UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

ESCOLA DE QUÍMICA

PROGRAMA EM TECNOLOGIA DOS PROCESSOS QUÍMICOS E BIOQUÍMICOS

PROCEDIMENTO *TOTAL SITE* NA SÍNTESE DE REDES DE ÁGUAS COM MÚLTIPLOS CONTAMINANTES

Ewerton Emmanuel da Silva Calixto

RIO DE JANEIRO

2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

ESCOLA DE QUÍMICA

PROGRAMA EM TECNOLOGIA DOS PROCESSOS QUÍMICOS E BIOQUÍMICOS

PROCEDIMENTO *TOTAL SITE* NA SÍNTESE DE REDES DE ÁGUAS COM MÚLTIPLOS CONTAMINANTES

Ewerton Emmanuel da Silva Calixto

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciências.

Orientadores:

Eduardo Mach Queiroz, D.Sc

Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D.Sc

Rio de Janeiro

Agosto de 2011

CALIXTO, EWERTON EMMANUEL DA SILVA

Procedimento *Total Site* na Síntese de Redes de Águas Com Múltiplos Contaminantes / Ewerton Emmanuel da Silva Calixto. – Rio de Janeiro: UFRJ, 2011.

XXII, 228 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Eduardo Mach Queiroz e Fernando Luiz Pellegrini Pessoa

Dissertação (mestrado) – UFRJ/Programa em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos/Escola de Química, 2011.

Referencias Bibliográficas: p. 223-228.

1. Redes de Águas. 2. Múltiplos Contaminantes. 3. Diagrama de Fontes de Águas. I. Calixto, Ewerton Emmanuel da Silva. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa em Tecnologia dos Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química. III. Procedimento *Total Site* na Síntese de Redes de Águas Com Múltiplos Contaminantes.

PROCEDIMENTO *TOTAL SITE* NA SÍNTESE DE REDES DE ÁGUAS COM MÚLTIPLOS CONTAMINANTES

Ewerton Emmanuel da Silva Calixto

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA DOS PROCESSOS QUÍMICOS E BIOQUÍMICOS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS.

Orientadores:

Prof. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D.Sc.

Prof. Eduardo Mach Queiroz, D.Sc.

Aprovada por:

Prof. Carlos Augusto Guimarães Perlingeiro, Ph.D.

Prof. Juacyara Carbonelli Campos, D.Sc.

Prof. Tito Lívio Moitinho Alves, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

AGOSTO DE 2011

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, força, coragem e graça que me tem concedido para vencer cada obstáculo que se antepõe à minha frente.

Ao meu querido e saudoso pai Manoel (*in memoriam*) por sempre acreditar no meu potencial, proporcionando-me anos de educação e estudo. Seu sacrifício não foi em vão. Hoje o seu filho é mestre.

A minha querida e amada mãe, Maria, pela incansável e constante dedicação. Ela simplesmente foi a minha maior companheira nas horas de luta. Sempre que precisei, soube me disciplinar, colaborando de maneira indescritível para o sucesso do seu filho. Mesmo estando distante meu coração está perto. Mainha, sou eternamente grato pelo seu amor.

Ao professor Fernando Luiz Pellegrini Pessoa pela orientação e constante apoio, sempre acreditando no sucesso deste trabalho. Suas observações e ideias foram fundamentais para o cumprimento da pesquisa.

Ao professor Eduardo Mach Queiroz pela enorme contribuição e apoio, ensinando-me a percorrer cada meandro de uma dissertação.

A Reinaldo Mirre pelo apoio dispensado no decorrer da pesquisa. Sua contribuição foi de elevada importância para elucidar muitos questionamentos sobre o DFA.

Aos professores do Programa em Tecnologia dos Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro que ministraram as aulas na Chemtech. Cada disciplina foi de fundamental importância para a consolidação da minha formação acadêmica.

Ao Programa em Tecnologia dos Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro pela oportunidade de fazer parte deste corpo discente de excelência e pela parceria firmada com a Chemtech.

A Chemtech por todo apoio e oportunidade de fazer o mestrado. Sou grato pelas liberações e compreensões dos meus gerentes.

DEDICATÓRIA

Ao Senhor Jesus razão maior da minha existência. Sem Ele nada posso fazer.

Aos meus queridos pais por todo cuidado, tempo, dedicação e educação.

EPÍGRAFE

“Critica o tolo, e ele te odiará, critica o sábio, e ele te amará...”.

Provérbios 9:8

Resumo da Dissertação apresentada ao Programa em Tecnologia dos Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

PROCEDIMENTO *TOTAL SITE* NA SÍNTESE DE REDES DE ÁGUAS COM MÚLTIPLOS CONTAMINANTES

EWERTON EMMANUEL DA SILVA CALIXTO

Nos últimos anos, a eficiência alocativa do uso da água recebeu especial enfoque por pesquisadores em todo o mundo. No campo industrial, muitos são os trabalhos desenvolvidos e estes possuem um objetivo comum: desenvolver uma metodologia que apresente uma rede ótima, ou seja, aquela que possui a melhor configuração das operações que fazem uso de água, minimizando a quantidade de água limpa (*freshwater*) consumida e maximizando o reúso entre elas. Muitos destes trabalhos têm enfrentado problemas semelhantes, como considerar em suas metodologias estudos de casos reais de grande porte que possuam um número significativo de operações (maior que três). A água industrial, em grande parte dos processos, apresenta um número extenso de componentes não desejáveis, também conhecidos como contaminantes. Para realizar os cálculos de transferência de massa entre estes, é necessário escolher um que seja referência para os demais. As técnicas até então utilizadas para esta escolha, quando testadas em problemas com um número considerável de operações e contaminantes, têm resultado em violações nos limites máximos de concentração na entrada e saída das operações, sendo este um critério restritivo fundamental para o problema. Uma dessas abordagens é o procedimento algoritmo-heurístico DFA (Diagrama de Fontes de Águas) que emergiu como uma estratégia simples e ao mesmo tempo robusta em sua abrangência. No entanto, até então, algumas lacunas existiam no que diz respeito à escolha de um contaminante e operação que fossem referências nos cálculos. Este trabalho apresenta uma abordagem nova "*Total Site*" para a maximização do reúso de água, em conjunto com uma estratégia para identificar, dentro de uma superestrutura, qual é o melhor contaminante e operação de referência. A geração de cenários consistiu na análise de exemplos reais e de grande porte, presentes na literatura. Os resultados obtidos mostram a simplicidade, eficácia e robustez do método, aproximando-se dos resultados obtidos por Leewongtanawit e Kim (2008) os quais fizeram uso de programação matemática.

Abstract of Dissertation presented to the Chemical and Biochemical Process Technology Program of School of Chemistry of UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

TOTAL SITE PROCEDURE ON THE SYNTHESIS OF WATER NETWORKS WITH MULTIPLE CONTAMINANTS

EWERTON EMMANUEL DA SILVA CALIXTO

In recent years the allocative efficiency of water use has received special attention from researchers around the world. In the industrial sector, many works have been developed, and all of those seek a common objective: to develop a methodology to produce an optimal network, i.e. that one with the optimal configuration among operations which makes use of water, minimizing the amount of freshwater consumed and maximizing reuse. Many of these works have faced common problems, such as to consider in its methodologies real large-scale case studies with a large number of operations. Industrial water, in most cases, features an extensive number of undesirable components, also called contaminants. To perform mass transfer calculations of between them, it's necessary to choose one to be a reference for the others. The techniques previously used for this election, when tested on problems with a considerable number of operations and contaminants, have resulted in violations of the maximum concentration in the inlet and outlet of the operations, which is a fundamental restrictive criterion for the problem. One such approach is the heuristic algorithm called DFA (Water Source Diagram) which has emerged as a simple and yet robust strategy for this purpose. However, until then, there were some shortcomings with regard to the choice and operation of a reference contaminant. This work presents a new "*Total Site*" approach to maximize the reuse of water, linked with a strategy to identify, within a superstructure, which is the best contaminant and operation of reference. The generation of scenarios consisted in the analysis of real and large scale examples in the literature. The results show the simplicity, effectiveness and robustness of the method, approaching the results obtained by Leewongtanawit e Kim (2008) that made use of mathematical programming.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....26

1.1. MOTIVAÇÃO 26

1.2. ESTRUTURA DO TEXTO 28

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 29

2.1. MÉTODOS QUE ENVOLVEM PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA 29

2.2. MÉTODOS GRÁFICOS 37

2.3. ALGORITMOS HEURÍSTICOS 45

2.4. DIAGRAMA DE FONTES DE ÁGUA (DFA) 49

2.5. DIAGRAMA DE FONTES DE ÁGUA APLICADO A MÚLTIPLOS CONTAMINANTES 55

2.5.1 A Escolha do Contaminante de Referência.....56

2.5.2 A Escolha da Operação de Referência 58

2.5.3 Aplicação do DFA em processos com mais de três contaminantes.....60

3. PROCEDIMENTOS PARA MÁXIMO REÚSO COM MÚLTIPLOS CONTAMINANTES.61

3.1. PROCEDIMENTO DE MÁXIMO REÚSO PROPOSTO POR GOMES (2002).....62

3.1.1 Problema de Wang e Smith (1994) com as 3 operações.....62

3.1.1.1 Escolha do Contaminante de Referência 62

3.1.1.2 Relações de Transferência de Massa 63

3.1.1.3 Ajuste das concentrações (Regra do deslocamento) 63

3.1.1.4 Construção do Diagrama de Fontes de Água 67

3.1.2 Problema de Wang e Smith (1994) com as operações 1 e 2. 69

3.1.2.1 Escolha do Contaminante de Referência 69

3.1.2.2 Relações de Transferência de Massa 69

3.1.2.3 Ajuste das concentrações (Regra do deslocamento) 70

3.1.2.4 Construção do Diagrama de Fontes de Água 71

3.1.3 Problema de Wang e Smith (1994) com as operações 1 e 3. 73

3.1.3.1 Escolha do Contaminante de Referência 73

3.1.3.2 Relações de Transferência de Massa 73

3.1.3.3 Ajuste das concentrações (Regra do deslocamento) 73

3.1.3.4 Construção do Diagrama de Fontes de Água 75

3.1.4 Problema de Wang e Smith (1994) com as operações 2 e 3. 76

3.1.4.1 Escolha do Contaminante de Referência 76

3.1.4.2 Relações de Transferência de Massa 76

3.1.4.3 Ajuste das concentrações (Regra do deslocamento) 78

3.1.4.4 Construção do Diagrama de Fontes de Água 79

3.2. PROCEDIMENTO DE MÁXIMO REÚSO PROPOSTO POR SANTOS (2007).....81

3.2.1 Problema de Wang e Smith (1994) com as operações 1, 2 e 3. 81

3.2.1.1 Escolha do Contaminante de Referência 81
3.2.2 Escolha da Operação de Referência 82
3.2.2.1 Relações de Transferência de Massa 83
3.2.2.2 Ajuste das concentrações (Regra do deslocamento) 83
3.2.2.3 Critério de Monotonicidade 87
3.2.2.4 Construção do Diagrama de Fontes de Água 88
3.2.3 Problema de Wang e Smith (1994) com as operações 1, 2 90
3.2.3.1 Escolha do Contaminante de Referência 90
3.2.3.2 Escolha da Operação de Referência 91
3.2.3.3 Relações de Transferência de Massa 91
3.2.3.4 Ajuste das concentrações (Regra do deslocamento) 91
3.2.3.5 Critério de Monotonicidade 92
3.2.3.6 Construção do Diagrama de Fontes de Água 92
3.2.4 Problema de Wang e Smith (1994) com as operações 1 e 3 94
3.2.4.1 Escolha do Contaminante de Referência 94
3.2.4.2 Escolha da Operação de Referência 94
3.2.4.3 Relações de Transferência de Massa 94
3.2.4.4 Ajuste das concentrações (Regra do deslocamento) 95
3.2.4.5 Critério de Monotonicidade 96
3.2.4.6 Construção do Diagrama de Fontes de Água 96
3.2.5 Problema de Wang e Smith (1994) com as operações 2 e 3 98
3.2.5.1 Escolha do Contaminante de Referência 98
3.2.5.2 Escolha da Operação de Referência 99
3.2.5.3 Relações de Transferência de Massa 99
3.2.5.4 Ajuste das concentrações (Regra do deslocamento) 99
3.2.5.5 Critério de Monotonicidade 101
3.2.5.6 Construção do Diagrama de Fontes de Água 101
3.3. PROCEDIMENTO DE MÁXIMO REÚSO PROPOSTO POR MIRRE (2007) 103
3.4. CONCLUSÕES 103
4. PROCEDIMENTO "*TOTAL SITE*" PARA DETERMINAÇÃO DO MÁXIMO REÚSO 105
4.1. ESTUDO DE CASO COM 10 OPERAÇÕES E 4 CONTAMINANTES 108
4.1.1 Procedimento para Determinação do Contaminante e da Operação de Referência 110
4.1.1.1 BLOCO 1 111
4.1.1.1.1 Cenário 1 (10, 1, 2) 111
4.1.1.1.2 Cenário 2 (10, 1, 3) 113
4.1.1.1.3 Cenário 3 (10, 1, 4) 114
4.1.1.1.4 Cenário 4 (10, 1, 5) 116
4.1.1.1.5 Cenário 5 (10, 1, 8) 117
4.1.1.1.6 Cenário 6 (10, 1, 9) 119
4.1.1.1.7 Cenário 7 (10, 2, 3) 120
4.1.1.1.8 Cenário 8 (10, 2,4) 121

4.1.1.1.9 Cenário 9 (10, 2,5) 123
4.1.1.1.10 Cenário 10 (10, 2,8) 124
4.1.1.1.11 Cenário 11 (10, 2,9) 126
4.1.1.1.12 Cenário 12 (10, 3,4) 127
4.1.1.1.13 Cenário 13 (10, 3,5) 129
4.1.1.1.14 Cenário 14 (10, 3,8) 130
4.1.1.1.15 Cenário 15 (10, 3,9) 132
4.1.1.1.16 Cenário 16 (10, 4,5) 133
4.1.1.1.17 Cenário 17 (10, 4,8) 135
4.1.1.1.18 Cenário 18 (10, 4,9) 136
4.1.1.1.19 Cenário 19 (10, 5,8) 138
4.1.1.1.20 Cenário 20 (10, 5,9) 139
4.1.1.1.21 Cenário 21 (10, 8,9) 141
4.1.1.1.22 Conclusões Parciais 142
4.1.1.2 BLOCO 2 143
4.1.1.2.1 Cenário 1 (7, 1, 2) 144
4.1.1.2.2 Cenário 2 (7, 1, 3) 145
4.1.1.2.3 Cenário 3 (7, 1, 4) 147
4.1.1.2.4 Cenário 4 (7, 1, 5) 148
4.1.1.2.5 Cenário 5 (7, 1, 8) 150
4.1.1.2.6 Cenário 6 (7, 1, 9) 151
4.1.1.2.7 Cenário 7 (7, 2, 3) 153
4.1.1.2.8 Cenário 8 (7, 2, 4) 154
4.1.1.2.9 Cenário 9 (7, 2, 5) 156
4.1.1.2.10 Cenário 10 (7, 2, 8) 157
4.1.1.2.11 Cenário 11 (7, 2, 9) 159
4.1.1.2.12 Cenário 12 (7, 3, 4) 160
4.1.1.2.13 Cenário 13 (7, 3, 5) 162
4.1.1.2.14 Cenário 14 (7, 3, 8) 163
4.1.1.2.15 Cenário 15 (7, 3, 9) 165
4.1.1.2.16 Cenário 16 (7, 4, 5) 166
4.1.1.2.17 Cenário 17 (7, 4, 8) 168
4.1.1.2.18 Cenário 18 (7, 4, 9) 169
4.1.1.2.19 Cenário 19 (7, 5, 8) 170
4.1.1.2.20 Cenário 20 (7, 5, 9) 172
4.1.1.2.21 Cenário 21 (7, 8, 9) 173
4.1.1.2.22 Conclusões Parciais 175
4.1.1.3 BLOCO 3 176
4.1.1.3.1 Cenário 1 (6, 1, 2, 3) 177
4.1.1.3.2 Cenário 2 (6, 1, 2, 4) 178
4.1.1.3.3 Cenário 3 (6, 1, 2, 5) 180
4.1.1.3.4 Cenário 4 (6, 1, 2, 8) 181
4.1.1.3.5 Cenário 5 (6, 1, 2, 9) 182
4.1.1.3.6 Cenário 6 (6, 1, 3, 4) 184
4.1.1.3.7 Cenário 7 (6, 1, 3, 5) 185

4.1.1.3.8 Cenário 8 (6, 1, 3, 8) 187
4.1.1.3.9 Cenário 9 (6, 1, 3, 9) 189
4.1.1.3.10 Cenário 10 (6, 1, 4, 5) 190
4.1.1.3.11 Cenário 11 (6, 1, 4, 8) 191
4.1.1.3.12 Cenário 12 (6, 1, 4, 9) 193
4.1.1.3.13 Cenário 13 (6, 1, 5, 8) 194
4.1.1.3.14 Cenário 14 (6, 1, 5, 9) 196
4.1.1.3.15 Cenário 15 (6, 1, 8, 9) 197
4.1.1.3.16 Conclusões Parciais 199
4.1.1.4 BLOCO FINAL 200
4.1.1.4.1 Análise Preliminar 200
4.1.1.4.2 Propostas – BLOCO FINAL 201
4.1.1.5 Comparativo DFA tradicional e Estratégia *TOTAL SITE* 206
4.1.2 Cenário 1 206
4.1.3 Cenário 2 211
4.1.4 Cenário 3 213
4.1.5 Cenário 4 216
4.1.5.1.1 Conclusões Parciais 219
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES 221

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Dados limite de operação referente ao problema proposto por Wang e Smith (1994). 52

Tabela 3.1 - Dados limites para as correntes de processo apresentados por Wang e Smith (1994). 62

Tabela 3.2 - Relações de Transferência de Massa. 63

Tabela 3.3 - Valores de concentração limites dos contaminantes A, B, C tendo o contaminante A como sendo o de referência. 64

Tabela 3.4 - Novos dados limites de vazão e concentração após aplicação da técnica do deslocamento. 66

Tabela 3.5 - Relações de Transferência de Massa (Operações 1 e 2). 70

Tabela 3.6 – Valores limites de concentração para os contaminantes A, B e C com o contaminante A como referência (Operações 1 e 2). 70

Tabela 3.7 - Novos valores limites após o deslocamento (operações 1 e 2). 71

Tabela 3.8 - Relações de transferência de massa (Operações 1 e 3). 73

Tabela 3.9 - Valores de concentração limites dos contaminantes A, B, C tendo o contaminante A como sendo o de referência (Operações 1 e 3). 74

Tabela 3.10 - Novos valores limites após o deslocamento (operações 1 e 3). 74

Tabela 3.11 - Relações de Transferência de Massa (Operações 2 e 3). 76

Tabela 3.12 - Valores limites de concentração para os contaminantes A, B e C com o contaminante A como referência (Operações 2 e 3). 77

Tabela 3.13 - Novos valores limites após o deslocamento (operações 2 e 3). 78

Tabela 3.14 - Dados limites para as correntes de processo apresentados por Wang e Smith (1994). 81

Tabela 3.15 - Cálculo da vazão mínima e do fator R para o problema apresentado por Wang e Smith (1994). 82

Tabela 3.16 - Relações de Transferência de Massa para o procedimento proposto por Santos (2007) com três operações e três contaminantes. 83

Tabela 3.17 - Indicação do ajuste de concentrações. Santos (2007). 84

Tabela 3.18 - Concentrações a serem ajustadas na operação 2. 84

Tabela 3.19 - Concentrações ajustadas na operação 2. 85

Tabela 3.20 - Concentrações a serem ajustadas na operação 3. 86

Tabela 3.21 - Concentrações ajustadas na operação 3. 86

Tabela 3.22 - Concentrações do contaminante de referência C, ajustadas. Verificação da monotonicidade das concentrações. 87

Tabela 3.23 - Dados limites para as correntes de processo apresentados por Wang e Smith (1994). Concentrações do contaminante de referência C ajustadas. 88

Tabela 3.24 - Cálculo da vazão mínima e do fator R para o problema apresentado por Wang e Smith (1994). 90

Tabela 3.25 - Relações de Transferência de Massa para o procedimento proposto por Santos (2007) com duas operações e três contaminantes. 91

Tabela 3.26 - Concentrações a serem ajustadas na operação 2. 91

Tabela 3.27 - Concentrações do contaminante de referência B, sem ajustes. Verificação da monotonicidade das concentrações. 92

Tabela 3.28 - Cálculo da vazão mínima e do fator R para o problema apresentado por Wang e Smith (1994). 94

Tabela 3.29 - Relações de Transferência de Massa para o procedimento proposto por Santos (2007) com duas operações e três contaminantes. 95

Tabela 3.30 - Concentrações a serem ajustadas na operação 3. 95

Tabela 3.31 - Concentrações ajustadas na operação 3. 96

Tabela 3.32 – Concentrações ajustadas do contaminante de referência C. Verificação da monotonicidade das concentrações. 96

Tabela 3.33 - Dados limites para as correntes de processo apresentados por Wang e Smith (1994). Concentrações do contaminante de referência C ajustadas e presença das operações 1 e 3. 97

Tabela 3.34 - Cálculo da vazão mínima e do fator R para o problema apresentado por Wang e Smith (1994). 98

Tabela 3.35 - Relações de Transferência de Massa para o procedimento proposto por Santos (2007) com três operações e três contaminantes. 99

Tabela 3.36 - Concentrações a serem ajustadas na operação 2. 99

Tabela 3.37 - Concentrações ajustadas na operação 2. 100

Tabela 3.38 – Concentrações ajustadas do contaminante de referência C. Verificação da monotonicidade das concentrações. 101

Tabela 3.39 - Dados limites para as correntes de processo apresentados por Wang e Smith (1994). Concentrações do contaminante de referência C ajustadas e presença das operações 2 e 3. 101

Tabela 3.40 - Resultados comparativos para cada cenário estudado, fazendo uso dos procedimentos de Gomes (2002) e Santos (2007) e aplicados no problema de Wang e Smith (1994). 104

Tabela 4.1 - Dados limites de concentração e vazão para o estudo de caso contendo dez operações e quatro contaminantes. Fonte: (Leewongtanawit e Kim, 2008). 109

Tabela 4.2 – Resultados do Bloco 1 – Cenário 1. 113

Tabela 4.3 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 2. 114

Tabela 4.4 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 3. 116

Tabela 4.5 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 4. 117

Tabela 4.6 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 5. 119

Tabela 4.7 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 6. 120

Tabela 4.8 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 7. 121

Tabela 4.9 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 8. 123

Tabela 4.10 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 9. 124

Tabela 4.11 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 10. 126

Tabela 4.12 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 11. 127

Tabela 4.13 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 12. 129

Tabela 4.14 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 13. 130

Tabela 4.15 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 14. 132

Tabela 4.16 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 15. 133

Tabela 4.17 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 16. 135

Tabela 4.18 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 17. 136

Tabela 4.19 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 18. 138

Tabela 4.20 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 19. 139

Tabela 4.21 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 20. 141

Tabela 4.22 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 21. 142

Tabela 4.23 - Resumo dos resultados obtidos em cada cenário do bloco 1. 143

Tabela 4.24 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 1. 145

Tabela 4.25 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 2. 147

Tabela 4.26 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 3. 148

Tabela 4.27 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 4. 150

Tabela 4.28 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 5. 151
Tabela 4.29 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 6. 153
Tabela 4.30 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 7. 154
Tabela 4.31 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 8. 156
Tabela 4.32 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 9. 157
Tabela 4.33 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 10. 159
Tabela 4.34 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 11. 160
Tabela 4.35 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 12. 162
Tabela 4.36 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 13. 163
Tabela 4.37 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 14. 165
Tabela 4.38 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 15. 166
Tabela 4.39 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 16. 167
Tabela 4.40 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 17. 169
Tabela 4.41 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 18. 170
Tabela 4.42 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 19. 172
Tabela 4.43 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 20. 173
Tabela 4.44 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 21. 175
Tabela 4.45 - Resumo dos resultados obtidos em cada cenário do bloco 2. 175
Tabela 4.46 - Resultados do Bloco 3 – Cenário 1. 178
Tabela 4.47 - Resultados do Bloco 3 – Cenário 2. 179
Tabela 4.48 - Resultados do Bloco 3 – Cenário 3. 181
Tabela 4.49 - Resultados do Bloco 3 – Cenário 4. 182
Tabela 4.50 - Resultados do Bloco 3 – Cenário 5. 184
Tabela 4.51 - Resultados do Bloco 3 – Cenário 6. 185
Tabela 4.52 - Resultados do Bloco 3 – Cenário 7. 187
Tabela 4.53 - Resultados do Bloco 3 – Cenário 8. 188
Tabela 4.54 - Resultados do Bloco 3 – Cenário 9. 190
Tabela 4.55 - Resultados do Bloco 3 – Cenário 10. 191
Tabela 4.56 - Resultados do Bloco 3 – Cenário 11. 193

Tabela 4.57 - Resultados do Bloco 3 – Cenário 12. 194
Tabela 4.58 - Resultados do Bloco 3 – Cenário 13. 196
Tabela 4.59 - Resultados do Bloco 3 – Cenário 14. 197
Tabela 4.60 - Resultados do Bloco 3 – Cenário 15. 198
Tabela 4.61 - Resumo dos resultados obtidos em cada cenário do bloco 3. 199
Tabela 4.62 - Resumo dos resultados levantados na análise preliminar para cada bloco. 201
Tabela 4.63 - Proposta 1 para o Bloco Final. 201
Tabela 4.64 - Proposta 2 para o Bloco Final. 202
Tabela 4.65 - Proposta 3 para o Bloco Final. 202
Tabela 4.66 - Proposta 4 para o Bloco Final. 203
Tabela 4.67 - Proposta 5 para o Bloco Final. 203
Tabela 4.68 - Proposta 6 para o Bloco Final. 204
Tabela 4.69 - Proposta 7 para o Bloco Final. 204
Tabela 4.70 – Resultados DFA Global – Cenário 1..... 209
Tabela 4.71 – Resultados DFA Global – Cenário 2..... 213
Tabela 4.72 – Resultados DFA Global – Cenário 3..... 216
Tabela 4.73 – Resultados DFA Global – Cenário 4..... 219

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Minimização do consumo de água primária via reúso. 50

Figura 2.2 – Minimização do consumo de água primária via regeneração com reúso. 50

Figura 2.3 – Minimização do consumo de água primária via regeneração com reciclo. 50

Figura 2.4 – Equipamento de transferência de massa. 51

Figura 2.5 – DFA para dados da Tabela 2.1. Determinação do mínimo consumo de água primária para o máximo reúso. Ponto de *pinch* na concentração de 100 ppm. Fonte: (GOMES, 2002). 52

Figura 2.6 - Rede de transferência de massa para o máximo reúso referente ao diagrama da Figura 2.5. Fonte: (GOMES, 2002). 54

Figura 3.1 - Limites de concentração e reúso nas operações. 64

Figura 3.2 - Diagrama de Fontes de Água (DFA) considerando o contaminante A como referência. 67

Figura 3.3 - Fluxograma para a rede de transferência de massa com as três operações presentes. Procedimento proposto por Gomes (2002). 69

Figura 3.4 - Limites de concentração. Reúso na operação 2. 71

Figura 3.5 - Diagrama de Fontes de Água com o contaminante A como referência (Operações 1 e 2)..... 72

Figura 3.6 - Fluxograma da rede de transferência de massa (Operações 1 e 2). 72

Figura 3.7 - Limites de concentração. Reúso na operação 3. 74

Figura 3.8 - Diagrama de Fontes de Água com o contaminante A como referência (Operações 1 e 3)..... 75

Figura 3.9 - Fluxograma da rede de transferência de massa (Operações 1 e 3). 76

Figura 3.10 - Limites de concentração. Reúso na operação 3. 77

Figura 3.11 - Diagrama de Fontes de Água com o contaminante A como referência (Operações 2 e 3). 79

Figura 3.12 - Fluxograma da rede de transferência de massa (operações 2 e 3). 80

Figura 3.13 - Fluxograma da rede de transferência de massa (operações 2 e 3). Acréscimo na vazão da operação 2. 80

Figura 3.14 - Diagrama de Fontes de Água para o problema proposto por Wang e Smith (1994) e estudado como base no procedimento proposto por Santos (2007) 88

Figura 3.15 - Fluxograma para a rede de transferência de massa com as três operações presentes. Procedimento proposto por Santos (2007). 90

Figura 3.16 - Diagrama de Fontes de Água com o contaminante A como referência (Operações 1 e 2). 93

Figura 3.17 - Fluxograma da rede de transferência de massa (Operações 1 e 2). 94

Figura 3.18 - Diagrama de Fontes de Água com o contaminante C como referência (Operações 1 e 3). 97

Figura 3.19 - Fluxograma da rede de transferência de massa (Operações 1 e 3). 98

Figura 3.20 - Diagrama de Fontes de Água com o contaminante C como referência (Operações 2 e 3). 102

Figura 3.21 - Fluxograma da rede de transferência de massa (Operações 2 e 3). 102

Figura 3.22 - Fluxograma da rede de transferência de massa (Operações 2 e 3). Acréscimo na vazão da operação 3. 103

Figura 4.1 - Estrutura *TOTAL SITE*. 106

Figura 4.2 - Algoritmo para a escolha da operação de referência e número de blocos. 107

Figura 4.3 - Algoritmo para a escolha da contaminante de referência. 108

Figura 4.4 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 1..... 112

Figura 4.5 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 1. 112

Figura 4.6 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 2..... 113

Figura 4.7 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 2. 114

Figura 4.8 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 3..... 115

Figura 4.9 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 3. 115

Figura 4.10 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 4..... 116

Figura 4.11 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 4. 117

Figura 4.12 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 5..... 118

Figura 4.13 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 5. 118

Figura 4.14 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 6..... 119

Figura 4.15 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 6. 119

Figura 4.16 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 7..... 120

Figura 4.17 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 7. 121

Figura 4.18 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 8..... 122

Figura 4.19 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 8. 122

Figura 4.20 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 9..... 123

Figura 4.21 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 9. 124
Figura 4.22 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 10..... 125
Figura 4.23 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 10. 125
Figura 4.24 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 11..... 126
Figura 4.25 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 11. 127
Figura 4.26 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 12..... 128
Figura 4.27 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 12. 128
Figura 4.28 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 13..... 129
Figura 4.29 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 13. 130
Figura 4.30 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 14..... 131
Figura 4.31 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 14. 131
Figura 4.32 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 15..... 132
Figura 4.33 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 15. 133
Figura 4.34 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 16..... 134
Figura 4.35 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 16. 134
Figura 4.36 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 17..... 135
Figura 4.37 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 17. 136
Figura 4.38 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 18..... 137
Figura 4.39 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 18. 137
Figura 4.40 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 19..... 138
Figura 4.41 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 19. 139
Figura 4.42 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 20..... 140
Figura 4.43 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 20. 140
Figura 4.44 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 21..... 141
Figura 4.45 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 21. 142
Figura 4.46 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 1..... 144
Figura 4.47 - Fluxograma - Bloco 2 - Cenário 1. 145
Figura 4.48 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 2..... 146
Figura 4.49 – Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 2. 146

Figura 4.50 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 3..... 147
Figura 4.51 - Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 3..... 148
Figura 4.52 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 4..... 149
Figura 4.53 - Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 4..... 149
Figura 4.54 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 5..... 150
Figura 4.55 - Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 5..... 151
Figura 4.56 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 6..... 152
Figura 4.57 - Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 6..... 152
Figura 4.58 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 7..... 153
Figura 4.59 - Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 7..... 154
Figura 4.60 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 8..... 155
Figura 4.61 - Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 8..... 155
Figura 4.62 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 9..... 156
Figura 4.63 - Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 9..... 157
Figura 4.64 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 10..... 158
Figura 4.65 - Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 10..... 158
Figura 4.66 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 11..... 159
Figura 4.67 - Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 11..... 160
Figura 4.68 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 12..... 161
Figura 4.69 - Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 12..... 161
Figura 4.70 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 13..... 162
Figura 4.71 - Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 13..... 163
Figura 4.72 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 14..... 164
Figura 4.73 - Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 14..... 164
Figura 4.74 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 15..... 165
Figura 4.75 - Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 15..... 166
Figura 4.76 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 16..... 167
Figura 4.77 - Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 16..... 167
Figura 4.78 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 17..... 168

Figura 4.79 - Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 17. 168
Figura 4.80 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 18. 169
Figura 4.81 - Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 18. 170
Figura 4.82 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 19. 171
Figura 4.83 - Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 19. 171
Figura 4.84 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 20. 172
Figura 4.85 - Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 20. 173
Figura 4.86 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 21. 174
Figura 4.87 - Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 21. 174
Figura 4.88 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 3 – Cenário 1. 177
Figura 4.89 - Fluxograma – Bloco 3 – Cenário 1. 177
Figura 4.90 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 3 – Cenário 2. 178
Figura 4.91 - Fluxograma – Bloco 3 – Cenário 2. 179
Figura 4.92 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 3 – Cenário 3. 180
Figura 4.93 - Fluxograma – Bloco 3 – Cenário 3. 180
Figura 4.94 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 3 – Cenário 4. 181
Figura 4.95 - Fluxograma – Bloco 3 – Cenário 4. 182
Figura 4.96 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 3 – Cenário 5. 183
Figura 4.97 - Fluxograma – Bloco 3 – Cenário 5. 183
Figura 4.98 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 3 – Cenário 6. 184
Figura 4.99 - Fluxograma – Bloco 3 – Cenário 6. 185
Figura 4.100 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 3 – Cenário 7. 186
Figura 4.101 - Fluxograma – Bloco 3 – Cenário 7. 186
Figura 4.102 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 3 – Cenário 8. 187
Figura 4.103 - Fluxograma – Bloco 3 – Cenário 8. 188
Figura 4.104 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 3 – Cenário 9. 189
Figura 4.105 - Fluxograma – Bloco 3 – Cenário 9. 189
Figura 4.106 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 3 – Cenário 10. 190
Figura 4.107 - Fluxograma – Bloco 3 – Cenário 10. 191

Figura 4.108 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 3 – Cenário 11. 192

Figura 4.109 - Fluxograma – Bloco 3 – Cenário 11. 192

Figura 4.110 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 3 – Cenário 12. 193

Figura 4.111 - Fluxograma – Bloco 3 – Cenário 12. 194

Figura 4.112 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 3 – Cenário 13. 195

Figura 4.113 - Fluxograma – Bloco 3 – Cenário 13. 195

Figura 4.114 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 3 – Cenário 14. 196

Figura 4.115 - Fluxograma – Bloco 3 – Cenário 14. 197

Figura 4.116 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 3 – Cenário 15. 197

Figura 4.117 - Fluxograma – Bloco 3 – Cenário 15. 198

Figura 4.118 - Superestrutura - Bloco Final. 204

Figura 4.119 - Resultados obtidos por Leewongtanawit e Kim (2008). 205

Figura 4.120 - Diagrama de Fontes de Água para o cenário 1 (contaminante A e operação 10 como referências). 207

Figura 4.121 - Fluxograma da rede de transferência de massa (cenário 1). 208

Figura 4.122 - Balanço de massa a montante da operação 7. 210

Figura 4.123 - Diagrama de Fontes de Água para o cenário 2 (contaminante B e operação 10 como referências). 211

Figura 4.124 - Fluxograma da rede de transferência de massa (cenário 2). 212

Figura 4.125 - Diagrama de Fontes de Água para o cenário 3 (contaminante C e operação 10 como referências). 214

Figura 4.126 - Fluxograma da rede de transferência de massa (cenário 3). 215

Figura 4.127 - Diagrama de Fontes de Água para o cenário 4 (contaminante D e operação 10 como referências). 217

Figura 4.128 - Fluxograma da rede de transferência de massa (cenário 4). 218

LISTA DE SIGLAS

ACA Análise de cascata de água

DEA Diagrama de excesso de água

ESND Extração por Solvente não dispersiva

FE Fonte Externa

GDP Programa disjuntivo generalizado

IP Programação inteira

LP Programação linear

MILP Programação linear inteira mista

MINLP Programação não linear inteira mista

NLP Programação não linear

RCA Rede Completa de água

RTA Redes Totais de água

RTC Redes de transferência de calor

RTM Redes de transferência de massa

WAP Water allocation planning (Planejamento de alocação de água)

WSD Water surplus diagram (Diagrama de excesso de água)

$G^{w}_{j,s}$ Parâmetro que define a escolha do contaminante de referência

$L_{j,s}$ Carga de contaminante *s* na operação *j*

$C^{max}_{j,s,out}$ Concentração máxima de saída do contaminante *s* da operação *j*

CAPÍTULO 1

"À medida que o homem, no desenvolvimento de suas atividades, dela necessita, e considerando que há cada vez mais pessoas dela necessitando, tende o conflito de interesses a ser cada vez mais intenso." Maria Luiza Machado Granziera

INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

A necessidade da conservação de água tem se tornado uma preocupação comum em todo o mundo. Governos, agências ambientais e empresas privadas estão mais atentos à questão do uso racional e sustentável deste bem natural que apesar de abundante em oceanos, com cerca de 97%, está cada vez mais escasso nos subsolos, rios e reservatórios. Para se ter uma ideia, do percentual restante 2% encontram-se inacessíveis em calotas polares e geleiras (BERTAZZOLI *et al.*, 2010). O acesso à água é uma condição de sobrevivência do homem (GRANZIERA, 2006). As mudanças em termos de organização social do ser humano propiciaram uma mudança nas regras do uso deste recurso.

No setor privado, as indústrias de processos químicos representam uma parcela significativa no consumo de água. Neste ambiente utiliza-se água em grande quantidade para os mais variados fins, tais como geração de vapor, água de resfriamento, lavagens, dentre outros. Indústrias de grande porte chegam a utilizar até mais que 40000 L/min de água, onde grande parte desta retorna para o meio ambiente como efluente, que necessita de tratamento prévio para a diminuição da concentração de contaminantes a fim de atingir limites estabelecidos pelas legislações ambientais regidas pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA 357/2005). Dentre suas diversas atribuições, uma das responsabilidades deste órgão é cuidar da "gestão dos recursos hídricos", no planejamento e controle do uso das águas. Algumas leis tanto no âmbito federal quanto estadual servem como base para um estudo mais aprofundado em sistemas de gerenciamento, cujo objetivo principal é solucionar um dos temas mais críticos para o próximo século: a obtenção de água para as populações (GRANZIERA, 2006). Nas indústrias, o tratamento de água e de efluentes demanda um custo e o seu reúso torna-se um fator de extrema importância. Existem muitos motivos para o aproveitamento de água em uma refinaria de petróleo ou planta petroquímica. Muitos destes motivos estão relacionados ao

custo de água primária e a questões ambientais. Não obstante, este custo pode aumentar mediante a quantidade de infraestrutura empreendida, como por exemplo, linhas de tubulações e estações de bombeamento necessárias para o transporte de água a lugares remotos. Este é um dos grandes desafios para empresas, indústrias petroquímicas e refinarias. Apesar de hoje o fornecimento de água primária (água limpa a 0 ppm de contaminantes) ser viável economicamente em muitas empresas, num longo prazo será uma preocupação a mais em muitos lugares do mundo.

Com o objetivo de determinar o ponto ótimo para a captação de água primária sem a presença de contaminantes, a maximização do reúso de água em seus diferentes níveis de concentração se faz necessária. É preciso determinar a quantidade máxima de efluentes aquosos a serem reutilizados, e para tal, muitas estratégias têm sido desenvolvidas dentro do campo da Integração de Processos, seja no uso de programação matemática ou no desenvolvimento de algoritmos heurísticos e gráficos.

Um procedimento proposto por Castro *et al.* (1999) serviu de base para que Gomes (2002) desenvolvesse a estratégia heurística conhecida como Diagrama de Fontes de Águas (DFA), a qual vem sendo aprimorada ao longo dos anos. O trabalho de Gomes (2002) representou um avanço em relação ao de Castro *et al.* (1999) no sentido em que este último considerou unicamente a concentração final do contaminante, enquanto que Gomes (2002) tratava com ambas as concentrações inicial e final. Os problemas então analisados mediante o uso do DFA não apresentaram complexidade suficiente para que fosse estabelecida uma metodologia centrada na consideração de múltiplos contaminantes. Além disso, não foi consolidado um critério que melhor definisse quais seriam o contaminante e operação de referência, através dos quais os cálculos de transferência de massa serviriam de base para os demais.

Em razão disso, trabalhos surgem com propostas que visavam a maximização do reúso de efluentes aquosos com múltiplos contaminantes, produzindo cenários cada vez mais próximos da realidade industrial. Ainda assim, não houve uma metodologia que abordasse diferentes tipos de problemas sem que houvesse violação na taxa de transferência de massa dos contaminantes entre as correntes e sem ultrapassar a concentração limite na entrada de operações.

Assim, um dos principais desafios que se colocou para o desenvolvimento do DFA foi a definição do contaminante e operação de referência para os cálculos.

Em vista do exposto, o objetivo geral deste trabalho é propor um procedimento *Total Site* para a geração de cenários com utilização de mínima quantidade de água em processos químicos complexos, estabelecendo critérios para a escolha do contaminante e da operação de referência, utilizando como ferramenta a metodologia conhecida como Diagrama de Fontes de Água (DFA).

1.2. Estrutura do Texto

O capítulo 2 expõe uma série de trabalhos no setor de gerenciamento de água e seus efluentes. É mostrada a importância de cada estratégia utilizada, seja no âmbito gráfico, matemático ou heurístico e no final são apresentadas algumas pesquisas que fizeram uso do DFA com múltiplos contaminantes, analisando cada proposta sugerida com o objetivo de preencher a principal lacuna do DFA, ou seja, a determinação do contaminante e operação de referência, visando evitar nas soluções propostas as violações que existem nas concentrações limites.

