mg/L)	pHeq								
50	7,0375	8,4366	8,4284	8,4202	8,4122	8,4041	8,3962	8,3884	8,3806
60	7,1539	8,3202	8,3120	8,3038	8,2958	8,2878	8,2798	8,2720	8,2642
70	7,2523	8,2218	8,2136	8,2054	8,1973	8,1893	8,1814	8,1735	8,1658
80	7,3375	8,1366	8,1283	8,1202	8,1121	8,1041	8,0962	8,0883	8,0805
90	7,4127	8,0614	8,0531	8,0450	8,0369	8,0289	8,0210	8,0131	8,0053
100	7,4800	7,9941	7,9859	7,9777	7,9696	7,9616	7,9537	7,9458	7,9381
110	7,5408	7,9333	7,9250	7,9169	7,9088	7,9008	7,8929	7,8850	7,8772
120	7,5964	7,8777	7,8695	7,8613	7,8532	7,8452	7,8373	7,8294	7,8217
130	7,6475	7,8266	7,8184	7,8102	7,8021	7,7941	7,7862	7,7783	7,7706
140	7,6948	7,7793	7,7711	7,7629	7,7548	7,7468	7,7389	7,7310	7,7232
150	7,7389	7,7353	7,7270	7,7189	7,7108	7,7028	7,6948	7,6870	7,6792
160	7,7801	7,6941	7,6858	7,6777	7,6696	7,6616	7,6536	7,6458	7,6380
170	7,8188	7,6553	7,6471	7,6390	7,6309	7,6229	7,6149	7,6071	7,5993
180	7,8553	7,6189	7,6106	7,6025	7,5944	7,5864	7,5785	7,5706	7,5628
190	7,8898	7,5843	7,5761	7,5680	7,5599	7,5519	7,5439	7,5361	7,5283
200	7,9225	7,5516	7,5434	7,5352	7,5271	7,5191	7,5112	7,5033	7,4955
210	7,9537	7,5204	7,5122	7,5041	7,4960	7,4880	7,4800	7,4722	7,4644
220	7,9834	7,4907	7,4825	7,4744	7,4663	7,4583	7,4503	7,4425	7,4347
230	8,0117	7,4624	7,4541	7,4460	7,4379	7,4299	7,4220	7,4141	7,4063
240	8,0389	7,4352	7,4270	7,4188	7,4107	7,4027	7,3948	7,3869	7,3791
250	8,0650	7,4091	7,4009	7,3927	7,3847	7,3767	7,3687	7,3609	7,3531

Tabela E.12 - Variação do índice de Puckorius em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

		CC							
		11,3	11,4	11,5	11,6	11,7	11,8	11,9	12
Alc (mg/L)	pHeq								
50	7,0375	8,3728	8,3652	8,3576	8,3501	8,3426	8,3352	8,3279	8,3206
60	7,1539	8,2564	8,2488	8,2412	8,2337	8,2262	8,2188	8,2115	8,2042
70	7,2523	8,1580	8,1504	8,1428	8,1353	8,1278	8,1204	8,1131	8,1058
80	7,3375	8,0728	8,0651	8,0575	8,0500	8,0426	8,0352	8,0279	8,0206
90	7,4127	7,9976	7,9899	7,9824	7,9748	7,9674	7,9600	7,9527	7,9454
100	7,4800	7,9303	7,9227	7,9151	7,9076	7,9001	7,8927	7,8854	7,8781
110	7,5408	7,8695	7,8618	7,8542	7,8467	7,8393	7,8319	7,8245	7,8173
120	7,5964	7,8139	7,8063	7,7987	7,7912	7,7837	7,7763	7,7690	7,7617
130	7,6475	7,7628	7,7552	7,7476	7,7401	7,7326	7,7252	7,7179	7,7106
140	7,6948	7,7155	7,7079	7,7003	7,6928	7,6853	7,6779	7,6706	7,6633
150	7,7389	7,6715	7,6638	7,6562	7,6487	7,6413	7,6339	7,6265	7,6193
160	7,7801	7,6303	7,6226	7,6150	7,6075	7,6001	7,5927	7,5853	7,5781
170	7,8188	7,5916	7,5839	7,5763	7,5688	7,5614	7,5540	7,5466	7,5394
180	7,8553	7,5551	7,5474	7,5398	7,5323	7,5249	7,5175	7,5101	7,5029
190	7,8898	7,5206	7,5129	7,5053	7,4978	7,4903	7,4830	7,4756	7,4684
200	7,9225	7,4878	7,4802	7,4726	7,4651	7,4576	7,4502	7,4429	7,4356
210	7,9537	7,4567	7,4490	7,4414	7,4339	7,4265	7,4191	7,4117	7,4045
220	7,9834	7,4270	7,4193	7,4117	7,4042	7,3968	7,3894	7,3820	7,3748
230	8,0117	7,3986	7,3909	7,3834	7,3758	7,3684	7,3610	7,3537	7,3464
240	8,0389	7,3714	7,3638	7,3562	7,3487	7,3412	7,3338	7,3265	7,3192
250	8,0650	7,3454	7,3377	7,3301	7,3226	7,3151	7,3078	7,3004	7,2932

Tabela E.12 - Variação do índice de Puckorius em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

		CC							
		12,1	12,2	12,3	12,4	12,5	12,6	12,7	12,8
Alc (mg/L)	pHeq								
50	7,0375	8,3134	8,3063	8,2992	8,2922	8,2852	8,2783	8,2714	8,2646
60	7,1539	8,1970	8,1899	8,1828	8,1758	8,1688	8,1619	8,1550	8,1482
70	7,2523	8,0986	8,0915	8,0844	8,0773	8,0704	8,0635	8,0566	8,0498
80	7,3375	8,0134	8,0062	7,9991	7,9921	7,9851	7,9782	7,9713	7,9645
90	7,4127	7,9382	7,9310	7,9239	7,9169	7,9099	7,9030	7,8961	7,8893
100	7,4800	7,8709	7,8638	7,8567	7,8496	7,8427	7,8357	7,8289	7,8221
110	7,5408	7,8101	7,8029	7,7958	7,7888	7,7818	7,7749	7,7680	7,7612
120	7,5964	7,7545	7,7474	7,7403	7,7332	7,7263	7,7193	7,7125	7,7057
130	7,6475	7,7034	7,6963	7,6892	7,6821	7,6752	7,6682	7,6614	7,6546
140	7,6948	7,6561	7,6490	7,6419	7,6348	7,6279	7,6209	7,6141	7,6073
150	7,7389	7,6121	7,6049	7,5978	7,5908	7,5838	7,5769	7,5700	7,5632
160	7,7801	7,5709	7,5637	7,5566	7,5496	7,5426	7,5357	7,5288	7,5220
170	7,8188	7,5322	7,5250	7,5179	7,5109	7,5039	7,4970	7,4901	7,4833
180	7,8553	7,4957	7,4885	7,4814	7,4744	7,4674	7,4605	7,4536	7,4468
190	7,8898	7,4611	7,4540	7,4469	7,4399	7,4329	7,4260	7,4191	7,4123
200	7,9225	7,4284	7,4213	7,4142	7,4071	7,4002	7,3932	7,3864	7,3796
210	7,9537	7,3973	7,3901	7,3830	7,3760	7,3690	7,3621	7,3552	7,3484
220	7,9834	7,3676	7,3604	7,3533	7,3463	7,3393	7,3324	7,3255	7,3187
230	8,0117	7,3392	7,3320	7,3249	7,3179	7,3109	7,3040	7,2971	7,2903
240	8,0389	7,3120	7,3049	7,2978	7,2907	7,2838	7,2768	7,2700	7,2632
250	8,0650	7,2859	7,2788	7,2717	7,2647	7,2577	7,2508	7,2439	7,2371

Tabela E.12 - Variação do índice de Puckorius em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