O capítulo 3 é uma aplicação de abordagens anteriores do Diagrama de Fontes de Águas com múltiplos contaminantes. Os principais trabalhos envolvendo DFA com múltiplos contaminantes são analisados e criticados. Em cada um é verificada e enfatizada a importância da escolha sistemática de um contaminante e operação de referência, tendo em vista as possíveis violações nas concentrações limites dos contaminantes. O exemplo proposto por Wang e Smith (1994), contendo três operações e três contaminantes, serviu de base para os cálculos para cada método investigado.

O capítulo 4 apresenta um novo procedimento *TOTAL SITE* para maximização do reúso de água fazendo uso do diagrama de fonte de águas. É tomado como base um estudo de caso de uma refinaria de petróleo contendo dez operações e 4 contaminantes. O procedimento é analisado e criticado tendo em vista os resultados obtidos no capítulo anterior

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

"Se tens que lidar com água, consulta primeiro a experiência, depois a razão". Leonardo da Vinci

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A busca pela solução ótima para o reúso de efluentes aquosos nas indústrias remonta a mais de trinta anos com os trabalhos de Carnes, Ford e Brad (1973); Hospondarec e Thompson (1974); Mishra, Fan e Erickson (1975); Anderson (1977); Sane e Atkins (1977).

Os próximos tópicos deste capítulo mostram um breve histórico de algumas das técnicas desenvolvidas ao longo das últimas décadas na busca do consumo ótimo e gerenciamento do uso e reúso de água em diversos tipos de processos na indústria química, petroquímica e petrolífera. É mostrada a importância dos métodos de programação matemática na área e como a tecnologia *pinch* influenciou toda uma série de pesquisas visando minimizar o consumo de água limpa e descarte de efluentes industriais. Ao final é dado um enfoque especial aos métodos heurísticos, em especial o DFA, foco deste trabalho.

2.1. Métodos que Envolvem Programação Matemática

Os algoritmos de programação matemática passaram a ser mais utilizados com o crescimento no uso dos computadores pessoais e com o seu poder de processamento. O contínuo desenvolvimento tecnológico favoreceu o surgimento de várias propostas de trabalho nesta área principalmente a partir de meados da década de 90.

Em paralelo a esse desenvolvimento, o mundo passou por um aumento na conscientização da preservação ambiental e de seus recursos hídricos. Viu-se então uma oportunidade no emprego dessas ferramentas com a finalidade de minimizar efluentes aquosos nas indústrias de processo. Os métodos utilizados são: programação linear (LP); programação não-linear (NLP); programação inteira (IP); programação linear inteira mista (MILP) e; programação não-linear inteira mista (MINLP).

Esses métodos são, na maioria das vezes, aplicados na otimização através de superestruturas (JEŻOWSKI, 2010). Superestruturas estão presentes em qualquer trabalho que envolva a síntese de processos, pois a partir delas é possível incorporar todas as possíveis soluções dos mesmos. Essa abordagem é bastante utilizada pelo fato de atuar simultaneamente na busca do ótimo global, mesmo que este percurso possa ser feito em mais de uma etapa. Os fatos das superestruturas de redes de águas em processos sem regeneração serem mais simples do que as de redes de transferência de calor, de possuírem a capacidade de identificar as não linearidades e permitirem o pleno conhecimento das questões topológicas, as tornam bem mais atrativas.

Todavia a presença de unidades de tratamento ou regeneração aumenta o nível de complexidade na formulação das superestruturas. Meyer e Floudas (2006) levantaram a dificuldade na escolha da operação ótima, mostrando que a seleção da tecnologia de tratamento em uma rede de efluentes aquosos é equivalente ao problema generalizado de *pooling*, o qual em sua versão padrão é difícil de ser solucionado. Em decorrência disso, apenas uma unidade de tratamento é escolhida na maioria das vezes. As exceções são unidades modulares, a exemplo dos processos de extração por solventes não dispersiva (ESND).

Muitas publicações podem ser encontradas para superestruturas de redes totais de água (RTA) que englobam os subsistemas de redes de águas do processo, visando o seu máximo reúso. Bagajewicz e Faria (2009) criaram uma superestrutura chamada de Rede Completa de Água (RCA) cujo objetivo foi promover uma maior integração entre os sistemas de pré-tratamento, de uso de água e de tratamento. Um diferencial desta superestrutura encontra-se na aplicação direta, não apenas em redes de transferência de massa envolvendo água, mas também em redes de transferência de calor. Essa flexibilidade nas aplicações é uma das grandes vantagens no uso de ferramentas de otimização em superestruturas.

Segundo Jeżowski (2010), superestruturas podem ser adequadas para definir a melhor sequência no arranjo de unidades de tratamento. O fato de, em geral, os modelos de superestruturas serem não lineares, aliado à possibilidade de existência de variáveis binárias e restrições topológicas, pode tornar muito complexa a formulação por MINLP, principalmente se a busca estiver sendo feito para atingir um ótimo global. Ainda de acordo com o autor, várias propostas foram feitas para tratar casos como este, dentre as quais estão:

- Linearização direta;
- Geração de “boas” estimativas;
- Procedimento de solução sequencial;
- Abordagens de otimização Meta-Heurísticas;
- Otimização Global (determinística).

A técnica de linearização direta é bem empregada em redes de água com ou sem regeneração, sendo estas com vazão de saída constante. Bagajewicz e Savelski (2001) utilizaram a técnica de linearização em um modelo de redes de água com processos de transferência de massa considerando um e múltiplos contaminantes. Porém, a técnica mostrou-se ineficaz na busca do ótimo global como foi previsto um ano antes (BAGAJEWIKCZ, RIVAS e MARIANO, 2000).

Outra alternativa para determinar ótimo global ou uma aproximação é inicializar adequadamente um otimizador local através de otimização determinística, por exemplo. Essa opção é mais usual no projeto de redes de tratamento de efluentes.

Métodos estocásticos e técnicas de linearização são também usados para determinar a melhor estimativa inicial. Entretanto a experiência tem mostrado que fixar as concentrações de saída em seus valores máximos é a melhor opção em processos de transferência que possuem operações que façam uso de água.

O pioneirismo no uso de programação matemática cabe ao trabalho desenvolvido por Takama *et al.* (1980). Pela primeira vez uma regra heurística associada ao uso de programação linear foi utilizada no gerenciamento de água e tratamento de efluentes aquosos em larga escala com aplicação em uma refinaria de petróleo. Foi considerado o sistema como um todo para a maximização do reúso de água. Segundo o autor, um problema de otimização em um processo que faça uso de água e efluentes aquosos é definido como aquele no qual uma superestrutura, aliada às condições de processo e dividida em subsistemas, é determinada para minimizar/maximizar uma função objetivo.

O problema de otimização proposto foi resolvido através do que o autor chamou de Método Complexo. A estratégia utilizada concentrou-se em duas frentes: a primeira no planejamento e busca da melhor configuração para o sistema de alocação de água e a segunda na determinação das condições ótimas do processo, especificando as variáveis para cada subsis-

tema. Para um problema bem posto do ponto de vista da Programação Linear não só a função objetivo necessita ser linear, como também suas restrições. Para isso a estrutura complexa do problema foi simplificada mediante o uso de regras heurísticas e as variáveis para os poluentes não tratados foram fixadas. Dessa forma foi possível minimizar uma função de custo para o reúso e tratamento de efluentes. Apesar das simplificações realizadas e limitações computacionais da época, este trabalho representou um começo no uso dos algoritmos matemáticos no reúso de água e tratamento de efluentes na indústria.

El-Halwagi e Manousiouthakis (1989) elaboraram o conceito de Redes de Transferência de Massa (RTM), tendo como base o conceito de Redes de Transferência de Calor (RTC), desenvolvido por Linnhoff (1993). A proposta da metodologia foi promover a troca de massa entre correntes ricas e pobres em poluentes para a remoção destes. A abordagem foi aplicada em processos sem regeneração e na presença de apenas um contaminante. Em outro trabalho, El-Halwagi e Manousiouthakis (1990) consideraram processos com regeneração, e com o intuito de atacar o problema em uma rede de transferência de massa foi utilizada programação linear (LP), minimizando deste modo o custo e os limites de trocas mássicas nos pontos de *pinch*. No mesmo trabalho empregou-se programação não linear inteira mista (MINLP) em um problema de transbordo para identificar o número mínimo de operações.

A partir de então mais trabalhos foram endereçados à busca do ótimo reúso e do mínimo desperdício, levando em consideração não apenas um, mas os vários contaminantes existentes nos processos.

Alva-Argáez, Kokossis e Smith (1998) propuseram a criação de uma superestrutura e formularam o problema do ponto de vista de MINLP. Mediante uma técnica de relaxação, fixaram as restrições das concentrações de saída dos múltiplos contaminantes em seus valores máximos, levando para zero as concentrações nas operações de tratamento e obtendo uma série de equações de balanço de massa, simplificando o problema para ser resolvido do ponto vista de MILP. Outros trabalhos também fizeram uso de técnicas semelhantes de relaxação para obter boas estimativas em problemas de NLP (GALAN e GROSSMANN, 1998). Todas essas simplificações mostraram que a resolução de problemas de MINLP e NLP ainda é um desafio a ser vencido.

Um modelo de NLP foi formulado por Huang, Chang e Ling (1999) para determinar a melhor distribuição de água em redes de tratamento de efluentes aquosos. Vários exemplos,

incluindo várias unidades de uma refinaria foram testados. Múltiplas fontes e sumidouros foram avaliados com o modelo proposto e posteriormente aplicados com sucesso em duas plantas petroquímicas. O modelo, entretanto, levou em consideração apenas a presença de um contaminante.

No ano 2000, Bagajewickz e colaboradores publicaram uma série de artigos onde foram sugeridas condições de otimalidade, para um e múltiplos contaminantes em redes de água e seus efluentes. Segundo o autor em uma de suas revisões, até então, várias iniciativas tinham sido empreendidas para criar um procedimento sistemático envolvendo o problema do reúso de água e efluentes na indústria (BAGAJEWICZ, 2000). Acrescentou ser necessário tirar o foco de abordagens de projetos conceituais e concentrar esforços no desenvolvimento de técnicas de programação matemática.

As condições de otimalidade necessárias para processos que utilizam água com um contaminante foram apresentadas por Savelski e Bagajewickz (2000). Estas condições dizem respeito às técnicas de otimização inseridas no plano de distribuição de água ou *Water Allocation Planning* (WAP), que leva em consideração o reúso de efluentes cujo objetivo é minimizar a captação de água primária da fonte externa. A iniciativa de criar estas condições foi motivada pelos resultados insuficientes apresentados na literatura, que abordavam modelos de superestruturas. Estes modelos necessitaram de um número grande de restrições para representar matematicamente o componente e todos os balanços de massa globais. Devido à natureza não linear dessas restrições, o uso direto de NLP comumente retorna soluções inviáveis. Logo, surgiu a ideia do uso de técnicas de relaxação, para inicialmente, solucionar o problema e depois gerar estimativas viáveis para o problema de NLP. No entanto, mesmo tendo chegado à solução, não houve garantia de que esta fosse ótima, nem globalmente ótima. Com o modelo linearizado para um contaminante, assumiram que cada unidade de processo que utiliza água é caracterizada por uma carga de contaminantes a qual necessita ser completamente removida. As condições de otimalidade dizem respeito às *concentrações máximas na saída* e *monotonicidade das concentrações*.

i. *concentrações máximas na saída*: É indicado que se a solução de um problema WAP é ótima, então todos os processos que usam água primária atingem suas concentrações máximas de saída possíveis. Há a possibilidade da presença de soluções degeneradas nas quais as concentrações de saída são muito

baixas e a vazão de água primária global mantém-se a mesma. Esses casos são evitados.

ii. *monotonicidade das concentrações*: Se a solução de um problema WAP é ótima, então em todo processo, as concentrações de saída não são menores que as concentrações das correntes combinadas de efluentes que antecedem este processo. Em termos matemáticos, dado um processo j então $C_{i,out} \geq C_{p_j,i}$ onde $C_{p_j,i}$ é a concentração das correntes combinadas que antecedem o processo j e $C_{i,out}$ representam as concentrações de saída deste processo.

Em outro artigo Savelski e Bagajewickz (2003) apresentaram condições de otimalidade para problemas WAP com múltiplos contaminantes. Foi introduzida uma nova regra de monotonicidade para componentes "chave" no processo. A escolha do *componente-chave*[1] é feita mediante análise dos resultados apresentados pela seguinte equação:

$$G_{j,s}^{w} = \frac{L_{j,s}}{C_{j,s,out}^{max}} \tag{2.1}$$

Em que $L_{j,s}$ é a carga ou vazão mássica de contaminante s na operação j $[M/t]$ e $C_{j,s,out}^{max}$ a concentração máxima de saída do contaminante s da operação j. Logo, segundo os autores, o componente-chave é aquele com maior valor de $G_{j,s}^{w}$. Em outras palavras, este componente-chave é definido como aquele que atinge primeiro sua concentração máxima quando água primária é usada.

Os teoremas são similares aos existentes para um contaminante, em que as condições de concentrações máximas na saída são substituídas pela condição de pelo menos um componente atingindo seu máximo. Já a condição de monotonicidade é substituída pela monotonicidade do componente-chave. Segundo os autores, em alguns casos a fonte externa de água primária não é livre de contaminantes e neste caso as condições de otimalidade necessitam de revisão.

Estas condições de otimalidade foram testadas por Bagajewikcz, Rivas e Mariano (2000), os quais aplicaram um algoritmo árvore de busca (*Branch and Bound*) para identificar

[1] Mais a frente, na revisão de Diagramas de Fontes de Água, o componente-chave acima citado será chamado de contaminante de referência.

soluções ótimas globais com o mínimo consumo de água primária. Também houve a consideração de custos de capital e operacional. A metodologia foi implementada em uma refinaria, onde nove operações e três contaminantes foram utilizadas e o problema WAP foi formulado do ponto de vista de NLP.

A abordagem consistiu no uso de vazões com o máximo reúso dentre uma série de unidades antecessoras a um determinado processo e também visou minimizar o consumo de água primária de um processo aproveitando os efluentes das unidades antecessoras ao mesmo. Definiu-se uma estrutura de reúso com a criação de uma árvore, onde cada ramificação é uma estrutura de máximo reúso. O limite superior foi obtido desenvolvendo uma ramificação completa da árvore. A árvore foi então explorada desenvolvendo cada ramificação e utilizando critérios de parada. Um dos critérios para "podar" essas ramificações baseou-se na monotonicidade do componente-chave e no conhecimento dos processos que utilizam água primária. Ao final foi possível gerar várias soluções subótimas que se situaram muito próximas umas às outras. Contudo, a melhor seleção desses resultados pode ser feita mediante a introdução de critérios adicionais.

Mais recentemente, trabalhos envolvendo algoritmos genéticos têm sido publicados. Como já mencionado, problemas contendo um contaminante podem ser formulados do ponto de vista de LP. Já problemas com múltiplos contaminantes aumentam a complexidade da representação matemática e são formulados mediante o emprego de NLP. Acontece que casos desse tipo possuem geralmente mais de um ótimo local e a precisão e eficiência dos resultados dependem muito de estimativas iniciais. Uma estimativa inadequada pode levar o resultado a um ótimo local.

Pensando nisso, Prakotpol e Srinophakun (2004) utilizaram um algoritmo genético para minimizar o consumo de água primária e maximizar o seu reúso em uma planta. Desenvolveram um modelo de otimização com interface em MATLAB™ para um e múltiplos contaminantes, utilizando LP, NLP e MINLP. Mesmo tendo a capacidade de fugir dos ótimos locais, o algoritmo não produziu resultados que satisfizessem a essas restrições randomicamente e o balanço de massa tornou-se o gargalo para o problema. O inconveniente está na necessidade das restrições de igualdade serem tratadas antes do modelo de otimização ser resolvido pelo uso do algoritmo genético. Para tal, foram desenvolvidas algumas técnicas para tratar as restrições de igualdade em cada tipo de processo. O modelo desenvolvido para múltiplos con-

taminantes apenas cobriu os casos de reúso, deixando de lado as opções com regeneração e reciclo.

Um modelo de fonte-sumidouro foi desenvolvido por Gabriel e El-Halwagi (2005), o qual considera a presença de "interceptores" que atuam como processos de regeneração. Foi assumido que cada interceptor poderia receber água de apenas uma fonte não havendo, desse modo, misturas antes da interceptação. A formulação matemática desenvolvida baseou-se em MINLP, mas devido à não-convexidade da função objetivo e à bilinearidade de várias restrições, a solução global não pôde ser garantida. Logo, tiveram que reformular o problema, fazendo algumas simplificações e resultando num modelo capaz de ser resolvido do ponto de vista da LP, comprovando mais uma vez a dificuldade de se aplicar modelos de MINLP em problemas em redes de transferência de massa.

Outro trabalho nesta mesma linha foi desenvolvido por Karuppiah e Grossmann (2006). Eles desenvolveram uma superestrutura que engloba todas as possíveis alternativas para o tratamento, reúso e reciclo de água. Para a otimização global desta superestrutura foi utilizado NLP de forma não convexa. Este trabalho foi uma generalização da abordagem feita por Takama *et al.* (1980), que combina tanto os processos que formam a rede de uso de água quanto unidades de tratamento em um único sistema. O problema passou a tomar a forma de um Programa Disjuntivo Generalizado (GDP), sendo em seguida transformado em um problema MINLP, (RUIZ e GROSSMANN, 2009). A não convexidade do modelo estrutural deveu-se à presença de bilinearidades nas restrições, o que fez com que os algoritmos NLP falhassem em convergir para uma solução viável ou soluções subótimas.

Um trabalho inovador que substitui NLPs por uma sucessão de LPs considerando a presença de múltiplos contaminantes foi publicado por Teles, Castro e Novais (2008). Uma superestrutura foi criada para levar em consideração todas as possíveis conexões entre as fontes de água e operações que usam água e em seguida diferentes subestruturas foram geradas considerando todas as possíveis sequências das operações. Diferentes soluções são estruturalmente geradas e estes resultados serviram como pontos iniciais para uma abordagem completa de NLP, cuja aplicação forneceu soluções viáveis para o problema. A desvantagem do método está no grande esforço computacional empreendido, devido à grande quantidade de problemas resolvidos, inclusive os de LP, o que tornou inviável a aplicação em um conjunto acima de seis operações. Os próprios autores reconheceram que ainda tratava-se de um traba-

lho em andamento. Os múltiplos pontos de partida, promovidos pelos diferentes LPs promovem uma discussão entre qualidade e eficiência na obtenção dos resultados.

Na atualidade, o desafio de pesquisadores que trabalham com programação matemática com aplicação no uso e reúso de água em plantas químicas, petroquímicas e refinarias é desenvolver um modelo que seja capaz de cobrir, de maneira robusta, o sistema completo de uso de água, o qual engloba: O pré-tratamento de água, processos que usam água e tratamento final dos efluentes, considerando todas as possíveis restrições e por fim obter resultados globalmente ótimos e/ou subótimos.

A influência na adição do pré-tratamento de água no modelo matemático foi investigada em detalhes por Faria e Bagajewicz (2010). O modelo foi criado considerando a *priori* uma estrutura com dois subsistemas. O primeiro correspondeu às operações que faziam uso de água e o segundo referente às unidades de tratamento de água. Depois, as fronteiras desses subsistemas foram removidas incluindo todas as opções de regeneração presentes no subsistema de pré-tratamento de água. Desse modo, os subsistemas de pré-tratamento e tratamento de efluentes tornaram-se um único conjunto de processos de regeneração, que permitiu receber água primária. A inclusão do subsistema de pré-tratamento aos demais forma o conceito de Sistemas Completos de Água, ou redes completas de água (RCA), como já mencionado. A escolha da arquitetura apropriada e as relações complexas entre os subsistemas podem dificultar ou não a busca pelo ótimo global tanto no reúso quanto na descarga de efluentes.

2.2. Métodos Gráficos

Desde a publicação do trabalho seminal de Wang e Smith (1994) inaugurando o conceito de análise *pinch* de água, que é provavelmente a abordagem gráfica mais conhecida, várias estratégias de otimização foram produzidas nesse contexto. No âmbito da transferência de massa, o objetivo da água é remover cargas de impurezas dos processos que a utilizam. Como exemplo destes processos pode-se citar lavagens de vasos, extração de solventes, absorção gasosa, etc. O conceito de curva composta existente para o *pinch* em redes de transferência de calor sofreu adaptação e pôde ser introduzido pelos autores em redes de água como objetivo de se chegar a uma meta de consumo mínimo desta rede. A construção da curva composta é similar à de energia, onde os perfis limite de água são plotados, formando um

diagrama de *concentração de contaminante* versus *carga* deste. Consequentemente esse tipo de estratégia está basicamente limitada ao uso de apenas um contaminante.

Uma estratégia de deslocamento foi apresentada com o objetivo de estender os procedimentos já existentes a casos com múltiplos contaminantes. Apenas os trabalhos de Alva-Argáez, Vallianatos e Kokossis (1999) aplicaram a metodologia proposta fazendo uso de um modelo de transbordo. Nenhum outro trabalho que empregasse essa metodologia foi encontrado na literatura.

Segundo Bagajewicz (2000), os métodos gráficos permitem que engenheiros incorporem fatores que através da programação matemática não seriam possíveis de serem considerados facilmente. As técnicas gráficas também são capazes de fornecer um maior entendimento das interações existentes entre os vários processos de uma planta (MAJOZI e GOUWS, 2008).

Alguns trabalhos têm considerado, na construção da curva composta, os ganhos e perdas que uma rede de água apresenta, com valores de vazão fixos (WANG e SMITH, 1995). Foi chegada à conclusão que para regiões acima da concentração do *pinch*, regiões de alta concentração, a análise de perdas e ganhos torna-se mais simples. Ganhos e pequenas perdas de água nesta região irão apenas afetar, aumentando ou diminuindo, as vazões dos efluentes aquosos. Entretanto se nesta região as perdas forem grandes, uma alteração na vazão de água primária que é provinda de uma fonte externa, deverá ser feita para ajustar a *linha de fornecimento de água*[2] presente no gráfico de limite da curva composta.

Dentro do conceito de síntese de redes de água é possível citar duas subdivisões: as que envolvem *metas de vazão* e os *projetos de redes*. *Meta de vazão* diz respeito à busca pelo mínimo valor de vazão de água primária oriunda de uma fonte externa e vazão de efluentes aquosos para uma determinada rede, e tudo isso baseado nos princípios de concentração e restrições de vazão. Já nos *projetos de redes* se visa definir a estrutura que permite atingir as mínimas taxas obtidas na fase de meta. Em ambos os casos, não é necessário dividir os processos que usam água dos que a produzem. Esses processos são combinados na fase de projeto da rede para alcançar os menores valores de vazão. As principais categorias dentro da sín-

[2] Também conhecida como perfil limite de água representa a mínima ou máxima vazão de fornecimento de água para valores de concentração inicial C_{entrada}e $C_{\text{saída}}$. O fato de a vazão ser máxima ou mínima irá depender se o objetivo é maximizar ou minimizar a quantidade de água. Como será visto mais na frente, este conceito será utilizado para a elaboração do procedimento heurístico Diagrama de Fontes de Água.

tese de água são as que englobam os problemas com *vazão fixa* e os com *carga fixa*. Problemas considerando carga mássica fixa de contaminantes tem sido alvo de estudos desde o surgimento da análise de *pinch* de água em 1994. O importante até então era concentrar esforços na remoção da carga de poluentes, ficando para segundo plano as necessidades de vazão. Foo (2009, p. 5126) sugere que:

- Dado um número de processos que usam água, cada um com concentrações de entrada e saída de impurezas de uma espécie, cada processo necessitará de uma carga de remoção de contaminantes;
- Em cada processo a fonte de água pode entrar na sua máxima concentração (C_{in}) e sair na máxima concentração (C_{out}) das espécies contaminantes;
- Caso haja necessidade, água oriunda de fontes externas é comprada para satisfazer as necessidades de remoção de impurezas do processo.

Sendo assim, se água é usada como um agente de separação de massa em um processo, as perdas e ganhos são desprezados e dessa forma assume-se que vazões de entrada e saída do processo são uniformes. Se essas perdas e ganhos são significantes faz-se necessário realizar modificações no processo. As vazões de entrada e saída das operações que usam água variam de acordo com a seguinte equação de balanço de massa:

$$F_i = \frac{\Delta m_i}{C_{saída} - C_{entrada}} \tag{2.2}$$

O Δm_i é a carga mássica de contaminantes $[M/t]$, $C_{saída}$ e $C_{entrada}$ são as concentrações de contaminantes na saída e na entrada de um determinado processo i. Até o ano 2000, o foco da maioria dos trabalhos estava em problemas com Δm_i constante. Mas, a partir de então, passou-se a investigar casos relacionados à ideia de fonte-sumidouro, em que o foco deixa de ser a carga de poluentes e passa a ser a vazão destes. Para o tipo de modelo mostrado na Equação (2.2) as vazões de entrada e saída deixam de ser uniformes.

El-Halwagi, Gabriel e Harell (2003) introduziram um método sistemático e rigoroso para meta mínima de fontes externas de matéria, utilizando técnicas de reúso e reciclo. De modo análogo aos problemas com carga constante, fizeram as seguintes afirmações com relação à abordagem com vazão uniforme:

- Um determinado número de unidades de consumo de água, conhecidas como sumidouros os quais necessitam de uma vazão F_i e concentração de contaminante C_i deve satisfazer à seguinte restrição: $C_i^{\min} \leq C_i \leq C_i^{\text{máx}}$.
- Um determinado número de unidades geradoras ou fornecedoras de água também conhecidas como fontes, cada fonte tem uma dada vazão F_i e concentração de contaminantes C_i;
- Por fim, fontes externas de água estão disponíveis para compra com objetivo de satisfazer as necessidades dos sumidouros.

A partir dessas premissas foi possível desenvolver um procedimento gráfico não iterativo para determinar o mínimo uso de água primária oriunda de fontes externas. Para obter as condições de otimalidade, utilizou-se um modelo de programação dinâmica e uma solução analítica para a otimização paramétrica. Desse modo, foi possível estabelecer uma representação gráfica baseada na tecnologia *pinch* a partir da construção de uma curva composta de carga versus vazão, de maneira que garantisse o ótimo. Nessa curva o ponto de *pinch* representa o local onde as cargas das fontes recicladas e/ou reutilizadas atingem o sumidouro. Essa estratégia foi aplicada em problemas de fonte-sumidouro com apenas um contaminante. No entanto é possível estendê-la para mais de um contaminante, a partir da escolha de um componente limitante. Os cálculos são feitos em cima desse contaminante e os resultados para os demais são coerentes com os obtidos para o limitante. Mas para outros tipos de problemas envolvendo múltiplos contaminantes um estudo mais aprofundado faz-se necessário.

Wang e Smith (1995) trabalharam a ideia de múltiplas fontes externas de água primária. Levaram em consideração que o custo das fontes externas com maiores níveis de impureza é mais baixo, praticamente zero, quando comparado com fontes de água pura. Também salientaram o fato de ser bastante incômodo utilizar curvas compostas limitantes com múltiplas fontes de água. Além de levar em consideração os ganhos e perdas no processo, a necessidade de atingir a meta de vazão para múltiplas fontes de água simultaneamente é algo que ocorre muito facilmente. Logo, isso envolve um procedimento iterativo e de replotagem da linha de fornecimento de água.

O primeiro trabalho a considerar a construção de uma curva de fonte-sumidouro para tratar de problemas com vazão fixa foi apresentado por Dhole *et al.* (1996). Considerou-se a construção de duas curvas compostas: uma representando todas as fontes disponíveis no sis-

tema e outra contemplando todas as demandas requeridas pelo processo. Em seguida, as curvas foram sobrepostas. Elas foram formadas com dados de concentração versus vazão, em que a variação no nível de concentração aconteceu de cima para baixo. A partir daí foi possível mostrar que a mistura de fontes aquosas com diferentes níveis de concentração, resultaria em uma única fonte com vazão reduzida, modificando o posicionamento do ponto de *pinch*. Polley e Polley (2000) melhoraram essa ideia elaborando outra estratégia de mistura para facilitar a busca por melhores valores de vazão de água, trazendo também uma nova visão com relação à minimização de vazão de água em operações que não são de transferência de massa (operações de vazão fixa), como é o caso de queimadores, torres de resfriamento e reatores.

No entanto a mistura detalhada das fontes corresponde ao segundo estágio da tecnologia *pinch* de água, ou seja, o projeto da rede (FOO, 2009). O processo de tentativa e erro para encontrar a melhor mistura que resulte no melhor *pinch* torna-se cansativo, não garantindo o ótimo enquanto houver lacunas entre as curvas compostas de fontes e demanda. Além disso, o método falha em determinar o *pinch* limitante em um problema com múltiplos pontos de *pinch*.

Uma das ferramentas gráficas mais promissoras para a determinação da mínima vazão de água em problemas de vazão fixa é o *diagrama de excesso de água* (DEA), desenvolvido por Alves (1999) para análises de sistemas de hidrogênio em refinarias de petróleo. Para construir este diagrama é necessário que antes, a curva composta de fonte-sumidouro de água seja estabelecida. Hallale (2002) desenvolveu uma nova representação das curvas compostas, tendo como objetivo a elaboração de diagramas de excesso de água. O modo como as técnicas gráficas vinham sendo tratadas sofriam limitações, principalmente em se tratando de problemas com múltiplas fontes de água e diferentes tipos de operações. Para algumas operações tais como lavagem, extração, *scrubbing* etc, este modelo tradicional de curva composta se adequa bem. No entanto, operações como reatores, queimadores, torres de resfriamento, etc., não podem ser descritas como operações de transferência de massa. Para esse tipo de operação a vazão de água é mais relevante do que a quantidade de contaminante, caso exista algum. A modelagem torna-se mais difícil na medida em que há várias correntes aquosas chegando com diferentes concentrações. Para evitar esse problema a curva composta deve ser feita para operações como torres de resfriamento, que perdem uma quantidade razoável de água por evaporação e essa perda é levada em consideração pelo modelo.

Desse modo Hallale (2002) envidou esforços no sentido de observar o comportamento da pureza de água versus a sua vazão. A pureza pode ser facilmente calculada de posse dos dados de concentração de contaminantes. Por definição a concentração de referência é de 1 milhão de ppm tendo-se então para a pureza da água:

$$\text{pureza} = \frac{1\,000\,000 - C}{1\,000\,000} \tag{2.3}$$

O C é a concentração de contaminantes em ppm. Obtendo os dados de vazão e concentração de contaminantes para possíveis demandas e fontes de água é possível calcular a pureza desta. Sendo assim, obtiveram-se duas curvas, uma representando a demanda e outra as fontes de água. A partir das curvas formadas é possível perceber em quais intervalos há excessos ou carências de água com pureza. Se a curva que representa a fonte está acima da curva de demanda, significa que há excesso de água para aquela vazão naquele intervalo de concentração. Já se a curva de fonte estiver abaixo da de demanda, há carência de água nas condições do intervalo observado. O autor ainda alerta para o fato de que é necessário existir quantidade suficiente de água pura em todos os pontos da rede e que isso é feito mediante o uso do DEA. A grande vantagem desta estratégia é a possibilidade de investigar todas as opções disponíveis e no final estabelecer uma única meta de vazão apontando quais são os pontos de *pinch*. Também é possível aplicar o método não só para operações que envolvem transferência de massa, mas também para torres de resfriamento, reatores etc. Apesar de abranger diferentes tipos de operações, essa técnica é cansativa do ponto de vista computacional, pois para a construção do DEA é necessário um processo de tentativa e erro o qual se repete até ir de encontro ao *pinch*. Além disso, a técnica leva em consideração a presença de um contaminante, não sendo possível tratar de casos com múltiplos contaminantes simultaneamente.

Mais trabalhos têm surgido no sentido de aplicar uma metodologia gráfica que trate tanto com operações com vazão, quanto com carga de contaminantes fixas, simultaneamente. Nesse sentido Prakash e Shenoy (2005) desenvolveram uma nova estratégia gráfica, que difere da citada anteriormente pelo fato de não considerar a pureza de água na construção da curva composta. O método utilizado inova em plotar os dados de carga de contaminantes contra os compostos de fonte e demanda, fazendo o inverso dos demais casos. Diferentemente do trabalho de Hallale (2002), a técnica é não iterativa e trata de ambos os casos com cargas e vazões fixas de contaminantes. Prakash e Shenoy (2005) alertam para o que já foi mencionado

antes, em que o diagrama de excesso de água chega a ser cansativo pelo fato de sempre ter que transferir dados de uma plotagem para outra. A vantagem do método em questão concentra-se em não precisar realizar nenhum cálculo iterativo, nem da pureza de água para representar previamente a meta mínima desta. Os autores também fizeram uso do *princípio do vizinho mais próximo* cujo objetivo é satisfazer a uma determinada demanda, usando as correntes mais próximas para suprir esta necessidade. Dessa forma viu-se que é possível combinar fontes com diferentes níveis de concentração para formar uma única a fim de satisfazer a demanda.

Manan, Tan e Foo (2004) elaboraram o conceito de Análise de Cascata de Água (ACA) ou *Water Cascade Analysis*. Esta técnica consiste na representação numérica do diagrama de excesso de água, com a diferença de não passar pelos mesmas etapas iterativas de tentativa e erro que o WSD (*water surplus diagram*), além de poder ser aplicado, não apenas em operações de transferência de massa, como também em queimadores, torres de resfriamento, reatores, etc. De posse de todos os dados de demanda e fontes disponíveis, assim como os diferentes níveis de concentração de água, uma tabela contendo estes dados é criada e forma-se uma cascata, em ordem decrescente, de pureza de água e demandas/fontes de água cumulativas.

Foo (2007) fez uma modificação na ACA aplicando-a em casos onde existe uma ou mais fontes de água primária. Para uma fonte a estratégia permanece a mesma. No caso de múltiplas fontes, algumas modificações foram feitas e hipóteses estabelecidas. A principal hipótese considera que a fonte de água primária pura é comprada de um fornecedor externo e que por sua vez possui um determinado custo, enquanto que a fonte de qualidade mais baixa é considerada grátis, tais como água de rios ou de chuva, etc. Esse tipo de água pode ser maximizada antes que a água de maior qualidade seja utilizada. Para isso tornou-se necessário determinar as vazões de ambos os tipos de água (qualidade mais baixa e maior) e depois ajustar essas vazões. Essa técnica foi aplicada em alguns exemplos da literatura (WANG e SMITH, 1995; POLLEY e POLLEY, 2000).

Bandyopadhyay (2006) estabeleceu um procedimento algorítmico com representação gráfica conhecida como curva composta de fontes (*Source Composite Curve*). O modelo matemático obedeceu às equações de conservação de massa. Estas equações dizem respeito às fontes e demandas internas e representam as restrições do problema. Como o objetivo foi mi-

nimizar a geração total de efluentes e ambas, função objetivo e restrições eram lineares, foi possível formular o problema do ponto de vista da programação linear. Esse procedimento pode ser aplicado no gerenciamento de água, hidrogênio e redes de reúso de massa. A principal vantagem da curva composta de fontes em relação à outras técnicas, tais como diagrama de excesso de água, análise de cascata de água, etc está no fato da existência da linha de efluentes (*wastewater line*), que é responsável pela indicação da concentração média de efluentes aquosos emitida da rede de água e pelo cálculo da vazão mínima de efluentes mediante o valor absoluto do inverso da sua inclinação .

Outros trabalhos têm dado atenção especial à parte de tratamento e otimização de efluentes aquosos, tanto em operações de transferência de massa (WANG e SMITH, 1994; KUO e SMITH, 1997) quanto em operações com vazão fixa (BANDYOPADHYAY e CORMOS, 2008; NG, FOO e TAN, 2007a; NG, FOO e TAN, 2007b).

Ng, Foo e Tan (2007b) apresentaram um procedimento gráfico para determinar a meta mínima de efluentes e o número mínimo de unidades de tratamento com concentração fixa na saída. Para isso, duas sequências foram elaboradas: (i) identificação das correntes de efluentes via métodos gráficos, tais como a análise de cascata de água e (ii) construção da curva composta de carga de contaminante versus vazão. Assim foi possível estabelecer uma diferença limite para o descarte de efluentes a partir de uma linha limite (*locus* de descarte). A diferença entre a curva composta e esta linha limite resulta na carga total de contaminantes a ser removida.

Os métodos gráficos em toda sua abrangência representam uma ferramenta de extremo valor para o projeto e análise de redes de transferência de massa, de água, podendo apontar o mínimo consumo de água primária de todo um processo visando o seu máximo reúso. Aliado ao fato de que, junto com os procedimentos matemáticos, torna-se possível resolver problemas de maneira mais robusta a partir do desenvolvimento de modelos mais sofisticados. Ciente das limitações mencionadas nos trabalhos acima revisados é notável que a aplicação de uma metodologia gráfica em problemas com múltiplos contaminantes torna-se inviável, pois é necessário assumir pressupostos, o que não justifica a sua utilização, sendo necessária para estes casos uma abordagem matemática ou heurística mais profunda.

2.3. Algoritmos Heurísticos

Tendo em vista não só a complexidade em desenvolver um modelo matemático que atenda à problemas envolvendo múltiplos contaminantes, como também a simplicidade e limitações das já tradicionais e mais recentes abordagens gráficas, a busca por uma metodologia de caráter e aplicação simples e que trate de maneira robusta os mais diferentes casos industriais torna-se de fundamental importância. A descoberta de tal ferramenta, que garanta otimalidade global, contribuirá para que engenheiros de processo e projetistas possam de maneira eficaz, reduzir consideravelmente os gastos com tratamentos de efluentes, custos de capital e operacional.

Os métodos heurísticos (*insight-based methods*) são procedimentos que se baseiam na experiência acumulada com a resolução de determinados problemas (MIRRE, 2007). Estes são fundamentados no método gráfico mais largamente conhecido como tecnologia do ponto de estrangulamento ou tecnologia *pinch* (*pinch technology*), também em outras versões como a análise *pinch*, apresentada por Linnhoff (1979) em sua tese de doutorado. A *priori*, criada para minimizar o consumo energético em plantas de processos químicos, mediante o cálculo de metas viáveis termodinamicamente e pela integração de redes de transferência de calor, serviu de modelo e inspiração para muitas outras técnicas em demais áreas, como é o caso de redes de transferência de massa, redes de água, etc. O sucesso da técnica aplicada em redes de calor também se estendeu às redes mencionadas. Além da Tecnologia do Ponto de Estrangulamento, fazem parte deste grupo os sistemas especialistas, que estão baseados em regras heurísticas e usam métodos empíricos e de inspeção, baseados em conhecimentos acumulados de ideias provadas na prática (GOMES, 2002, p. 14).

Antes do surgimento de trabalhos inspirados na tecnologia *pinch*, o conceito de Redes de Transferência de Massa (RTM) foi introduzido, como mencionado anteriormente (EL-HALWAGI e MANOUSIOUTHAKIS, 1989). A partir de então outras pesquisas tomaram como base essa ideia e fizeram uso da tecnologia *pinch* em diversos problemas, com o intuito de minimizar o consumo de água e efluentes na indústria (LINNHOFF, 1993). *A priori*, os métodos da tecnologia *pinch* foram desenvolvidos para RTM que faziam uso de água. No entanto, por volta de 1996 a tecnologia *pinch* foi expandida para processos que não envolviam esse tipo de rede (DHOLE *et al.*, 1996).

Provavelmente o trabalho de maior influência baseado na ideia do *pinch* foi desenvolvido por Wang e Smith (1994). Essa técnica também conhecida como "*pinch* de água" é muito similar à da curva composta desenvolvida para o *pinch* de Redes de Transferência de Calor (RTC). A busca em maximizar as forças motrizes de concentrações foi o foco inicial do trabalho e para isso desenvolveu-se uma estratégia que dividisse a curva composta limitante em intervalos de cargas mássicas "verticais". Ou seja, isso consistiu em projetar uma rede que levasse em consideração esses intervalos. Aplicada no início para um contaminante, a técnica foi também inserida no contexto de múltiplos. Entretanto, a escolha de um contaminante de referência não é feita de forma sistemática e, a princípio, cada contaminante é tratado de forma isolada e não simultânea. Em se tratando de estações de tratamento, a maior vazão obtida dentre todos os contaminantes torna-se a meta. Mesmo estabelecendo a maior vazão não se obtém o objetivo final.

Li, Fan e Yao (2002) desenvolveram um método para determinar a distribuição de carga mássica ótima entre diferentes processos de tratamento e a sequência de correntes a serem tratadas nesses processos, assim como estabeleceram um critério de separação ou mistura de correntes. Foram propostos quatro cenários que consideraram o projeto com um contaminante e um único processo de tratamento, em seguida considerou-se um contaminante e vários processos de tratamento. Em seguida foi discutido a respeito da escala de escolha nos processos de tratamento. Apesar de existirem diferentes estágios de tratamento para diferentes processos, estes não devem ser levados em consideração nesta escala, uma vez que podem modificar o custo total de tratamento (LINNHOFF, 1979). Logo, considerou-se como sendo o custo total de tratamento, a vazão de efluentes a ser tratada por unidade mássica de contaminante removido. Por fim, foram introduzidos casos com múltiplos contaminantes em conjunto com múltiplos processos de tratamento e foi criado um método de dois estágios, em que no primeiro foi projetada uma sub-rede para cada contaminante e no segundo, as sub-redes foram unidas. Para tal, foi proposto um método novo de união que relaciona toda a estrutura da rede respeitando algumas regras que envolvem, por exemplo, a sequência na qual os contaminantes estariam, caso um método sequencial fosse adotado e também a garantia da otimalidade para, pelo menos um contaminante.