		CC							
		12,9	13	13,1	13,2	13,3	13,4	13,5	13,6
Alc (mg/L)	pHeq								
50	7,0375	8,2578	8,2511	8,2445	8,2379	8,2313	8,2248	8,2183	8,2119
60	7,1539	8,1414	8,1347	8,1281	8,1215	8,1149	8,1084	8,1019	8,0955
70	7,2523	8,0430	8,0363	8,0297	8,0230	8,0165	8,0100	8,0035	7,9971
80	7,3375	7,9578	7,9511	7,9444	7,9378	7,9312	7,9247	7,9183	7,9119
90	7,4127	7,8826	7,8759	7,8692	7,8626	7,8560	7,8495	7,8431	7,8367
100	7,4800	7,8153	7,8086	7,8019	7,7953	7,7888	7,7823	7,7758	7,7694
110	7,5408	7,7545	7,7478	7,7411	7,7345	7,7279	7,7214	7,7150	7,7086
120	7,5964	7,6989	7,6922	7,6855	7,6789	7,6724	7,6659	7,6594	7,6530
130	7,6475	7,6478	7,6411	7,6344	7,6278	7,6213	7,6148	7,6083	7,6019
140	7,6948	7,6005	7,5938	7,5871	7,5805	7,5740	7,5675	7,5610	7,5546
150	7,7389	7,5565	7,5497	7,5431	7,5365	7,5299	7,5234	7,5170	7,5106
160	7,7801	7,5153	7,5085	7,5019	7,4953	7,4887	7,4822	7,4758	7,4694
170	7,8188	7,4765	7,4698	7,4632	7,4566	7,4500	7,4435	7,4371	7,4306
180	7,8553	7,4401	7,4333	7,4267	7,4201	7,4135	7,4070	7,4006	7,3942
190	7,8898	7,4055	7,3988	7,3922	7,3856	7,3790	7,3725	7,3661	7,3596
200	7,9225	7,3728	7,3661	7,3594	7,3528	7,3463	7,3398	7,3333	7,3269
210	7,9537	7,3416	7,3349	7,3283	7,3217	7,3151	7,3086	7,3022	7,2957
220	7,9834	7,3119	7,3052	7,2986	7,2920	7,2854	7,2789	7,2725	7,2660
230	8,0117	7,2836	7,2769	7,2702	7,2636	7,2570	7,2505	7,2441	7,2377
240	8,0389	7,2564	7,2497	7,2430	7,2364	7,2299	7,2234	7,2169	7,2105
250	8,0650	7,2303	7,2236	7,2170	7,2104	7,2038	7,1973	7,1908	7,1844

Tabela E.12 - Variação do índice de Puckorius em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

		CC							
		13,7	13,8	13,9	14	14,1	14,2	14,3	14,4
Alc (mg/L)	pHeq								
50	7,0375	8,2056	8,1992	8,1930	8,1867	8,1806	8,1744	8,1683	8,1623
60	7,1539	8,0892	8,0828	8,0766	8,0703	8,0642	8,0580	8,0519	8,0459
70	7,2523	7,9908	7,9844	7,9782	7,9719	7,9658	7,9596	7,9535	7,9475
80	7,3375	7,9055	7,8992	7,8929	7,8867	7,8805	7,8744	7,8683	7,8622
90	7,4127	7,8303	7,8240	7,8177	7,8115	7,8053	7,7992	7,7931	7,7870
100	7,4800	7,7630	7,7567	7,7505	7,7442	7,7380	7,7319	7,7258	7,7198
110	7,5408	7,7022	7,6959	7,6896	7,6834	7,6772	7,6711	7,6650	7,6589
120	7,5964	7,6466	7,6403	7,6341	7,6278	7,6217	7,6155	7,6094	7,6034
130	7,6475	7,5955	7,5892	7,5830	7,5767	7,5706	7,5644	7,5583	7,5523
140	7,6948	7,5482	7,5419	7,5356	7,5294	7,5232	7,5171	7,5110	7,5050
150	7,7389	7,5042	7,4979	7,4916	7,4854	7,4792	7,4731	7,4670	7,4609
160	7,7801	7,4630	7,4567	7,4504	7,4442	7,4380	7,4319	7,4258	7,4197
170	7,8188	7,4243	7,4180	7,4117	7,4055	7,3993	7,3932	7,3871	7,3810
180	7,8553	7,3878	7,3815	7,3752	7,3690	7,3628	7,3567	7,3506	7,3445
190	7,8898	7,3533	7,3470	7,3407	7,3345	7,3283	7,3221	7,3160	7,3100
200	7,9225	7,3205	7,3142	7,3079	7,3017	7,2955	7,2894	7,2833	7,2772
210	7,9537	7,2894	7,2831	7,2768	7,2706	7,2644	7,2582	7,2522	7,2461
220	7,9834	7,2597	7,2534	7,2471	7,2409	7,2347	7,2285	7,2225	7,2164
230	8,0117	7,2313	7,2250	7,2187	7,2125	7,2063	7,2002	7,1941	7,1880
240	8,0389	7,2041	7,1978	7,1915	7,1853	7,1791	7,1730	7,1669	7,1609
250	8,0650	7,1781	7,1718	7,1655	7,1593	7,1531	7,1469	7,1408	7,1348

Tabela E.12 - Variação do índice de Puckorius em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

		CC							
		14,5	14,6	14,7	14,8	14,9	15	15,1	15,2
Alc (mg/L)	pHeq								
50	7,0375	8,1563	8,1503	8,1444	8,1385	8,1326	8,1268	8,1210	8,1153
60	7,1539	8,0399	8,0339	8,0280	8,0221	8,0162	8,0104	8,0047	7,9989
70	7,2523	7,9415	7,9355	7,9296	7,9237	7,9178	7,9120	7,9062	7,9005
80	7,3375	7,8562	7,8502	7,8443	7,8384	7,8326	7,8268	7,8210	7,8153
90	7,4127	7,7810	7,7750	7,7691	7,7632	7,7574	7,7516	7,7458	7,7401
100	7,4800	7,7138	7,7078	7,7019	7,6960	7,6901	7,6843	7,6785	7,6728
110	7,5408	7,6529	7,6469	7,6410	7,6351	7,6293	7,6235	7,6177	7,6120
120	7,5964	7,5974	7,5914	7,5855	7,5796	7,5737	7,5679	7,5621	7,5564
130	7,6475	7,5463	7,5403	7,5344	7,5285	7,5226	7,5168	7,5110	7,5053
140	7,6948	7,4989	7,4930	7,4870	7,4812	7,4753	7,4695	7,4637	7,4580
150	7,7389	7,4549	7,4489	7,4430	7,4371	7,4313	7,4255	7,4197	7,4139
160	7,7801	7,4137	7,4077	7,4018	7,3959	7,3901	7,3842	7,3785	7,3727
170	7,8188	7,3750	7,3690	7,3631	7,3572	7,3514	7,3455	7,3398	7,3340
180	7,8553	7,3385	7,3325	7,3266	7,3207	7,3149	7,3091	7,3033	7,2975
190	7,8898	7,3040	7,2980	7,2921	7,2862	7,2803	7,2745	7,2688	7,2630
200	7,9225	7,2712	7,2653	7,2593	7,2534	7,2476	7,2418	7,2360	7,2303
210	7,9537	7,2401	7,2341	7,2282	7,2223	7,2165	7,2106	7,2049	7,1991
220	7,9834	7,2104	7,2044	7,1985	7,1926	7,1868	7,1809	7,1752	7,1694
230	8,0117	7,1820	7,1760	7,1701	7,1642	7,1584	7,1526	7,1468	7,1411
240	8,0389	7,1548	7,1489	7,1429	7,1371	7,1312	7,1254	7,1196	7,1139
250	8,0650	7,1288	7,1228	7,1169	7,1110	7,1051	7,0993	7,0936	7,0878

Tabela E.12 - Variação do índice de Puckorius em função do pH e do ciclo de concentração – TR01 (continuação)

		CC							
		15,3	15,4	15,5	15,6	15,7	15,8	15,9	16
Alc (mg/L)	pHeq								
50	7,0375	8,1096	8,1040	8,0983	8,0928	8,0872	8,0817	8,0762	8,0708
60	7,1539	7,9932	7,9876	7,9819	7,9764	7,9708	7,9653	7,9598	7,9544
70	7,2523	7,8948	7,8892	7,8835	7,8779	7,8724	7,8669	7,8614	7,8560
80	7,3375	7,8096	7,8039	7,7983	7,7927	7,7871	7,7816	7,7762	7,7707
90	7,4127	7,7344	7,7287	7,7231	7,7175	7,7120	7,7064	7,7010	7,6955
100	7,4800	7,6671	7,6614	7,6558	7,6502	7,6447	7,6392	7,6337	7,6282
110	7,5408	7,6063	7,6006	7,5950	7,5894	7,5838	7,5783	7,5728	7,5674
120	7,5964	7,5507	7,5450	7,5394	7,5338	7,5283	7,5228	7,5173	7,5119
130	7,6475	7,4996	7,4939	7,4883	7,4827	7,4772	7,4717	7,4662	7,4608
140	7,6948	7,4523	7,4466	7,4410	7,4354	7,4299	7,4244	7,4189	7,4134
150	7,7389	7,4083	7,4026	7,3970	7,3914	7,3858	7,3803	7,3748	7,3694
160	7,7801	7,3670	7,3614	7,3558	7,3502	7,3446	7,3391	7,3336	7,3282
170	7,8188	7,3283	7,3227	7,3171	7,3115	7,3059	7,3004	7,2949	7,2895
180	7,8553	7,2919	7,2862	7,2806	7,2750	7,2694	7,2639	7,2584	7,2530
190	7,8898	7,2573	7,2517	7,2461	7,2405	7,2349	7,2294	7,2239	7,2185
200	7,9225	7,2246	7,2189	7,2133	7,2077	7,2022	7,1967	7,1912	7,1857
210	7,9537	7,1934	7,1878	7,1822	7,1766	7,1710	7,1655	7,1600	7,1546
220	7,9834	7,1637	7,1581	7,1525	7,1469	7,1413	7,1358	7,1303	7,1249
230	8,0117	7,1354	7,1297	7,1241	7,1185	7,1129	7,1074	7,1020	7,0965
240	8,0389	7,1082	7,1025	7,0969	7,0913	7,0858	7,0803	7,0748	7,0693
250	8,0650	7,0821	7,0765	7,0709	7,0653	7,0597	7,0542	7,0487	7,0433

Tabela E.13 - Variação do índice de Puckorius em função do pH e do ciclo de concentração – TR02

		CC							
		6,5	6,6	6,7	6,8	6,9	7	7,1	7,2
Alc (mg/L)	pHeq								
50	7,0375	8,8532	8,8399	8,8269	8,8140	8,8013	8,7888	8,7765	8,7643
60	7,1539	8,7368	8,7235	8,7105	8,6976	8,6849	8,6724	8,6601	8,6479
70	7,2523	8,6384	8,6251	8,6120	8,5992	8,5865	8,5740	8,5617	8,5495
80	7,3375	8,5531	8,5399	8,5268	8,5139	8,5012	8,4887	8,4764	8,4643
90	7,4127	8,4779	8,4647	8,4516	8,4387	8,4261	8,4136	8,4012	8,3891
100	7,4800	8,4107	8,3974	8,3843	8,3715	8,3588	8,3463	8,3340	8,3218
110	7,5408	8,3498	8,3366	8,3235	8,3106	8,2979	8,2854	8,2731	8,2610
120	7,5964	8,2943	8,2810	8,2679	8,2551	8,2424	8,2299	8,2176	8,2054
130	7,6475	8,2432	8,2299	8,2168	8,2040	8,1913	8,1788	8,1665	8,1543
140	7,6948	8,1959	8,1826	8,1695	8,1567	8,1440	8,1315	8,1192	8,1070
150	7,7389	8,1518	8,1385	8,1255	8,1126	8,0999	8,0874	8,0751	8,0630
160	7,7801	8,1106	8,0973	8,0843	8,0714	8,0587	8,0462	8,0339	8,0218
170	7,8188	8,0719	8,0586	8,0456	8,0327	8,0200	8,0075	7,9952	7,9831
180	7,8553	8,0354	8,0221	8,0091	7,9962	7,9835	7,9710	7,9587	7,9466
190	7,8898	8,0009	7,9876	7,9746	7,9617	7,9490	7,9365	7,9242	7,9121
200	7,9225	7,9681	7,9549	7,9418	7,9290	7,9163	7,9038	7,8915	7,8793
210	7,9537	7,9370	7,9237	7,9107	7,8978	7,8851	7,8726	7,8603	7,8482
220	7,9834	7,9073	7,8940	7,8810	7,8681	7,8554	7,8429	7,8306	7,8185
230	8,0117	7,8789	7,8657	7,8526	7,8397	7,8270	7,8146	7,8022	7,7901
240	8,0389	7,8517	7,8385	7,8254	7,8126	7,7999	7,7874	7,7751	7,7629
250	8,0650	7,8257	7,8124	7,7994	7,7865	7,7738	7,7613	7,7490	7,7369

Tabela E.13 - Variação do índice de Puckorius em função do pH e do ciclo de concentração – TR02 (continuação)

		CC							
		7,3	7,4	7,5	7,6	7,7	7,8	7,9	8
Alc (mg/L)	pHeq								
50	7,0375	8,7524	8,7405	8,7289	8,7174	8,7060	8,6948	8,6837	8,6728
60	7,1539	8,6360	8,6241	8,6125	8,6010	8,5896	8,5784	8,5674	8,5564
70	7,2523	8,5375	8,5257	8,5141	8,5026	8,4912	8,4800	8,4689	8,4580
80	7,3375	8,4523	8,4405	8,4288	8,4173	8,4060	8,3948	8,3837	8,3728
90	7,4127	8,3771	8,3653	8,3536	8,3421	8,3308	8,3196	8,3085	8,2976
100	7,4800	8,3098	8,2980	8,2864	8,2749	8,2635	8,2523	8,2412	8,2303
110	7,5408	8,2490	8,2372	8,2255	8,2140	8,2027	8,1915	8,1804	8,1695
120	7,5964	8,1934	8,1816	8,1700	8,1585	8,1471	8,1359	8,1248	8,1139
130	7,6475	8,1423	8,1305	8,1189	8,1074	8,0960	8,0848	8,0737	8,0628
140	7,6948	8,0950	8,0832	8,0716	8,0601	8,0487	8,0375	8,0264	8,0155
150	7,7389	8,0510	8,0392	8,0275	8,0160	8,0047	7,9934	7,9824	7,9715
160	7,7801	8,0098	7,9980	7,9863	7,9748	7,9634	7,9522	7,9412	7,9303
170	7,8188	7,9711	7,9593	7,9476	7,9361	7,9247	7,9135	7,9025	7,8915
180	7,8553	7,9346	7,9228	7,9111	7,8996	7,8883	7,8770	7,8660	7,8551
190	7,8898	7,9001	7,8883	7,8766	7,8651	7,8537	7,8425	7,8315	7,8205
200	7,9225	7,8673	7,8555	7,8439	7,8323	7,8210	7,8098	7,7987	7,7878
210	7,9537	7,8362	7,8244	7,8127	7,8012	7,7898	7,7786	7,7676	7,7566
220	7,9834	7,8065	7,7947	7,7830	7,7715	7,7601	7,7489	7,7379	7,7269
230	8,0117	7,7781	7,7663	7,7546	7,7431	7,7318	7,7206	7,7095	7,6986
240	8,0389	7,7509	7,7391	7,7275	7,7159	7,7046	7,6934	7,6823	7,6714
250	8,0650	7,7249	7,7131	7,7014	7,6899	7,6785	7,6673	7,6563	7,6453

Tabela E.13 - Variação do índice de Puckorius em função do pH e do ciclo de concentração – TR02 (continuação)