Ullmer *et al.* (2005) apresentaram uma estratégia para a síntese de redes de água fazendo uso da integração entre um conjunto de regras heurísticas e programação matemática. O objetivo foi determinar o custo ótimo de uma rede considerando múltiplos contaminantes

com diferentes possibilidades de reúso e regeneração de água. As regras heurísticas foram criadas para auxiliar na formulação do problema de modo que a solução ótima pudesse ser obtida pelo uso de programação não linear inteira mista (MINLP), que por sua vez foi usada para gerar o custo ótimo como função objetivo a ser minimizada. Essas regras também serviram para determinar a sequência de operações de tratamento que respeitassem as restrições estabelecidas por regulamentações ambientais. E para que isso acontecesse foi necessário observar a dependência da vazão mássica total e das composições das correntes. Sem estas regras, muitos detalhes técnicos ficariam de lado e não seria possível elaborar um modelo matemático mais próximo da realidade industrial. A metodologia heurística consistiu em quatro passos: a análise da síntese do problema, determinação das oportunidades de regeneração e reúso, seleção das operações de tratamento e definição da superestrutura. Em seguida a otimização do modelo matemático foi realizada. No final, foi desenvolvido um *software*, (WADO™), para a coleta de informações do processo de água, horas de trabalho anuais, limites de vazão e concentração, dados de custos etc, contidas em um banco de dados e para determinar qual seria a estrutura ótima. Mais cenários poderiam ter sido observados, já que apenas um caso industrial, contendo três contaminantes e oito operações, foi verificado.

Liu *et al.* (2004) criaram um procedimento heurístico de dois estágios para tratar de problemas que visam minimizar o descarte de efluentes aquosos. Estes estágios consistiram em identificar um fluxograma inicial viável usando regras heurísticas e determinar as vazões das correntes neste fluxograma através do balanço de massa dos contaminantes. Trabalhando com um contaminante estabeleceram que *o processo deve ser iniciado com o contaminante no seu limite mais baixo* e que *para processos com o mesmo limite de concentração na entrada, água deveria ser alocada primeiro para o processo cujo limite de concentração na saída seja o mais baixo*. Já para situações onde há múltiplos contaminantes uma terceira regra foi estabelecida que indica que *o acréscimo de água primária pode ser determinada pelo* **contaminante de referência**. Tomando como base um exemplo proposto por Wang e Smith (1994) contendo dois contaminantes e duas operações, os autores avaliaram a razão entre a concentração atual do contaminante *i* na saída do processo *j* e a concentração limite do contaminante *i* na entrada do processo *j*, conforme mostra a equação abaixo:

$$CR_{j,k}^{i} = \frac{C_{j,\text{saida}}^{i,\text{ atual}}}{C_{j,\text{entrada}}^{i,\text{limite}}} \tag{2.4}$$

O contaminante de referência foi escolhido como aquele que possuía o maior valor de $CR_{j,k}^{i}$. Outras situações que envolveram regeneração e reúso também foram analisadas e uma quarta regra heurística foi criada *com o objetivo de reduzir o custo de regeneração, esta deve ser introduzida no processo que possuir concentrações baixas de contaminantes na saída ou em correntes de saída que possua um custo relativamente baixo para serem regeneradas*. Não é possível avaliar a robustez dos procedimentos criados uma vez que apenas um estudo de caso foi abordado contendo três operações e três contaminantes.

Ulson de Souza *et al.* (2009) aplicaram o procedimento heurístico conhecido como *Diagrama de Fontes de Água*[3] (DFA) numa rede de água em um processo de refino, com o objetivo de reduzir o consumo de água tratada, geração de efluentes, e o custo envolvido no tratamento destes, mediante o reúso das correntes de efluentes no processo. Foi determinada a melhor combinação possível de correntes em diferentes processos. Também foi introduzido um tipo diferente de regeneração para cada contaminante, uma vez que apenas um processo regenerativo não foi suficiente devido os diferentes níveis de eficiência de remoção de cada contaminante. O estudo de caso consistiu em uma rede de água em um processo de refino que havia sido apresentado por Faria (2004) com seis operações e quatro contaminantes. As opções de reúso envolveram estratégias de *máximo reúso, regeneração com reciclo e regeneração com reúso*[4]. A escolha do contaminante de referência não foi bem esclarecida pelos autores e apenas foi relatada a realização de uma análise das cargas mássicas e vazões em cada operação, e mediante esta análise observou-se qual contaminante era o mais crítico. A partir dos cenários levantados, contemplou-se um estudo econômico, comparando estas estratégias com os trabalhos de Faria (2004) e Koppol *et al.* (2004). Percebeu-se que o trabalho de Faria (2004) foi o que obteve menor custo. Mesmo com uma distribuição individual de correntes em um regenerador, não foi suficiente para garantir uma rede que fosse ideal do ponto de vista econômico. Apesar disso, a redução no consumo obtida foi bastante considerável quando comparada com outros casos da literatura.

Ulson de Souza *et al.* (2010) modificaram a metodologia do (DFA) a partir da introdução de uma abordagem de racionalização do uso de água para sistemas bifásicos. Desenvolveram e validaram um software que tem por finalidade racionalizar o uso de água em lavadores

[3] Este conceito será abordado em maiores detalhes no próximo tópico com uma revisão mais aprofundada da literatura.
[4] Assim como o conceito do DFA, estas opções de reúso serão tratadas em detalhes na revisão feita no próximo tópico.

contínuos da indústria têxtil. O algoritmo elaborado efetuou simultaneamente a especificação de metas de consumo e síntese de rede visando solucionar problemas que possuem apenas um contaminante. Abordaram o reúso máximo, regeneração com reúso e processos com restrição de vazão e múltiplas fontes aquosas. Para a validação do software vários testes foram feitos com exemplos da literatura e em lavanderias têxteis, e ficou comprovado o ajuste do modelo com os casos reais. Apesar de toda eficácia obtida, o sistema apenas aplica-se a um contaminante, necessitando assim de estudos mais aprofundados para estendê-lo a múltiplos.

2.4. Diagrama de Fontes de Água (DFA)

Tendo em vista todos os esforços envidados na busca de uma metodologia que atendesse a critérios de simplicidade, aplicabilidade industrial, eficácia e economia, o procedimento conhecido como Diagrama de Fontes de Água emergiu como uma das principais ferramentas no gerenciamento de águas industriais. O DFA engloba três caminhos para reduzir a geração de efluentes líquidos, (GOMES, 2002; GOMES, QUEIROZ e PESSOA, 2007):

- Reúso: o efluente é reutilizado diretamente em outra corrente sem passar por nenhum tratamento prévio, desde que o nível de contaminantes não venha a trazer prejuízos nesta operação;
- Regeneração com reúso: o efluente é regenerado pela remoção parcial de contaminante e reutilizado em outras operações. Com isso o volume de água primária captada é diminuído. Há também diminuição no volume de efluente gerado e na sua carga de contaminantes em função da regeneração;
- Regeneração com reciclo: o efluente passa por um tratamento parcial para a remoção de contaminantes, podendo ser reutilizado pelo processo que o gerou. Há também uma diminuição no volume captado de água primária, no volume de efluente gerado e na sua carga de contaminantes.

As Figuras a seguir ilustram cada situação de reúso seja ele direto em uma operação como mostra a Figura 2.1 (nesse caso a água que sai de uma operação é diretamente aproveitada em outra), passando por um processo regenerativo (Figura 2.2) ou passando por uma regeneração com parte da corrente regenerada sendo reciclada (Figura 2.3).

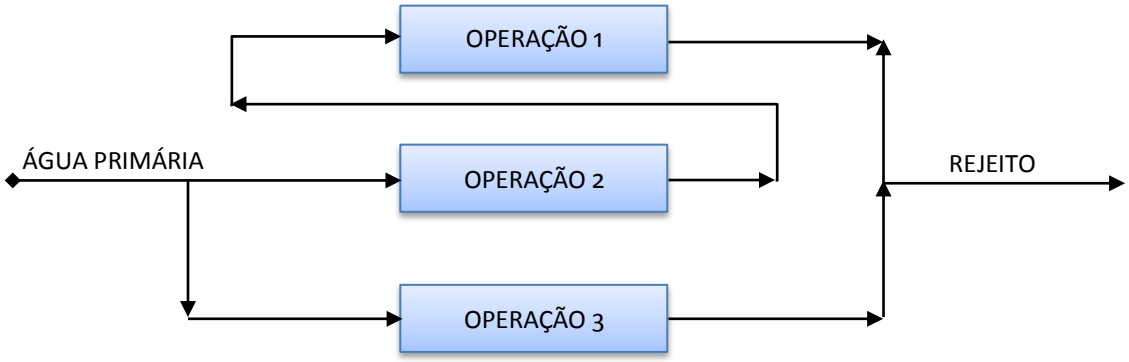

Figura 2.1 – Minimização do consumo de água primária via reúso.

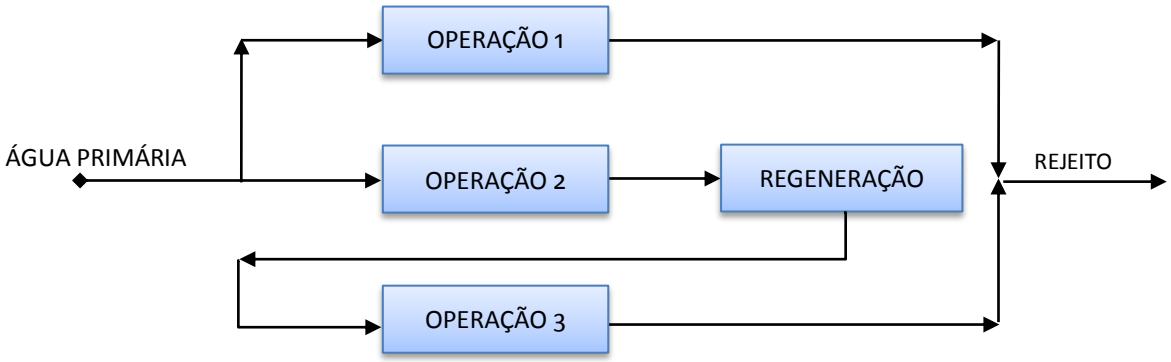

Figura 2.2 – Minimização do consumo de água primária via regeneração com reúso.

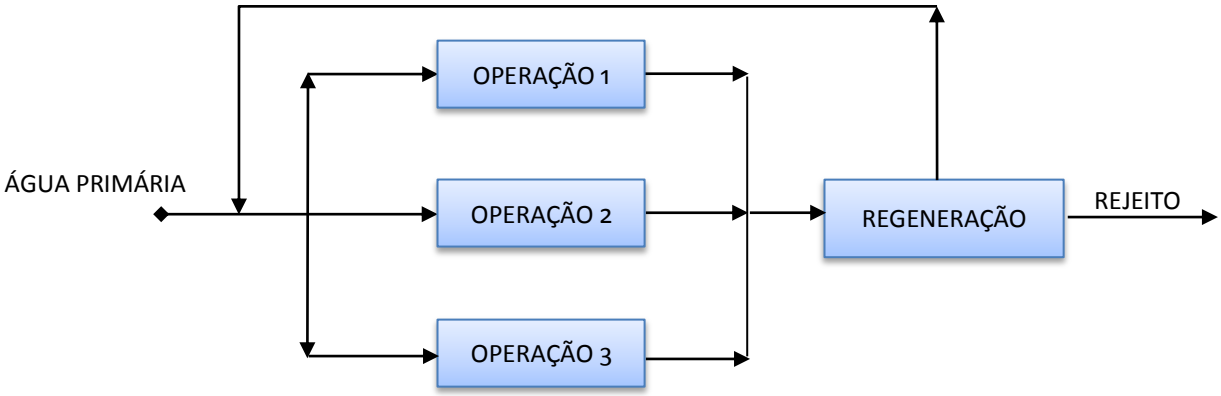

Figura 2.3 – Minimização do consumo de água primária via regeneração com reciclo.

Para a construção do procedimento, Gomes, Queiroz e Pessoa (2007) consideraram os equipamentos responsáveis pela redução da carga de algum contaminante mediante o uso do agente extrator água, como sendo *equipamentos de transferência de massa*, conforme representado na Figura 2.4. O balanço material em relação ao contaminante foi apresentado anteri-

ormente na Equação (2.2) que pode ser reescrita em função da carga de contaminantes passada ou trocada entre correntes Δm_k em cada operação k mediante equação de Kremser:

$$\Delta m_k = G_k x\left(C_{\text{proc},i,k} - C_{\text{proc},f,k}\right) = f_k x\left(C_{f,k} - C_{i,k}\right) \tag{2.5}$$

Em que $f_i, G_k, C_{i,k}$ e $C_{f,k}$ representam a vazão de água na operação (t/h), vazão em cada corrente de processo, concentração inicial (ppm) do contaminante e concentração final (ppm), respectivamente.

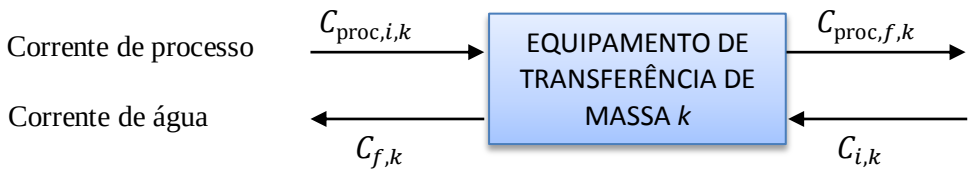

Figura 2.4 – Equipamento de transferência de massa.

Tendo como finalidade maximizar a concentração de saída da corrente de água e minimizar a captação de água primária ($C_{i,k} = 0$) é realizado um levantamento de todas as operações que utilizam água e definidos os intervalos de concentração limite de entrada e saída das correntes aquosas. Vale salientar que a concentração máxima de saída pode ser especificada levando em conta fatores como solubilidade máxima do contaminante, limite de corrosão, limite de deposição, mínima força motriz de transferência de massa no equipamento e concentração máxima de entrada para os processos de tratamento. Desse modo forma-se um conjunto contendo o número de intervalos de concentração (N_{int}) que está relacionado ao número de operações (N_{op}) conforme a seguinte inequação:

$$N_{int} \leq \left(2N_{op}\right) - 1 \tag{2.6}$$

A igualdade somente estará presente quando as concentrações nas operações coincidirem. O exemplo tomado como referência foi o mesmo proposto por Wang e Smith (1994), considerando apenas a presença de um contaminante no processo. A Tabela 2.1 mostra os dados limites para as correntes de processo.

Tabela 2.1 - Dados limite de operação referente ao problema proposto por Wang e Smith (1994).

Operação (*k*)	f_k (t/h)	$C_{ik,max}$ (ppm)	$C_{ik,max}$ (ppm)	Δm_k (kg/h)
1	20	0	100	2
2	100	50	100	5
3	40	50	800	30
4	10	400	800	4

Com os dados acima foi possível construir um diagrama contendo os intervalos de concentrações limite, as vazões limite para cada operação e a quantidade de massa transferida em cada uma das quatro operações em cada intervalo, conforme ilustra a Figura 2.5.

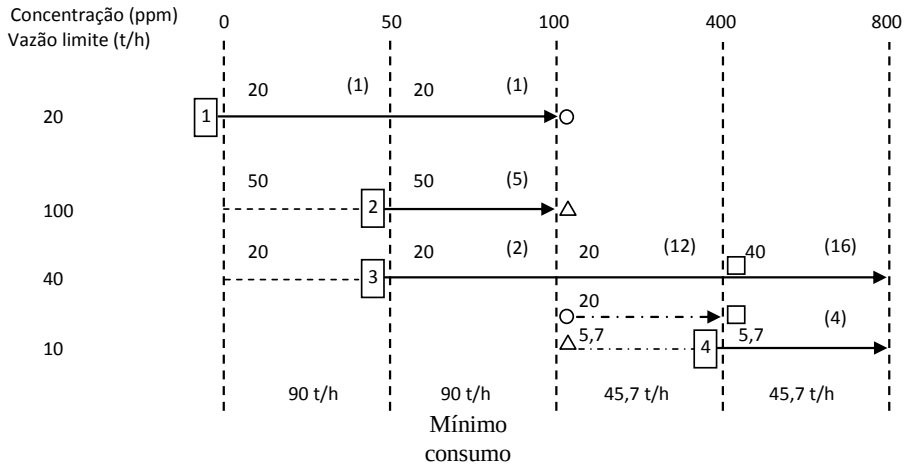

Figura 2.5 – DFA para dados da Tabela 2.1. Determinação do mínimo consumo de água primária para o máximo reúso. Ponto de *pinch* na concentração de 100 ppm. Fonte: (GOMES, 2002).

Para realizar a síntese do DFA mostrado na Figura 2.5, algumas regras necessitaram ser estabelecidas.

1. O uso de água vinda de uma fonte externa é realizado quando não houver mais disponibilidade de água em alguma fonte interna; Caso haja disponibilidade em alguma fonte interna, deve-se usar preferencialmente a originária da mesma operação;
2. A fonte utilizada em um intervalo de concentração, para uma dada operação, deve absorver a quantidade de massa a ser transferida no respectivo intervalo, pois isto assegura que as concentrações máximas de entrada e saída não sejam violadas;

3. Para operações que estão presentes em mais de um intervalo, a corrente deve continuar a fluir através da mesma operação até o seu fim, pois isso evita divisões na operação.

Conforme mostra o DFA, no primeiro intervalo de concentração (0-50 ppm), apenas a operação 1 está presente e uma vazão de 20 t/h é requisitada .

No segundo intervalo estão presentes as operações 1, 2 e 3. Nesse intervalo são requeridas 20 t/h (50 ppm) pela operação 1 que são usadas do intervalo anterior. Outras 100 t/h (50 ppm) são requisitadas pela operação 2, sendo consumidos apenas 50 t/h da fonte externa de água primária (0 ppm). De modo similar, a operação 3 usa 20 t/h (0 ppm) que são captados da fonte externa de água limpa, totalizando assim outros 90 t/h para este intervalo.

No terceiro intervalo apenas a operação 3 está presente. Neste ponto estão disponíveis duas fontes internas capazes de fornecer água com a concentração de 100 ppm. A vazão de água requerida pela operação 3 neste é intervalo é de 20 t/h que é aproveitada do intervalo de concentração anterior.

No quarto intervalo as operações 3 e 4 fazem-se presentes. A operação 3 requer 40 t/h, onde 20 t/h são aproveitados do intervalo anterior, como indica a regra 1, e os outros 20 são oriundos da operação 1 a 100 ppm. A escolha da fonte interna modifica o fluxograma da rede de água e por sua vez os custos associados. Foi escolhida como fonte a alimentar a operação 3 neste intervalo a oriunda da operação 1, completando assim as 40 t/h requeridas. Para este intervalo de concentração a operação 4 necessita de uma vazão de 10 t/h a 400 ppm, no entanto como há disponibilidade de água a 100 ppm no intervalo anterior, encontra-se um valor de 5,7 t/h que são consumidos da operação 2 desta corrente a 100 ppm.

Para se chegar a este valor de 5,7 t/h, como a outros aqui apresentados, é preciso observar que a vazão de água requerida de fonte de água p qualquer por uma operação k pode ser determinada pelas equações mostradas a seguir:

- Fontes Externas (GOMES, 2002):

$$f_{p,k,i}^{e} = \frac{\Delta m_{k,i} - \sum_{j=1}^{N_{fia,i}} f_{j,k,i}^{i} \left(C_{f,i} - C_{i,j}\right)}{C_{fi} - C_{p}^{e}} \tag{2.7}$$

O $C_{i,j}$ é a concentração na qual a fonte interna j é usada no intervalo i, $C_{f,i}$ é a concentração final do intervalo i, $N_{fia,i}$ o número de fontes internas disponíveis no intervalo i, C_p^e a concentração da fonte externa p. Pela ordem de cálculo, se houver utilização de fonte interna no intervalo, os valores dos respectivos $f_{j,k,i}^i$ são calculados antes do $f_{p,k,i}^e$. A parcela do somatório na Equação (2.1) representa a quantidade de contaminante removida pelas fontes internas, na operação k no intervalo i, que têm preferência sobre as fontes externas. Já para fontes internas tem-se que:

- Fontes Internas (GOMES, 2002):

$$f_{p,k,i}^e = \frac{\Delta m_{k,i} - \sum_{j=p-1}^{p} f_{j,k,i}^i \left(C_{f,i} - C_{i,j}\right)}{C_{fi} - C_p^i} \tag{2.8}$$

Já para o cálculo da vazão mínima de água da fonte externa p tem-se:

$$f_p^e = \sum_{k=1}^{N_{op}} \sum_{k=1}^{N_{op}} f_{p,k,i}^e \tag{2.9}$$

Logo, observando o diagrama da Figura 2.5, percebe-se que o ponto de *pinch* encontra-se na concentração de 100 ppm, ou seja, quando o somatório das vazões em cada intervalo muda de 90 t/h (vazão do *pinch*), para 45,7 t/h. De posse destes resultados, Gomes, Queiroz e Pessoa (2007), puderam elaborar um fluxograma da Rede de Transferência de Massa (RTM) para o máximo reúso e consequente mínimo consumo de água primária, correspondente no DFA da Figura 2.5 e mostrado na Figura 2.6.

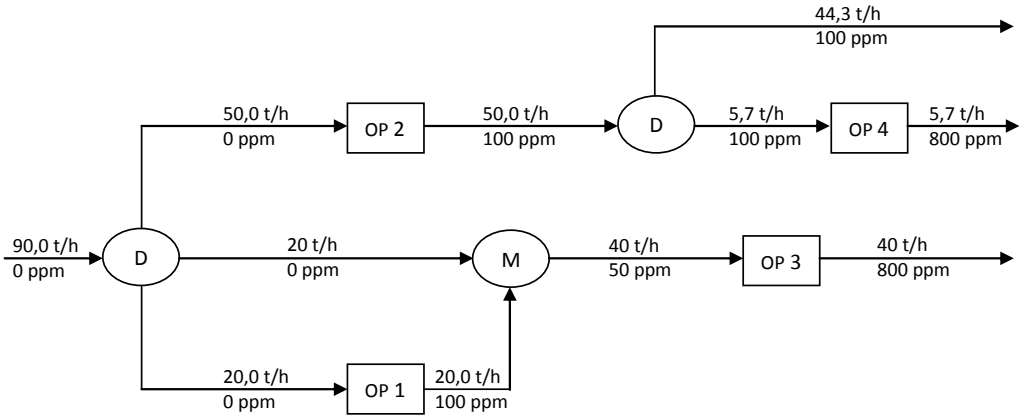

Figura 2.6 - Rede de transferência de massa para o máximo reúso referente ao diagrama da Figura 2.5. Fonte: (GOMES, 2002).

Os autores também apresentaram um caso onde há a presença de mais de uma fonte externa de água, em diferentes níveis de concentração de poluentes. Nesse caso, como a finalidade é minimizar o custo operacional de água primária, a preferência de uso é da água que estiver em um nível maior de impureza. Este procedimento foi apresentado para o máximo reúso apenas e diz respeito ao caso de um contaminante. Outros procedimentos também foram realizados levando em conta os casos de regeneração com reúso e regeneração com reciclo. No próximo capítulo estes casos serão analisados com maiores detalhes numa revisão sucinta da aplicação do DFA em problemas com múltiplos contaminantes.

2.5. Diagrama de Fontes de Água aplicado a múltiplos contaminantes

Visando desenvolver um procedimento que também fosse aplicável a casos onde houvesse a presença de múltiplos contaminantes, Gomes (2002) estendeu a metodologia exibida no tópico anterior, para um contaminante, para casos com até três.

Assim como fizeram Wang e Smith (1994), Gomes (2002) considerou que as transferências de massa entre os contaminantes envolvidos ocorriam simultaneamente. No entanto simplificaram a relação de transferência considerando-a linear. Ou seja, caso haja um processo com *k* operação(s) com contaminantes A e B, a transferência de massa entre eles ocorre na mesma proporção, seguindo um critério de proporcionalidade na quantidade transferida de contaminantes:

$$\frac{\Delta m_{B,k}}{\Delta m_{A,k}} = \frac{f\Delta C_{B,k}}{f\Delta C_{A,k}} \qquad \frac{\Delta C_{B,k}}{\Delta C_{A,k}} = cte \tag{2.10}$$

Como é possível perceber, a diferença de concentração do contaminante B na entrada e saída da operação *k* é proporcional à que entra e sai da mesma operação com relação ao contaminante A. Sendo assim, de posse das concentrações limites de um contaminante é possível determinar as concentrações de todos os demais para a mesma operação.

2.5.1 A Escolha do Contaminante de Referência

A escolha do contaminante de referência vem sendo alvo de discussão de vários trabalhos ao longo da última década. Em se tratando de múltiplos contaminantes, esta torna-se a primeira dentre duas etapas decisivas que definirão o sucesso envolvendo todo processo de otimização. A segunda será discutida mais adiante e diz respeito à escolha da operação de referência. A escolha adequada deste componente garantirá que as concentrações limites dos demais contaminantes não sejam violadas, permitindo a síntese do melhor fluxograma da rede de transferência de massa e o menor custo associado.

Pensando nisso, Gomes (2002) estabeleceu critérios para esta escolha. Baseando-se inicialmente no exemplo apresentado por Wang e Smith (1994), que considera dois contaminantes e duas operações, demonstrou que os resultados independem da escolha do contaminante de referência para o cálculo do consumo mínimo de água, desde que o ajuste inicial das concentrações fosse feito de maneira correta. No entanto Gomes (2002) verificou que para assegurar o máximo reúso seria preciso certificar-se de que todas as restrições das concentrações dos contaminantes fossem atendidas, não apenas no reúso, mas também nas outras restrições de processo, tais como a utilização de múltiplas fontes de água, perdas do processo e a possibilidade da presença de operações de regeneração e reciclo. Foi proposto que o contaminante de referência seria aquele que exigisse a menor concentração de entrada na operação que haveria reúso. E isto pôde ser feito comparando a concentração de saída da primeira operação (operação que capta água primária) com as concentrações que aflui nas demais operações. Com o intuito de simplificar os cálculos, estabeleceu-se que o contaminante de referência poderia ser aquele que apresentasse uma concentração de saída menor que as concentrações de entrada das demais operações.

Uma *regra de deslocamento*[5] foi então criada fazendo uso da Equação (2.1) mostrada anteriormente. O deslocamento de concentração dos demais contaminantes foi feito com relação ao de referência.

> Já com respeito à vazão, esta pode ser determinada independente de qual seja o contaminante eleito, pois todos os componentes envolvidos necessitarão da mesma vazão de água para atender às restrições do processo, desde que o contaminante seja mantido como limitante do começo ao fim em todo intervalo de concentração no fluxograma gerado para a rede de transferência de massa. (GOMES, 2002).

[5] Esta regra pode ser melhor investigada no trabalho de Gomes (2002).

Para que o fluxograma final fosse o melhor, ele tinha que atender ao maior número possível de restrições. Para isso, algumas etapas foram inseridas no procedimento de minimização que foram desde a distribuição de concentrações, escolha do contaminante de referência, construção do diagrama de fontes de água até a síntese de um cenário mediante construção do fluxograma da rede.

A vantagem do procedimento proposto concentra-se na facilidade e abrangência do seu uso, uma vez que não está baseado em um algoritmo matemático complexo, e a sua implementação pode ser feita em uma planilha eletrônica, evitando o uso de pacotes computacionais de otimização, por exemplo.

Apesar de vários casos terem sido testados, o número de contaminantes presentes ficou limitado a um total de três. A escolha do contaminante de referência foi relativamente bem-sucedida para os casos testados, mas como será mostrado mais adiante, à medida que o número de operações e contaminantes aumenta, também aumentam as chances de ocorrer violação nos limites de concentração destes.

Santos (2007) estendeu o critério para a escolha do contaminante de referência proposto por Gomes (2002) e introduziu um procedimento para a determinação da operação de referência. Ficou estabelecido que o contaminante eleito seria aquele que exigisse a vazão mínima de água para cada operação a fim de atender à demanda dos demais contaminantes. O trabalho consistiu em automatizar o algoritmo DFA, implementando-o em um ambiente de planilha eletrônica[6] Excel™, com a finalidade de gerenciar redes de equipamentos de transferência de massa com múltiplos contaminantes presentes. O critério de escolha do contaminante de referência consistiu em, a partir do cálculo da vazão mínima de água em cada operação, verificar qual contaminante possuía a maior dentre todas as vazões mínimas em cada operação. Aquele que possuiu uma quantidade superior de vazões mínimas por operação foi considerado o contaminante de referência. Este critério teve como base a seguinte equação:

$$f_{\mathrm{min,k}} = \max \frac{\Delta m_{i,k}}{C_{s,i,k}} \tag{2.11}$$

[6] Santos (2007) desenvolveu um software na linguagem VBA para Excel chamado MINEA, o qual mais adiante fará parte das investigações em problemas de maior complexidade.

O $f_{\text{min,k}}$ é a vazão mínima de água necessária para satisfazer as concentrações de saída de todos os contaminantes da operação k, $\Delta m_{i,k}$ é a quantidade de massa do contaminante i na operação k e $C_{s,i,k}$ é a concentração máxima de saída do contaminante i na operação k. Sendo assim, o contaminante que apresentasse o maior valor de $f_{\text{min,k}}$ dentre as operações k seria considerado o de referência.

Apesar de Santos (2007, p. 153) considerar que o algoritmo proposto consolida a definição do contaminante de referência, não foram feitos testes mais aprofundados que confirmassem este comentário. Assim como os demais trabalhos já citados, o de Santos (2007) levou em conta apenas situações com a presença de três contaminantes e três operações. Todavia, foi de grande importância a introdução ao tópico da escolha de uma operação de referência, algo não estudado até então.

Mirre (2007) propôs que o contaminante de referência seria aquele que possuísse a maior diferença de concentração dentre todas as operações presentes. No entanto, acrescentou que:

> "A seleção do contaminante de referência é uma etapa que ainda não se encontra bem definida na abordagem de problemas multicomponentes. Logo, não pode ser considerada universalmente verdadeira; somente estudos mais específicos, incluindo casos mais amplos, é que poderão apontar na validação deste critério". (MIRRE, 2007).

E mais uma vez, assim como em trabalhos prévios, este critério foi aplicado em um estudo de caso contendo três contaminantes.

Percebe-se que para cada critério de escolha exposto acima, há uma necessidade de investigar como se comportam em sistemas contendo um número grande de contaminantes. Tendo isso em mente, uma metodologia sistemática para a escolha deste contaminante necessita ser mais bem estruturada.

2.5.2 A Escolha da Operação de Referência

O conceito de operação de referência está relacionado a operações que permitem apenas o uso de água primária, não admitindo mudanças com respeito às concentrações de entrada. A escolha deste tipo de operação é uma abordagem apresentada por Santos (2007). Nela é preciso fazer o cálculo do fator de restrição, que indica qual será o montante de água a ser

economizado em uma dada operação, tomando como base uma operação de referência. Este fator pode ser calculado pela seguinte:

$$\text{Fator } R_{i,k} = \frac{C_{s,ref,i}}{C_{e,k,i}} \tag{2.12}$$

No qual o Fator $R_{i,k}$ é o fator restritivo do contaminante i na operação k, $C_{s,ref,i}$ representa a concentração do contaminante i na operação de referência e $C_{e,k,i}$ é a concentração de entrada do contaminante i na operação k. À medida que Fator $R_{i,k}$ cresce também aumenta o grau de restrição para o reúso da operação de referência na operação k. Logo, o maior valor do Fator $R_{i,k}$ será o que restringirá este reúso e a operação de referência será aquela que possuir o menor valor de Fator $R_{i,k}$ dentre os máximos observados.

Este algoritmo sofreu algumas alterações quando trataram-se casos com proibições de reúso. Após a seleção das operações que apenas fazem uso de água primária, investigou-se dentre as operações remanescentes, qual(s) não permite(m) reúso das operações que faziam uso de água primária e que permitiam flexibilização nas suas concentrações de entrada. Nos testes realizados, este algoritmo não demonstrou robustez e confiabilidade, no sentido de que não há garantia de não violação nos limites de concentração após a construção do DFA. Havendo essa violação, um novo diagrama deve ser construído promovendo assim um maior trabalho adicional.

Já Mirre (2007) também utilizou um critério para eleição da operação de referência em um estudo de caso onde envolveu alguns dos principais processos hídricos de uma refinaria de petróleo. Semelhante ao apresentado por Santos (2007), esse critério baseou-se na escolha de uma operação que exigisse uma qualidade maior de água primária na sua entrada (menor teor de contaminantes), no caso uma operação de destilação foi escolhida. No entanto, não ficou bem claro como priorizar a escolha de uma operação dentre várias candidatas que também requeressem água primária. Um fato foi comentado com relação a não eleição de uma operação de caldeira em detrimento da torre de destilação, pelo fato de naquela ocorrer perda de água apresentando menores cargas mássicas para assimilação por contaminante.

Percebe-se que em ambos os trabalhos citados acima, as estratégias para a escolha de uma operação, que serviria de base para os cálculos de vazão em relação ao contaminante de

referência, não foram testadas em diferentes situações. Ou seja, não foram averiguados processos que possuíssem um número maior do que três contaminantes. Assim, como acontece com a escolha de um contaminante que seja referência, essa é uma etapa que precisa ser mais bem sistematizada e validada com um número grande de exemplos da literatura.

2.5.3 Aplicação do DFA em processos com mais de três contaminantes

Em processos tais como refinarias de petróleo, o número de operações é grande, o que contribui para dificultar ainda mais a escolha da operação de referência. Uma prova disso é o trabalho de (CARVALHO *et al.*, 2009) que consistiu na aplicação do DFA, em conjunto com uma variação proposta, num estudo de caso contendo múltiplos contaminantes e fontes. O estudo de caso consistiu num exemplo contendo dez operações e quatro contaminantes e duas fontes externas de água.

A escolha da operação de referência baseou-se naquela que possuísse as menores concentrações de entrada e saída e que apresentasse um maior potencial de reúso nas demais operações. Já a escolha do contaminante de referência levou em consideração o número total de operações que não violaram o critério de monotonicidade[7] para cada contaminante. O contaminante escolhido é aquele que possuir o maior número de operações que não violam este critério.

A concentração do contaminante de referência na operação de referência é dada por:

$$C_{XR}^{Op} = \frac{(Cf_x^{Op} - Ci_x^{Op})}{\Delta ad} + Cad_{XR}^{Op} \tag{2.13}$$

Aplicando esta heurística no estudo de caso os autores chegaram a resultados satisfatórios em termos da captação de água limpa e do custo associado.

[7] A monotonicidade irá indicar qual é a melhor sequencia ou distribuição das operações, de modo que não haja violação nos valores de concentração limites. Manter este critério é fundamental quando se trabalha com problemas envolvendo múltiplos contaminantes.

CAPÍTULO 3

"A água tem um preço e sua gratuidade prenuncia escassez." Jacques Chirac, Presidente da França.

PROCEDIMENTOS PARA MÁXIMO REÚSO COM MÚLTIPLOS CONTAMINANTES

Como já foi referenciado na seção 2.4, para garantir o mínimo consumo de água no processo é preciso assegurar que a taxa mássica de cada contaminante entre as correntes, ou seja, Δm_k seja satisfeita (GOMES, 2002).

No capítulo anterior foi lembrada a necessidade de realizar uma investigação mais detalhada do DFA em casos que contemplam um número significativo de operações e contaminantes (>3). Até então, o algoritmo DFA não foi testado em exemplos com um grau maior de complexidade. Os principais procedimentos de máximo reúso do DFA com múltiplos contaminantes desenvolvidos por Gomes (2002), Santos (2007) e Mirre (2007) são analisados e criticados nos próximos tópicos deste capítulo. Foi tomado como caso base o exemplo proposto por Wang e Smith (1994) contendo três operações e três contaminantes[8]. Cada DFA é aplicado a um conjunto de duas operações, formado por uma combinação entre as três operações presentes. Mediante esta investigação torna-se possível identificar em quais casos ocorrem ou se ocorrem violações nos limites de entrada e saída das operações.

No próximo capítulo é apresentado um procedimento "*TOTAL SITE*" aplicado a um exemplo com um número de contaminantes e operações maior do que três.

[8] Os cálculos para a construção dos diagramas foram realizados no software de planilha eletrônica EXCEL™ versão 2010.

A Tabela 3.1 traz dados de concentrações e vazões limites em um processo apresentado por Wang e Smith (1994) contendo três operações e três contaminantes.

Tabela 3.1 - Dados limites para as correntes de processo apresentados por Wang e Smith (1994).

Operação k	f_k (t/h)	Contaminante	$C_{i,k,max}$	$C_{f,k,max}$	Δ_{mk} (kg/h)
		A	0	15	0,675
1	45	B	0	400	18
		C	0	35	1,575
		A	20	120	3,4
2	34	B	300	12500	414,8
		C	45	180	4,59
		A	120	220	5,6
3	56	B	20	45	1,4
		C	200	9500	520,8

É importante frisar que estas condições limites podem ser obtidas de diversas formas, tais como o conhecimento acumulado com a vivência de planta do engenheiro de processos, limitações de corrosão, solubilidade máxima, simulação, estudos em laboratório e testes feitos em planta até análises de sensibilidade.

3.1. Procedimento de Máximo Reúso Proposto por Gomes (2002)

No algoritmo proposto por Gomes (2002) é preciso indicar qual é o contaminante de referência, a partir do qual os cálculos das concentrações dos demais contaminantes são realizados, considerando a transferência simultânea de massa e, por fim, garantindo o máximo reúso de água no processo.

3.1.1 Problema de Wang e Smith (1994) com as 3 operações

3.1.1.1 Escolha do Contaminante de Referência

De posse do conjunto de dados limites, o primeiro passo do algoritmo é identificar o contaminante de referência. Portanto, para este estudo de caso escolheu-se o contaminante que exigisse a menor concentração para reúso, ou seja, o componente A. Este será adotado nos cálculos para a construção do DFA, como será visto mais adiante.

3.1.1.2 Relações de Transferência de Massa

Um modelo que represente a transferência de massa entre dois ou mais contaminantes deve considerar a simultaneidade dessa transferência, podendo este ser linear ou não. Conforme foi mostrado na Equação (2.10), até aqui considerou-se que a relação da transferência dos contaminantes é representada por um modelo linear.

Para o exemplo em questão, as relações de transferência são mostradas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Relações de Transferência de Massa.

Relação de transferência de massa		
1	$\Delta C_{A1}/\Delta C_{B1}$	0,0375
2	$\Delta C_{A1}/\Delta C_{C1}$	0,4286
3	$\Delta C_{B1}/\Delta C_{C1}$	11,4286
4	$\Delta C_{A2}/\Delta C_{B2}$	0,0082
5	$\Delta C_{A2}/\Delta C_{C2}$	0,7407
6	$\Delta C_{B2}/\Delta C_{C2}$	90,3704
7	$\Delta C_{A3}/\Delta C_{B3}$	4,0000
8	$\Delta C_{A3}/\Delta C_{C3}$	0,0108
9	$\Delta C_{B3}/\Delta C_{C3}$	0,0027

3.1.1.3 Ajuste das concentrações (Regra do deslocamento)

Após a escolha do contaminante de referência é necessário verificar como se dará o reúso de cada contaminante de uma operação para a seguinte. E também será observado se esse reúso não violará os limites máximos estabelecidos para cada operação. Para tal, alguns critérios precisam ser observados:

i. A concentração de um contaminante que eflui de uma operação deve possuir, no máximo, a concentração deste afluindo na operação seguinte. O objetivo é de não ultrapassar o limite máximo já estabelecido para o componente que entra em uma operação;

ii. Na etapa de deslocamento de concentrações, a quantidade que sai de uma operação deve ser suficiente para suprir à concentração de entrada da operação seguinte;

Com isso em mente, organizam-se de modo tabular as concentrações dos componentes em cada operação em função do contaminante de referência (A):

Tabela 3.3 - Valores de concentração limites dos contaminantes A, B, C tendo o contaminante A como sendo o de referência.

Contaminante	Operação	Concentrações				
A	–	**0**	**15**	**20**	**120**	**220**
B1	1	0	**400**	–	–	–
B2	2	–	–	**300**	**12500**	–
B3	3	–	–	–	**20**	45
C1	1	0	35	–	–	–
C2	2	–	–	45	180	–
C3	3	–	–	–	200	9500

As concentrações em destaque são as que sofrerão deslocamento, em virtude da restrição do contaminante B não poder ser reusado nas operações 2 e 3. A Figura 3.1 traz outra representação desses limites:

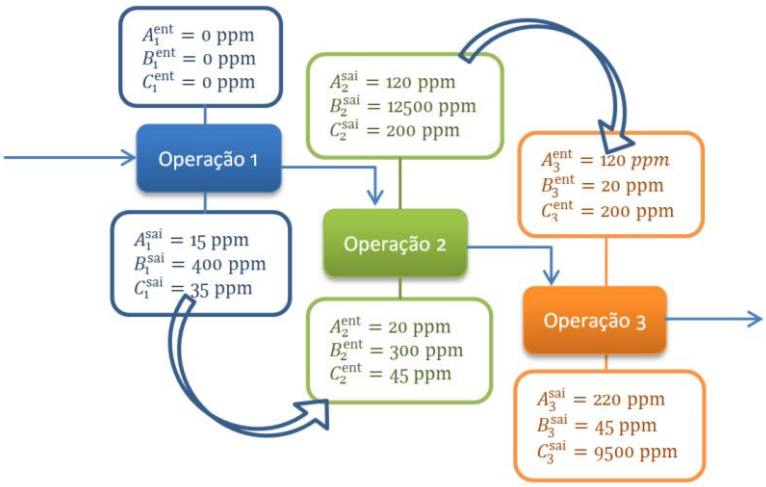

Figura 3.1 - Limites de concentração e reúso nas operações.

Observando a Figura 3.1 é possível ter uma ideia de quais contaminantes podem ou não ser aproveitados nas demais operações. A *priori* considera-se o reúso dos contaminantes da operação 1 para a 2 e posteriormente da 1 para a 3. Logo, percebe-se que é possível o reúso dos contaminantes A e C da operação 1 para a 2. Entretanto, como a operação 1 só permite uma saída para o contaminante B de no máximo 400 ppm , $B_1^{\text{sai}} = 400$ ppm, e a operação 2 permite, no máximo, 300 ppm em sua entrada, $B_2^{\text{ent}} = 300$ ppm, é necessário calcular uma nova concentração para o contaminante A na entrada da operação 2, considerando que B_1^{sai} esteja no limite de entrada da operação 2, ou seja, $B_1^{\text{sai}} = 300$. Desse modo fazendo uso da relação de transferência 1 tem-se que:

$$\begin{gathered}\frac{\Delta C_{A1}}{\Delta C_{B1}} = 0{,}0375 \\ \Delta C_{A1} = 0{,}0375 \times 300 \\ \Delta C_{A1} = 11{,}25 \text{ ppm} \\ \text{ou } \boxed{C_{A2}^{\text{ent}} = 11{,}25 \text{ ppm}}\end{gathered} \tag{3.1}$$

De modo análogo, o valor máximo de B na operação 2 ($B_2^{\text{sai}} = 12500$ ppm) também é deslocado. Assim, para conhecer o valor de A correspondente, deve-se fazer uso da relação de transferência 4 através da qual resulta em:

$$\begin{aligned}&\frac{\Delta C_{A2}}{\Delta C_{B2}} = 0{,}0082 \\ &\Delta C_{A2} = 0{,}0082 \times \Delta C_{B2} \\ &C_{A2}^{\text{sai}} - C_{A2}^{\text{ent}} = 0{,}0082 \times (C_{B2}^{\text{sai}} - C_{B2}^{\text{ent}}) \\ &C_{A2}^{\text{sai}} = 0{,}0082 \times (C_{B2}^{\text{sai}} - C_{B2}^{\text{ent}}) + C_{A2}^{\text{ent}} \\ &C_{A2}^{\text{sai}} = 0{,}0082 \times (12500 - 300) + 11{,}25 \\ &C_{A2}^{\text{sai}} = 0{,}0082 \times 12200 + 11{,}25 \\ &C_{A2}^{\text{sai}} = 100{,}04 + 11{,}25 \\ &\boxed{C_{A2}^{\text{sai}} = 111{,}29 \text{ ppm}}\end{aligned} \tag{3.2}$$

Semelhantemente, considerando o reúso dos contaminantes partindo da operação 1 para a 3, observa-se que não é possível o reúso do contaminante B na operação 3 e mais uma

vez é preciso ajustar a concentração de A nessa operação para satisfazer a restrição de 20 ppm. Logo, utilizando a relação de transferência 1 tem-se:

$$\begin{gathered}\frac{\Delta C_{A1}}{\Delta C_{B1}} = 0{,}0375 \\ \Delta C_{A1} = 0{,}0375 \times \Delta C_{B1} \\ \Delta C_{A1} = 0{,}0375 \times 20 \\ \Delta C_{A1} = 0{,}75 \text{ ppm ou } \boxed{C_{A3}^{\text{ent}} = 0{,}75 \text{ ppm}}\end{gathered} \tag{3.3}$$

Em virtude desse deslocamento na entrada da operação 3, a concentração de B na saída $\left(B_3^{\text{sai}}\right)$ também é deslocada e a concentração de A na saída recebe um novo valor:

$$\begin{aligned}&\frac{\Delta C_{A3}}{\Delta C_{B3}} = 4 \\ &\Delta C_{A3} = 4 \times \Delta C_{B3} \\ &C_{A3}^{\text{sai}} - C_{A3}^{\text{ent}} = 4\left(C_{B3}^{\text{sai}} - C_{B3}^{\text{ent}}\right) \\ &C_{A3}^{\text{sai}} = 4\left(C_{B3}^{\text{sai}} - C_{B3}^{\text{ent}}\right) + C_{A3}^{\text{ent}} \\ &C_{A3}^{\text{sai}} = 4(45 - 20) + 0{,}75 \quad \boxed{C_{A3}^{\text{sai}} = 100{,}75 \text{ ppm}}\end{aligned} \tag{3.4}$$

Com essa mudança nos limites concentração do contaminante A (referência) na operação 2, os resultados obtidos na geração do DFA assim como na síntese do fluxograma são alterados. Esses valores são organizados em uma nova tabela de dados limites (Tabela 3.4):

Tabela 3.4 - Novos dados limites de vazão e concentração após aplicação da técnica do deslocamento.

Operação *k*	f_k (t/h)	Contaminante	$C_{i,k,max}$	$C_{f,k,max}$	Δ_{mk} (kg/h)
1	45	A	0	15	0,675
		B	0	400	18
		C	0	35	1,575
2	34	A	11,25	111,25	3,4
		B	300	12500	414,8
		C	45	180	4,59
3	56	A	0,75	100,75	5,6
		B	20	45	1,4
		C	200	9500	520,8

Com os dados apresentados acima e sendo permitindo o reúso de todos os contaminantes, parte-se para a construção do diagrama de fontes de água, mediante o qual será possível identificar o ponto de *pinch* com a vazão máxima para reúso.

3.1.1.4 Construção do Diagrama de Fontes de Água

A Figura 3.2 apresenta o diagrama de fontes de água para o máximo reúso dos contaminantes, para as três operações presentes e os dados limites apresentados na Tabela 3.4.

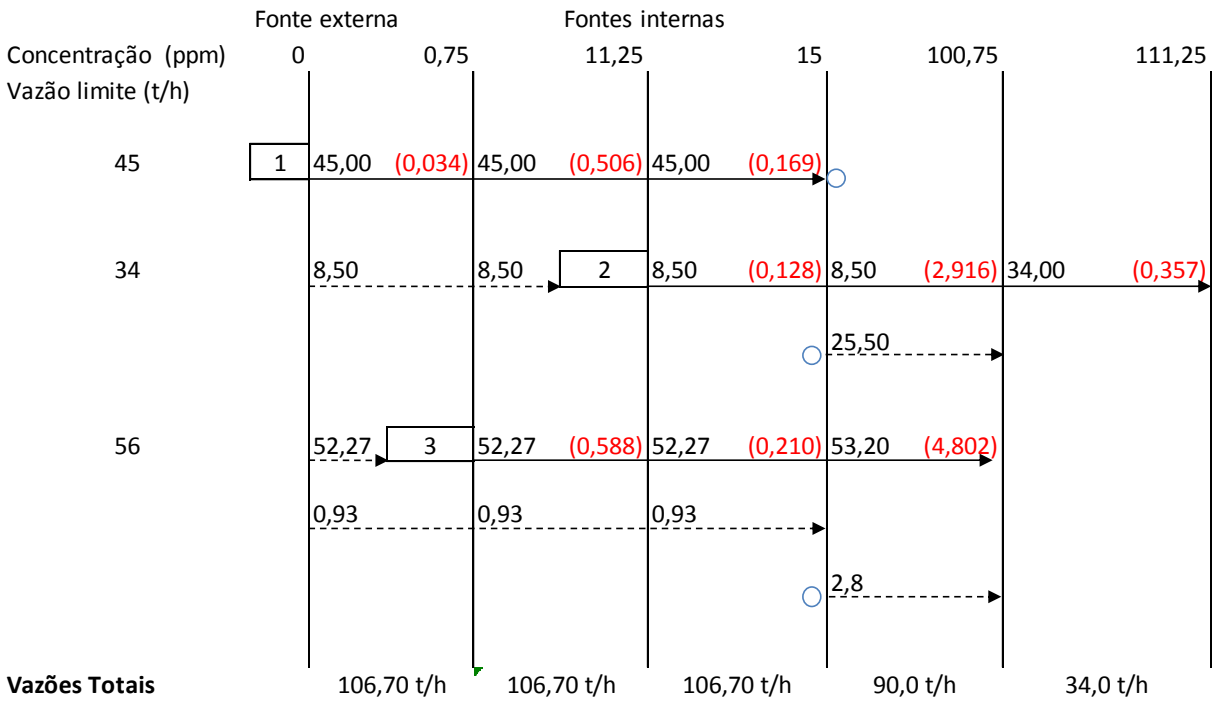

Figura 3.2 - Diagrama de Fontes de Água (DFA) considerando o contaminante A como referência.

Como já referenciado no capítulo anterior, para que a mínima vazão de água primária seja garantida, duas premissas precisam ser respeitadas:

i. As fontes externas apenas deverão ser utilizadas caso não haja mais disponibilidade de fontes internas. E no caso de mais de uma fonte interna estar disponível, a prioridade será da que for proveniente da mesma operação;

ii. Para uma determinada operação, a fonte de água utilizada num certo intervalo de concentração deve absorver a quantidade de massa a ser transferida no respectivo intervalo, o que assegura a não violação das concentrações máximas de entrada e de saída.

O reúso deverá ser realizado observando a qualidade da água, tendo preferência para aquela que possuir menor valor agregado, ou seja, maior concentração de contaminantes. A fonte de água primária é sempre a última a ser recorrida.

Pensando nisso, a avaliação da alocação da água procede com a verificação das fontes disponíveis em cada intervalo. Logo, conforme mostra o diagrama da Figura 3.2, no primeiro intervalo de concentração (0-0,75 ppm) apenas a operação 1 encontra-se presente, a qual exige uma vazão de 45 t/h que é consumida da fonte externa de água limpa (0 ppm) e que apresenta uma carga fixa (Δm) de 0,0033 kg/h.

Do segundo intervalo participam as operação 1 e 3. A vazão de água necessária para alimentar a operação 3 neste intervalo é de 56 t/h, mas são consumidos 52,27 t/h originados também da fonte externa de água primária e apresenta uma carga fixa de 0,59 kg/h. Já a vazão de água necessária na operação 1 são 45 t/h, a qual é proveniente do intervalo anterior.

No terceiro intervalo estão presentes as operações 1, 2 e 3. A vazão exigida pela operação 2 neste intervalo é de 36,6 t/h, porém são captados apenas 8,5 t/h da fonte externa de água primária e a carga é de 0,13 kg/h. A vazão necessária para operação 1 nesse intervalo são 45 t/h oriunda do intervalo anterior. A operação 3 necessita de uma vazão de 56 t/h e 52,27 t/h vem do intervalo anterior. Como não há fonte interna disponível, faz-se uso da Equação (2.7) que calcula a vazão de água necessária para suprir a demanda da operação 3 neste intervalo, resultando em 0,93 t/h.

Já no quarto intervalo de concentração as operações 2 e 3 encontram-se presentes e estão disponíveis (como fonte interna) 45 t/h da operação 1 para serem reusados no processo. A operação 2 necessita de 34 t/h e 8,5 t/h vêm do intervalo anterior e 25,5 são aproveitados da fonte interna disponível com 45 t/h na operação 1. A quantidade de água requerida para a operação 3 neste intervalo é de 56 t/h, onde 52,27 t/h e 0,93 t/h são oriundos do intervalo anterior na mesma operação, totalizando 53,2 t/h. E para completar das 56 t/h, utiliza-se 2,8 t/h disponíveis na fonte interna a 15 ppm disponível na operação 1.

No quinto e último intervalo apenas a operação 2 está presente e para suprir a demanda de 34 t/h, as quantidades de 8,5 t/h e 25,5 t/h do intervalo anterior são aproveitadas.

Com o diagrama completo é possível identificar o ponto onde ocorre a transição no valor de vazão total nos intervalos de concentração (*pinch*). Nesse caso o ponto está presente na concentração de 15 ppm na qual há a mudança de 106,7 t/h para 90 t/h.

Com este DFA é possível elaborar um cenário montando um fluxograma da rede de transferência de massa, conforme ilustra a Figura 3.3.

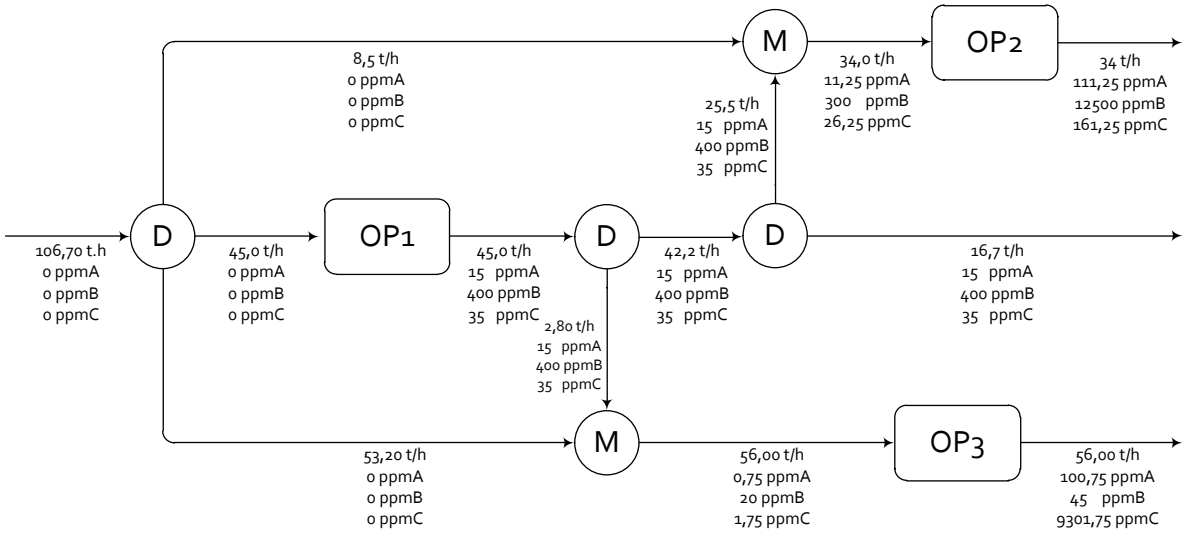

Figura 3.3 - Fluxograma para a rede de transferência de massa com as três operações presentes. Procedimento proposto por Gomes (2002).

Com o fluxograma construído constata-se que todas as restrições tratadas anteriormente foram atendidas.

3.1.2 Problema de Wang e Smith (1994) com as operações 1 e 2.

Com o objetivo de investigar o consumo total de água em cada intervalo de concentração e a ocorrência ou não de violações nas concentrações limites dos contaminantes, a operação 3 foi removida combinando-se apenas as operações 1 e 2.

3.1.2.1 Escolha do Contaminante de Referência

Novamente o contaminante A será escolhido como referência dentre os demais.

3.1.2.2 Relações de Transferência de Massa

As relações de transferência de massa passam apenas a considerar os contaminantes nas operações 1 e 2. A Tabela 3.5 mostra os dados:

Tabela 3.5 - Relações de Transferência de Massa (Operações 1 e 2).

Relação de transferência de massa		
1	$\Delta C_{A1}/\Delta C_{B1}$	0,0375
2	$\Delta C_{A1}/\Delta C_{C1}$	0,4286
3	$\Delta C_{B1}/\Delta C_{C1}$	11,4286
4	$\Delta C_{A2}/\Delta C_{B2}$	0,0082
5	$\Delta C_{A2}/\Delta C_{C2}$	0,7407
6	$\Delta C_{B2}/\Delta C_{C2}$	90,3704

3.1.2.3 Ajuste das concentrações (Regra do deslocamento)

Adotando o procedimento já descrito no item 4.1.1.3, uma nova tabela é montada considerando as operações 1 e 2:

Tabela 3.6 – Valores limites de concentração para os contaminantes A, B e C com o contaminante A como referência (Operações 1 e 2).

Contaminante	Operação	Concentrações			
A	–	**0**	**15**	**20**	**120**
B1	1	0	400	–	–
B2	2	–	–	300	12500
C1	1	0	35	–	–
C2	2	–	–	45	180

Mais uma vez, o componente que necessita ter sua concentração deslocada é o B, pois pelo mesmo motivo apresentado anteriormente, não é possível reusá-lo da operação 1 para a 2 em virtude da restrição em sua concentração de entrada, como também ilustra a Figura 3.4 .

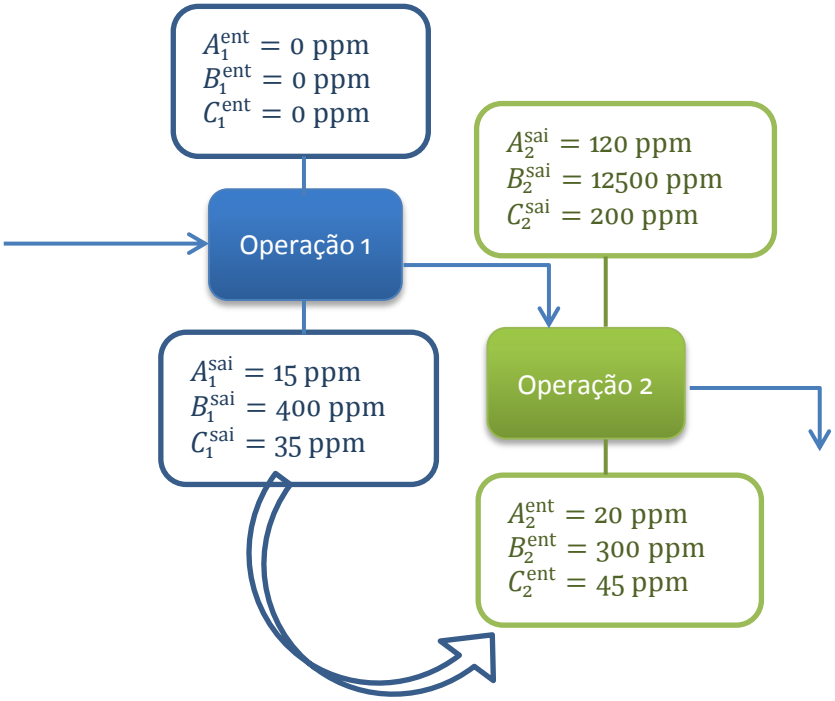

Figura 3.4 - Limites de concentração. Reúso na operação 2.

Os cálculos são novamente realizados em relação ao contaminante A, modificando sua concentração máxima na entrada e saída da operação 2. A Tabela 3.7 é preenchida com esses valores.

Tabela 3.7 - Novos valores limites após o deslocamento (operações 1 e 2).

Operação *k*	f_k (t/h)	Contaminante	$C_{i,k,max}$	$C_{f,k,max}$	Δ_{mk} (kg/h)
1	45	A	0	15	0,675
		B	0	400	18
		C	0	35	1,575
2	34	A	11,25	111,25	3,4
		B	300	12500	414,8
		C	45	180	4,59

3.1.2.4 Construção do Diagrama de Fontes de Água

A Figura 3.5 mostra o DFA que agora está dividido em três intervalos de concentração. No primeiro está presente apenas a operação 1 e a vazão necessária de água é de 45 t/h que são consumidas da fonte externa (0 ppm) e havendo uma carga fixa de 0,51 kg/h.

No segundo intervalo, ambas as operações estão presentes e mais uma vez 45 t/h de água são requeridas e são aproveitas do intervalo anterior apresentando uma carga de 0,17

kg/h. Esta vazão de 45 t/h estará disponível como fonte interna para reúso na operação seguinte. Ainda neste intervalo a operação 2 requer uma vazão de 34 t/h, porém apenas 8,5 t/h são captadas da fonte externa de água primária.

No terceiro e último intervalo são necessários 34 t/h para suprir a demanda de água, onde são aproveitados 8,5 t/h do intervalo anterior e o restante, 25,5 t/h, são recebidos da fonte interna disponível na operação 1 a 15 ppm e a carga é de 3,27 kg/h.

Nota-se que com a ausência da operação 3 houve uma queda de 50% no consumo de água primária e o ponto de *pinch* ocorre na concentração de 15 ppm, transição de 54-34 t/h.

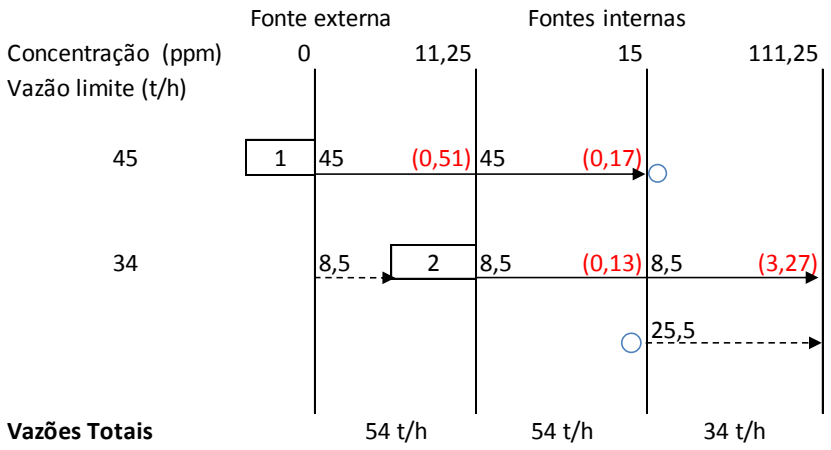

Figura 3.5 - Diagrama de Fontes de Água com o contaminante A como referência (Operações 1 e 2).

Sendo assim, a partir do DFA da Figura 3.5, o fluxograma resulta na seguinte forma:

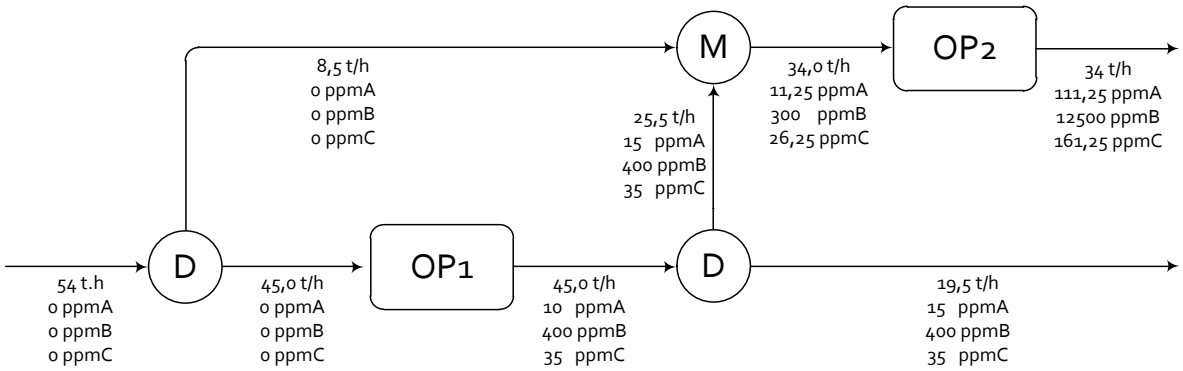

Figura 3.6 - Fluxograma da rede de transferência de massa (Operações 1 e 2).

Percebe-se que não ocorreu nenhuma violação nos limites de concentração dos contaminantes.

3.1.3 Problema de Wang e Smith (1994) com as operações 1 e 3.

A presença agora é entre as operações 1 e 3 e mais uma vez será observado se haverá ou não violações nas concentrações dos contaminantes.

3.1.3.1 Escolha do Contaminante de Referência

O contaminante de referência continua sendo o A.

3.1.3.2 Relações de Transferência de Massa

Agora as relações de transferência de massa são as referentes às operações 1 e 3 e estão mostradas na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Relações de transferência de massa (Operações 1 e 3).

Relação de transferência de massa		
1	$\Delta C_{A1}/\Delta C_{B1}$	0,0375
2	$\Delta C_{A1}/\Delta C_{C1}$	0,4286
3	$\Delta C_{B1}/\Delta C_{C1}$	11,4286
4	$\Delta C_{A3}/\Delta C_{B3}$	4,0000
5	$\Delta C_{A3}/\Delta C_{C3}$	0,0108
6	$\Delta C_{B3}/\Delta C_{C3}$	0,0027

3.1.3.3 Ajuste das concentrações (Regra do deslocamento)

Com relação ao deslocamento, percebe-se que não é permitido o reúso do contaminante B da operação 1 para a 3. Conforme mostra a Tabela 3.9 , mais uma vez é preciso deslocar a concentração deste contaminante para que haja uma alteração no valor da concentração do contaminante A na entrada da operação 3. Ou seja, caso a concentração de B na operação fosse 20 ppm, mediante a relação de transferência 1, chega-se à mesma conclusão anterior:

$$C_{A3}^{\text{ent}} = 0{,}75 \text{ ppm e } C_{A3}^{\text{sai}} = 100{,}75 \text{ ppm} \tag{3.5}$$

Tabela 3.9 - Valores de concentração limites dos contaminantes A, B, C tendo o contaminante A como sendo o de referência (Operações 1 e 3).

Contaminante	Operação	Concentrações			
A	–	**0**	**15**	**120**	**220**
B1	1	0	400	–	–
B3	3	–	–	20	45
C1	1	0	35	–	–
C3	3	–	–	200	9500

A Figura 3.7 ilustra esses limites de concentração e a impossibilidade de reúso do contaminante B na operação 3. Com os novos valores de $\boldsymbol{C_{A3}^{ent}}$ e $\boldsymbol{C_{A3}^{sai}}$, monta-se a Tabela 3.10.

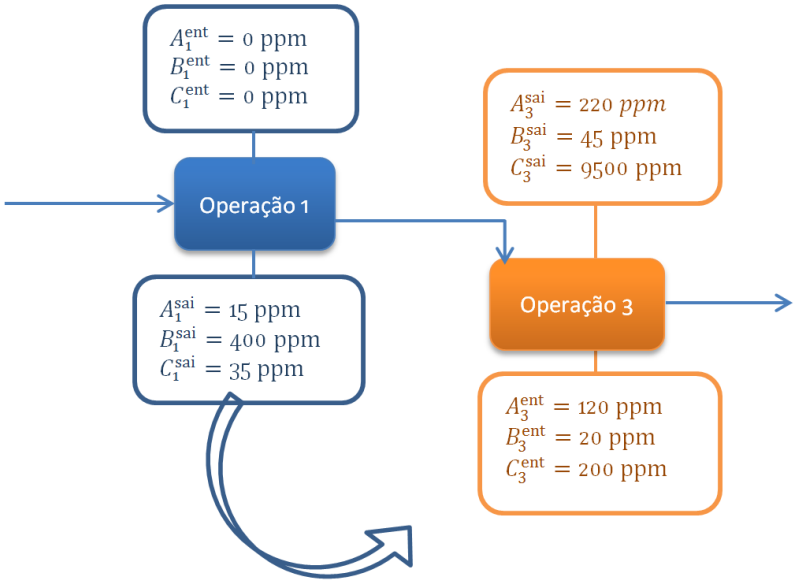

Figura 3.7 - Limites de concentração. Reúso na operação 3.

Tabela 3.10 - Novos valores limites após o deslocamento (operações 1 e 3).

Operação *k*	f_k (t/h)	Contaminante	$C_{i,k,max}$	$C_{f,k,max}$	Δ_{mk} (kg/h)
1	45	A	0	15	0,675
		B	0	400	18
		C	0	35	1,575
3	56	A	0,75	100,75	5,6
		B	20	45	1,4
		C	200	9500	520.8

3.1.3.4 Construção do Diagrama de Fontes de Água

O Diagrama de Fontes de Águas correspondente mostrado na Figura 3.8 traz em seu primeiro intervalo a operação 1 necessitando de 45 t/h, que são consumidas da fonte externa de água primária, e carga de 0,03 t/h.

No segundo intervalo estão presentes as operações 1 e 3. A vazão requerida pela operação 1 é de 45 t/h que é aproveitada do intervalo anterior, com uma carga de 0,64 kg/h. Assim, 45 t/h ficam disponíveis como fonte interna para o próximo intervalo. A operação 3 necessita de uma vazão de 56 t/h, no entanto 53,2 t/h são consumidos da fonte externa com uma carga de 0,80 t/h.

No terceiro e último intervalo de concentração, apenas a operação 3 encontra-se presente, necessitando de 56 t/h, onde 53,2 t/h, oriundos do intervalo anterior, são somados com 2,8 t/h da fonte interna disponível da operação 1.

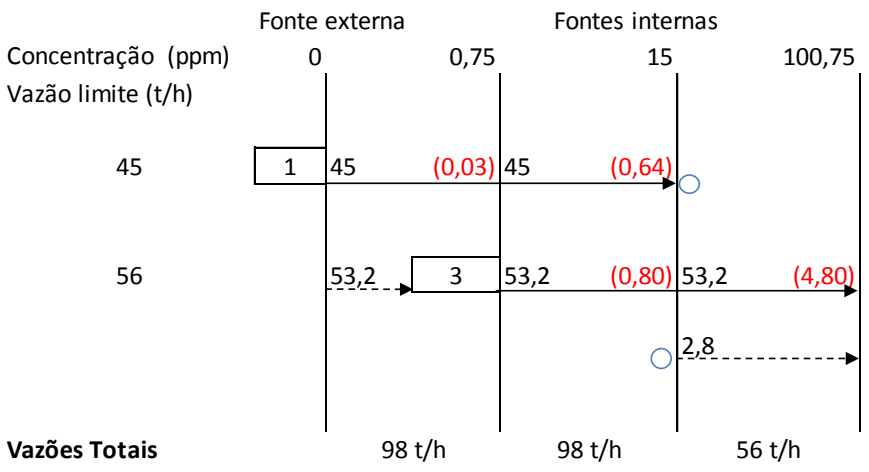

Figura 3.8 - Diagrama de Fontes de Água com o contaminante A como referência (Operações 1 e 3).

Com a presença da operação 3 houve um aumento de 55% no volume de água primária consumida em relação ao sistema contendo apenas as operações 1 e 2. Observa-se que o ponto de *pinch* está na concentração de 15 ppm (98-56 t/h). O fluxograma correspondente (Figura 3.9) exibido logo a seguir também mostra que não houve violações nas concentrações limites dos contaminantes:

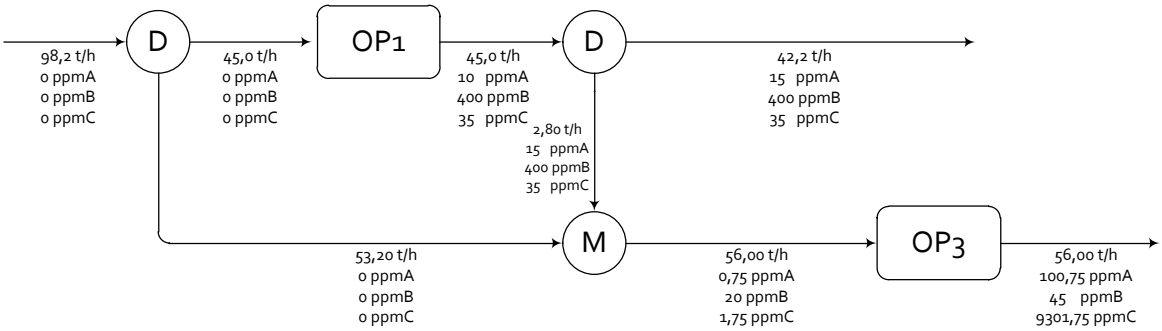

Figura 3.9 - Fluxograma da rede de transferência de massa (Operações 1 e 3).

3.1.4 Problema de Wang e Smith (1994) com as operações 2 e 3.

Esta é a última combinação realizada, agora envolvendo as operações 2 e 3. Apesar da operação 1 não estar presente, ainda há a disponibilidade de água a 0 ppm para alimentar ambas as operações.

3.1.4.1 Escolha do Contaminante de Referência

Para esta última combinação, o contaminante de referência escolhido continua sendo o A.

3.1.4.2 Relações de Transferência de Massa

As relações de transferência de massa presentes na Tabela 3.11 passam a considerar as operações 2 e 3.

Tabela 3.11 - Relações de Transferência de Massa (Operações 2 e 3).

Relação de transferência de massa		
1	$\Delta C_{A2}/\Delta C_{B2}$	0,0082
2	$\Delta C_{A2}/\Delta C_{C2}$	0,7407
3	$\Delta C_{B2}/\Delta C_{C2}$	90,3704
4	$\Delta C_{A3}/\Delta C_{B3}$	4,0000
5	$\Delta C_{A3}/\Delta C_{C3}$	0,0108
6	$\Delta C_{B3}/\Delta C_{C3}$	0,0027

Considerando estas operações as concentrações limites são exibidas na Tabela 3.12.

Tabela 3.12 - Valores limites de concentração para os contaminantes A, B e C com o contaminante A como referência (Operações 2 e 3).

Contaminante	Operação	Concentrações			
A	–	**0**	**20**	**120**	**220**
B2	2	–	300	12500	–
B3	3	–	–	20	45
C2	2	–	45	180	–
C3	3	–	–	200	9500

A Figura 3.10 mostra as concentrações e a restrição de reúso do contaminante B da operação 2 para a 3.

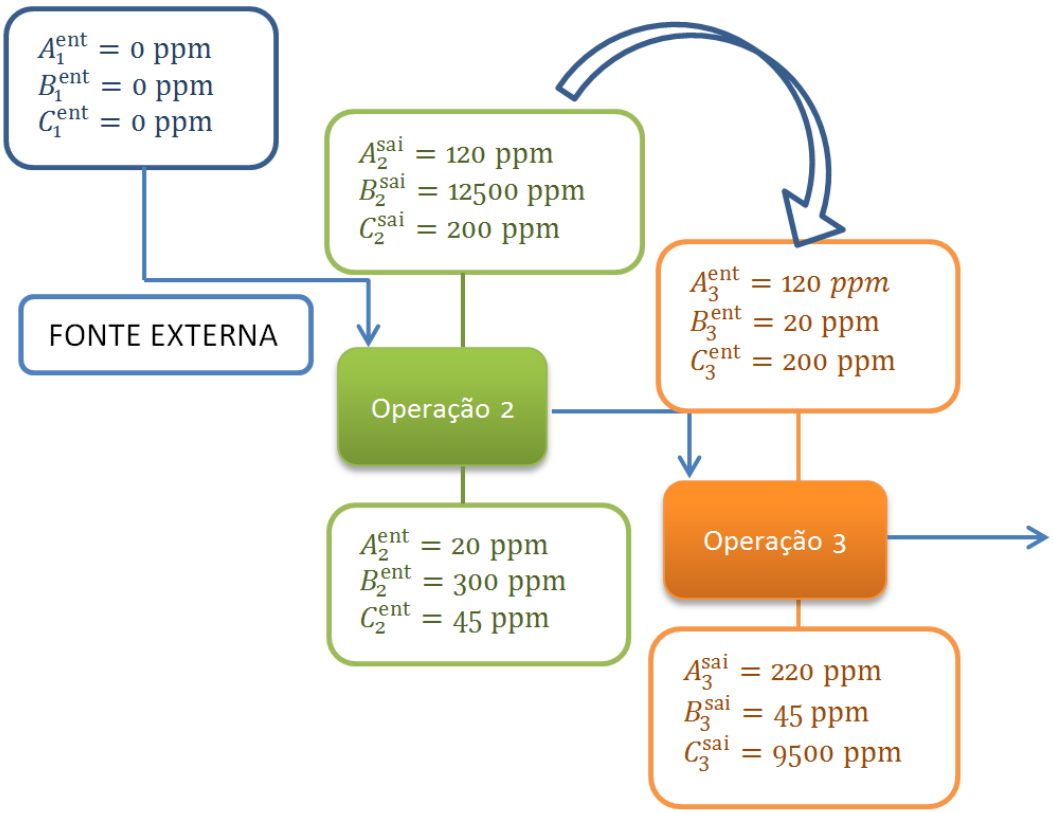

Figura 3.10 - Limites de concentração. Reúso na operação 3.

3.1.4.3 Ajuste das concentrações (Regra do deslocamento)

Observando os valores apresentados na Tabela 3.12 nota-se a viabilidade existente no reúso dos componentes A e C para a operação 3. No entanto, existe a restrição no reúso do contaminante B(12500-20 ppm). Desse modo, mediante o deslocamento na concentração do contaminante B na operação 3, é preciso calcular o valor da concentração de A na operação 3, caso B na operação 2 assumisse um valor de 20 ppm ao invés dos 12500 ppm. Sendo assim, fazendo uso da relação de transferência de massa 1 tem-se:

$$\begin{gathered}\frac{\Delta C_{A2}}{\Delta C_{B2}} = 0{,}0082 \\ \Delta C_{A2} = 0{,}0082 \times \Delta C_{B2} \\ \Delta C_{A2} = 0{,}0082 \times 20 \\ \Delta C_{A2} = 0{,}164 \text{ ppm ou } \boxed{C_{A2}^{\text{ent}} = 0{,}164 \text{ ppm}}\end{gathered} \tag{3.6}$$

Em virtude dessa mudança na concentração de entrada de A na operação 3, a saída também é alterada. Logo:

$$\begin{gathered}\frac{\Delta C_{A2}}{\Delta C_{B2}} = 4 \\ \frac{C_{A3}^{\text{sai}} - C_{A3}^{\text{ent}}}{C_{B3}^{\text{sai}} - C_{B3}^{\text{ent}}} = 4 \\ C_{A3}^{\text{sai}} = 4\left(C_{B3}^{\text{sai}} - C_{B3}^{\text{ent}}\right) + C_{A3}^{\text{ent}} = 4(45 - 20) + 0{,}164 \\ \boxed{C_{A3}^{\text{sai}} = 100{,}164 \text{ ppm}}\end{gathered} \tag{3.7}$$

Com esses valores atualizados. Monta-se a Tabela 3.13.

Tabela 3.13 - Novos valores limites após o deslocamento (operações 2 e 3).

Operação *k*	f_k (t/h)	Contaminante	$C_{i,k,max}$	$C_{f,k,max}$	Δ_{mk} (kg/h)
2	34	A	20	120	3,4
		B	300	12500	414,8
		C	45	180	4,59
3	56	A	0,164	100,164	5,6
		B	20	45	1,4
		C	200	9500	520,8

3.1.4.4 Construção do Diagrama de Fontes de Água

Apesar do limite mínimo de concentração de 0 ppm não abranger as operações 2 e 3, faz-se necessário incluí-lo na construção do DFA, pois representa a fonte externa de água primária disponível para alimentar ambas as operações no processo. Também é importante salientar que para facilitar a visualização é recomendado que as operações sejam colocadas no diagrama, de cima para baixo, seguindo a ordem crescente nas concentrações de entrada. Sendo assim, levando em conta apenas uma fonte externa (água primária) chega-se ao seguinte diagrama:

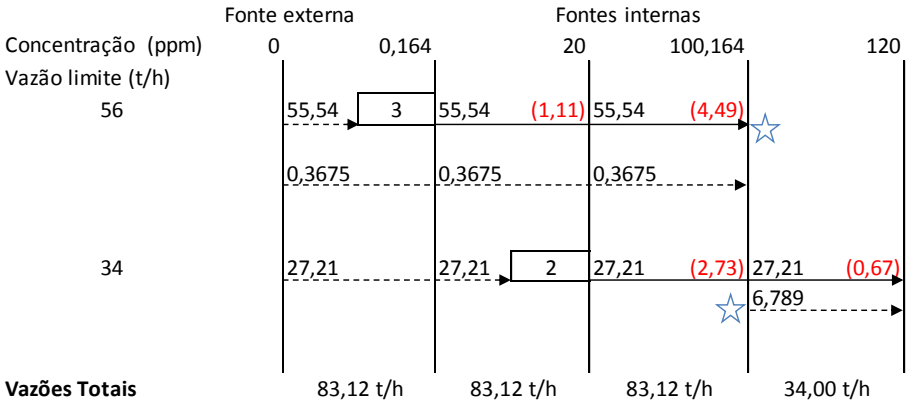

Figura 3.11 - Diagrama de Fontes de Água com o contaminante A como referência (Operações 2 e 3).

Não há operações no primeiro intervalo (0-0164 ppm). No segundo, a operação 3 está presente requerendo uma vazão de 56 t/h. Entretanto são consumidos da fonte externa, 55,54 t/h e a carga mássica da operação no intervalo é 1,11 kg/h.

No terceiro intervalo a operação 2 está presente e necessita de uma vazão de 34 t/h, entretanto são consumidos da fonte externa de água primária 27,21 t/h para suprir nesse intervalo a carga de 2,73 kg/h. Na operação 3, a vazão demandada continua sendo a mesma do intervalo anterior, ou seja, 56 t/h, do qual são aproveitados 55,54 t/h. Para completar a diferença é preciso consumir uma certa quantidade da fonte externa. E esse valor pode ser calculado pela Equação (2.7), resultando em 0,3675 t/h.

Já no quarto e último intervalo a operação 2 encontra-se presente e necessita de 34 t/h, onde 27,21 t/h são aproveitados do intervalo anterior e 6,79 t/h dão consumidos da fonte interna disponível a 100,164 ppm pela operação 3. A carga presente é de 0,67 kg/h. Tendo em mente o reúso da vazão da operação 2 na 3 será verificado se houve ou não violações nas car-

gas fixas dos contaminantes nas operações mediante análise do fluxograma da rede de transferência de massa (Figura 3.12) que será realizada a seguir, com reúso da operação 2 para a 3.

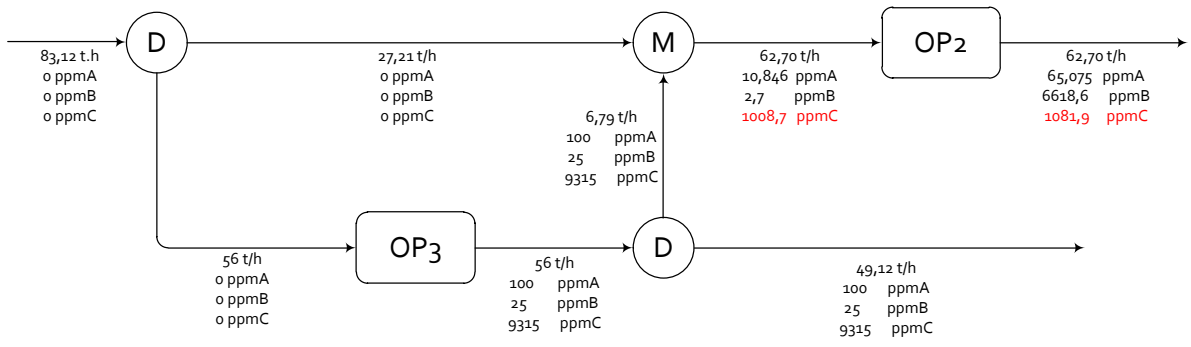

Figura 3.12 - Fluxograma da rede de transferência de massa (operações 2 e 3).

O fluxograma acima mostra o reúso de 6,79 t/h provenientes da operação 3 na operação 2. As cargas fixas para cada contaminante na operação 2 mantiveram-se inalteradas, no entanto os limites máximos de concentração de entrada e saída do contaminante C foram violados. Isso reforça a necessidade de mudança na escolha da operação e do contaminante de referência ou da elaboração de um procedimento onde os limites de concentração e cargas fixas sejam respeitados quando aplicados nos mais variados casos existentes na literatura. Outra alternativa é aumentar a vazão a montante da operação 2 misturando com a corrente 62,70 t/h. A vazão necessária para respeitar o limite de 45 ppm é de 1405,33 t/h. Sabendo que esta quantidade é proveniente da fonte externa de água primária, tem-se o fluxograma da Figura 3.13.