		CC							
		8,1	8,2	8,3	8,4	8,5	8,6	8,7	8,8
Alc (mg/L)	pHeq								
50	7,0375	8,6620	8,6514	8,6408	8,6304	8,6202	8,6100	8,6000	8,5900
60	7,1539	8,5456	8,5350	8,5244	8,5140	8,5038	8,4936	8,4836	8,4736
70	7,2523	8,4472	8,4366	8,4260	8,4156	8,4054	8,3952	8,3852	8,3752
80	7,3375	8,3620	8,3513	8,3408	8,3304	8,3201	8,3099	8,2999	8,2900
90	7,4127	8,2868	8,2761	8,2656	8,2552	8,2449	8,2348	8,2247	8,2148
100	7,4800	8,2195	8,2089	8,1983	8,1879	8,1776	8,1675	8,1574	8,1475
110	7,5408	8,1587	8,1480	8,1375	8,1271	8,1168	8,1066	8,0966	8,0867
120	7,5964	8,1031	8,0925	8,0819	8,0715	8,0613	8,0511	8,0411	8,0311
130	7,6475	8,0520	8,0414	8,0308	8,0204	8,0102	8,0000	7,9900	7,9800
140	7,6948	8,0047	7,9941	7,9835	7,9731	7,9628	7,9527	7,9426	7,9327
150	7,7389	7,9607	7,9500	7,9395	7,9291	7,9188	7,9086	7,8986	7,8887
160	7,7801	7,9195	7,9088	7,8983	7,8879	7,8776	7,8674	7,8574	7,8475
170	7,8188	7,8808	7,8701	7,8596	7,8492	7,8389	7,8287	7,8187	7,8088
180	7,8553	7,8443	7,8336	7,8231	7,8127	7,8024	7,7922	7,7822	7,7723
190	7,8898	7,8097	7,7991	7,7886	7,7782	7,7679	7,7577	7,7477	7,7378
200	7,9225	7,7770	7,7663	7,7558	7,7454	7,7351	7,7250	7,7149	7,7050
210	7,9537	7,7459	7,7352	7,7247	7,7143	7,7040	7,6938	7,6838	7,6739
220	7,9834	7,7162	7,7055	7,6950	7,6846	7,6743	7,6641	7,6541	7,6442
230	8,0117	7,6878	7,6771	7,6666	7,6562	7,6459	7,6358	7,6257	7,6158
240	8,0389	7,6606	7,6499	7,6394	7,6290	7,6187	7,6086	7,5985	7,5886
250	8,0650	7,6345	7,6239	7,6134	7,6030	7,5927	7,5825	7,5725	7,5626

Tabela E.13 - Variação do índice de Puckorius em função do pH e do ciclo de concentração – TR02 (continuação)

		CC							
		8,9	9	9,1	9,2	9,3	9,4	9,5	9,6
Alc (mg/L)	pHeq								
50	7,0375	8,5802	8,5705	8,5609	8,5514	8,5420	8,5327	8,5236	8,5145
60	7,1539	8,4638	8,4541	8,4445	8,4350	8,4256	8,4163	8,4072	8,3981
70	7,2523	8,3654	8,3557	8,3461	8,3366	8,3272	8,3179	8,3087	8,2997
80	7,3375	8,2802	8,2705	8,2609	8,2514	8,2420	8,2327	8,2235	8,2144
90	7,4127	8,2050	8,1953	8,1857	8,1762	8,1668	8,1575	8,1483	8,1392
100	7,4800	8,1377	8,1280	8,1184	8,1089	8,0995	8,0902	8,0810	8,0719
110	7,5408	8,0769	8,0672	8,0576	8,0481	8,0387	8,0294	8,0202	8,0111
120	7,5964	8,0213	8,0116	8,0020	7,9925	7,9831	7,9738	7,9646	7,9555
130	7,6475	7,9702	7,9605	7,9509	7,9414	7,9320	7,9227	7,9135	7,9044
140	7,6948	7,9229	7,9132	7,9036	7,8941	7,8847	7,8754	7,8662	7,8571
150	7,7389	7,8789	7,8691	7,8596	7,8501	7,8407	7,8314	7,8222	7,8131
160	7,7801	7,8377	7,8279	7,8183	7,8089	7,7995	7,7902	7,7810	7,7719
170	7,8188	7,7989	7,7892	7,7796	7,7702	7,7608	7,7515	7,7423	7,7332
180	7,8553	7,7625	7,7528	7,7432	7,7337	7,7243	7,7150	7,7058	7,6967
190	7,8898	7,7279	7,7182	7,7086	7,6991	7,6898	7,6805	7,6713	7,6622
200	7,9225	7,6952	7,6855	7,6759	7,6664	7,6570	7,6477	7,6385	7,6294
210	7,9537	7,6640	7,6543	7,6447	7,6352	7,6259	7,6166	7,6074	7,5983
220	7,9834	7,6343	7,6246	7,6150	7,6056	7,5962	7,5869	7,5777	7,5686
230	8,0117	7,6060	7,5963	7,5867	7,5772	7,5678	7,5585	7,5493	7,5402
240	8,0389	7,5788	7,5691	7,5595	7,5500	7,5406	7,5313	7,5221	7,5130
250	8,0650	7,5527	7,5430	7,5334	7,5239	7,5145	7,5053	7,4961	7,4870

Tabela E.13 - Variação do índice de Puckorius em função do pH e do ciclo de concentração – TR02 (continuação)

		CC							
		9,7	9,8	9,9	10	10,1	10,2	10,3	10,4
Alc (mg/L)	pHeq								
50	7,0375	8,5055	8,4965	8,4877	8,4790	8,4704	8,4618	8,4533	8,4449
60	7,1539	8,3891	8,3802	8,3713	8,3626	8,3540	8,3454	8,3369	8,3285
70	7,2523	8,2906	8,2817	8,2729	8,2642	8,2556	8,2470	8,2385	8,2301
80	7,3375	8,2054	8,1965	8,1877	8,1789	8,1703	8,1617	8,1533	8,1449
90	7,4127	8,1302	8,1213	8,1125	8,1038	8,0951	8,0866	8,0781	8,0697
100	7,4800	8,0629	8,0540	8,0452	8,0365	8,0278	8,0193	8,0108	8,0024
110	7,5408	8,0021	7,9932	7,9844	7,9756	7,9670	7,9584	7,9500	7,9416
120	7,5964	7,9465	7,9376	7,9288	7,9201	7,9114	7,9029	7,8944	7,8860
130	7,6475	7,8954	7,8865	7,8777	7,8690	7,8603	7,8518	7,8433	7,8349
140	7,6948	7,8481	7,8392	7,8304	7,8217	7,8130	7,8045	7,7960	7,7876
150	7,7389	7,8041	7,7952	7,7864	7,7776	7,7690	7,7604	7,7520	7,7436
160	7,7801	7,7629	7,7540	7,7452	7,7364	7,7278	7,7192	7,7108	7,7024
170	7,8188	7,7242	7,7153	7,7065	7,6977	7,6891	7,6805	7,6721	7,6637
180	7,8553	7,6877	7,6788	7,6700	7,6612	7,6526	7,6440	7,6356	7,6272
190	7,8898	7,6532	7,6443	7,6354	7,6267	7,6181	7,6095	7,6010	7,5927
200	7,9225	7,6204	7,6115	7,6027	7,5940	7,5853	7,5768	7,5683	7,5599
210	7,9537	7,5893	7,5804	7,5716	7,5628	7,5542	7,5456	7,5372	7,5288
220	7,9834	7,5596	7,5507	7,5419	7,5331	7,5245	7,5159	7,5075	7,4991
230	8,0117	7,5312	7,5223	7,5135	7,5047	7,4961	7,4875	7,4791	7,4707
240	8,0389	7,5040	7,4951	7,4863	7,4776	7,4689	7,4604	7,4519	7,4435
250	8,0650	7,4780	7,4691	7,4602	7,4515	7,4429	7,4343	7,4258	7,4174

Tabela E.13 - Variação do índice de Puckorius em função do pH e do ciclo de concentração – TR02 (continuação)

		CC							
		10,5	10,6	10,7	10,8	10,9	11	11,1	11,2
Alc (mg/L)	pHeq								
50	7,0375	8,4366	8,4284	8,4202	8,4122	8,4041	8,3962	8,3884	8,3806
60	7,1539	8,3202	8,3120	8,3038	8,2958	8,2878	8,2798	8,2720	8,2642
70	7,2523	8,2218	8,2136	8,2054	8,1973	8,1893	8,1814	8,1735	8,1658
80	7,3375	8,1366	8,1283	8,1202	8,1121	8,1041	8,0962	8,0883	8,0805
90	7,4127	8,0614	8,0531	8,0450	8,0369	8,0289	8,0210	8,0131	8,0053
100	7,4800	7,9941	7,9859	7,9777	7,9696	7,9616	7,9537	7,9458	7,9381
110	7,5408	7,9333	7,9250	7,9169	7,9088	7,9008	7,8929	7,8850	7,8772
120	7,5964	7,8777	7,8695	7,8613	7,8532	7,8452	7,8373	7,8294	7,8217
130	7,6475	7,8266	7,8184	7,8102	7,8021	7,7941	7,7862	7,7783	7,7706
140	7,6948	7,7793	7,7711	7,7629	7,7548	7,7468	7,7389	7,7310	7,7232
150	7,7389	7,7353	7,7270	7,7189	7,7108	7,7028	7,6948	7,6870	7,6792
160	7,7801	7,6941	7,6858	7,6777	7,6696	7,6616	7,6536	7,6458	7,6380
170	7,8188	7,6553	7,6471	7,6390	7,6309	7,6229	7,6149	7,6071	7,5993
180	7,8553	7,6189	7,6106	7,6025	7,5944	7,5864	7,5785	7,5706	7,5628
190	7,8898	7,5843	7,5761	7,5680	7,5599	7,5519	7,5439	7,5361	7,5283
200	7,9225	7,5516	7,5434	7,5352	7,5271	7,5191	7,5112	7,5033	7,4955
210	7,9537	7,5204	7,5122	7,5041	7,4960	7,4880	7,4800	7,4722	7,4644
220	7,9834	7,4907	7,4825	7,4744	7,4663	7,4583	7,4503	7,4425	7,4347
230	8,0117	7,4624	7,4541	7,4460	7,4379	7,4299	7,4220	7,4141	7,4063
240	8,0389	7,4352	7,4270	7,4188	7,4107	7,4027	7,3948	7,3869	7,3791
250	8,0650	7,4091	7,4009	7,3927	7,3847	7,3767	7,3687	7,3609	7,3531