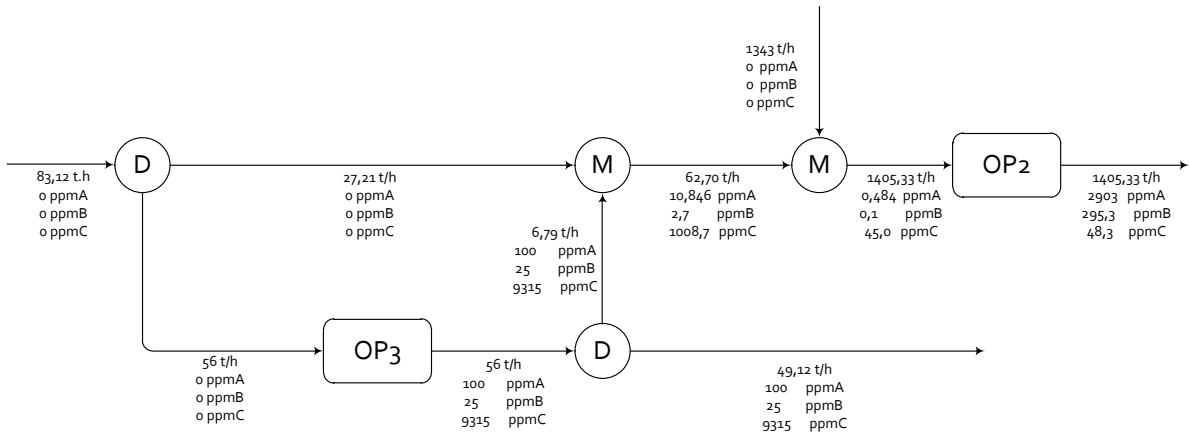

Figura 3.13 - Fluxograma da rede de transferência de massa (operações 2 e 3). Acréscimo na vazão da operação 2.

A seguir será aplicado um procedimento proposto por Santos (2007) no mesmo exemplo até aqui estudado.

3.2. Procedimento de Máximo Reúso Proposto por Santos (2007)

3.2.1 Problema de Wang e Smith (1994) com as operações 1, 2 e 3.

Santos (2007) também desenvolveu um procedimento para a minimização do consumo de águas industriais levando em conta a presença de múltiplos contaminantes. O mesmo exemplo proposto por Wang e Smith (1994) será utilizado e mais uma vez serão também testadas combinações entre as operações 1 e 2, 1 e 3 e 2 e 3. Inicialmente o procedimento será aplicado na presença das três operações e dos três contaminantes e com os dados limites de concentração e cargas mássicas originais. A Tabela 3.14 mostra os valores limites utilizados na aplicação do procedimento de Gomes (2002) que serão repetidos no presente exemplo.

Tabela 3.14 - Dados limites para as correntes de processo apresentados por Wang e Smith (1994).

Operação k	f_k (t/h)	Contaminante	$C_{i,k,max}$	$C_{f,k,max}$	Δ_{mk} (kg/h)
1	45	A	0	15	0,675
		B	0	400	18
		C	0	35	1,575
2	34	A	20	120	3,4
		B	300	12500	414,8
		C	45	180	4,59
3	56	A	120	220	5,6
		B	20	45	1,4
		C	200	9500	520,8

3.2.1.1 Escolha do Contaminante de Referência

Para a eleição do contaminante de referência é preciso realizar o cálculo da vazão mínima de água necessária para cada operação, conforme foi mostrado na Equação (2.11), reproduzida a seguir:

$$f_{\min,k} = \max \frac{\Delta m_{i,k}}{C_{s,i,k}} \,. \tag{3.8}$$

O contaminante de referência será aquele que indicar a vazão mínima de água em um maior número de operações. Caso haja mais de um contaminante de referência, deve ser feita

uma análise destes e somar-se-ão as vazões mínimas que cada um apresenta. Aquele que apresentar o maior valor no somatório de vazão mínima de água será escolhido como referência.

Realizando os cálculos para a vazão mínima têm-se os seguintes resultados, mostrados na Tabela 3.15.

Tabela 3.15 - Cálculo da vazão mínima e do fator R para o problema apresentado por Wang e Smith (1994).

Operação *k*	f_k (t/h)	Contaminante	$C_{i,k,max}$	$C_{f,k,max}$	Δ_{mk} (kg/h)	f_{min} (t/h)	Fator R Op1
1	45	A	0	15	0,675	45,00	-
		B	0	400	18	45,00	-
		C	0	35	1,575	45,00	-
2	34	A	20	120	3,4	28,33	0,75
		B	300	12500	414,8	33,18	1,33
		C	45	180	4,59	25,50	0,78
3	56	A	120	220	5,6	25,45	0,13
		B	20	45	1,4	31,11	20,00
		C	200	9500	520,8	54,82	0,18

Observa-se que na operação 1 não há como analisar qual contaminante possui a maior vazão mínima, uma vez que todos eles apresentam as mesmas vazões mássicas. Já na operação 2 o maior valor corresponde ao contaminante B (33,18 t/h) e na operação 3 o contaminante C apresenta o maior valor (54,82 t/h). Sendo assim, como C possui vazão mínima maior que B, ele será considerado o de referência.

3.2.2 Escolha da Operação de Referência

Para a escolha da operação de referência deve-se a *priori*, verificar qual (is) operação (ões) faz (em) uso apenas de água primária. Se apenas uma operação fizer uso de água primária, esta é a de referência. No entanto, para o caso no qual mais de uma operação seja indicada como referência, é necessário calcular o fator de restrição, que dará uma ideia da quantidade de água a ser economizada em tal operação fazendo uso da operação de referência. Como já visto, a equação para o fator é a seguinte:

$$\text{Fator } R_{i,k} = \frac{C_{s,ref,i}}{C_{e,k,i}} \tag{3.9}$$

Neste exemplo não é preciso calcular o fator de restrição uma vez que apenas a operação 1 necessita de água primária. Logo ela será escolhida como a operação que servirá de referência para as operações 2 e 3.

3.2.2.1 Relações de Transferência de Massa

As relações de transferência de massa são as mesmas já apresentadas na Tabela 3.2 repetida na Tabela 3.16.

Tabela 3.16 - Relações de Transferência de Massa para o procedimento proposto por Santos (2007) com três operações e três contaminantes.

Relação de transferência de massa		
1	$\Delta C_{A1}/\Delta C_{B1}$	0,0375
2	$\Delta C_{A1}/\Delta C_{C1}$	0,4286
3	$\Delta C_{B1}/\Delta C_{C1}$	11,4286
4	$\Delta C_{A2}/\Delta C_{B2}$	0,0082
5	$\Delta C_{A2}/\Delta C_{C2}$	0,7407
6	$\Delta C_{B2}/\Delta C_{C2}$	90,3704
7	$\Delta C_{A3}/\Delta C_{B3}$	4,0000
8	$\Delta C_{A3}/\Delta C_{C3}$	0,0108
9	$\Delta C_{B3}/\Delta C_{C3}$	0,0027

3.2.2.2 Ajuste das concentrações (Regra do deslocamento)

Nessa etapa são efetuados ajustes nas concentrações dos contaminantes A e B. Estes ajustes são feitos mediante um procedimento que guarda analogia à regra de deslocamento até então estudada. Para organizar os cálculos, Santos (2007) então definiu uma tabela com todos os parâmetros que indicam o ajuste, conforme mostra a Tabela 3.17.

Tabela 3.17 - Indicação do ajuste de concentrações. Santos (2007)

	C_{eref}	C_{sref}	C_{ekdesl}	C_{ek}	C_{skdesl}	C_{sk}
Fator R_{ik}	C_{erefi}	C_{srefi}	$C_{ekidesl}$	C_{refi}	C_{skdesl}	
Fator R_{ik}	C_{erefi}	C_{sref}	$C_{ekidesl}$	C_{refi}	C_{skdesl}	
				C_{eki}		C_{ski}
				C_{eki}		C_{ski}

O Fator R_{ik} é o fator restritivo do contaminante i na operação *k*, $\mathbf{C_{eref}}$ é a concentração de entrada do contaminante de referência na operação de referência, $\mathbf{C_{erfei}}$ é a concentração de entrada dos demais contaminantes na operação de referência, $\mathbf{C_{sref}}$ é a concentração de saída do contaminante de referência na operação de referência, $\mathbf{C_{srfei}}$ é a concentração de saída dos demais contaminantes na operação de referência, $\mathbf{C_{ek}}$ é a concentração de entrada do contaminante de referência na operação *k*, $\mathbf{C_{eki}}$ é a concentração de entrada dos demais contaminantes na operação *k*, $\mathbf{C_{sk}}$ é a concentração de saída do contaminante de referência na operação *k*, $\mathbf{C_{ski}}$ indica a concentração de saída dos demais contaminantes na operação *k*, $\mathbf{C_{refi}}$ é a concentração dos demais contaminantes quando a operação de referência está na concentração de entrada do contaminante de referência, $\mathbf{C_{ekdesl}}$ é a concentração de entrada ajustada do contaminante de referência na operação *k*, $\mathbf{C_{ekidesl}}$ é a concentração de entrada ajustada dos demais contaminantes na operação *k*, $\mathbf{C_{skdesl}}$ é a concentração de saída ajustada do contaminante de referência na operação *k* e $\mathbf{C_{skidesl}}$ é a concentração de saída ajustada dos demais contaminantes na operação *k*.

O ajuste nas concentrações baseia-se na Equação (3.9), onde o critério para a escolha do contaminante que terá sua concentração deslocada indica aquele que possui o maior Fator R. De posse do contaminante e operação de referência, monta-se a Tabela 3.18. Nela estão contidas as concentrações dos contaminantes na operação de referência e as concentrações dos contaminantes nas demais operações, além dos fatores R.

Tabela 3.18 - Concentrações a serem ajustadas na operação 2.

Fator R	0	35	45	180
0,75	0	15		
1,33	0	400	C_{B1}	
			20	120
			300	12500

Observando a Tabela 3.18, percebe-se que o contaminante relacionado ao maior fator R é o B. Logo, será preciso determinar a concentração deste na operação 1 quando a concentração do contaminante C for 45 ppm. Para isso faz-se uso da relação de transferência 3 (Tabela 3.16):

$$\frac{\Delta C_{B1}}{\Delta C_{C1}} = 11{,}4286$$
$$\frac{C_{B1} - 400}{45 - 35} = 11{,}4286 \tag{3.10}$$
$$C_{B1} = 514{,}3 \text{ ppm}$$

Este valor ultrapassa o limite de 300 ppm para o contaminante B na operação 2, sendo necessário ajustar a concentração do contaminante de referência na operação 1 para adequá-la a este limite de 300 ppm de B. Uma nova tabela é elaborada (Tabela 3.19):

Tabela 3.19 - Concentrações ajustadas na operação 2.

Fator R	0	35	C_{e2desl}	45	C_{s2desl}	180
0,75	0	15				
1,33	0	400		514,3		
				20		120
				300		12500

$$\frac{\Delta C_{B1}}{\Delta C_{C1}} = 11{,}4286$$
$$\frac{C_{e2desl} - 35}{300 - 400} = 11{,}4286 \tag{3.11}$$
$$\boxed{C_{e2desl} = 26{,}25 \text{ ppm}}$$
$$C_{s2desl} = (180 - 35) + 26{,}25$$
$$\boxed{C_{s2desl} = 171{,}25 \text{ ppm}}$$

Com os valores na operação 2 ajustados, deve-se realizar o mesmo com respeito à operação 3. A Tabela 3.20 mostra as concentrações referentes a este deslocamento.

Tabela 3.20 - Concentrações a serem ajustadas na operação 3.

Fator R	0	35	200	9500
0,75	0	15		
1,33	0	400	C_{B1}	
			120	220
			20	45

Calcula-se o valor da concentração de B na operação 1 quando a concentração de C for 200 ppm. Fazendo uso da relação de transferência de massa 3 presente na Tabela 3.16, tem-se:

$$\frac{\Delta C_{B1}}{\Delta C_{C1}} = 11{,}4286$$
$$\frac{CB_1 - 400}{200 - 35} = 11{,}4286 \tag{3.12}$$
$$\boxed{CB_1 = 2285{,}7 \text{ ppm}}$$

Essa concentração extrapola o limite máximo de 20 ppm na entrada da operação 3, fazendo-se necessária uma mudança na concentração do contaminante de referência C na operação 1 quando a concentração de B estiver em seu limite de 20 ppm. Esse deslocamento também é percebido quando visualiza-se a Tabela 3.21:

Tabela 3.21 - Concentrações ajustadas na operação 3.

Fator R	0	35	C_{e3desl}	200	C_{s3desl}	9500
0,75	0	15				
1,33	0	400		2285,7		
				120		220
				20		45

Será preciso calcular a concentração do contaminante de referência na operação 1 que fornecerá uma concentração de 20 ppm do contaminante B. A relação de transferência 3 é novamente utilizada.

$$\frac{\Delta C_{B1}}{\Delta C_{C1}} = 11{,}4286 \tag{3.13}$$

$$\frac{400 - 20}{35 - C_{e3desl}} = 11{,}4286$$

$$\boxed{C_{e3desl} = 1{,}75 \text{ ppm}} \text{ e}$$

$$C_{s3desl} = (9500 - 200) + 1{,}75$$

$$\boxed{C_{s3desl} = 9301{,}75 \text{ ppm}}$$

3.2.2.3 Critério de Monotonicidade

Savelski e Bagajewickz (2003) estabeleceram um critério que afirma que, se uma solução for ótima, *a concentração de saída do contaminante de referência na operação de referência é menor que a concentração de saída da operação que não é a de referência*. O contaminante de referência é calculado pela Equação (2.1) e a operação de referência é aquela em que algum dos contaminantes presentes apresenta concentração nula. A Tabela 3.22 mostra os resultados mediante ajustes nas concentrações do contaminante de referência.

Tabela 3.22 - Concentrações do contaminante de referência C, ajustadas. Verificação da monotonicidade das concentrações.

Operação	f(t/h)	C_e(ppm)	C_s(ppm)
1	45	0	35
2	34	26,25	161,25
3	56	1,75	9301,75

Observa-se por tanto que a concentração do contaminante C na operação 1 (35 t/h) é menor que as concentrações nas operações 2(161,25 t/h) e 3(9301,75 t/h), obedecendo ao critério estabelecido. Se a concentração em alguma operação fosse menor do que a da operação de referência, então esta operação deveria consumir água limpa em sua totalidade, sendo sua vazão a mínima estabelecida, tornando-se deste modo, uma candidata a mais a ser eleita como operação de referência. Assim deve-se repetir o passo para a escolha da operação de referência e isso deve ser feito até que o critério de monotonicidade se aplique a todas as operações que não são a de referência.

3.2.2.4 Construção do Diagrama de Fontes de Água

A Tabela 3.23 mostra todos os valores limites incluindo as concentrações do contaminante C ajustadas.

Tabela 3.23 - Dados limites para as correntes de processo apresentados por Wang e Smith (1994). Concentrações do contaminante de referência C ajustadas.

Operação k	f_k (t/h)	Contaminante	$C_{i,k,max}$	$C_{f,k,max}$	Δ_{mk} (kg/h)
1	45	A	0	15	0,675
		B	0	400	18
		C	0	35	1,575
2	34	A	20	120	3,4
		B	300	12500	414,8
		C	26,25	161,25	4,59
3	56	A	120	220	5,6
		B	20	45	1,4
		C	1,75	9301,75	520,8

A Figura 3.14 mostra o Diagrama de Fonte de Águas correspondentes aos dados mostrados na Tabela 3.23.

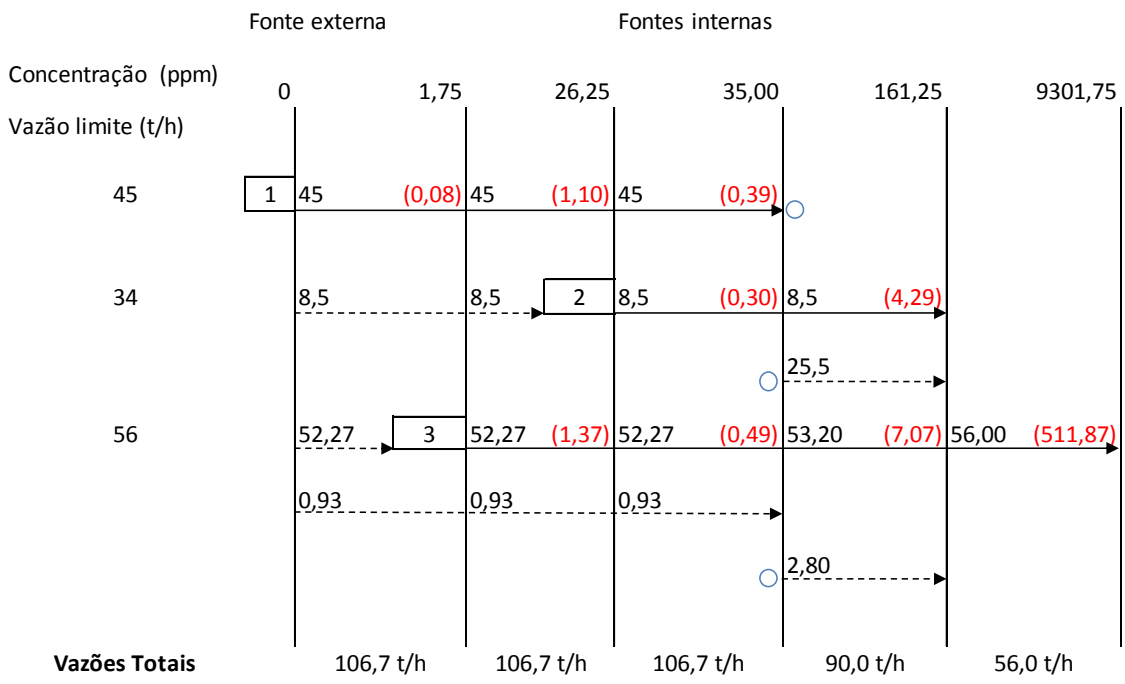

Figura 3.14 - Diagrama de Fontes de Água para o problema proposto por Wang e Smith (1994) e estudado como base no procedimento proposto por Santos (2007) .

No primeiro intervalo de concentração (0-1,75 ppm) apenas a operação 1 está presente. Para suprir a demanda de uma carga de 0,08 kg/h são necessários 45 t/h, que são consumidos da fonte externa de água limpa.

Do segundo intervalo participam as operações 1 e 3. A operação 1 necessita de uma vazão de 45 t/h que é aproveitada do intervalo anterior e troca uma carga de 1,10 kg/h. Na operação 3 são requeridos 56 t/h, mas apenas 52,27 t/h de água primária são consumidos em função da sua disponibilidade a 0 ppm e a carga do intervalo é de 1,37 kg/h.

No terceiro intervalo estão presentes as operações 1, 2 e 3. A operação 1 necessita de 45 t/h que são aproveitados do intervalo anterior e a carga mássica é 0,39 kg/h. A operação 2 precisa de 34 t/h, mas apenas 8,5 t/h são consumidas da fonte externa em função da indisponibilidade de fontes internas e a carga do intervalo é 0,30 kg/h. A operação 3 necessita de 56 t/h onde uma parte, 52,27 t/h, procede do intervalo anterior e mediante o uso da Equação (2.7) para fontes externas, é calculado um valor de 0,93 t/h que são consumidos da fonte externa de água limpa.

No quarto intervalo a operação 1 disponibiliza 45 t/h para reúso. A operação 2 precisa de 34 t/h, dos quais 8,5 t/h vêm do intervalo anterior e para completar este valor são reusados 25,5 t/h da fonte interna na operação 1. A operação 3 precisa de 56 t/h, dos quais 53,20 t/h são oriundas da mesma operação no terceiro intervalo e o restante, 2,8t/h vêm da fonte interna disponível na operação 1.

No quinto e último intervalo apenas a operação 3 está presente na qual toda quantidade requerida, 56 t/h, é oriunda do intervalo anterior. Observa-se que o consumo mínimo de água primária é 106,7 t/h e que o ponto de *pinch* ocorre na concentração de 35 ppm. Fazendo um comparativo com o procedimento desenvolvido por Gomes (2002), observa-se que a quantidade total de água primária consumida é a mesma, uma vez que a operação de referência escolhida (operação 1) coincidiu e diferiu apenas na eleição do contaminante de referência, sendo o A para Gomes (2002) e C para Santos (2007). Com o procedimento de Gomes (2002), o ponto de *pinch* aconteceu em numa concentração de 15 ppm para A, já o de Santos (2007), como já mencionado, foi 35 ppm para C.

Com o diagrama construído (Figura 3.14), é possível montar um fluxograma da rede de transferência de massa com todos os dados do balanço material.

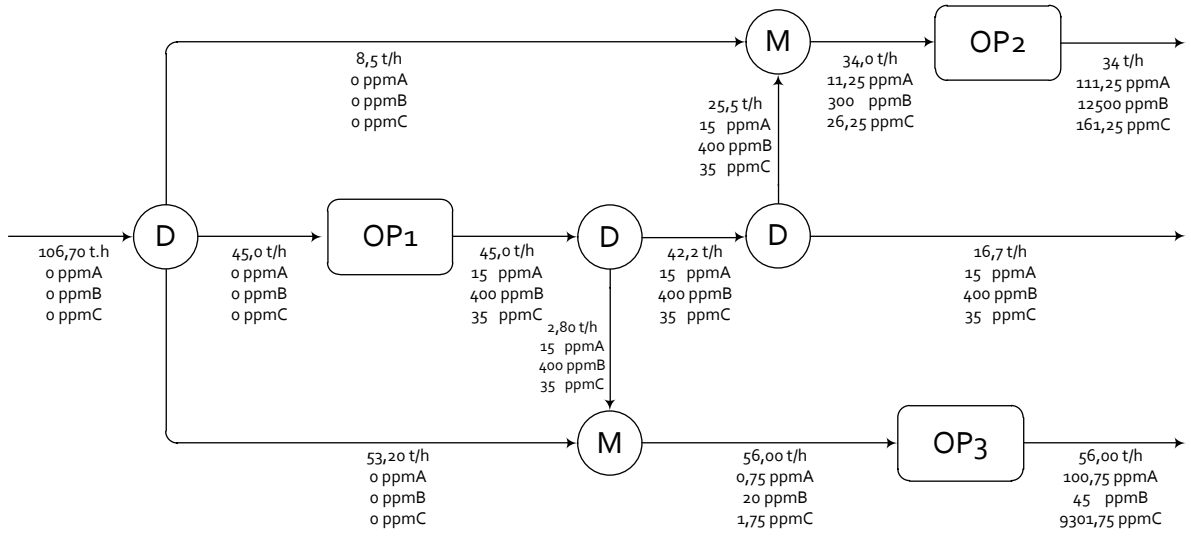

Figura 3.15 - Fluxograma para a rede de transferência de massa com as três operações presentes. Procedimento proposto por Santos (2007).

Observando o fluxograma acima, percebe-se que ele é idêntico ao gerado utilizando o procedimento de Gomes (2002), onde mais uma vez não houve violações nos limites de concentração dos contaminantes.

3.2.3 Problema de Wang e Smith (1994) com as operações 1, 2

Agora será considerada apenas a presença das operações 1 e 2.

3.2.3.1 Escolha do Contaminante de Referência

A escolha do contaminante de referência é feita mediante o uso da Equação (2.11). A Tabela 3.24 mostra os valores limites, neste caso.

Tabela 3.24 - Cálculo da vazão mínima e do fator R para o problema apresentado por Wang e Smith (1994).

Operação *k*	f_k (t/h)	Contaminante	$C_{i,k,max}$	$C_{f,k,max}$	Δ_{mk} (kg/h)	f_{min} (t/h)	Fator R Op1
		A	0	15	0,675	45,00	-
1	45	B	0	400	18	45,00	-
		C	0	35	1,575	45,00	-
		A	20	120	3,4	28,33	0,75
2	34	B	300	12500	414,8	33,18	1,33
		C	45	180	4,59	25,50	0,78

Nota-se que na operação 2, o contaminante que possui o maior valor de vazão mínima é o B. Logo, ele será tomado como referência.

3.2.3.2 Escolha da Operação de Referência

A operação de referência escolhida é a 1, pois é a única a consumir água primária.

3.2.3.3 Relações de Transferência de Massa

As relações de transferência de massa são as mesmas com exceção das que envolviam a operação 3, as quais foram removidas (Tabela 3.25).

Tabela 3.25 - Relações de Transferência de Massa para o procedimento proposto por Santos (2007) com duas operações e três contaminantes.

Relação de transferência de massa		
1	$\Delta C_{A1}/\Delta C_{B1}$	0,0375
2	$\Delta C_{A1}/\Delta C_{C1}$	0,4286
3	$\Delta C_{B1}/\Delta C_{C1}$	11,4286
4	$\Delta C_{A2}/\Delta C_{B2}$	0,0082
5	$\Delta C_{A2}/\Delta C_{C2}$	0,7407
6	$\Delta C_{B2}/\Delta C_{C2}$	90,3704

3.2.3.4 Ajuste das concentrações (Regra do deslocamento)

Novamente faz-se necessário ajustar as concentrações do contaminante de referência na operação 1 para que haja a possibilidade de reúso (Tabela 3.26).

Tabela 3.26 - Concentrações a serem ajustadas na operação 2.

Fator R	0	400	300	12500
0,75	0	15		
0,78	0	35	C_{C1}	
			20	120
			45	180

Como o contaminante C possui o maior Fator R, é preciso saber qual é a sua concentração na operação 1 quando o contaminante de referência possuir 300 ppm nessa mesma operação. Para isso é utilizada a relação de transferência 3.

$$\frac{\Delta C_{B1}}{\Delta C_{C1}} = 11{,}4286$$
$$\frac{400 - 300}{35 - C_{C1}} = 11{,}4286 \tag{3.14}$$
$$\boxed{C_{C1} = 26{,}25 \text{ ppm}}$$

Como o valor encontrado para o contaminante C é menor que o seu valor limite de entrada na operação 2, então não se faz necessário deslocar essa concentração. As concentrações do contaminante de referência permanecem inalteradas.

3.2.3.5 Critério de Monotonicidade

Agora precisa-se verificar se o critério de monotonicidade desenvolvido por Savelski e Bagajewickz (2003) é obedecido.

Tabela 3.27 - Concentrações do contaminante de referência B, sem ajustes. Verificação da monotonicidade das concentrações.

Operação	f(t/h)	C_e(ppm)	C_s(ppm)
1	45	0	400
2	34	300	12500

Pode ser visto na Tabela 3.27 que a concentração de saída de B na operação 1 (referência) é menor que a sua concentração na saída da operação 2, então o critério de monotonicidade está satisfeito.

3.2.3.6 Construção do Diagrama de Fontes de Água

A Figura 3.16 apresenta o diagrama de fontes de água obtido a partir dos dados na Tabela 3.26.

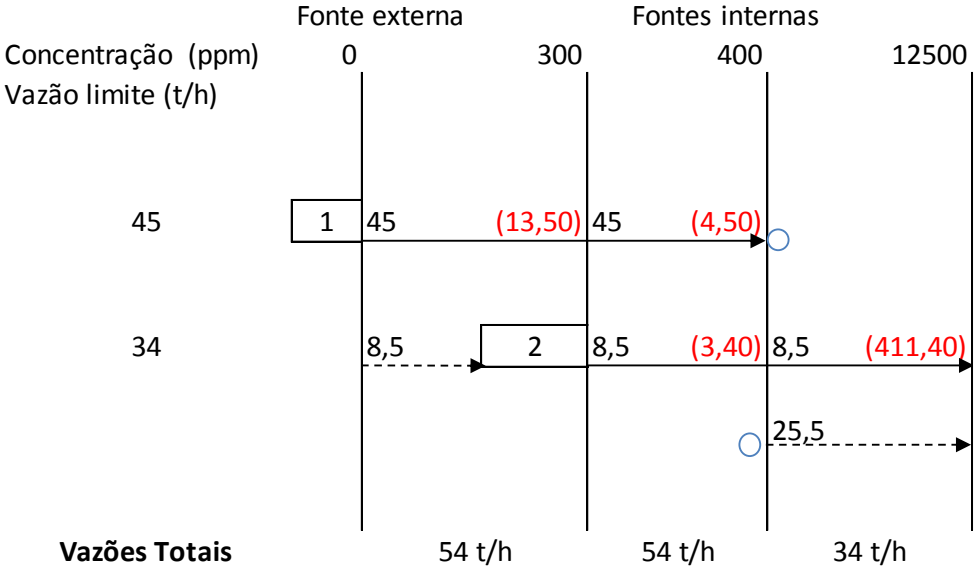

Figura 3.16 - Diagrama de Fontes de Água com o contaminante A como referência (Operações 1 e 2).

Analisando o DFA, tem-se que no primeiro intervalo de concentração (0-300 ppm), apenas a operação 1 encontra-se presente, a qual necessita de 45 t/h que são consumidos da fonte externa de água limpa. A carga mássica no intervalo é de 13,50 kg/h .

No segundo intervalo estão presentes ambas as operações. Na operação 1 é requerida uma vazão de 45 t/h, que é aproveitada do intervalo anterior, fazendo uma troca no intervalo de 4,5 kg/h. A partir de então (400 ppm) fica disponibilizada uma vazão de 45 t/h como fonte interna para reúso na operação seguinte. Já a operação 2 necessita de 34 t/h a 300 ppm, no entanto apenas 8,5 t/h são consumidos da fonte externa e que atendem a quantidade de troca mássica de 3,4kg/h.

Apenas a operação 2 participa do intervalo 3 e precisa de 34 t/h a 400 ppm. Uma parte, 8,5 t/h, deriva do intervalo anterior e o restante, 25,5 t/h vêm da fonte interna disponível na operação 1 a 400 ppm. A carga neste intervalo é de 411,40 kg/h. Por fim o ponto de *pinch* acontece na concentração de 400 ppm, quando há a mudança de 54 para 34 t/h. A seguir é mostrado o fluxograma da rede de transferência de massa, correspondente ao DFA da Figura 3.16.

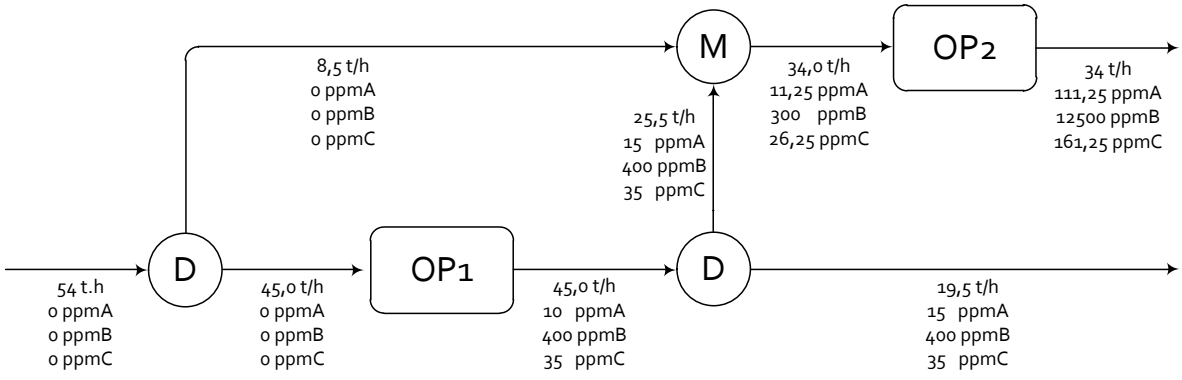

Figura 3.17 - Fluxograma da rede de transferência de massa (Operações 1 e 2).

Percebe-se na Figura 3.17 que não há violações nas concentrações limites e que o fluxograma é idêntico ao gerado mediante aplicação do procedimento de Gomes (2002).

3.2.4 Problema de Wang e Smith (1994) com as operações 1 e 3

A seguir serão consideradas apenas as operações 1 e 3.

3.2.4.1 Escolha do Contaminante de Referência

Mais uma vez será preciso identificar o contaminante que detém o maior valor de vazão mínima. Observa-se na Tabela 3.28 que este contaminante é o C.

Tabela 3.28 - Cálculo da vazão mínima e do fator R para o problema apresentado por Wang e Smith (1994).

Operação *k*	f_k (t/h)	Contaminante	$C_{i,k,max}$	$C_{f,k,max}$	Δ_{mk} (kg/h)	f_{min} (t/h)	Fator R Op1
		A	0	15	0,675	45,00	-
1	45	B	0	400	18	45,00	-
		C	0	35	1,575	45,00	-
		A	120	220	5,6	25,45	0,13
3	56	B	20	45	1,4	31,11	20,00
		C	200	9500	520,8	54,82	0,18

3.2.4.2 Escolha da Operação de Referência

Como a operação 1 ainda participa e é a única a consumir água primária, ela é tomada como sendo a de referência.

3.2.4.3 Relações de Transferência de Massa

As relações de troca de massa são apresentadas na Tabela 3.29.

Tabela 3.29 - Relações de Transferência de Massa para o procedimento proposto por Santos (2007) com duas operações e três contaminantes.

Relação de transferência de massa		
1	$\Delta C_{A1}/\Delta C_{B1}$	0,0375
2	$\Delta C_{A1}/\Delta C_{C1}$	0,4286
3	$\Delta C_{B1}/\Delta C_{C1}$	11,4286
4	$\Delta C_{A3}/\Delta C_{B3}$	4,0000
5	$\Delta C_{A3}/\Delta C_{C3}$	0,0108
6	$\Delta C_{B3}/\Delta C_{C3}$	0,0027

3.2.4.4 Ajuste das concentrações (Regra do deslocamento)

A seguir será investigado se haverá a necessidade de deslocamento nas concentrações limites do contaminante de referência.

Tabela 3.30 - Concentrações a serem ajustadas na operação 3.

Fator R	0	35	200	9500
0,13	0	15		
20,00	0	400	C_{B1}	
			120	220
			20	45

O contaminante B é o que possui o maior Fator R, e por esse motivo será calculada sua concentração na operação 1 que corresponde a uma concentração de 200 ppm do contaminante de referência. Para isso, é necessário usar a relação de transferência 3 (Tabela 3.29):

$$\frac{\Delta C_{B1}}{\Delta C_{C1}} = 11{,}4286$$
$$\frac{C_{B1} - 400}{200 - 35} = 11{,}4286 \tag{3.15}$$
$$\boxed{C_{B1} = 2285{,}7 \text{ ppm}}$$

Essa concentração ultrapassa o limite de 200 ppm na entrada da operação 2, sendo preciso deslocar esse valor para determinar uma concentração nova para o contaminante de referência.

Tabela 3.31 - Concentrações ajustadas na operação 3.

Fator R	0	35	C_{e3desl}	200	C_{s3desl}	9500
0,13	0	15				
20,00	0	400	20	2285,7		
				120		200
				20		45

Partindo da relação de transferência, tem-se:

$$\frac{\Delta C_{B1}}{\Delta C_{C1}} = 11{,}4286$$

$$\frac{400 - 20}{C_{\mathrm{e3desl}} - 35} = 11{,}4286$$

$$\boxed{C_{\mathrm{e3desl}} = 68{,}25 \text{ ppm}} \tag{3.16}$$

$$C_{\mathrm{s3desl}} - C_{\mathrm{e3desl}} = 9500 - 200$$

$$C_{\mathrm{s3desl}} = 9300 + 68{,}25$$

$$\boxed{C_{\mathrm{s3desl}} = 9368{,}25 \text{ ppm}}$$

Estes são então os novos valores limites de entrada e saída do contaminante de referência (C) na operação 3.

3.2.4.5 Critério de Monotonicidade

Analisando os limites de concentração para o contaminante de referência nas operações 1 e 3 na Tabela 3.32, percebe-se que o critério de monotonicidade foi atendido, pois a concentração de saída da operação de referência (1) é menor que sua concentração de saída na operação seguinte.

Tabela 3.32 – Concentrações ajustadas do contaminante de referência C. Verificação da monotonicidade das concentrações.

Operação	f(t/h)	C_e(ppm)	C_s(ppm)
1	45	0	35
3	56	68,25	9368,25

3.2.4.6 Construção do Diagrama de Fontes de Água

Os valores ajustados de C estão presentes na Tabela 3.33. Com esses valores é possível construir o diagrama de fontes de água mostrado na Figura 3.18.

Tabela 3.33 - Dados limites para as correntes de processo apresentados por Wang e Smith (1994). Concentrações do contaminante de referência C ajustadas e presença das operações 1 e 3.

Operação *k*	f_k (t/h)	Contaminante	$C_{i,k,max}$	$C_{f,k,max}$	Δ_{mk} (kg/h)	f_{min} (t/h)	Fator R Op1
		A	0	15	0,675	45,00	-
1	45	B	0	400	18	45,00	-
		C	0	35	1,575	45,00	-
		A	120	220	5,6	25,45	0,13
3	56	B	20	45	1,4	31,11	20,00
		C	68,25	9368,25	520,8	54,82	0,18

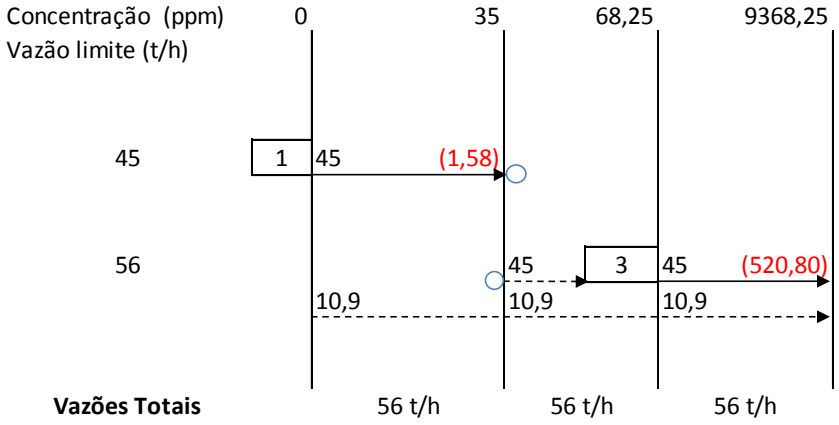

Figura 3.18 - Diagrama de Fontes de Água com o contaminante C como referência (Operações 1 e 3).

Como mostra o DFA da Figura 3.18, no primeiro intervalo de concentração (0-35 ppm) encontra-se presente a operação 1. A quantidade de água que esta requer para suprir a carga de 1,58 kg/h são 45 t/h, que são consumidas da fonte externa a 0 ppm. Essa vazão fica disponível para reúso pela operação seguinte.

No segundo intervalo nenhuma operação está presente e no terceiro encontra-se a operação 3. Esta necessita de uma vazão de 56 t/h, onde 45 t/h são consumidos da fonte interna a 35 ppm. Os demais 10,9 t/h são obtidos da fonte externa de água primária. A seguir é exibido o fluxograma da rede de transferência de massa.

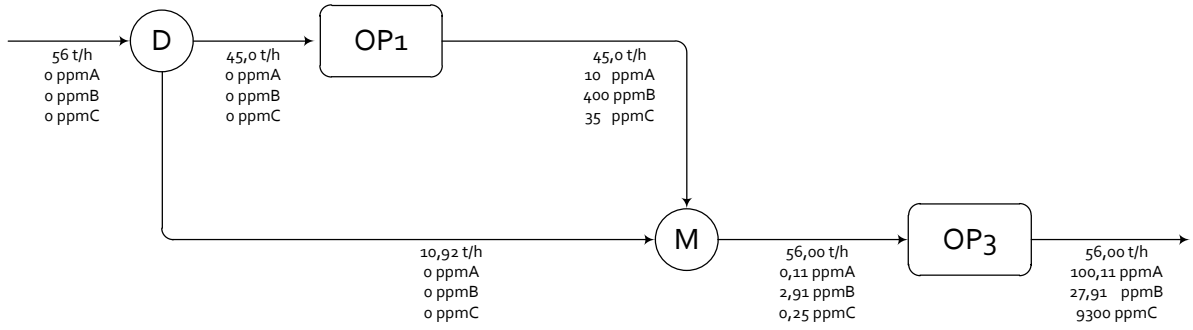

Figura 3.19 - Fluxograma da rede de transferência de massa (Operações 1 e 3).

Comparando os resultados aqui obtidos com os alcançados mediante uso do procedimento de Gomes (2002) mostrados na Figura 3.8, nota-se que houve um aumento de 2,97% na quantidade de água consumida da fonte externa, passando de 98,2 para 101 t/h.

3.2.5 Problema de Wang e Smith (1994) com as operações 2 e 3

Parte-se agora para a análise do DFA com um processo considerando somente as operações 2 e 3.

3.2.5.1 Escolha do Contaminante de Referência

A escolha do contaminante de referência segue o critério de maior vazão mínima entre as operações. A Tabela 3.34 mostra estes valores.

Tabela 3.34 - Cálculo da vazão mínima e do fator R para o problema apresentado por Wang e Smith (1994).

Operação *k*	f_k (t/h)	Contaminante	$C_{i,k,max}$	$C_{f,k,max}$	Δ_{mk} (kg/h)	f_{min} (t/h)	Fator R Op1
2	34	A	20	120	3,4	28,33	0,75
		B	300	12500	414,8	33,18	1,33
		C	45	180	4,59	25,50	0,78
3	56	A	120	220	5,6	25,45	0,13
		B	20	45	1,4	31,11	20,00
		C	200	9500	520,8	54,82	0,18

Na operação 2 o contaminante que apresenta a maior vazão mínima é o B com 33,18 t/h e na operação 3 é o contaminante C que tem o maior valor de f_{min}(54,82 t/h). Sendo assim, o contaminante escolhido para ser o de referência mais uma vez é o C.

3.2.5.2 Escolha da Operação de Referência

Para a escolha da operação de referência percebe-se que ambas as operações são flexíveis em suas concentrações de entrada quanto ao uso de água primária. Desse modo, tanto a operação 1 quanto a 2 são candidatas a serem operações de referência. Nesse caso, o cálculo do Fator R faz-se necessário e a Tabela 3.34 apresenta estes valores. O maior Fator R na operação 2 é 1,33 e na operação 3 é 20 e ambos para o contaminante B. Pelo fato deste fator ser menor na operação 2, esta será considerada operação de referência.

3.2.5.3 Relações de Transferência de Massa

As relações de transferência de massa são apresentadas na Tabela 3.35.

Tabela 3.35 - Relações de Transferência de Massa para o procedimento proposto por Santos (2007) com três operações e três contaminantes.

Relação de transferência de massa		
1	$\Delta C_{A2}/\Delta C_{B2}$	0,0082
2	$\Delta C_{A2}/\Delta C_{C2}$	0,7407
3	$\Delta C_{B2}/\Delta C_{C2}$	90,3704
4	$\Delta C_{A3}/\Delta C_{B3}$	4,0000
5	$\Delta C_{A3}/\Delta C_{C3}$	0,0108
6	$\Delta C_{B3}/\Delta C_{C3}$	0,0027

3.2.5.4 Ajuste das concentrações (Regra do deslocamento)

A seguir é verificada a necessidade de realizar ajustes na concentração do contaminante de referência, mediante deslocamento na concentração daquele que possui maior Fator R, no caso o componente B.

Tabela 3.36 - Concentrações a serem ajustadas na operação 2.

Fator R	45	180	200	9500
0,75	20	120		
1,33	300	12500	C_{B2}	
			20	120
			45	180

Pelo fato de B possuir maior Fator R, ele é o escolhido para ter sua concentração deslocada. Logo, calculando a concentração de B na operação 2 quando C possuir uma concentração de 200 ppm, tem-se que pela relação de transferência 3 (Tabela 3.35):

$$\frac{\Delta C_{B2}}{\Delta C_{C2}} = 90{,}3704$$
$$\frac{C_{B2} - 12500}{200 - 180} = 90{,}3704 \tag{3.17}$$
$$\boxed{C_{B2} = 14307{,}4 \text{ ppm}}$$

Percebe-se que este valor é muito maior do que o limite de 20 ppm que B exige na entrada da operação 3. Sendo assim é preciso calcular a concentração do contaminante de referência correspondente uma concentração de 20 ppm de B. A relação de transferência de massa continua a mesma. Os valores ajustados estão na Tabela 3.37.

$$\frac{\Delta C_{B2}}{\Delta C_{C2}} = 90{,}3704$$
$$\frac{12500 - 20}{180 - C_{\text{e3desl}}} = 90{,}3704$$
$$\boxed{C_{\text{e3desl}} = 41{,}90 \text{ ppm}} \tag{3.18}$$
$$C_{\text{s3desl}} - C_{\text{e3desl}} = 9500 - 200$$
$$\boxed{C_{\text{s3desl}} = 9341{,}9 \text{ ppm}}$$

Tabela 3.37 - Concentrações ajustadas na operação 2.

Fator R	45	180	C_{e2desl}	200	C_{s2desl}	9500
0,75	20	120				
1,33	300	12500	20	14307,4		
				20		120
				45		180

Com os valores encontrados para o contaminante de referência, é verificada a monotonicidade nas concentrações.

3.2.5.5 Critério de Monotonicidade

A monotonicidade nas concentrações do contaminante de referência é verificada analisando os valores presentes na Tabela 3.38:

Tabela 3.38 – Concentrações ajustadas do contaminante de referência C. Verificação da monotonicidade das concentrações.

Operação	f(t/h)	Ce(ppm)	Cs(ppm)
2	**34**	**0**	**35**
3	**56**	**41,90**	**9341,9**

Como a concentração de saída da operação 2 é menor que a de saída da 3 então o critério foi atendido.

3.2.5.6 Construção do Diagrama de Fontes de Água

Os valores ajustados de C estão presentes na Tabela 3.39. Com esses valores é possível construir o diagrama de fontes de água mostrado na Figura 3.20.

Tabela 3.39 - Dados limites para as correntes de processo apresentados por Wang e Smith (1994). Concentrações do contaminante de referência C ajustadas e presença das operações 2 e 3.

Operação k	f_k (t/h)	Contaminante	$C_{i,k,max}$	$C_{f,k,max}$	Δ_{mk} (kg/h)	f_{min} (t/h)	Fator R Op1
		A	20	120	3,4	28,33	0,75
2	45	B	300	12500	418,8	33,18	1,33
		C	45	180	4,59	25,50	0,78
		A	120	220	5,6	25,45	0,13
3	56	B	20	45	1,4	31,11	20,00
		C	41,90	9341,9	520,8	54,82	0,18

Observando o DFA da Figura 3.20, percebe-se que no primeiro intervalo de concentração (0-41,90 ppm) nenhuma das operações encontram-se presentes.

Do segundo intervalo apenas a operação 3 participa, a qual necessita de uma vazão de 56 t/h a 41,9 ppm. Como é consumida água limpa, são usados 3,86 t/h (fonte externa).

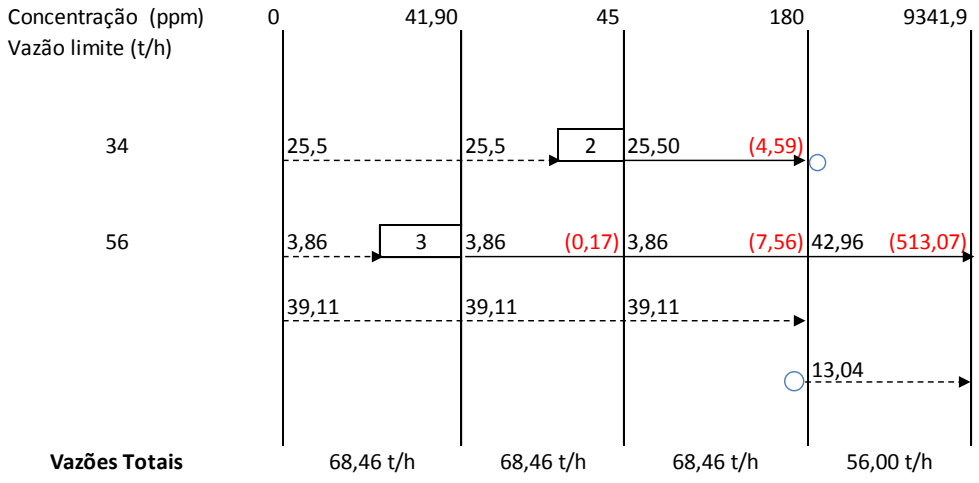

Figura 3.20 - Diagrama de Fontes de Água com o contaminante C como referência (Operações 2 e 3).

Do terceiro intervalo participam as operações 2 e 3. Das 45 t/h necessárias para captação, apenas 25,5 t/h são consumidas da fonte externa. A operação 2 disponibiliza, a 180 ppm, esta quantidade para reúso total ou parcial na operação seguinte. A operação 3 ainda necessita de 56 t/h e aproveita os 3,86 t/h do intervalo anterior e para complementar, mediante a aplicação da Equação (2.7), chega-se a um valor de 39,11 t/h .

No quarto e último intervalo participa apenas a operação 3 que aproveita do intervalo anterior (3,86+39,11 t/h) e que complementa a quantidade requerida de 56 t/h fazendo uso de 13,04 t/h oriunda da fonte interna a 180 ppm.

Com isso, fazendo uma analogia com o DFA obtido pela aplicação do procedimento de Gomes (2002) com a presença das operações 2 e 3, nota-se que houve um decréscimo de 7,71% na captação de água primária da fonte externa. O ponto de *pinch* está presente na concentração de 180 ppm. Na Figura 3.21 é mostrado o fluxograma da rede de transferência de massa, correspondente aos dados da Tabela 3.19.

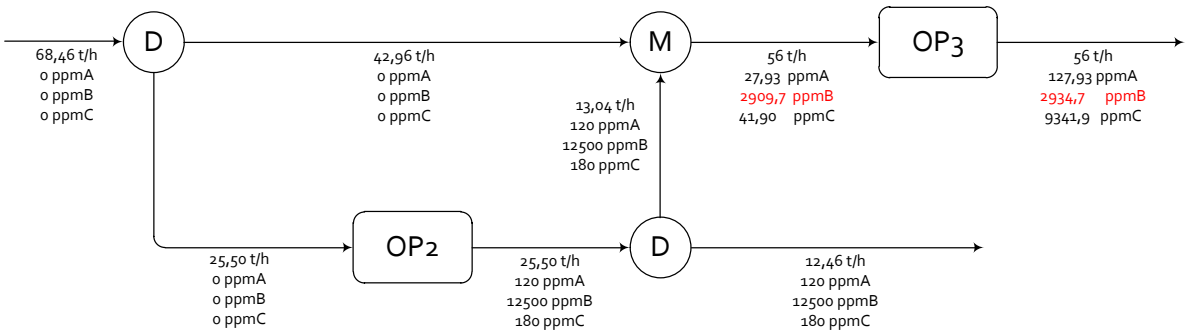

Figura 3.21 - Fluxograma da rede de transferência de massa (Operações 2 e 3).

Verifica-se no fluxograma acima que mais uma vez houve violações nos limites de concentração, agora apenas para o contaminante B. Nesse caso pode-se aumentar a vazão de água a montante da operação 3, misturando com a corrente contendo 56 t/h. Para que os limites de concentração do contaminante B sejam respeitados, é preciso alimentar a operação 3 com 8147,22 t/h. Sabendo que esta quantidade é proveniente da fonte externa de água primária, tem-se o fluxograma da Figura 3.22.

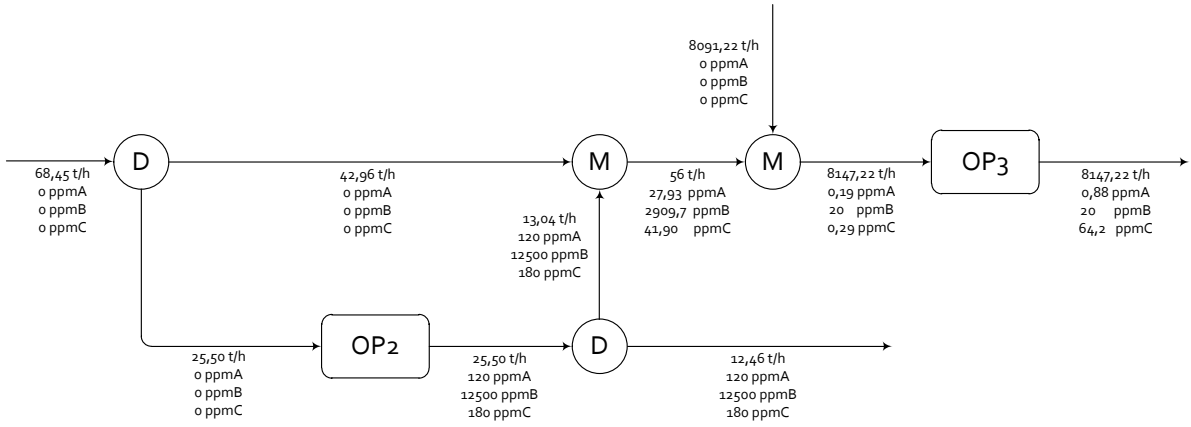

Figura 3.22 - Fluxograma da rede de transferência de massa (Operações 2 e 3). Acréscimo na vazão da operação 3.

3.3. Procedimento de Máximo Reúso Proposto por Mirre (2007)

Mirre (2007) utilizou o mesmo procedimento de Gomes (2002), chegando aos mesmos resultados.

3.4. Conclusões

Os procedimentos propostos por Gomes (2002) e Santos (2007) não apresentaram resultados satisfatórios no cenário contendo as operações 2 e 3. As violações observadas para os contaminantes B e C evidenciam a necessidade de uma análise mais criteriosa no modo como a escolha do contaminante e operação de referência é realizada. No capítulo 4 são apresentadas propostas para a determinação do contaminante e operação de referência e o procedimento é aplicado a um estudo de caso de grande porte. A Tabela 3.40 mostra os resultados comparativos para os três cenários em estudo.

Tabela 3.40 - Resultados comparativos para cada cenário estudado, fazendo uso dos procedimentos de Gomes (2002) e Santos (2007) e aplicados no problema de Wang e Smith (1994).

Autor		Ops 1, 2 e 3	Ops 1 e 2	Ops 1 e 3	Ops 2 e 3
Gomes (2002)	Captação de água primária (t/h)	106,70	54	98,2	1454,45
	Descarte Total (t/h)	106,70	54	98,2	1454,45
	Acréscimo extra de água primária (t/h)	-	-	-	1371,33
Santos (2007)	Captação de água primária (t/h)	106,70	54	56	8159,68
	Descarte Total (t/h)	106,70	54	56	8159,68
	Acréscimo extra de água primária (t/h)	-	-	-	8091,22

Os cenários contemplando as operações 1, 2 e 3 apresentam as mesmas vazões de captação de descarte de água (106,70 t/h), tanto no trabalho de Gomes (2002) quanto no de Santos (2007).

CAPÍTULO 4

"*Á água é o petróleo do século XXI*". Andrew Liveris, CEO da Dow Chemical.

PROCEDIMENTO "*TOTAL SITE*" PARA DETERMINAÇÃO DO MÁXIMO REÚSO

Esse capítulo propõe um procedimento para a maximização do reúso de água em aplicação conjunta com o DFA. A base para o desenvolvimento dessa metodologia está nos critérios apresentados por Savelski e Bagajewickz (2003), bem como na ideia de uma abordagem macro estrutural ou *Total Site*. Esta metodologia consiste na divisão do problema em blocos ou subestruturas que compõem um determinado conjunto de operações. O DFA é aplicado a cada um destes blocos que formam um bloco maior ou superestrutura *Total Site*. O intuito desta divisão é promover o máximo reúso sem que haja violação nos limites máximos de entrada e saída dos contaminantes nas operações. Após a aplicação do DFA em cada bloco, os resultados são migrados para a superestrutura. Por fim, são gerados quatros cenários para quatro diferentes contaminantes de referência, nos quais dessa vez apenas um bloco contendo todas as operações é formado para cada cenário. O objetivo é comparar os resultados obtidos mediante estratégia *Total Site* com os gerados levando em conta apenas um grande bloco.

Vale salientar que na presença de violações o DFA é construído novamente, levando em conta as proibições de reúso em cada operação. O DFA que não apresentar violações e que possuir a menor captação/descarte global de água é o escolhido.

A Figura 4.1 mostra a estrutura do procedimento *TOTAL SITE* destacando cada etapa.

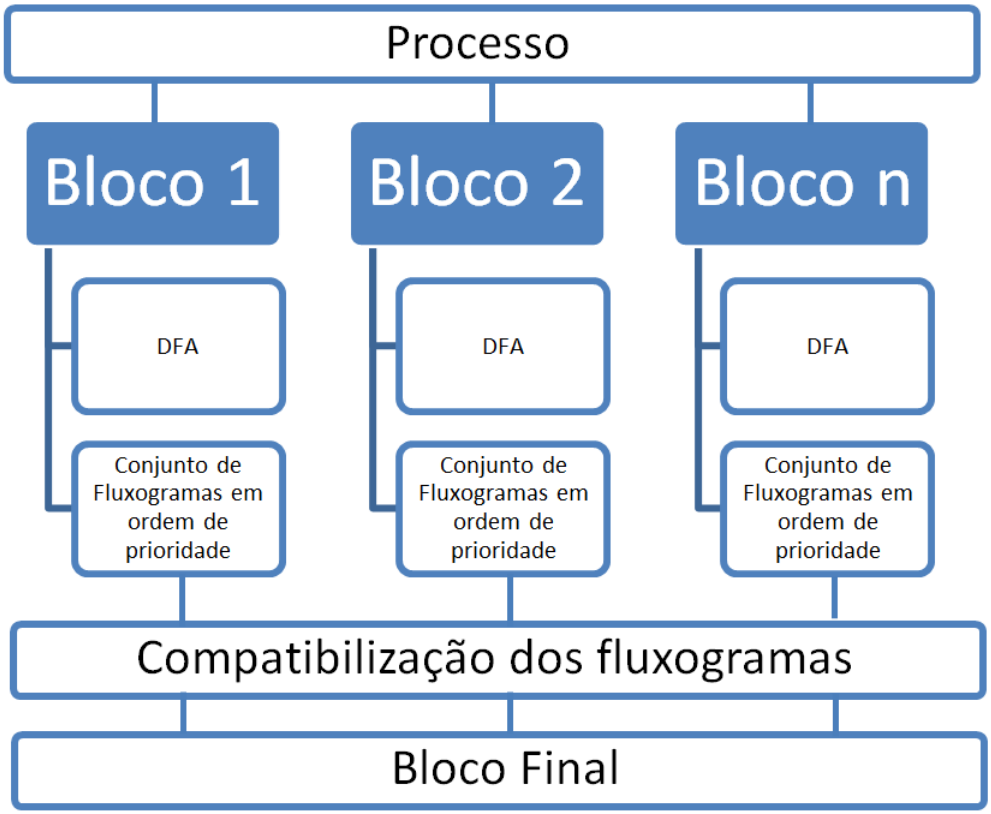

Figura 4.1 - Estrutura *TOTAL SITE*.

O procedimento *TOTAL SITE* consiste inicialmente na divisão do processo em blocos de operações, estando cada bloco associado à aplicação de um DFA. Em cada bloco são analisados diversos cenários possíveis, gerando-se uma lista de prioridade, tendo como base o menor descarte total do bloco. Em seguida estes fluxogramas são compatibilizados para produzir um único grande bloco (Fluxograma do Processos *TOTAL SITE*), formado pela junção dos fluxogramas de cada bloco. Isto é feito através de um procedimento identificado como Compatibilização dos Fluxogramas dos Blocos. É proposto então um algoritmo para definição do número de blocos a ser utilizado, mostrado na Figura 4.2.

Figura 4.2 - Algoritmo para a escolha da operação de referência e número de blocos.

Dado um número qualquer de operações num processo é preciso verificar se há alguma operação com concentração de entrada nula em algum de seus contaminantes. Caso exista a(s) operação(ões) é(são) separada(s) e o número de operações nessas condições está diretamente associado ao número de blocos a ser utilizado. Se N operações forem identificadas, N blocos serão utilizados. No entanto se não houver operações com concentração nula na entrada em algum dos seus contaminantes, deve-se considerar a menor concentração na entrada, com o intuito de respeitar a monotonicidade das concentrações nas operações, ou seja, a concentração do contaminante na saída da operação necessita ser maior que a concentração na entrada (SAVELSKI e BAGAJEWICKZ, 2003). A divisão dos blocos fica então a critério pessoal.

A Figura 4.3 representa o algoritmo para escolha do contaminante de referência em cada bloco. Uma pergunta semelhante a do algoritmo anterior é feita: Dada a operação de referência escolhida, existe algum contaminante com concentração a montante 0 ppm? Caso afirmativo, verifica-se se estão presentes mais que um contaminante. Em havendo mais de um, faz-se necessário verificar qual deles será o de referência. Para tal, uma análise é feita pelo uso da Equação do parâmetro G também mostrada na Figura 4.3. Esta equação representa a relação entre a carga mássica de um determinado contaminante *s* numa operação *j* e a concentração máxima na saída do contaminante *s* numa operação *j*. É considerado o contaminante de referência aquele que possuir o maior valor de G.

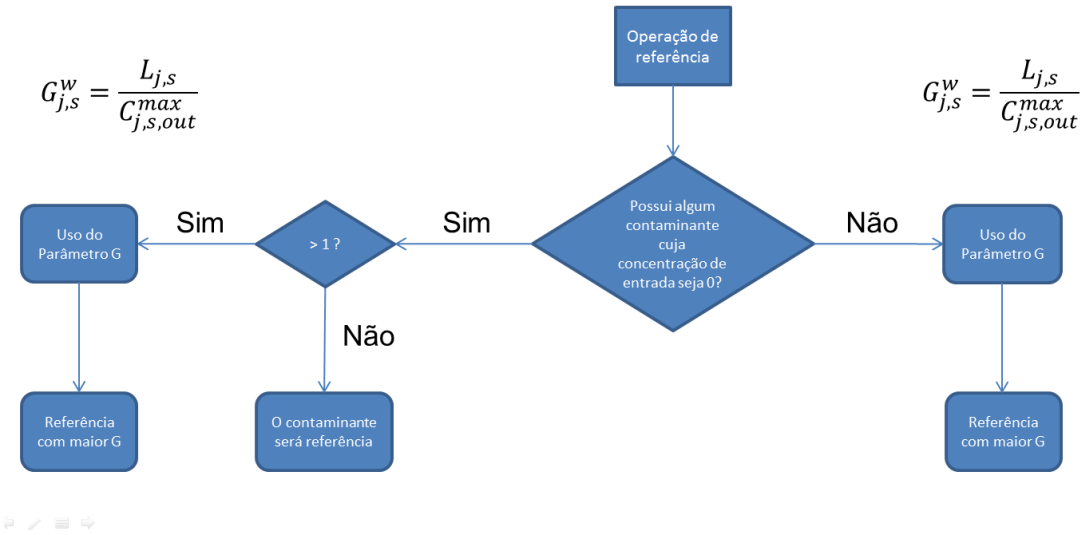

Figura 4.3 - Algoritmo para a escolha da contaminante de referência.

Mas se apenas um contaminante for verificado com concentração 0 ppm na entrada da operação de referência, então este será referência. Por outro lado, se não existirem contaminantes com concentração nula a montante da operação de referência, de maneira análoga faz-se o cálculo do parâmetro G e será considerado referência aquele que possuir o maior valor de G.

4.1. Estudo de caso com 10 operações e 4 contaminantes

Leewongtanawit e Kim (2008) propuseram um algoritmo de programação matemática aplicado no projeto de superestruturas de redes de água e calor simultaneamente. Esta metodologia foi aplicada num problema de larga escala contendo dez operações e quatro contaminantes. Duas fontes externas estão disponíveis, uma contendo água limpa a 0 ppm e a outra água salobra a 10 ppm[9].

[9] Apesar de Leewongtanawit e Kim (2008) considerarem a segunda fonte externa como água salobra, a legislação nacional através do CONAMA 357/2005, classifica as águas salobras presentes no território brasileiro mediante sua salinidade (salinidade entre 500 e 30 mil ppm) e águas doces com salinidade inferior a 500 ppm.

Tabela 4.1 - Dados limites de concentração e vazão para o estudo de caso contendo dez operações e quatro contaminantes. Fonte: (Leewongtanawit e Kim, 2008).

Operação *k*	f_k (t/h)	Contaminante	$C_{i,k,max}$	$C_{f,k,max}$	Δ_{mk} (kg/h)
1	24,87	A	200	25000	616,78
		B	500	20000	484,97
		C	100	28500	706,31
		D	1500	230000	5682,80
2	40,98	A	350	8000	313,50
		B	3000	9000	245,88
		C	500	24080	966,31
		D	400	3000	106,55
3	39,2	A	350	3500	123,48
		B	450	2500	80,36
		C	150	1500	52,92
		D	500	1500	39,20
4	4	A	800	15000	56,80
		B	650	5000	17,40
		C	450	700	1,00
		D	300	1500	4,80
5	3,92	A	1300	2000	2,74
		B	2000	7000	19,60
		C	2000	9000	27,44
		D	4000	10000	23,52
6	137,5	A	3000	12000	1237,50
		B	2000	10000	1100,00
		C	100	8000	1086,25
		D	0	200	27,5
7	290,96	A	450	2000	450,99
		B	0	3000	872,88
		C	250	1000	218,22
		D	650	12000	3302,40
8	23,81	A	100	3450	79,76
		B	250	4000	89,29
		C	200	700	11,91
		D	550	7000	153,57
9	65,44	A	150	1000	55,62
		B	450	1000	35,99
		C	3000	4000	65,44
		D	100	100	0
10	4	A	0	100	0,40
		B	0	100	0,40
		C	0	100	0,40
		D	0	100	0,40

A Tabela 4.1 apresenta os valores limites de vazão e concentração para cada contaminante nas dez operações. Os deslocamentos foram realizados para todos os cenários com o auxílio do MINEA.

4.1.1 Procedimento para Determinação do Contaminante e da Operação de Referência

Nesse estudo de caso são investigados três macro cenários compostos por três blocos 1, 2, 3. O número de blocos foi determinado mediante distribuição igualitária entre o número de operações presentes no processo. Cada bloco é composto por sub-cenários formados pela combinação das operações que o compõem. Observando a Tabela 4.1 nota-se que as operações 6, 7 e 10 possuem pelo menos um de seus contaminantes demandando o consumo de água primária. Isso as habilita a serem candidatas à operação de referência. No entanto, tendo em vista que os cálculos de deslocamento das concentrações e construção do DFA levam em conta apenas uma operação de referência, optou-se por alocar uma operação para cada bloco. Deste modo, cada operação será referência em seu bloco, estando a operação 10 contida no bloco 1, a operação 7 no bloco 2 e a operação 6 no bloco 3.

As mesmas limitações estão presentes para a escolha do contaminante de referência. É importante destacar que a proposta para a escolha da operação de referência que até então vem sendo utilizada é aquela fundamentada na Equação (2.1). No entanto, como esse estudo de caso possui nas operações 6 e 7 as restrições para os contaminantes D e B, respectivamente, estes serão automaticamente eleitos como referência. No caso da operação 10, faz-se necessário o uso da equação. Nesse caso o contaminante que apresentar o maior valor de G será o de referência. No entanto, como as concentrações máximas de saída de cada contaminante são iguais a 100 ppm, o valor observado para G é idêntico para cada um deles, conforme mostra o cálculo a seguir:

$$G_{j,s}^{w} = \frac{L_{j,s}}{C_{j,s,out}^{max}} = G_{10,A} = \frac{L_{10,A}}{C_{10,4}^{máx}} = G_{10,B} = G_{10,c} = G_{10,D} = \frac{400\,\frac{t}{h}}{100\ ppm} = 4 \times 10^{9}\,\frac{t}{m^{3}} \qquad (4.1)$$

Sendo assim, qualquer um dos contaminantes pode ser escolhido como referência para esta operação.

4.1.1.1 BLOCO 1

O bloco 1 é formado pela combinação das operações 1, 2, 3, 4, 5, 8 e 9. A operação 10 (referência) já compõe este bloco. Optou-se por um conjunto de três operações. Logo, sabe-se que:

$$Bloco\ 1 = (10, ?, ?) \tag{4.2}$$

Como não se sabe se a sequência entre as operações irá afetar a monotonicidade do contaminante de referência no bloco, utiliza-se uma combinação $\binom{n}{k}$. Pela definição de combinação tem-se:

$$C_k^n = \frac{n!}{k!\,(n-k)!} \tag{4.3}$$

O ***k*** é o número de combinações possíveis num conjunto de ***n*** possibilidades. Sendo assim:

$$C_2^7 = \frac{7!}{2!\,(7-2)!} = \frac{7!}{2! \times 5!} = \frac{7 \times 6 \times 5!}{2! \times 5!} = \frac{42}{2} = 21 \tag{4.4}$$

Por tanto para o bloco 1 possuindo a operação 10 como referência, são possíveis 21 combinações distintas entre as demais operações. Vale salientar que esta é uma dentre as muitas possibilidades para a formação desse bloco que também poderia ser formado por 2 ou mais de três operações e também possuir como operação de referência a 6 ou 7. Objetivo deste trabalho não é testar todas as possibilidades, mas gerar cenários suficientes para comprovar a eficácia do método.

4.1.1.1.1 *Cenário 1 (10, 1, 2)*

Este cenário é composto pelas operações 1, 2 e 10. Foi dito que para a operação de referência (10) deste bloco, qualquer contaminante poderia ser escolhido como referência. Sendo **A** o contaminante de referência e aplicando o DFA para o bloco, chega-se ao diagrama presente na Figura 4.4.

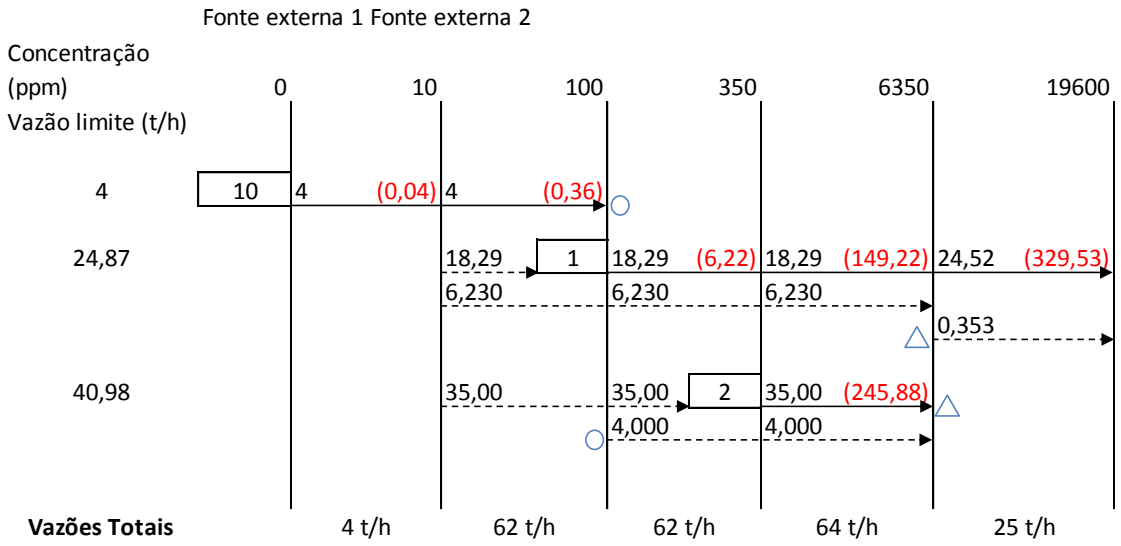

Figura 4.4 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 1.

Para este diagrama foi gerado o fluxograma da Figura 4.5:

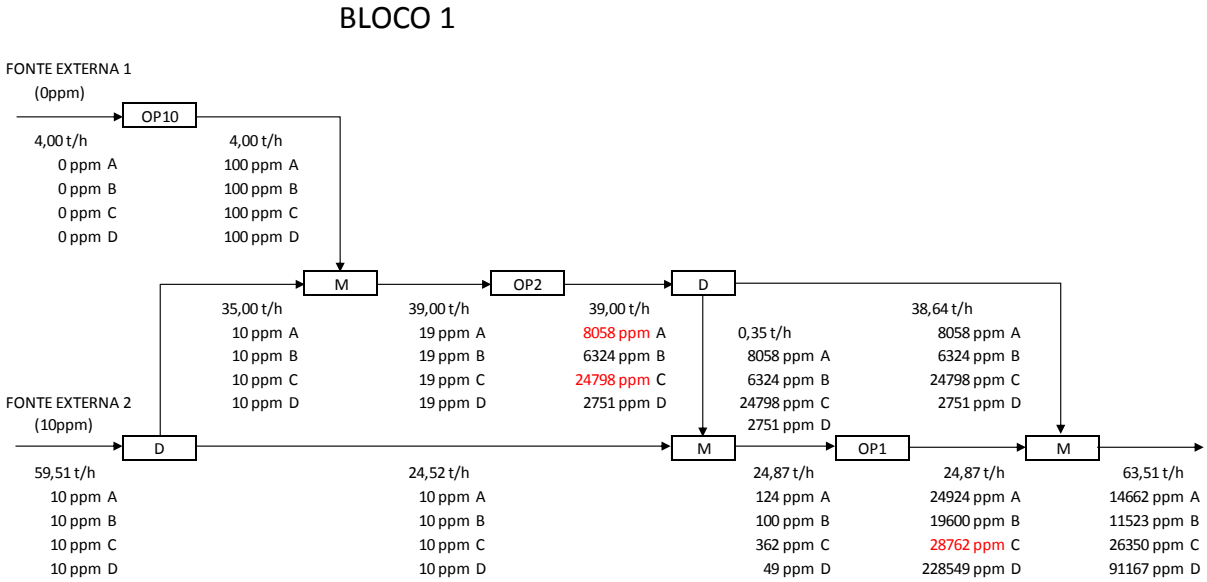

Figura 4.5 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 1.

Apenas a operação 10 capta água primária da fonte externa. As demais operações captam água da operação 10 como fonte interna e da segunda fonte externa (10 ppm).

Percebe-se que houve violações nas concentrações de saída de contaminantes das operações 1 e 2. Na Tabela 4.2 são mostrados os dados de consumo e descarte de água pelas operações.

Tabela 4.2 – Resultados do Bloco 1 – Cenário 1.

BLOCO 1			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
10	4	-	-
1	-	24,52	24,87
2	-	35,00	38,64
TOTAL	**4**	**59,51**	**63,51**

FE – Fonte Externa

4.1.1.1.2 ***Cenário 2 (10, 1, 3)***

As operações 1, 3 e 10 compõem este cenário e o DFA (contaminante de referência A) é mostrado na Figura 4.6.

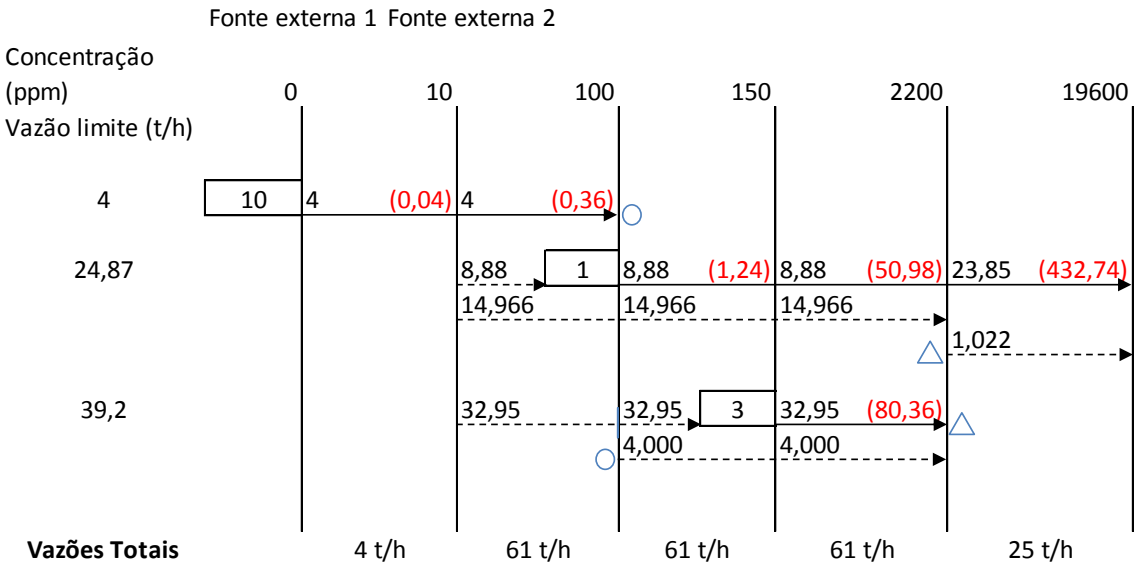

Figura 4.6 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 2.

O fluxograma correspondente ao DFA da Figura 4.6 é mostrado na Figura 4.7.

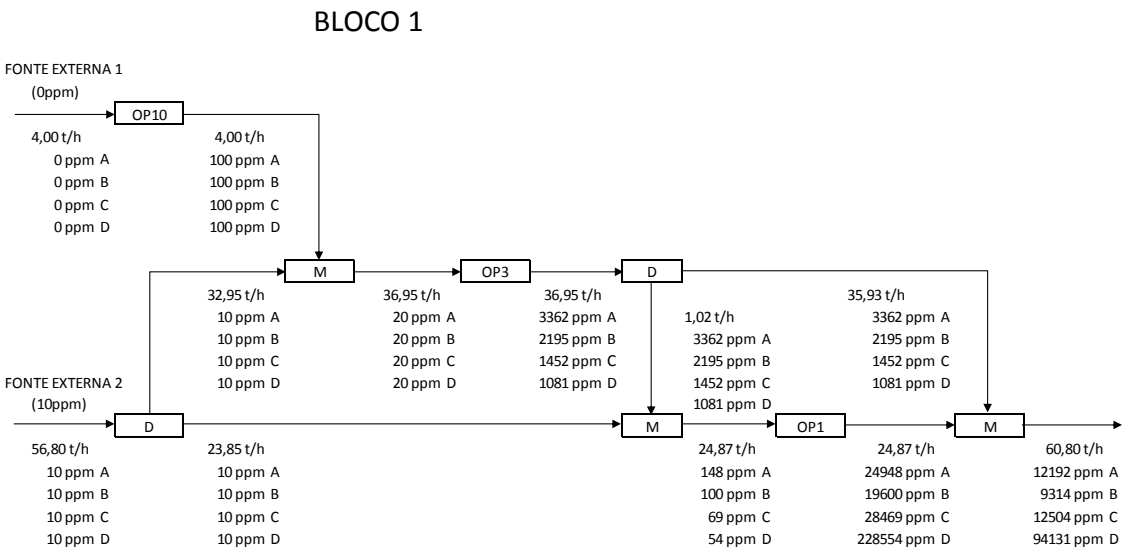

Figura 4.7 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 2.

Desta vez não houve violações em nenhuma das operações. A operação 1 aproveita 1,02 t/h da operação 3 que por sua vez aproveita 4 t/h da operação 10. Esta última é a única a consumir água primária. Os valores totais de consumo das fontes externas (FE) estão presentes na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 2.

BLOCO 1			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
10	4	-	-
1	-	23,85	24,87
3	-	32,95	35,93
TOTAL	**4**	**56,80**	**60,80**

4.1.1.1.3 ***Cenário 3 (10, 1, 4)***

Este cenário apresenta as operações 1, 4 e 10 dispostas no DFA exibido na Figura 4.8.

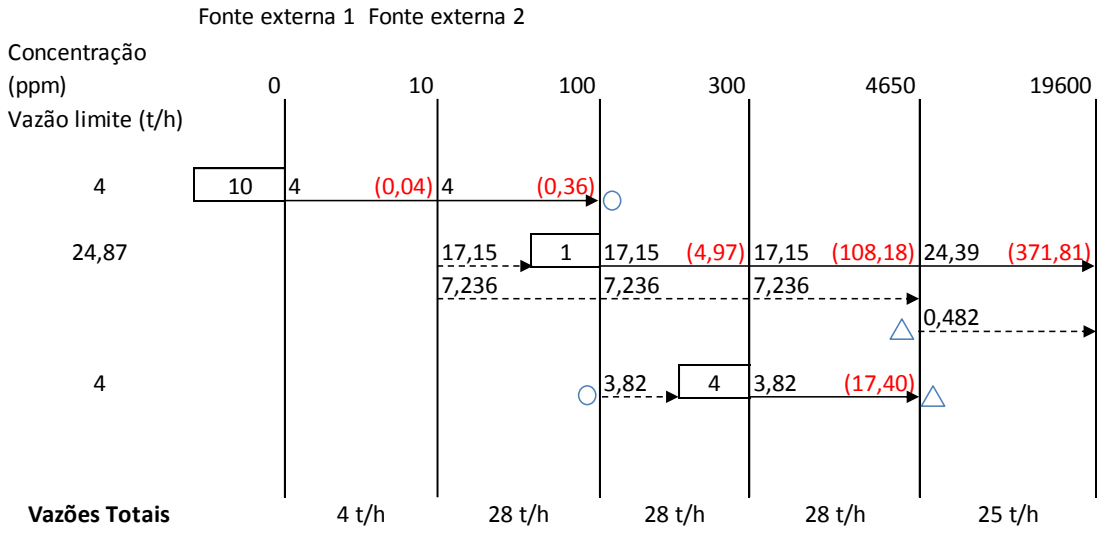

Figura 4.8 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 3.

O fluxograma correspondente ao DFA da Figura 4.8 é mostrado na Figura 4.9.

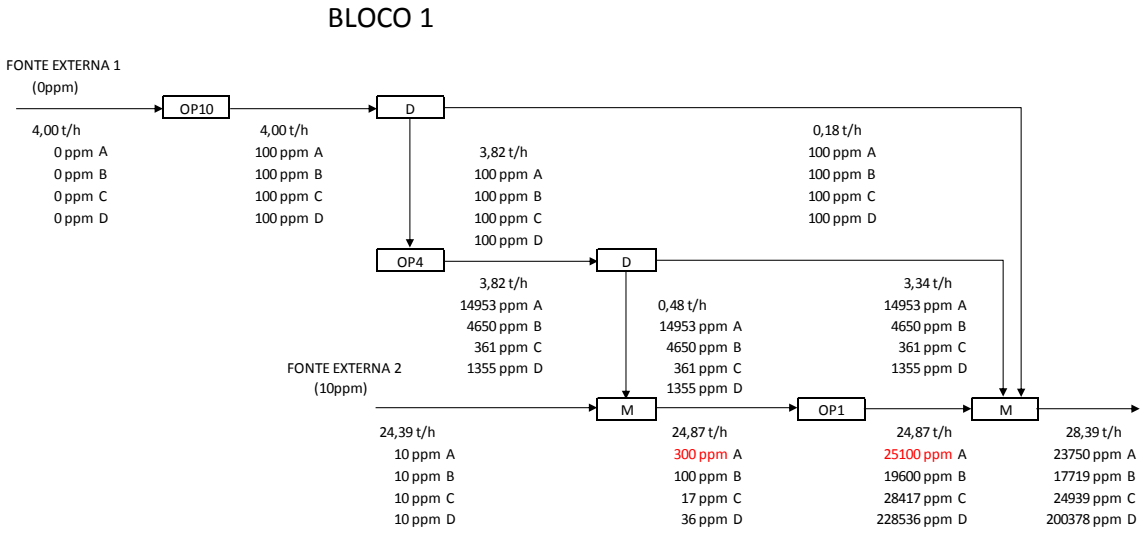

Figura 4.9 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 3.

A operação 1 apresenta violação na concentração de entrada e saída do contaminante A. Nenhuma outra operação, exceto a 10 capta água primária da fonte externa 1. Os resultados de consumo das operações de ambas as fontes são mostrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 3.