Tabela E.13 - Variação do índice de Puckorius em função do pH e do ciclo de concentração – TR02 (continuação)

		CC							
		11,3	11,4	11,5	11,6	11,7	11,8	11,9	12
Alc (mg/L)	pHeq								
50	7,0375	8,3728	8,3652	8,3576	8,3501	8,3426	8,3352	8,3279	8,3206
60	7,1539	8,2564	8,2488	8,2412	8,2337	8,2262	8,2188	8,2115	8,2042
70	7,2523	8,1580	8,1504	8,1428	8,1353	8,1278	8,1204	8,1131	8,1058
80	7,3375	8,0728	8,0651	8,0575	8,0500	8,0426	8,0352	8,0279	8,0206
90	7,4127	7,9976	7,9899	7,9824	7,9748	7,9674	7,9600	7,9527	7,9454
100	7,4800	7,9303	7,9227	7,9151	7,9076	7,9001	7,8927	7,8854	7,8781
110	7,5408	7,8695	7,8618	7,8542	7,8467	7,8393	7,8319	7,8245	7,8173
120	7,5964	7,8139	7,8063	7,7987	7,7912	7,7837	7,7763	7,7690	7,7617
130	7,6475	7,7628	7,7552	7,7476	7,7401	7,7326	7,7252	7,7179	7,7106
140	7,6948	7,7155	7,7079	7,7003	7,6928	7,6853	7,6779	7,6706	7,6633
150	7,7389	7,6715	7,6638	7,6562	7,6487	7,6413	7,6339	7,6265	7,6193
160	7,7801	7,6303	7,6226	7,6150	7,6075	7,6001	7,5927	7,5853	7,5781
170	7,8188	7,5916	7,5839	7,5763	7,5688	7,5614	7,5540	7,5466	7,5394
180	7,8553	7,5551	7,5474	7,5398	7,5323	7,5249	7,5175	7,5101	7,5029
190	7,8898	7,5206	7,5129	7,5053	7,4978	7,4903	7,4830	7,4756	7,4684
200	7,9225	7,4878	7,4802	7,4726	7,4651	7,4576	7,4502	7,4429	7,4356
210	7,9537	7,4567	7,4490	7,4414	7,4339	7,4265	7,4191	7,4117	7,4045
220	7,9834	7,4270	7,4193	7,4117	7,4042	7,3968	7,3894	7,3820	7,3748
230	8,0117	7,3986	7,3909	7,3834	7,3758	7,3684	7,3610	7,3537	7,3464
240	8,0389	7,3714	7,3638	7,3562	7,3487	7,3412	7,3338	7,3265	7,3192
250	8,0650	7,3454	7,3377	7,3301	7,3226	7,3151	7,3078	7,3004	7,2932

Tabela E.13 - Variação do índice de Puckorius em função do pH e do ciclo de concentração – TR02 (continuação)

		CC							
		12,1	12,2	12,3	12,4	12,5	12,6	12,7	12,8
Alc (mg/L)	pHeq								
50	7,0375	8,3134	8,3063	8,2992	8,2922	8,2852	8,2783	8,2714	8,2646
60	7,1539	8,1970	8,1899	8,1828	8,1758	8,1688	8,1619	8,1550	8,1482
70	7,2523	8,0986	8,0915	8,0844	8,0773	8,0704	8,0635	8,0566	8,0498
80	7,3375	8,0134	8,0062	7,9991	7,9921	7,9851	7,9782	7,9713	7,9645
90	7,4127	7,9382	7,9310	7,9239	7,9169	7,9099	7,9030	7,8961	7,8893
100	7,4800	7,8709	7,8638	7,8567	7,8496	7,8427	7,8357	7,8289	7,8221
110	7,5408	7,8101	7,8029	7,7958	7,7888	7,7818	7,7749	7,7680	7,7612
120	7,5964	7,7545	7,7474	7,7403	7,7332	7,7263	7,7193	7,7125	7,7057
130	7,6475	7,7034	7,6963	7,6892	7,6821	7,6752	7,6682	7,6614	7,6546
140	7,6948	7,6561	7,6490	7,6419	7,6348	7,6279	7,6209	7,6141	7,6073
150	7,7389	7,6121	7,6049	7,5978	7,5908	7,5838	7,5769	7,5700	7,5632
160	7,7801	7,5709	7,5637	7,5566	7,5496	7,5426	7,5357	7,5288	7,5220
170	7,8188	7,5322	7,5250	7,5179	7,5109	7,5039	7,4970	7,4901	7,4833
180	7,8553	7,4957	7,4885	7,4814	7,4744	7,4674	7,4605	7,4536	7,4468
190	7,8898	7,4611	7,4540	7,4469	7,4399	7,4329	7,4260	7,4191	7,4123
200	7,9225	7,4284	7,4213	7,4142	7,4071	7,4002	7,3932	7,3864	7,3796
210	7,9537	7,3973	7,3901	7,3830	7,3760	7,3690	7,3621	7,3552	7,3484
220	7,9834	7,3676	7,3604	7,3533	7,3463	7,3393	7,3324	7,3255	7,3187
230	8,0117	7,3392	7,3320	7,3249	7,3179	7,3109	7,3040	7,2971	7,2903
240	8,0389	7,3120	7,3049	7,2978	7,2907	7,2838	7,2768	7,2700	7,2632
250	8,0650	7,2859	7,2788	7,2717	7,2647	7,2577	7,2508	7,2439	7,2371

Tabela E.13 - Variação do índice de Puckorius em função do pH e do ciclo de concentração – TR02 (continuação)

		CC							
		12,9	13	13,1	13,2	13,3	13,4	13,5	13,6
Alc (mg/L)	pHeq								
50	7,0375	8,2578	8,2511	8,2445	8,2379	8,2313	8,2248	8,2183	8,2119
60	7,1539	8,1414	8,1347	8,1281	8,1215	8,1149	8,1084	8,1019	8,0955
70	7,2523	8,0430	8,0363	8,0297	8,0230	8,0165	8,0100	8,0035	7,9971
80	7,3375	7,9578	7,9511	7,9444	7,9378	7,9312	7,9247	7,9183	7,9119
90	7,4127	7,8826	7,8759	7,8692	7,8626	7,8560	7,8495	7,8431	7,8367
100	7,4800	7,8153	7,8086	7,8019	7,7953	7,7888	7,7823	7,7758	7,7694
110	7,5408	7,7545	7,7478	7,7411	7,7345	7,7279	7,7214	7,7150	7,7086
120	7,5964	7,6989	7,6922	7,6855	7,6789	7,6724	7,6659	7,6594	7,6530
130	7,6475	7,6478	7,6411	7,6344	7,6278	7,6213	7,6148	7,6083	7,6019
140	7,6948	7,6005	7,5938	7,5871	7,5805	7,5740	7,5675	7,5610	7,5546
150	7,7389	7,5565	7,5497	7,5431	7,5365	7,5299	7,5234	7,5170	7,5106
160	7,7801	7,5153	7,5085	7,5019	7,4953	7,4887	7,4822	7,4758	7,4694
170	7,8188	7,4765	7,4698	7,4632	7,4566	7,4500	7,4435	7,4371	7,4306
180	7,8553	7,4401	7,4333	7,4267	7,4201	7,4135	7,4070	7,4006	7,3942
190	7,8898	7,4055	7,3988	7,3922	7,3856	7,3790	7,3725	7,3661	7,3596
200	7,9225	7,3728	7,3661	7,3594	7,3528	7,3463	7,3398	7,3333	7,3269
210	7,9537	7,3416	7,3349	7,3283	7,3217	7,3151	7,3086	7,3022	7,2957
220	7,9834	7,3119	7,3052	7,2986	7,2920	7,2854	7,2789	7,2725	7,2660
230	8,0117	7,2836	7,2769	7,2702	7,2636	7,2570	7,2505	7,2441	7,2377
240	8,0389	7,2564	7,2497	7,2430	7,2364	7,2299	7,2234	7,2169	7,2105
250	8,0650	7,2303	7,2236	7,2170	7,2104	7,2038	7,1973	7,1908	7,1844