BLOCO 1			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
10	4	-	0,18
1	-	24,39	24,87
4	-	-	3,27
TOTAL	**4**	**24,39**	**28,14**

A baixa captação e descarte são justificados pela menor vazão requerida pela operação 4 (3,75 t/h), que é aproveitada da operação 10.

4.1.1.1.4 *Cenário 4 (10, 1, 5)*

Desta vez a operação 5 assume o lugar da 4. O DFA é análogo ao anterior e é ilustrado na Figura 4.10.

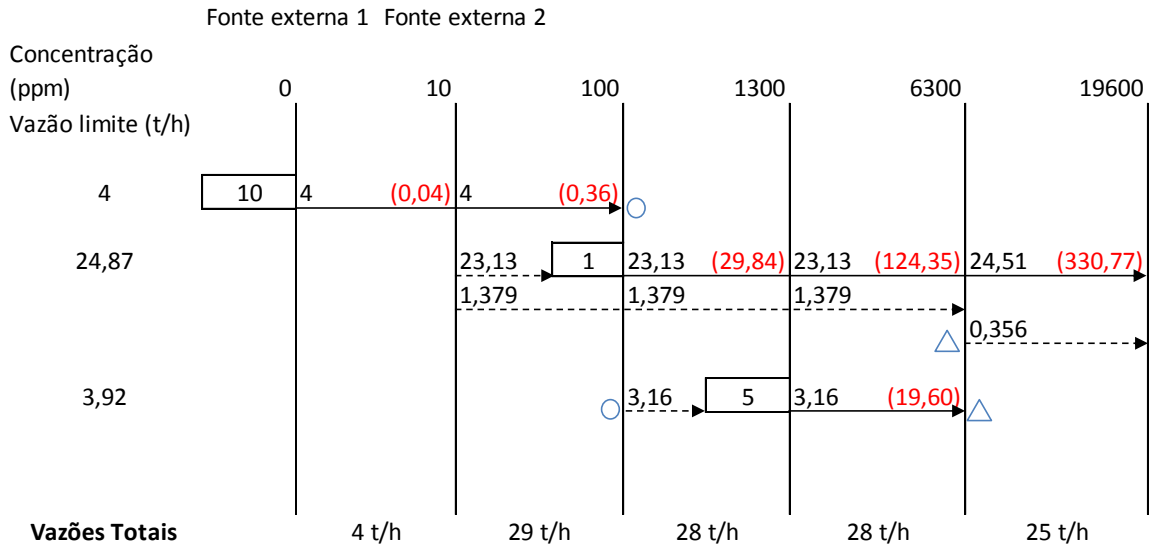

Figura 4.10 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 4.

O fluxograma correspondente é mostrado na Figura 4.11. Semelhante ao cenário anterior, a concentração máxima do contaminante C na saída da operação 1 é violada.

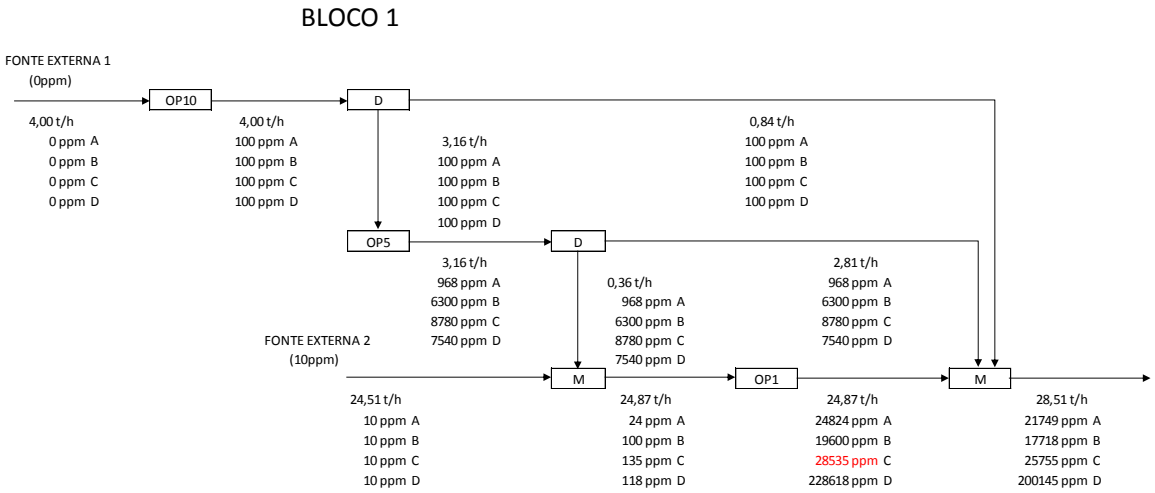

Figura 4.11 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 4.

Os resultados mostrados na Tabela 4.5 são semelhantes ao caso anterior pelo fato da operação 5 requerer uma baixa vazão na sua entrada com 3,16t/h, aproveitadas da operação 10.

Tabela 4.5 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 4.

BLOCO 1			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
10	4	-	0,84
1	-	24,51	24,87
5	-	-	2,81
TOTAL	**4**	**24,51**	**28,51**

4.1.1.1.5 ***Cenário 5 (10, 1, 8)***

Para este cenário sai a operação 5 e entra a 8. O diagrama é exibido na Figura 4.12 e o fluxograma da rede na Figura 4.13.

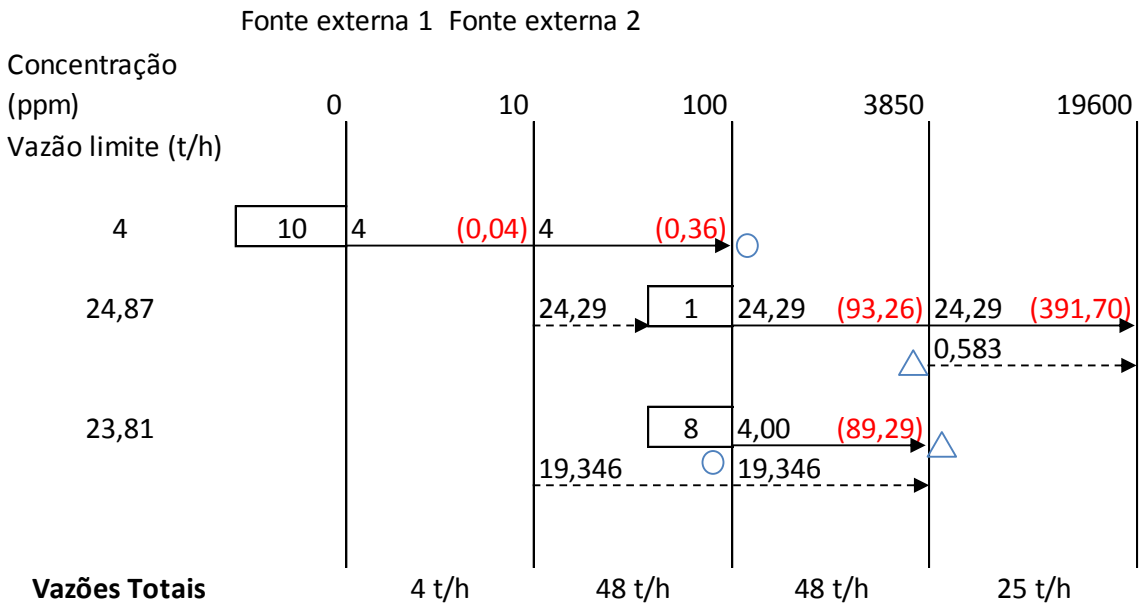

Figura 4.12 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 5.

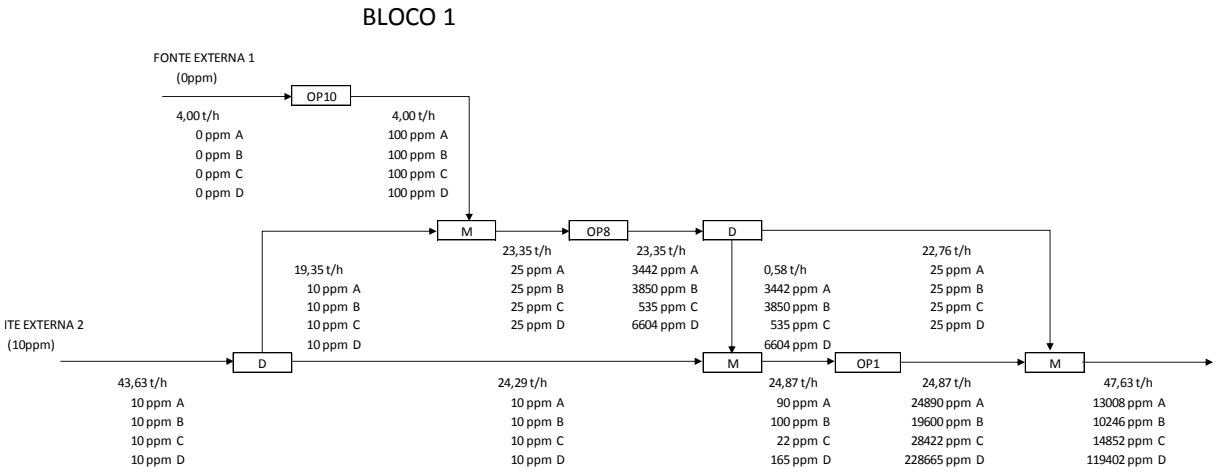

Figura 4.13 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 5.

A operação 10 capta 4,00 t/h da fonte externa 1 a 0 ppm e fornece toda esta quantidade para a operação 8. Boa parta da quantidade que esta requer, é descartada e apenas 0,58 t/h são reusadas na operação 1. Não houve violações nos limites de concentração dos contaminantes e os resultados são mostrados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 5.

BLOCO 1			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
10	4	-	-
1	-	24,29	24,87
8	-	19,35	22,76
TOTAL	**4**	**43,63**	**47,63**

4.1.1.1.6 ***Cenário 6 (10, 1, 9)***

Este cenário é formado pelas operações 1, 9 e 10. A Figura 4.14 mostra o DFA gerado e a Figura 4.15, o fluxograma do processo.

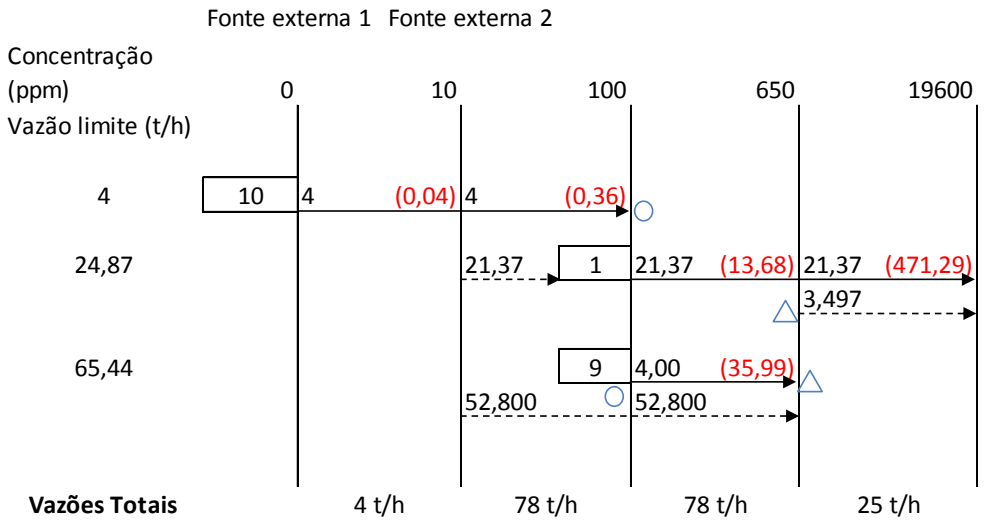

Figura 4.14 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 6.

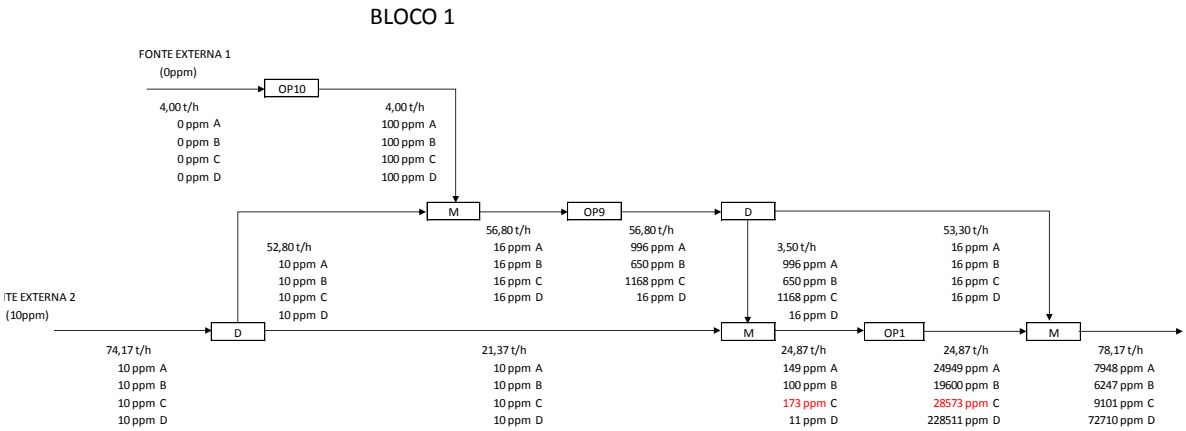

Figura 4.15 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 6.

Mais uma vez a operação 1 sofre violação na concentração máxima de entrada e saída dos contaminantes. A captação total de água a 10 ppm é de 74,17 t/h, a maior até aqui registrada. Os resultados de captação e descarte são apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 6.

BLOCO 1			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
10	4	-	-
1	-	21,37	24,87
9	-	52,8	53,30
TOTAL	**4**	**74,17**	**78,17**

4.1.1.1.7 ***Cenário 7 (10, 2, 3)***

Esse cenário é formado pelas operações 2, 3 e 10. O DFA é mostrado na Figura 4.16.

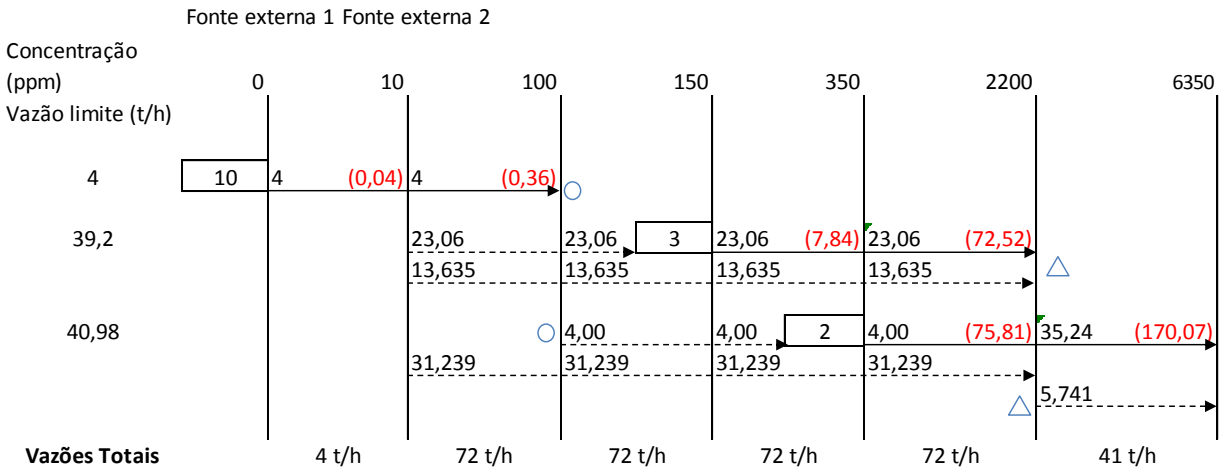

Figura 4.16 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 7.

A captação de água limpa se dá novamente pela operação 10, que por sua vez disponibiliza 4 t/h. Esta quantidade é utilizada na operação 2 somando-se aos 31,24 t/h captados da segunda fonte externa e aos 5,74 t/h disponibilizados pela operação 3 a 2200 ppm. O ponto de *pinch* acontece exatamente nesta concentração quando a vazão total do intervalo muda de 72 para 41 t/h. O fluxograma é representado na Figura 4.17.

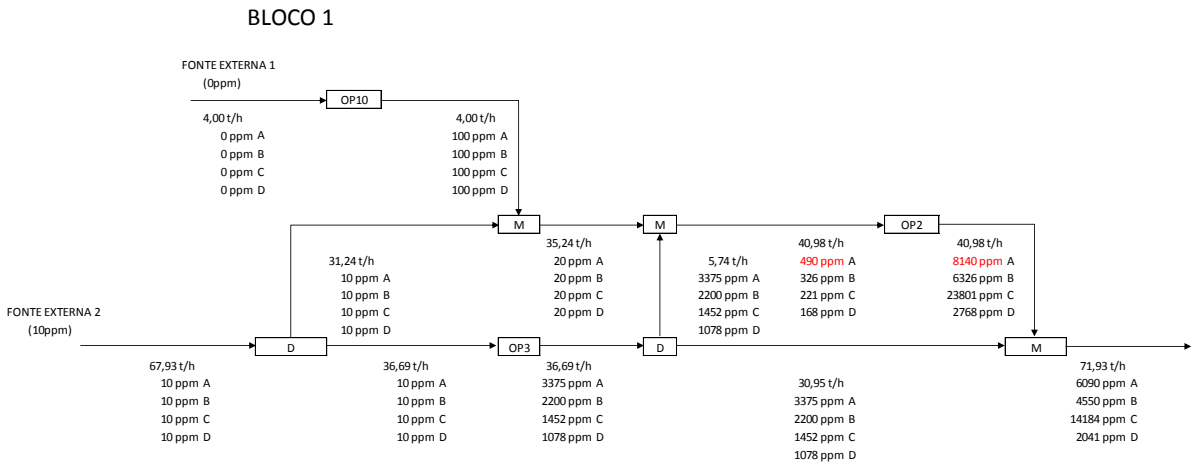

Figura 4.17 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 7.

Agora a violação está presente na concentração de entrada e saída do contaminante A na operação 2. Observa-se que as elevadas concentrações dos contaminantes na saída da operação 3 favoreceram esse desvio. Os resultados das vazões de captação e descarte de água estão presentes na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 7.

BLOCO 1			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
10	4	-	-
2	-	31,24	40,98
3	-	36,69	30,95
TOTAL	**4**	**67,93**	**71,93**

4.1.1.1.8 ***Cenário 8 (10, 2,4)***

Para este cenário, a operação 3 é substituída pela 4, permanecendo as operações 10 e 2.

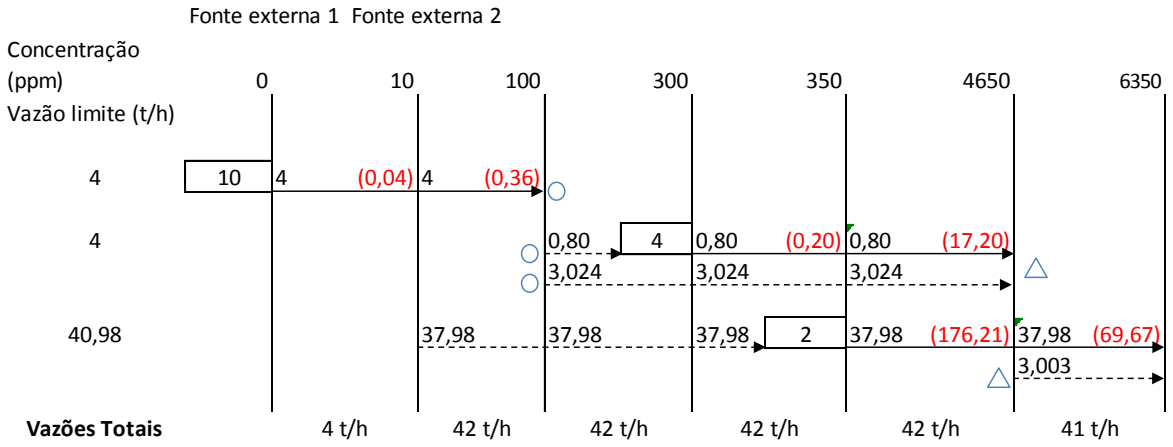

Figura 4.18 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 8.

Nesse cenário o reúso acontece em sequência. A operação 10 disponibiliza 4 t/h sendo uma parte (3,824 t/h) aproveitada pela operação 4. Esta disponibiliza toda a vazão a 4650 ppm e a operação 2 aproveita 3,003 t/h que são somados aos 37,98 t/h captados da segunda fonte externa. Agora o ponto de *pinch* ocorre em 4650 ppm na transição de 42 para 41 t/h. O fluxograma da rede é mostrado a seguir.

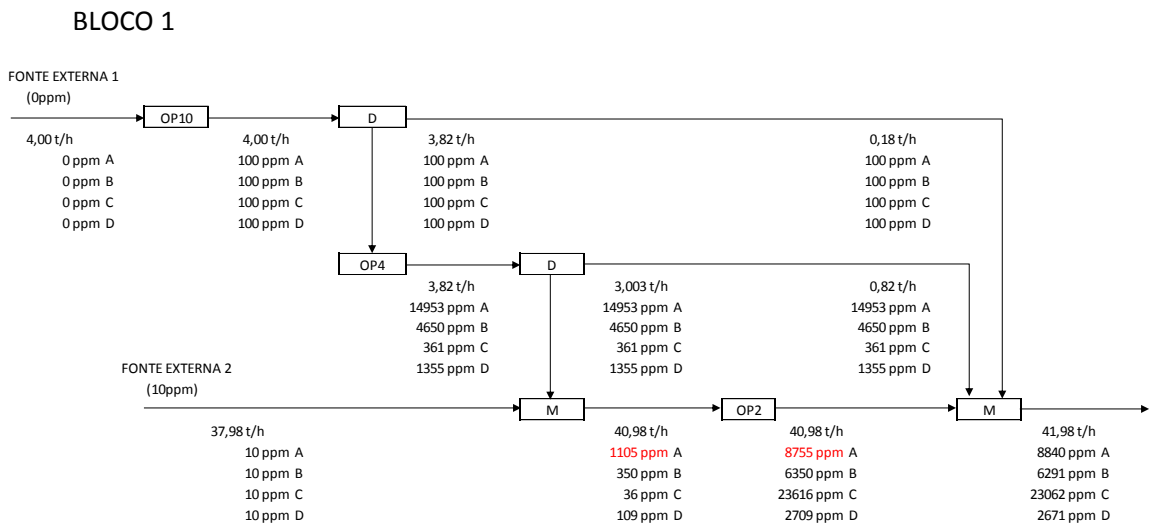

Figura 4.19 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 8.

Repetindo o problema do caso anterior a violação continua presente na concentração de entrada e saída do contaminante A na operação 2. Percebe-se que o valor de 14953 ppm de A na operação 4 contribuiu para ultrapassar o limite estabelecido. Os resultados das vazões na entrada e saída do sistema são mostrados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 8.

BLOCO 1			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
10	4	-	-
2	-	37,98	0,18
4	-	-	40,98
TOTAL	**4**	**37,98**	**41,98**

4.1.1.1.9 ***Cenário 9 (10, 2,5)***

A operação 5 toma o lugar da 4 nesse cenário como mostra o diagrama na Figura 4.20.

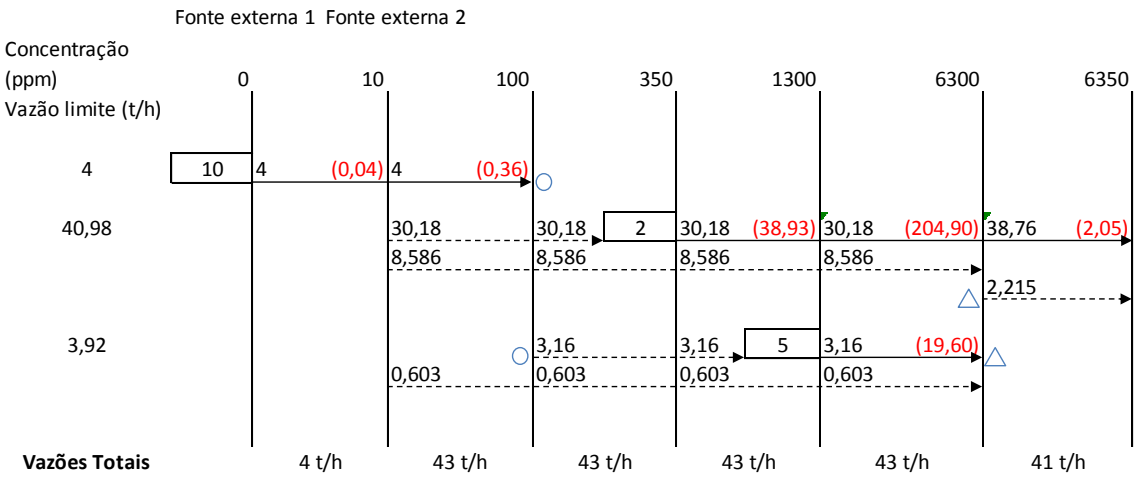

Figura 4.20 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 9.

A exigência de água na operação 5 é semelhante à da operação 4. São consumidos 3,763 t/h sendo 0,603 t/h oriundos da segunda fonte externa e 3,16 aproveitados da operação 4 a 100 ppm provenientes da segunda fonte externa a 0 ppm. O restante (3,16 t/h) é reusado da operação 4 a 100 ppm. Desse modo a operação 5 disponibiliza os 3,763 t/h a 6300 ppm e 2,215 t/h são aproveitados pela operação 2. Verifica-se que o ponto de *pinch* está presente na concentração de 6300 ppm na mudança de 43t/h (5º intervalo) para 41 t/h (6º intervalo). O fluxograma gerado é mostrado na Figura 4.21.

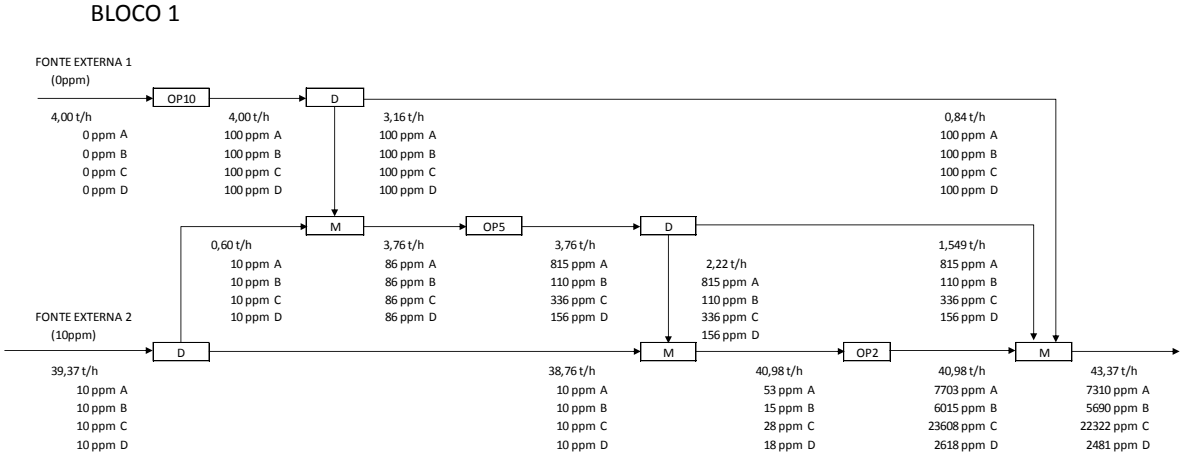

Figura 4.21 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 9.

Não houve nenhuma violação neste cenário. Interessante notar as menores concentrações presentes na saída da operação 5, o que contribui para manter as concentrações dos contaminantes nas operações dentro dos seus limites estabelecidos. A Tabela 4.10 mostra as vazões em cada operação e o descarte total.

Tabela 4.10 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 9.

BLOCO 1			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
10	4	-	0,84
2	-	37,76	40,98
5	-	0,60	1,55
TOTAL	**4**	**39,37**	**43,37**

4.1.1.1.10 ***Cenário 10 (10, 2,8)***

Nesse cenário a operação 8 ocupa o lugar da 5. O DFA é mostrado na Figura 4.22.

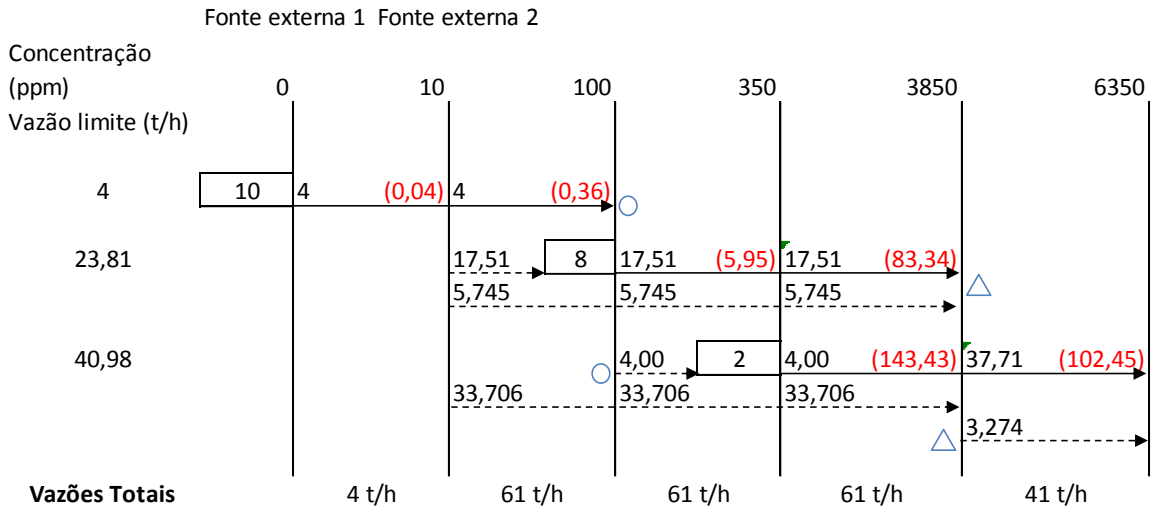

Figura 4.22 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 10.

A operação 10 capta 4 t/h da primeira fonte externa a 0 ppm. Toda essa quantidade é reusada na operação 2 que soma-se a 33,70 t/h provenientes da segunda fonte externa e 3,27 t/h disponíveis a 3850 ppm na operação 8. É nessa concentração que está presente o ponto de *pinch*. A Figura 4.23 mostra o fluxograma da rede de água.

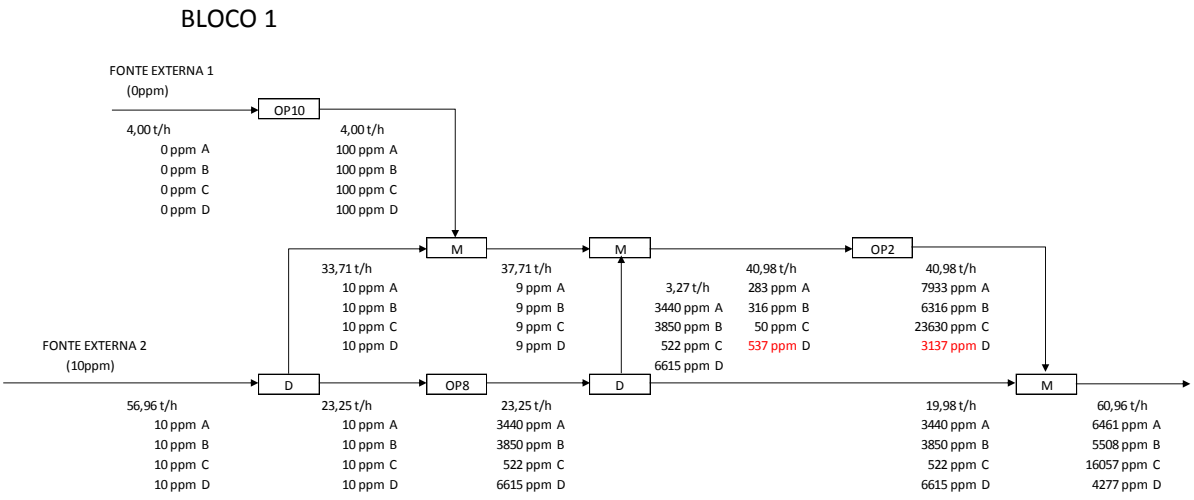

Figura 4.23 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 10.

A operação 2 apresenta violação nas concentrações de entrada e saída do contaminante D. A elevada concentração deste contaminante na saída da operação 8 justifica esse desvio. A Tabela 4.11 apresenta as vazões de entrada e saída.

Tabela 4.11 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 10.

BLOCO 1			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
10	4	-	-
2	-	33,71	40,98
8	-	23,25	19,98
TOTAL	**4**	**56,96**	**60,96**

4.1.1.1.11 ***Cenário 11 (10, 2,9)***

Para este cenário participam as operações 2, 9 e 10. O DFA é exibido na Figura 4.24.

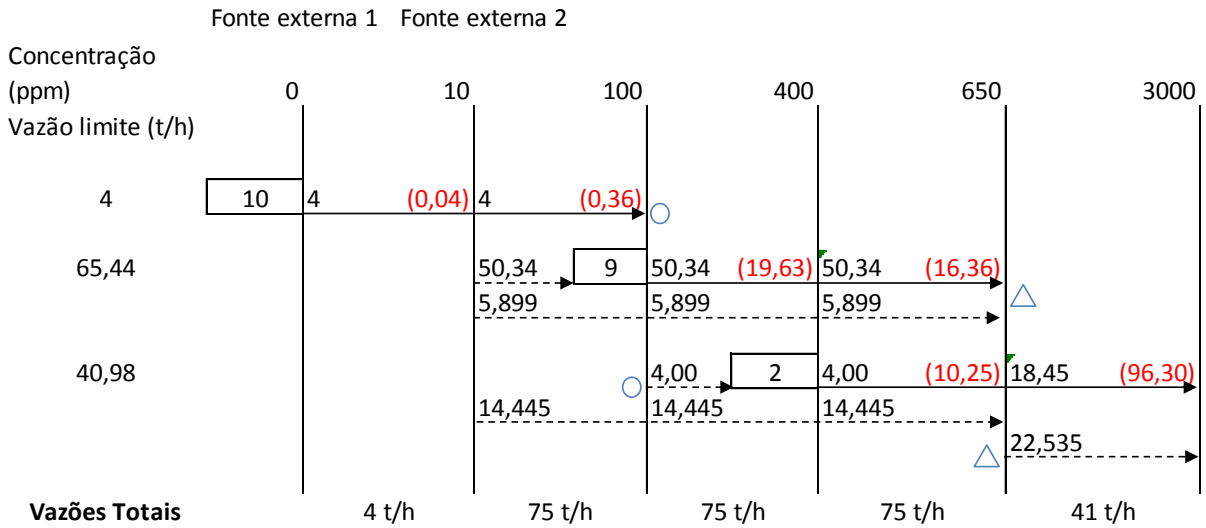

Figura 4.24 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 11.

Boa parte do consumo de água da segunda fonte externa se dá pela operação 9, que capta 56,24 t/h. Esta quantidade é disponibilizada pela operação 9 a 650 ppm, sendo uma parte (22,53 t/h) consumida pela operação 2. Esta também consome 4 t/h oriundas da operação 10 (100 ppm) e o restante, 14,45 t/h são provenientes da segunda fonte externa a 10 ppm. A Figura 4.25 mostra o fluxograma da rede correspondente.

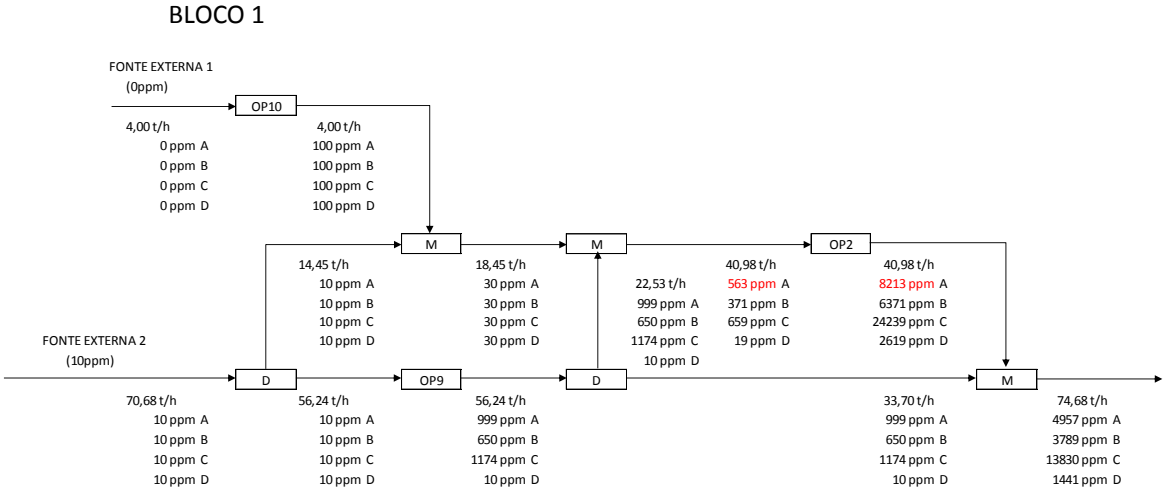

Figura 4.25 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 11.

Para esse cenário também ocorre violação nas concentrações de entrada e saída do contaminante A na operação 2. As vazões de captação e descarte são mostradas na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 11.

BLOCO 1			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
10	4	-	-
2	-	14,45	40,98
9	-	56,24	33,70
TOTAL	**4**	**70,68**	**74,68**

4.1.1.1.12 ***Cenário 12 (10, 3,4)***

As operações 3, 4 e 10 fazem parte deste cenário e o DFA é exibido na Figura 4.26.

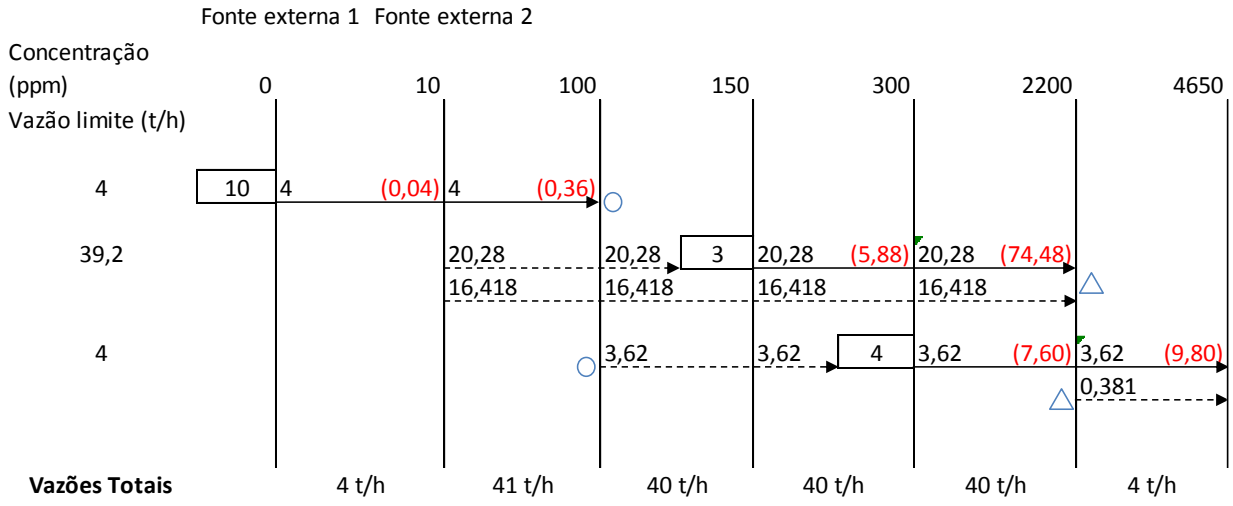

Figura 4.26 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 12.

Conforme mostra a Figura 4.26, a operação 10 disponibiliza 4 t/h que são consumidas pela operação 4. Esta por sua vez consome 0,381 t/h a 2200 ppm disponibilizadas pela operação 3. O ponto de *pinch* ocorre nessa concentração, do quinto intervalo para o sexto. Na Figura 4.27 é mostrado o fluxograma da rede correspondente.

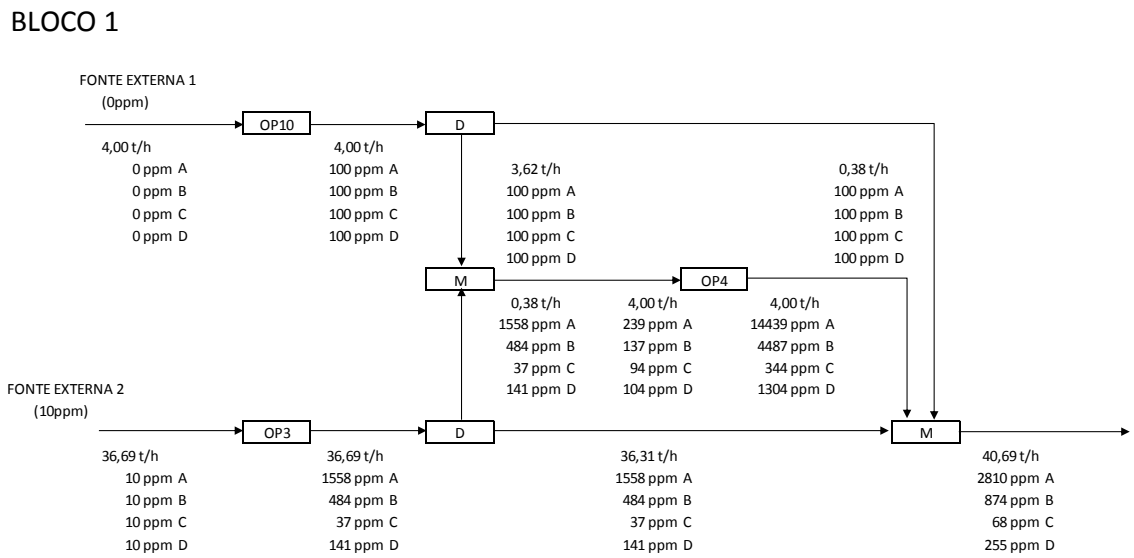

Figura 4.27 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 12.