Tabela E.13 - Variação do índice de Puckorius em função do pH e do ciclo de concentração – TR02 (continuação)

		CC							
		13,7	13,8	13,9	14	14,1	14,2	14,3	14,4
Alc (mg/L)	pHeq								
50	7,0375	8,2056	8,1992	8,1930	8,1867	8,1806	8,1744	8,1683	8,1623
60	7,1539	8,0892	8,0828	8,0766	8,0703	8,0642	8,0580	8,0519	8,0459
70	7,2523	7,9908	7,9844	7,9782	7,9719	7,9658	7,9596	7,9535	7,9475
80	7,3375	7,9055	7,8992	7,8929	7,8867	7,8805	7,8744	7,8683	7,8622
90	7,4127	7,8303	7,8240	7,8177	7,8115	7,8053	7,7992	7,7931	7,7870
100	7,4800	7,7630	7,7567	7,7505	7,7442	7,7380	7,7319	7,7258	7,7198
110	7,5408	7,7022	7,6959	7,6896	7,6834	7,6772	7,6711	7,6650	7,6589
120	7,5964	7,6466	7,6403	7,6341	7,6278	7,6217	7,6155	7,6094	7,6034
130	7,6475	7,5955	7,5892	7,5830	7,5767	7,5706	7,5644	7,5583	7,5523
140	7,6948	7,5482	7,5419	7,5356	7,5294	7,5232	7,5171	7,5110	7,5050
150	7,7389	7,5042	7,4979	7,4916	7,4854	7,4792	7,4731	7,4670	7,4609
160	7,7801	7,4630	7,4567	7,4504	7,4442	7,4380	7,4319	7,4258	7,4197
170	7,8188	7,4243	7,4180	7,4117	7,4055	7,3993	7,3932	7,3871	7,3810
180	7,8553	7,3878	7,3815	7,3752	7,3690	7,3628	7,3567	7,3506	7,3445
190	7,8898	7,3533	7,3470	7,3407	7,3345	7,3283	7,3221	7,3160	7,3100
200	7,9225	7,3205	7,3142	7,3079	7,3017	7,2955	7,2894	7,2833	7,2772
210	7,9537	7,2894	7,2831	7,2768	7,2706	7,2644	7,2582	7,2522	7,2461
220	7,9834	7,2597	7,2534	7,2471	7,2409	7,2347	7,2285	7,2225	7,2164
230	8,0117	7,2313	7,2250	7,2187	7,2125	7,2063	7,2002	7,1941	7,1880
240	8,0389	7,2041	7,1978	7,1915	7,1853	7,1791	7,1730	7,1669	7,1609
250	8,0650	7,1781	7,1718	7,1655	7,1593	7,1531	7,1469	7,1408	7,1348

Tabela E.13 - Variação do índice de Puckorius em função do pH e do ciclo de concentração – TR02 (continuação)

		CC							
		14,5	14,6	14,7	14,8	14,9	15	15,1	15,2
Alc (mg/L)	pHeq								
50	7,0375	8,1563	8,1503	8,1444	8,1385	8,1326	8,1268	8,1210	8,1153
60	7,1539	8,0399	8,0339	8,0280	8,0221	8,0162	8,0104	8,0047	7,9989
70	7,2523	7,9415	7,9355	7,9296	7,9237	7,9178	7,9120	7,9062	7,9005
80	7,3375	7,8562	7,8502	7,8443	7,8384	7,8326	7,8268	7,8210	7,8153
90	7,4127	7,7810	7,7750	7,7691	7,7632	7,7574	7,7516	7,7458	7,7401
100	7,4800	7,7138	7,7078	7,7019	7,6960	7,6901	7,6843	7,6785	7,6728
110	7,5408	7,6529	7,6469	7,6410	7,6351	7,6293	7,6235	7,6177	7,6120
120	7,5964	7,5974	7,5914	7,5855	7,5796	7,5737	7,5679	7,5621	7,5564
130	7,6475	7,5463	7,5403	7,5344	7,5285	7,5226	7,5168	7,5110	7,5053
140	7,6948	7,4989	7,4930	7,4870	7,4812	7,4753	7,4695	7,4637	7,4580
150	7,7389	7,4549	7,4489	7,4430	7,4371	7,4313	7,4255	7,4197	7,4139
160	7,7801	7,4137	7,4077	7,4018	7,3959	7,3901	7,3842	7,3785	7,3727
170	7,8188	7,3750	7,3690	7,3631	7,3572	7,3514	7,3455	7,3398	7,3340
180	7,8553	7,3385	7,3325	7,3266	7,3207	7,3149	7,3091	7,3033	7,2975
190	7,8898	7,3040	7,2980	7,2921	7,2862	7,2803	7,2745	7,2688	7,2630
200	7,9225	7,2712	7,2653	7,2593	7,2534	7,2476	7,2418	7,2360	7,2303
210	7,9537	7,2401	7,2341	7,2282	7,2223	7,2165	7,2106	7,2049	7,1991
220	7,9834	7,2104	7,2044	7,1985	7,1926	7,1868	7,1809	7,1752	7,1694
230	8,0117	7,1820	7,1760	7,1701	7,1642	7,1584	7,1526	7,1468	7,1411
240	8,0389	7,1548	7,1489	7,1429	7,1371	7,1312	7,1254	7,1196	7,1139
250	8,0650	7,1288	7,1228	7,1169	7,1110	7,1051	7,0993	7,0936	7,0878

Tabela E.13 - Variação do índice de Puckorius em função do pH e do ciclo de concentração – TR02 (continuação)

		CC							
		15,3	15,4	15,5	15,6	15,7	15,8	15,9	16
Alc (mg/L)	pHeq								
50	7,0375	8,1096	8,1040	8,0983	8,0928	8,0872	8,0817	8,0762	8,0708
60	7,1539	7,9932	7,9876	7,9819	7,9764	7,9708	7,9653	7,9598	7,9544
70	7,2523	7,8948	7,8892	7,8835	7,8779	7,8724	7,8669	7,8614	7,8560
80	7,3375	7,8096	7,8039	7,7983	7,7927	7,7871	7,7816	7,7762	7,7707
90	7,4127	7,7344	7,7287	7,7231	7,7175	7,7120	7,7064	7,7010	7,6955
100	7,4800	7,6671	7,6614	7,6558	7,6502	7,6447	7,6392	7,6337	7,6282
110	7,5408	7,6063	7,6006	7,5950	7,5894	7,5838	7,5783	7,5728	7,5674
120	7,5964	7,5507	7,5450	7,5394	7,5338	7,5283	7,5228	7,5173	7,5119
130	7,6475	7,4996	7,4939	7,4883	7,4827	7,4772	7,4717	7,4662	7,4608
140	7,6948	7,4523	7,4466	7,4410	7,4354	7,4299	7,4244	7,4189	7,4134
150	7,7389	7,4083	7,4026	7,3970	7,3914	7,3858	7,3803	7,3748	7,3694
160	7,7801	7,3670	7,3614	7,3558	7,3502	7,3446	7,3391	7,3336	7,3282
170	7,8188	7,3283	7,3227	7,3171	7,3115	7,3059	7,3004	7,2949	7,2895
180	7,8553	7,2919	7,2862	7,2806	7,2750	7,2694	7,2639	7,2584	7,2530
190	7,8898	7,2573	7,2517	7,2461	7,2405	7,2349	7,2294	7,2239	7,2185
200	7,9225	7,2246	7,2189	7,2133	7,2077	7,2022	7,1967	7,1912	7,1857
210	7,9537	7,1934	7,1878	7,1822	7,1766	7,1710	7,1655	7,1600	7,1546
220	7,9834	7,1637	7,1581	7,1525	7,1469	7,1413	7,1358	7,1303	7,1249
230	8,0117	7,1354	7,1297	7,1241	7,1185	7,1129	7,1074	7,1020	7,0965
240	8,0389	7,1082	7,1025	7,0969	7,0913	7,0858	7,0803	7,0748	7,0693
250	8,0650	7,0821	7,0765	7,0709	7,0653	7,0597	7,0542	7,0487	7,0433

APÊNDICE 6

Resultados da Análise de Sensibilidade Econômica

Tabela F.1 - Sensibilidade (taxa de desconto x VPL) do cenário 3a

Taxa (%)	0	5	10	15	20	25	30	35
Ano								
1	1006427,69	958502,57	914934,27	875154,52	838689,75	805142,16	774175,15	745502,00
2	1006427,69	912859,59	831758,43	761003,93	698908,12	644113,72	595519,35	552223,70
3	1006427,69	869390,08	756144,02	661742,55	582423,43	515290,98	458091,80	409054,59
4	1006427,69	827990,55	687403,66	575428,30	485352,86	412232,78	352378,31	303003,40
5	1006427,69	788562,43	624912,42	500372,44	404460,72	329786,23	271060,24	224446,96
6	1006427,69	751011,84	568102,20	435106,47	337050,60	263828,98	208507,88	166257,01
7	1006427,69	715249,37	516456,54	378353,45	280875,50	211063,19	160390,67	123153,34
8	1006427,69	681189,88	469505,95	329003,00	234062,92	168850,55	123377,44	91224,70
9	1006427,69	648752,27	426823,59	286089,56	195052,43	135080,44	94905,72	67573,85
10	1006427,69	617859,30	388021,44	248773,53	162543,69	108064,35	73004,40	50054,70
VPL	9106205,13	6813296,07	5225990,70	4092955,93	3261348,21	2635381,56	2153339,16	1774422,45

Tabela F.1 - Sensibilidade (taxa de desconto x VPL) do cenário 3a (continuação)

Taxa (%)	40	45	50	55	60	65	70	75
Ano								
1	718876,92	694088,07	670951,80	649308,19	629017,31	609956,18	592016,29	575101,54
2	513483,52	478681,42	447301,20	418908,51	393135,82	369670,41	348244,88	328629,45
3	366773,94	330125,12	298200,80	270263,55	245709,89	224042,67	204849,93	187788,26
4	261981,39	227672,50	198800,53	174363,58	153568,68	135783,44	120499,96	107307,58
5	187129,56	157015,51	132533,69	112492,63	95980,42	82292,99	70882,33	61318,61
6	133663,97	108286,56	88355,79	72575,89	59987,77	49874,54	41695,49	35039,21
7	95474,27	74680,39	58903,86	46823,16	37492,35	30226,99	24526,76	20022,40
8	68195,90	51503,72	39269,24	30208,49	23432,72	18319,39	14427,50	11441,37
9	48711,36	35519,80	26179,49	19489,35	14645,45	11102,66	8486,77	6537,93
10	34793,83	24496,42	17453,00	12573,77	9153,41	6728,89	4992,22	3735,96
VPL	1471012,85	1223997,70	1019877,59	848935,32	704052,00	579926,36	472550,30	378850,50

Tabela F.1 - Sensibilidade (taxa de desconto x VPL) do cenário 3a (continuação)

Taxa (%)	80	85	90	95	100	105	110
Ano							
1	559126,50	544014,97	529698,79	516116,77	503213,85	490940,34	479251,28
2	310625,83	294062,15	278788,84	264675,26	251606,92	239483,09	228214,90
3	172569,91	158952,51	146730,97	135730,91	125803,46	116821,02	108673,76
4	95872,17	85920,28	77226,82	69605,59	62901,73	56985,86	51749,41
5	53262,32	46443,39	40645,70	35695,18	31450,87	27797,98	24642,58
6	29590,18	25104,54	21392,47	18305,22	15725,43	13559,99	11734,56
7	16438,99	13570,02	11259,20	9387,29	7862,72	6614,63	5587,89
8	9132,77	7335,15	5925,89	4814,00	3931,36	3226,65	2660,90
9	5073,76	3964,94	3118,89	2468,72	1965,68	1573,97	1267,09
10	2818,76	2143,21	1641,52	1266,01	982,84	767,79	603,38
VPL	296439,36	223439,34	158357,27	99993,12	47373,04	-300,47	-43686,07

Tabela F.2 - Sensibilidade (taxa de desconto x VPL) do cenário 11a

Taxa (%)	0	5	10	15	20	25	30	35
Ano								
1	1493342,28	1422230,74	1357583,89	1298558,50	1244451,90	1194673,82	1148724,83	1106179,46
2	1493342,28	1354505,47	1234167,17	1129181,31	1037043,25	955739,06	883634,48	819392,20
3	1493342,28	1290005,21	1121970,16	981896,79	864202,71	764591,25	679718,83	606957,18
4	1493342,28	1228576,39	1019972,87	853823,29	720168,92	611673,00	522860,64	449597,91
5	1493342,28	1170072,75	927248,06	742455,04	600140,77	489338,40	402200,49	333035,49
6	1493342,28	1114355,00	842952,78	645613,08	500117,31	391470,72	309384,99	246692,96
7	1493342,28	1061290,48	766320,71	561402,68	416764,42	313176,57	237988,46	182735,52
8	1493342,28	1010752,83	696655,19	488176,24	347303,69	250541,26	183068,04	135359,65
9	1493342,28	962621,75	633322,90	424501,08	289419,74	200433,01	140821,57	100266,40
10	1493342,28	916782,62	575748,09	369131,37	241183,11	160346,41	108324,29	74271,41
VPL	11802305,37	8400075,82	6044824,43	4363621,97	3129678,41	2200866,08	1485609,23	923370,79

Tabela F.2 - Sensibilidade (taxa de desconto x VPL) do cenário 11a (continuação)

Taxa (%)	40	45	50	55	60	65	70	75
Ano								
1	1066673,05	1029891,23	995561,52	963446,63	933338,92	905055,93	878436,63	853338,44
2	761909,32	710269,81	663707,68	621578,47	583336,83	548518,74	516727,43	487621,97
3	544220,95	489841,25	442471,79	401018,37	364585,52	332435,60	303957,31	278641,12
4	388729,25	337821,55	294981,19	258721,53	227865,95	201476,12	178798,42	159223,50
5	277663,75	232980,38	196654,13	166917,11	142416,22	122106,74	105175,54	90984,86
6	198331,25	160676,12	131102,75	107688,46	89010,14	74004,09	61867,97	51991,35
7	141665,18	110811,12	87401,83	69476,43	55631,33	44850,96	36392,92	29709,34
8	101189,41	76421,46	58267,89	44823,50	34769,58	27182,40	21407,60	16976,77
9	72278,15	52704,46	38845,26	28918,39	21730,99	16474,18	12592,71	9701,01
10	51627,25	36347,90	25896,84	18657,02	13581,87	9984,35	7407,47	5543,43
VPL	473170,16	106647,88	-196226,53	-449871,49	-664850,05	-849028,29	-1008353,40	-1147385,61

Tabela F.2 - Sensibilidade (taxa de desconto x VPL) do cenário 11a (continuação)

Taxa (%)	80	85	90	95	100	105	110
Ano							
1	829634,60	807212,04	785969,62	765816,55	746671,14	728459,65	711115,37
2	460908,11	436330,83	413668,22	392726,44	373335,57	355346,17	338626,37
3	256060,06	235854,50	217720,12	201398,17	186667,78	173339,59	161250,65
4	142255,59	127488,92	114589,53	103281,11	93333,89	84555,90	76786,02
5	79030,88	68912,93	60310,28	52964,67	46666,95	41246,78	36564,77
6	43906,05	37250,23	31742,25	27161,37	23333,47	20120,38	17411,80
7	24392,25	20135,26	16706,45	13928,91	11666,74	9814,82	8291,33
8	13551,25	10883,92	8792,87	7143,03	5833,37	4787,72	3948,25
9	7528,47	5883,20	4627,83	3663,09	2916,68	2335,47	1880,12
10	4182,48	3180,11	2435,70	1878,51	1458,34	1139,25	895,30
VPL	-1269667,66	-1377985,44	-1474554,53	-1561155,54	-1639233,47	-1709971,66	-1774347,42

Tabela F.3 - Sensibilidade (taxa de desconto x VPL) do cenário 17a

Taxa (%)	0	5	10	15	20	25	30	35
Ano								
1	1413147,73	1345854,98	1284679,75	1228824,11	1177623,11	1130518,18	1087036,71	1046776,10
2	1413147,73	1281766,65	1167890,68	1068542,71	981352,59	904414,55	836182,09	775389,70
3	1413147,73	1220730,14	1061718,80	929167,57	817793,82	723531,64	643216,99	574362,74
4	1413147,73	1162600,13	965198,91	807971,80	681494,85	578825,31	494782,30	425453,88
5	1413147,73	1107238,22	877453,56	702584,17	567912,38	463060,25	380601,77	315151,02
6	1413147,73	1054512,59	797685,05	610942,76	473260,31	370448,20	292770,59	233445,20
7	1413147,73	1004297,71	725168,23	531254,57	394383,60	296358,56	225208,15	172922,37
8	1413147,73	956474,01	659243,84	461960,50	328653,00	237086,85	173237,04	128090,65
9	1413147,73	910927,63	599312,59	401704,78	273877,50	189669,48	133259,26	94881,96
10	1413147,73	867550,12	544829,62	349308,51	228231,25	151735,58	102507,12	70282,93
VPL	11000563,75	7781038,64	5552267,52	3961347,95	2793668,87	1914735,06	1237888,49	705843,03

Tabela F.3 - Sensibilidade (taxa de desconto x VPL) do cenário 17a (continuação)

Taxa (%)	40	45	50	55	60	65	70	75
Ano								
1	1009391,23	974584,64	942098,49	911708,21	883217,33	856453,17	831263,37	807512,99
2	720993,74	672127,34	628065,66	588198,85	552010,83	519062,53	488978,45	461435,99
3	514995,53	463536,10	418710,44	379483,13	345006,77	314583,35	287634,38	263677,71
4	367853,95	319680,07	279140,29	244827,82	215629,23	190656,58	169196,70	150672,98
5	262752,82	220469,01	186093,53	157953,43	134768,27	115549,44	99527,47	86098,84
6	187680,59	152047,59	124062,35	101905,44	84230,17	70029,96	58545,57	49199,34
7	134057,56	104860,41	82708,23	65745,45	52643,86	42442,40	34438,57	28113,91
8	95755,40	72317,52	55138,82	42416,42	32902,41	25722,67	20257,98	16065,09
9	68396,71	49874,15	36759,22	27365,43	20564,01	15589,50	11916,46	9180,05
10	48854,80	34395,97	24506,14	17655,12	12852,50	9448,18	7009,68	5245,74
VPL	279818,80	-67020,73	-353630,36	-593654,24	-797088,16	-971375,76	-1122144,90	-1253710,88

Tabela F.3 - Sensibilidade (taxa de desconto x VPL) do cenário 17a (continuação)

Taxa (%)	80	85	90	95	100	105	110
Ano							
1	785082,07	763863,64	743761,96	724691,14	706573,86	689340,36	672927,49
2	436156,71	412899,26	391453,66	371636,48	353286,93	336263,59	320441,66
3	242309,28	223188,79	206028,24	190582,81	176643,47	164031,02	152591,27
4	134616,27	120642,59	108435,92	97734,78	88321,73	80015,13	72662,51
5	74786,82	65212,21	57071,54	50120,40	44160,87	39031,77	34601,19
6	41548,23	35249,84	30037,65	25702,77	22080,43	19039,89	16476,76
7	23082,35	19053,97	15809,29	13180,91	11040,22	9287,75	7846,08
8	12823,53	10299,44	8320,68	6759,44	5520,11	4530,61	3736,23
9	7124,18	5567,27	4379,30	3466,38	2760,05	2210,05	1779,16
10	3957,88	3009,33	2304,90	1777,63	1380,03	1078,07	847,22
VPL	-1369426,22	-1471927,18	-1563310,38	-1645260,80	-1719145,83	-1786085,29	-1847003,97

Tabela F.4 - Sensibilidade (taxa de desconto x VPL) do cenário 11a – 3a

Taxa (%)	0	5	10	15	20	25	30	35
Ano								
1	463728,17	463728,17	442649,62	423403,98	405762,15	389531,67	374549,68	360677,47
2	486914,58	441645,88	402408,75	368177,38	338135,13	311625,33	288115,14	267168,50
3	486914,58	420615,12	365826,13	320154,24	281779,27	249300,27	221627,03	197902,59
4	486914,58	400585,83	332569,21	278394,99	234816,06	199440,21	170482,33	146594,51
5	486914,58	381510,32	302335,65	242082,60	195680,05	159552,17	131140,25	108588,53
6	486914,58	363343,16	274850,59	210506,61	163066,71	127641,74	100877,12	80435,95
7	486914,58	346041,10	249864,17	183049,23	135888,92	102113,39	77597,78	59582,18
8	486914,58	329562,96	227149,25	159173,24	113240,77	81690,71	59690,60	44134,95
9	486914,58	313869,48	206499,31	138411,51	94367,31	65352,57	45915,85	32692,56
10	486914,58	298923,32	187726,65	120357,84	78639,42	52282,06	35319,88	24216,71
VPL	2672913,83	1586779,75	818833,74	270666,04	-131669,80	-434515,48	-667729,93	-851051,66

Tabela F.4 - Sensibilidade (taxa de desconto x VPL) do cenário 11a – 3a (continuação)

Taxa (%)	40	45	50	55	60	65	70	75
Ano								
1	347796,13	335803,16	324609,72	314138,44	304321,61	295099,75	286420,34	278236,90
2	248425,81	231588,39	216406,48	202669,96	190201,01	178848,33	168482,55	158992,52
3	177447,01	159716,13	144270,99	130754,81	118875,63	108392,93	99107,38	90852,87
4	126747,86	110149,05	96180,66	84357,94	74297,27	65692,68	58298,46	51915,92
5	90534,19	75964,86	64120,44	54424,48	46435,79	39813,75	34293,21	29666,24
6	64667,28	52389,56	42746,96	35112,57	29022,37	24129,54	20172,48	16952,14
7	46190,91	36130,73	28497,97	22653,27	18138,98	14623,97	11866,16	9686,94
8	32993,51	24917,75	18998,65	14615,01	11336,86	8863,01	6980,10	5535,39
9	23566,79	17184,65	12665,77	9429,04	7085,54	5371,52	4105,94	3163,08
10	16833,42	11851,48	8443,84	6083,25	4428,46	3255,47	2415,26	1807,47
VPL	-997842,69	-1117349,82	-1216104,11	-1298806,81	-1368902,06	-1428954,64	-1480903,70	-1526236,11

Tabela F.4 - Sensibilidade (taxa de desconto x VPL) do cenário 11a – 3a (continuação)

Taxa (%)	80	85	90	95	100	105	110
Ano							
1	270508,10	263197,07	256270,83	249699,79	243457,29	237519,31	231864,09
2	150282,28	142268,69	134879,39	128051,17	121728,65	115863,08	110411,47
3	83490,15	76901,99	70989,15	65667,27	60864,32	56518,57	52576,89
4	46383,42	41568,64	37362,71	33675,52	30432,16	27570,04	25036,61
5	25768,57	22469,54	19664,58	17269,50	15216,08	13448,80	11922,20
6	14315,87	12145,70	10349,78	8856,15	7608,04	6560,39	5677,24
7	7953,26	6565,24	5447,25	4541,62	3804,02	3200,19	2703,45
8	4418,48	3548,78	2866,98	2329,03	1902,01	1561,07	1287,36
9	2454,71	1918,26	1508,93	1194,38	951,01	761,50	613,03
10	1363,73	1036,90	794,18	612,50	475,50	371,46	291,92
VPL	-1566107,02	-1601424,78	-1632911,81	-1661148,66	-1686606,51	-1709671,19	-1730661,35