Nota-se que não há violações em nenhuma das operações. A Tabela 4.13 mostra as vazões na captação e saídas para as operações. A presença da elevada concentração do contaminante A na saída da operação 3 não é o suficiente para violar a entrada e saída deste na operação 4. Isso se dá em virtude de uma menor vazão de reúso, 0,38 t/h, sendo a maior parte, 3,62 t/h, oriunda da operação 10.

Tabela 4.13 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 12.

BLOCO 1			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
10	4	-	-
3	-	33,71	40,98
4	-	23,25	19,98
TOTAL	**4**	**36,69**	**40,69**

4.1.1.1.13 ***Cenário 13 (10, 3,5)***

Participam desse cenário as operações 3, 5 e 10. O DFA é exibido na Figura 4.28.

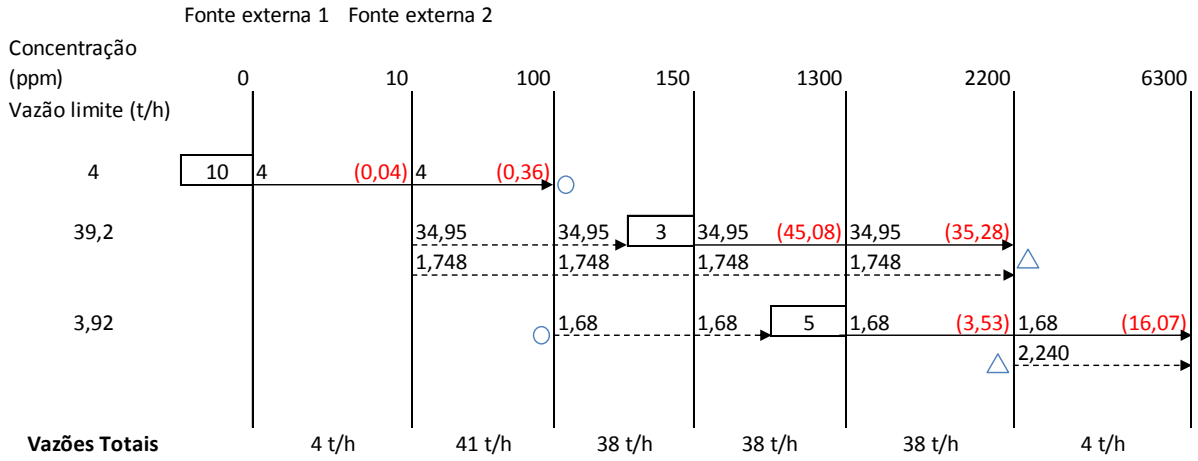

Figura 4.28 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 13.

A operação 10 consome no primeiro intervalo 4 t/h a 0 ppm da primeira fonte externa. Essa quantidade é disponibilizada a 100 ppm e 1,68 t/h são aproveitados na operação 5. A operação 3 disponibiliza 36,7 t/h que são consumidos da segunda fonte externa a 10 ppm. Desse total, 2,240 t/h são aproveitados pela operação 5 a 2200 ppm. Esta é a concentração do *pinch* quando a vazão de água utilizada no intervalo muda de 38 t/h para 4 t/h. O fluxograma é mostrado na Figura 4.29.

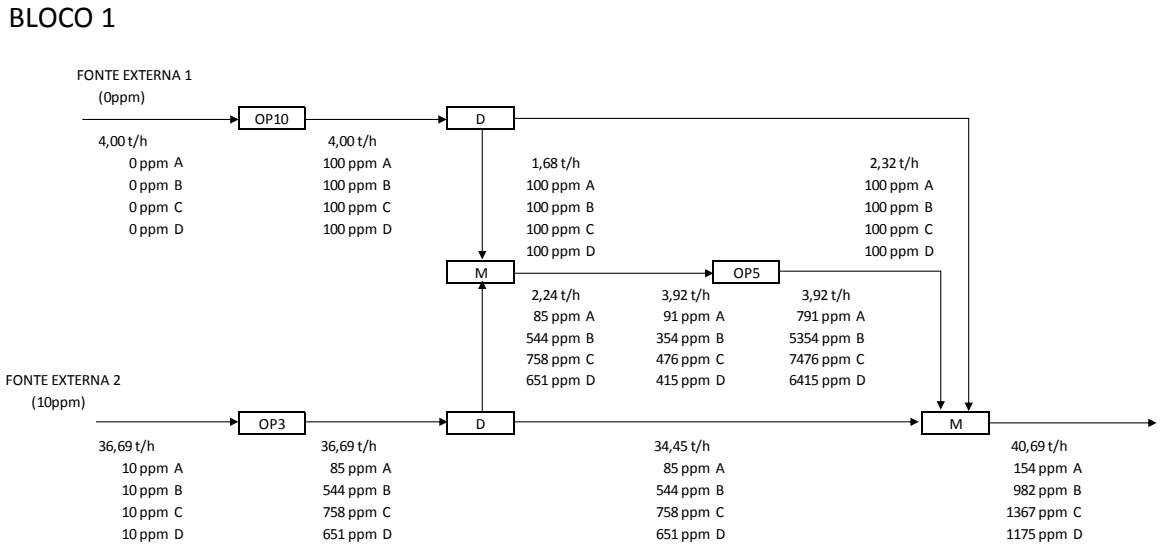

Figura 4.29 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 13.

Mais uma vez não há violações nas concentrações dos contaminantes nas operações. Diferente do caso anterior, a operação 5 recebe em seus contaminantes valores baixos em comparação à operação 4. O baixo descarte justifica-se pelo fato da operação 5 possuir um limite relativamente pequeno de vazão. Os dados de vazão estão condensados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 13.

BLOCO 1			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
10	4	-	2,32
3	-	36,69	34,45
5	-	-	3,92
TOTAL	**4**	**36,69**	**40,69**

4.1.1.1.14 ***Cenário 14 (10, 3,8)***

Para este cenário encontram-se presentes as operações 3, 8 e 10. O DFA é mostrado na Figura 4.30.

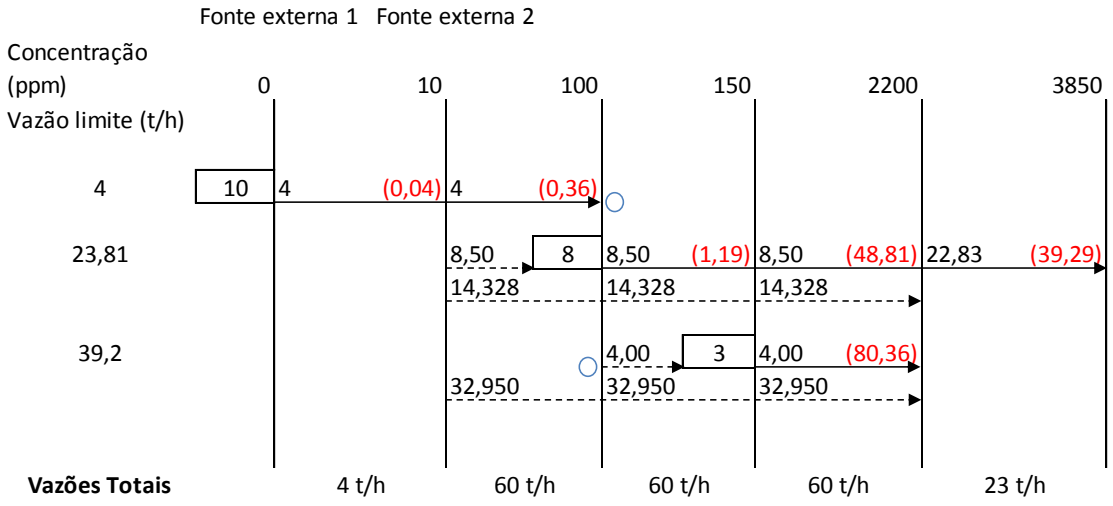

Figura 4.30 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 14.

A operação 10 consome 4 t/h de água limpa, que é aproveitada pela operação 3 a 100 ppm. Esta também capta 32,95 t/h da segunda fonte externa (10 ppm). A operação 8 utiliza apenas 22,83 t/h da segunda fonte externa. O fluxograma da rede é exibido na Figura 4.31.

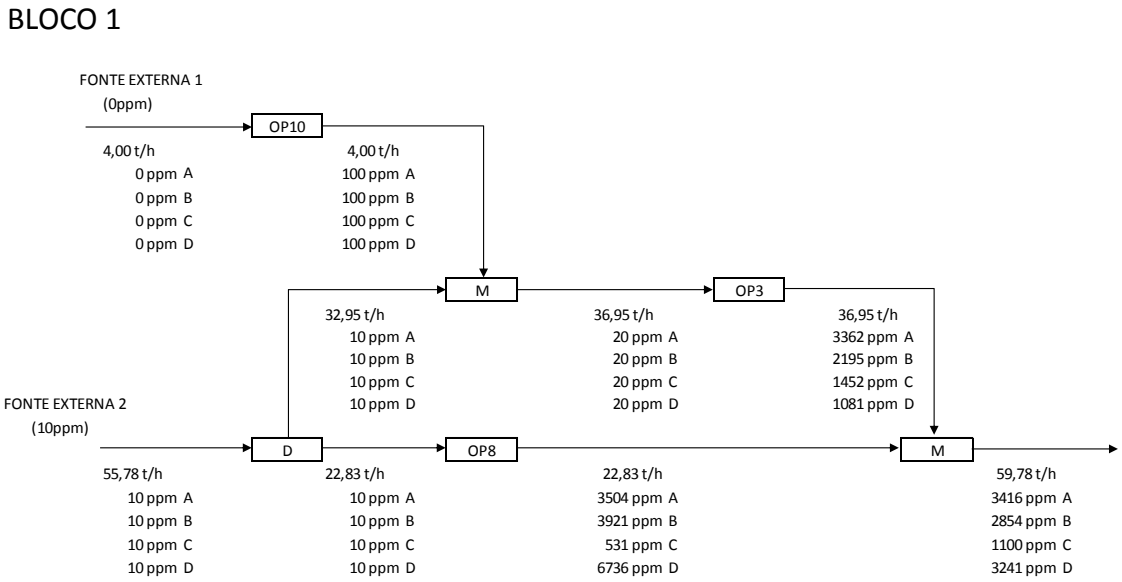

Figura 4.31 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 14.

Para este cenário também não há violação nas concentrações dos contaminantes. O descarte maior do que no cenário anterior é justificado pela presença da operação 8 que possui um limite de vazão maior do que o da operação 5. A Tabela 4.15 mostra os valores de vazões de captação e descartes totais e individuais.

Tabela 4.15 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 14.

BLOCO 1			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
10	4	-	2,32
3	-	32,95	36,95
8	-	22,83	22,83
TOTAL	**4**	**55,78**	**59,78**

4.1.1.1.15 ***Cenário 15 (10, 3,9)***

Este cenário é composto pelas operações 3, 9 e 10. O DFA é mostrado na Figura 4.32.

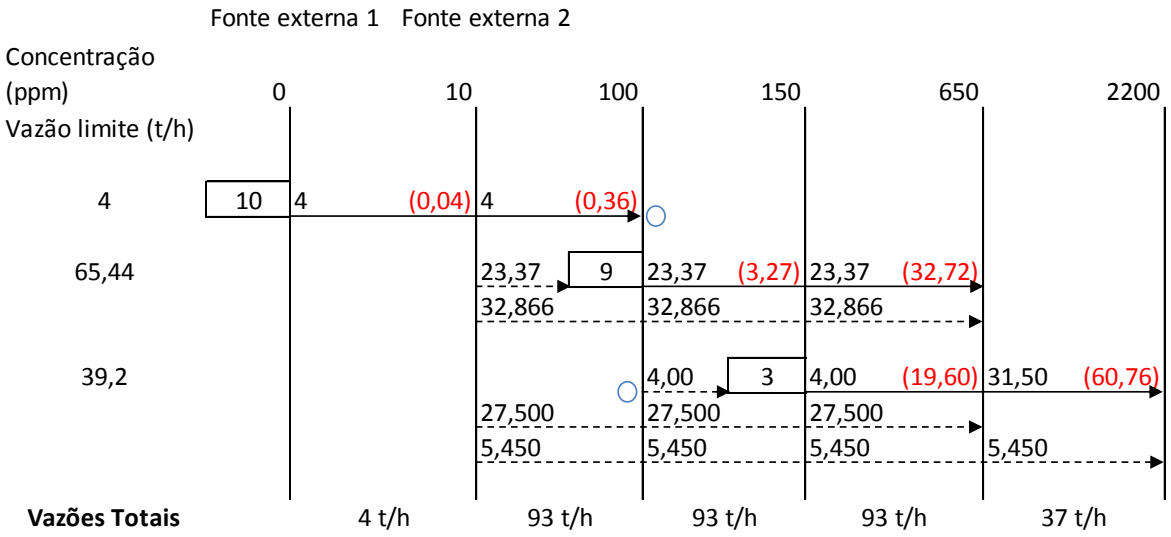

Figura 4.32 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 15.

No primeiro intervalo a operação 10 consome 4 t/h, que mais uma vez são consumidos pela operação 3, que somados aos 32,95 t/h captados da segunda fonte externa totalizam 37 t/h. A operação 9 consome 56,24 t/h da segunda fonte externa e em seguida segue para descarte. O fluxograma é mostrado na Figura 4.33.

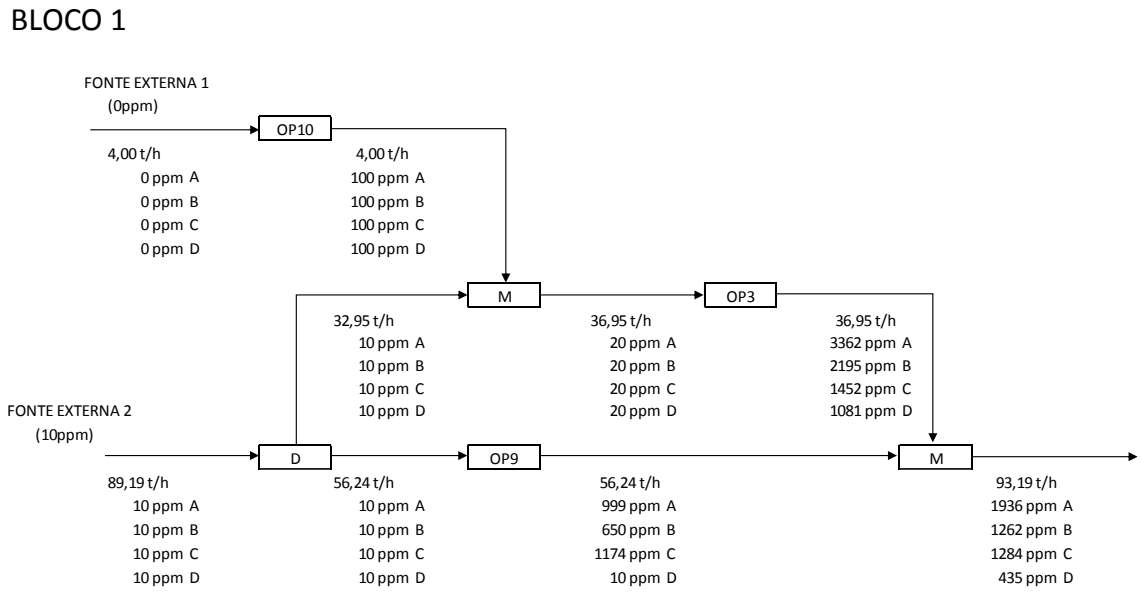

Figura 4.33 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 15.

Também não há violações nas concentrações dos contaminantes em nenhuma das operações. No entanto há um aumento considerável no consumo de água limpa com a presença da operação 9 (56,24 t/h). Os dados de vazões de consumo e descarte das operações estão presentes na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 15.

BLOCO 1			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
10	4	-	-
3	-	32,95	36,95
9	-	56,24	56,24
TOTAL	**4**	**89,19**	**93,19**

4.1.1.1.16 ***Cenário 16 (10, 4,5)***

As operações 4 e 5 formam com a 10 o cenário 16. O DFA é exibido na Figura 4.34.

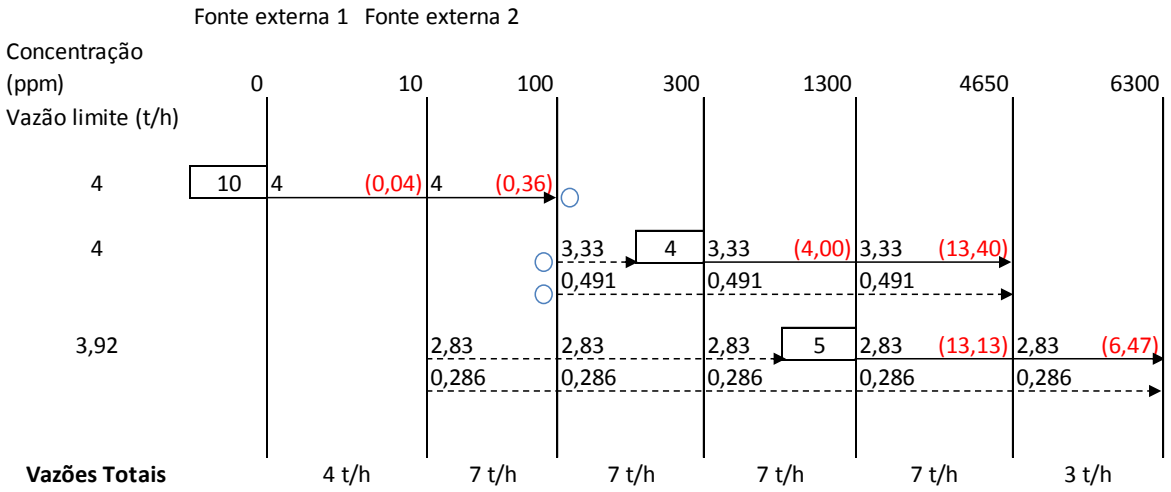

Figura 4.34 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 16.

A operação 4 aproveita 3,82 t/h das 4 t/h disponibilizadas pela operação 10 a 100 ppm e a operação 5 consome 3,12 t/h da segunda fonte externa. Percebe-se que até agora este é o cenário que apresenta o menor consumo e descarte de água. Isso ocorre em função das menores vazões requeridas pelas operações 4 (4 t/h) e 5 (3,92 t/h). O fluxograma é mostrado na Figura 4.35.

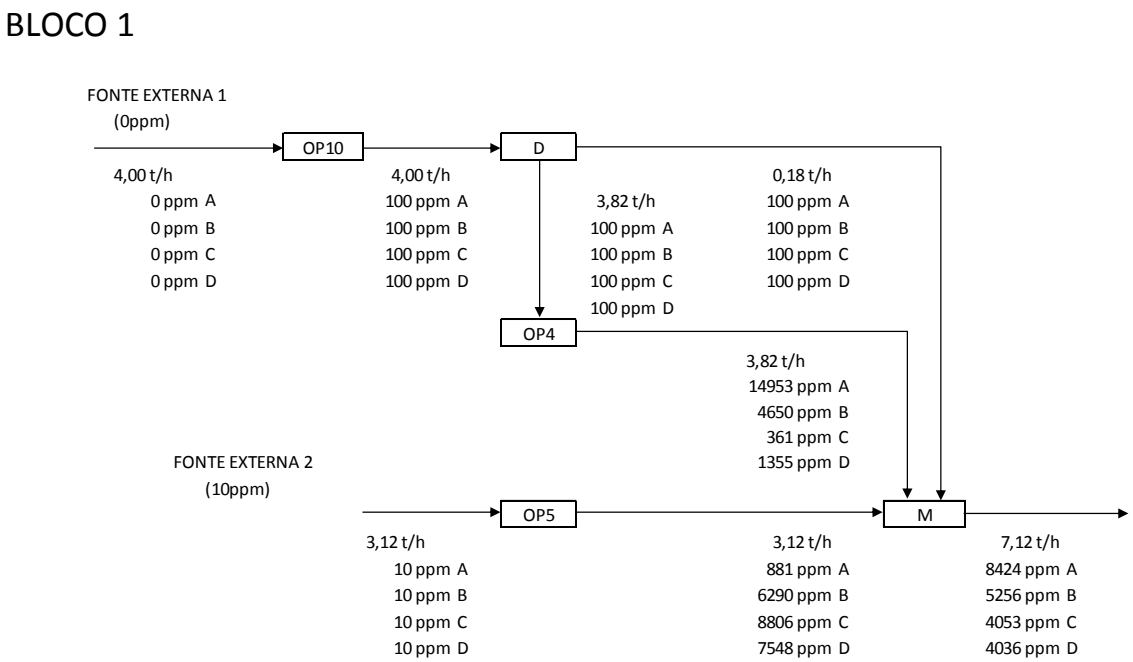

Figura 4.35 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 16.

Não há violações nas operações e o baixo consumo/descarte total de água (7,12 t/h) coloca este cenário como a melhor configuração até o momento. A Tabela 4.17 mostra estes dados.

Tabela 4.17 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 16.

BLOCO 1			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
10	4	-	0,18
4	-	-	3,82
5	-	3,12	3,12
TOTAL	**4**	**3,12**	**7,12**

4.1.1.1.17 ***Cenário 17 (10, 4,8)***

Para esta configuração a operação 5, presente no cenário anterior, é substituída pela 9. O DFA é exibido na Figura 4.36.

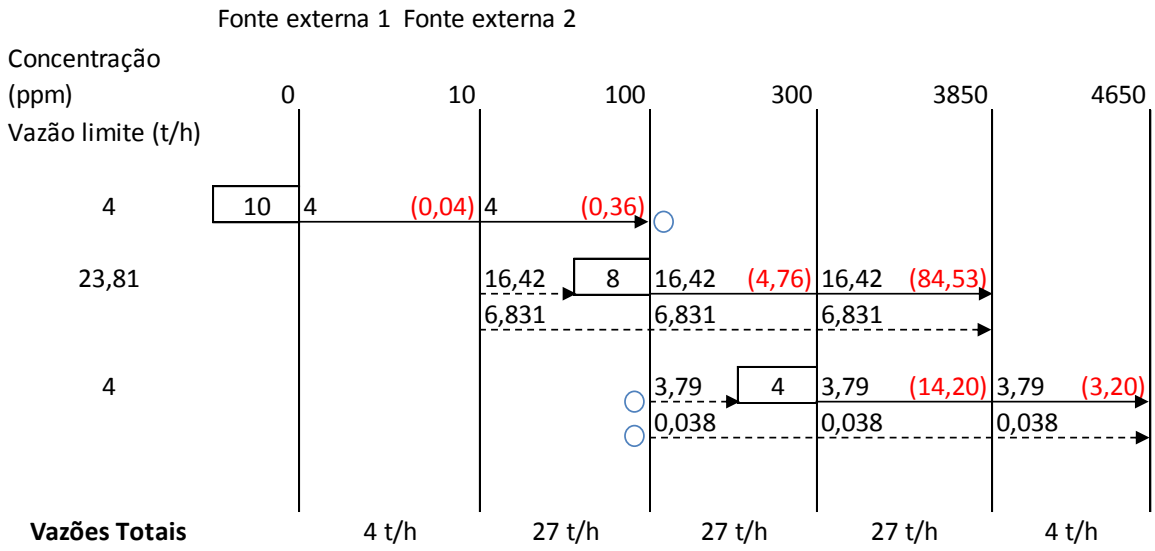

Figura 4.36 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 17.

A operação 4 continua recebendo água (3,83 t/h) da operação 10 a 100 ppm. Já a operação 8 descarta toda a água que capta da fonte externa a 10 ppm. O fluxograma é mostrado na Figura 4.37.

BLOCO 1

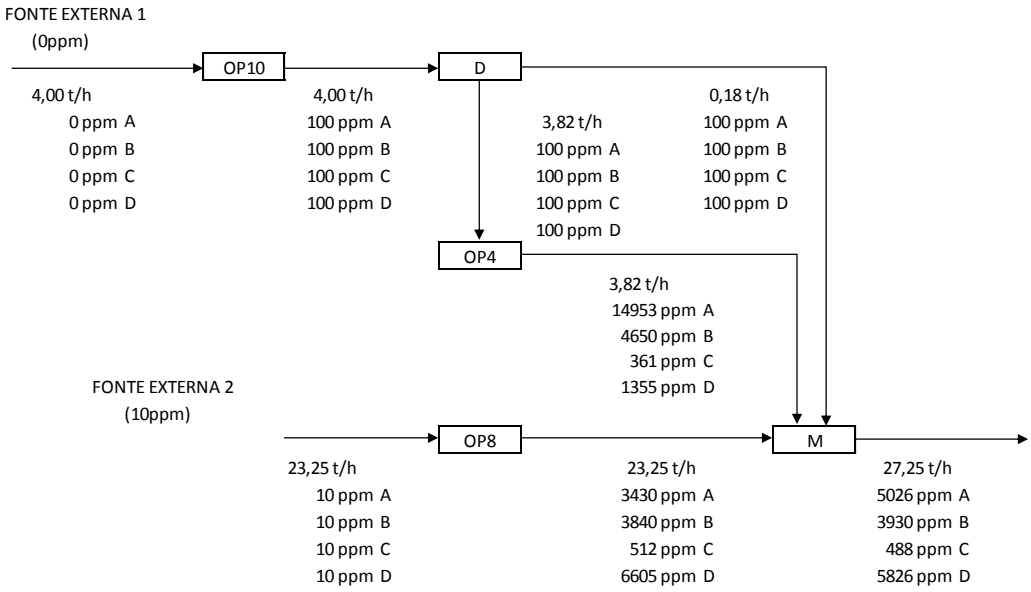

Figura 4.37 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 17.

Para este cenário não ocorrem violações. Há um aumento no consumo/descarte de água pela presença da operação 8, que consume 23,25 t/h da segunda fonte externa. Os dados totais de consumo e descarte estão presentes na Tabela 4.18.

Tabela 4.18 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 17.

BLOCO 1			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
10	4	-	0,18
4	-	-	3,82
8	-	23,25	23,25
TOTAL	**4**	**23,25**	**27,25**

4.1.1.1.18 ***Cenário 18 (10, 4,9)***

Para esta última combinação com a presença da operação 4, a operação 8 é substituída pela 9. Desse modo o DFA é mostrado na Figura 4.38.

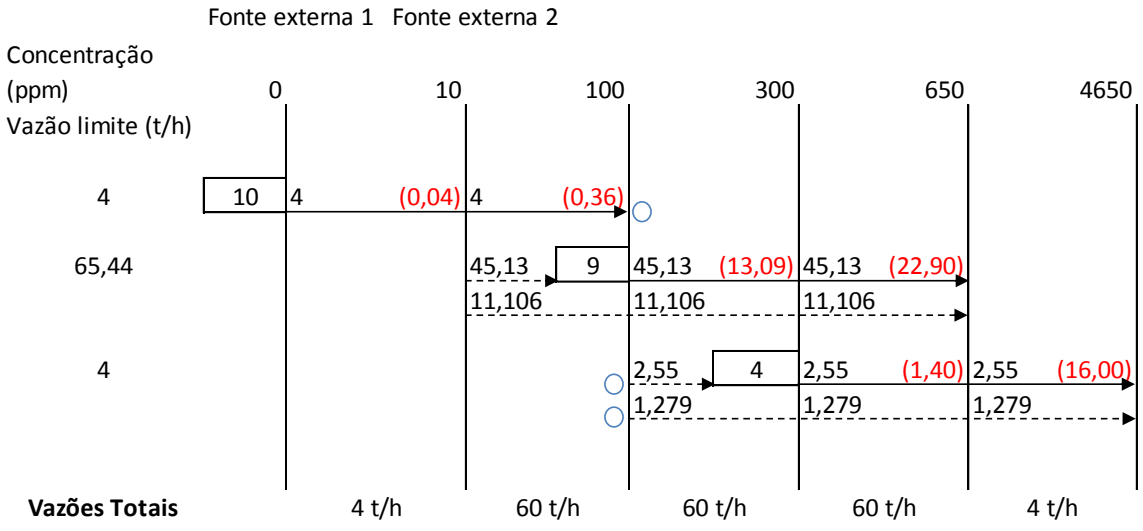

Figura 4.38 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 18.

O DFA é semelhante ao do cenário anterior, exceto pela maior quantidade de água consumida pela operação 9 (56,24 t/h) da segunda fonte externa a 10 ppm. O fluxograma é exibido na Figura 4.39.

BLOCO 1

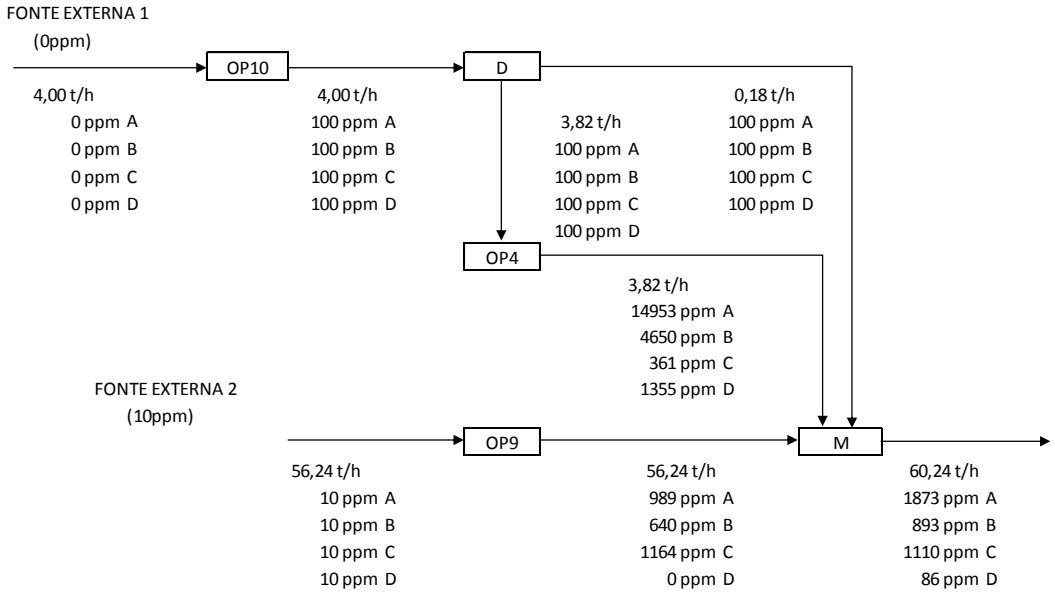

Figura 4.39 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 18.

Não há violações nessa configuração, apenas um aumento no consumo/descarte de água. A Tabela 4.19 com os dados de consumo e descarte é mostrada a seguir.

Tabela 4.19 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 18.

BLOCO 1			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
10	4	-	-
4	-	-	3,82
9	-	56,24	56,24
TOTAL	**4**	**56,24**	**60,06**

4.1.1.1.19 ***Cenário 19 (10, 5,8)***

Neste cenário entram as operações 5 e 8. O DFA é mostrado a seguir.

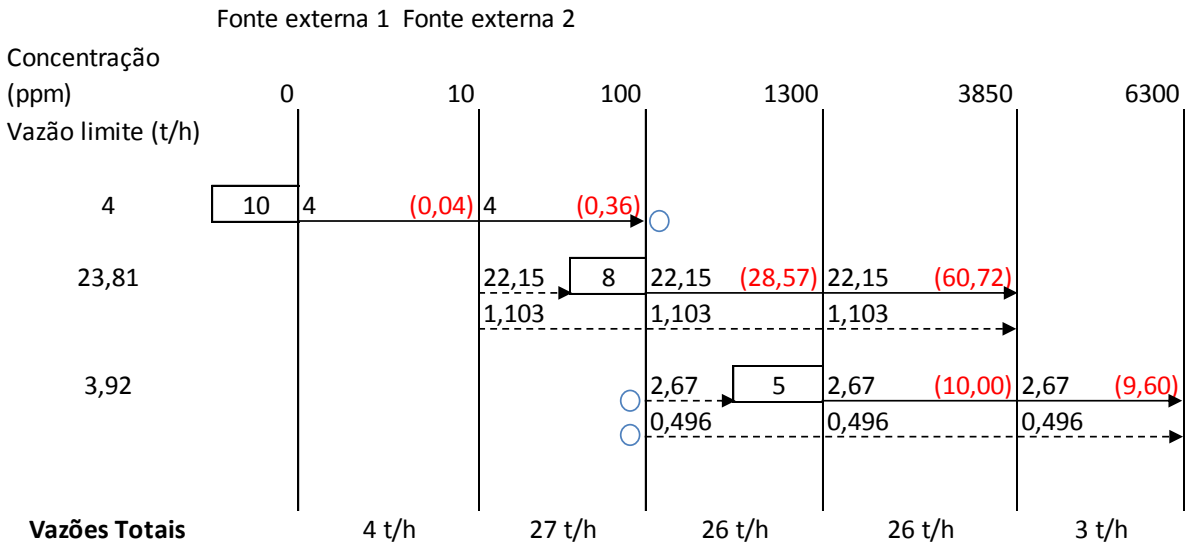

Figura 4.40 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 19.

A operação 5 aproveita 3,16 t/h dos 4 t/h disponíveis a 100 ppm na operação 10. A operação 8 descarta toda quantidade que consome da segunda fonte externa. O fluxograma é exibido na Figura 4.41.

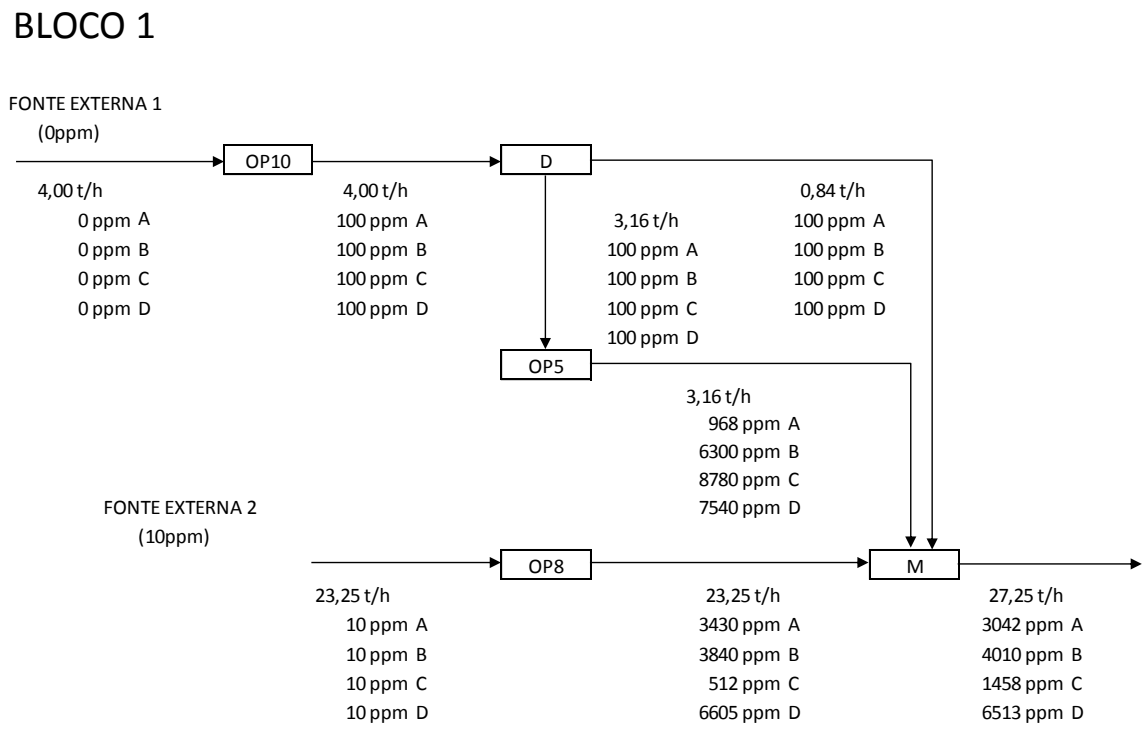

Figura 4.41 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 19.

Neste cenário não há violações nas concentrações dos contaminantes em nenhuma das operações. Há outra diminuição na quantidade de água consumida/descartada em decorrência da presença da operação 5. As vazões encontram-se na Tabela 4.20.

Tabela 4.20 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 19.

BLOCO 1			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
10	4	-	0,84
5	-	-	3,16
8	-	23,25	23,25
TOTAL	**4**	**23,25**	**27,25**

4.1.1.1.20 ***Cenário 20 (10, 5,9)***

Neste cenário a operação 8 é substituída pela 9 e o DFA é mostrado na Figura 4.42.

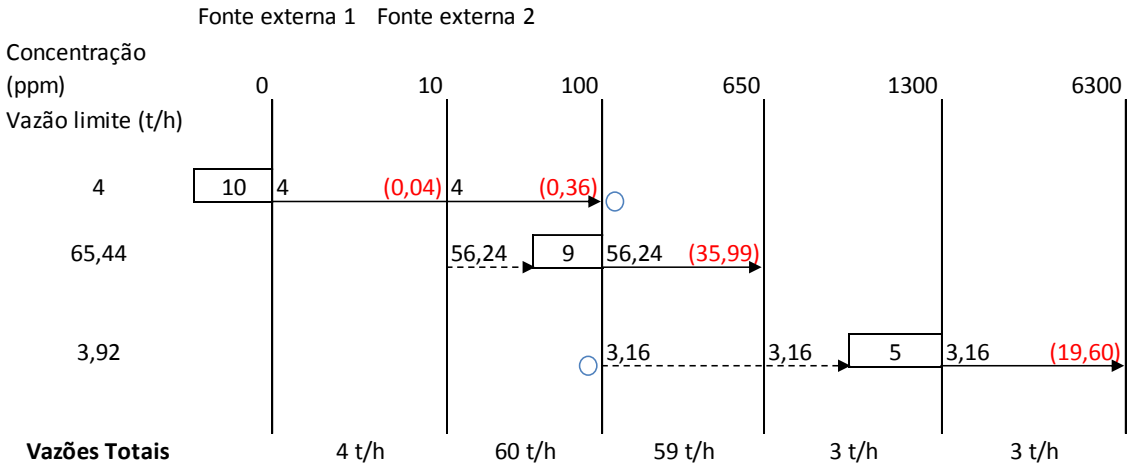

Figura 4.42 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 20.

A operação 10 disponibiliza 4 t/h para reúso a 100 ppm. Uma parte, 3,16 t/h, segue para a operação 5. A operação 9 descarta toda quantidade captada da segunda fonte externa. O fluxograma mostrado na Figura 4.43 melhor representa a rede.

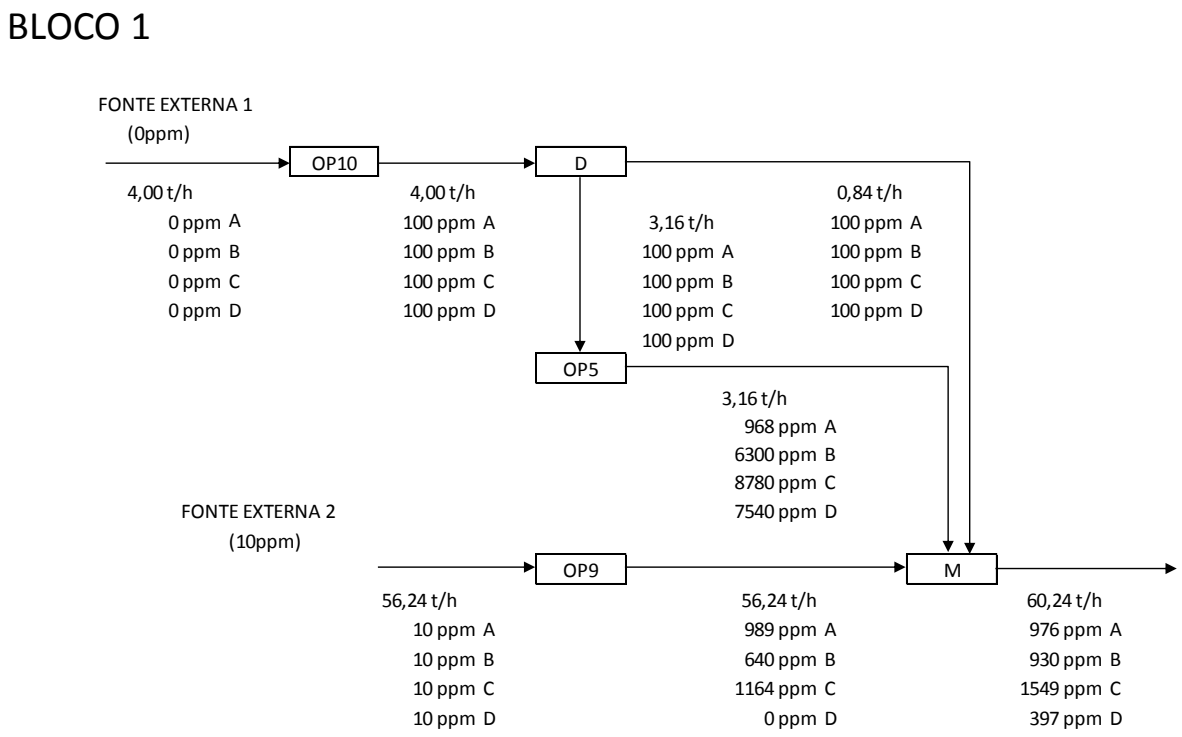

Figura 4.43 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 20.

Essa configuração também não apresenta violações em nenhuma operação. As vazões são mostradas na Tabela 4.21.

Tabela 4.21 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 20.

BLOCO 1			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
10	4	-	0,84
5	-	-	3,16
9	-	56,24	56,24
TOTAL	**4**	**56,24**	**60,24**

4.1.1.1.21 ***Cenário 21 (10, 8,9)***

Esta é a última combinação proposta para o bloco 1. O DFA é mostrado na Figura 4.44.

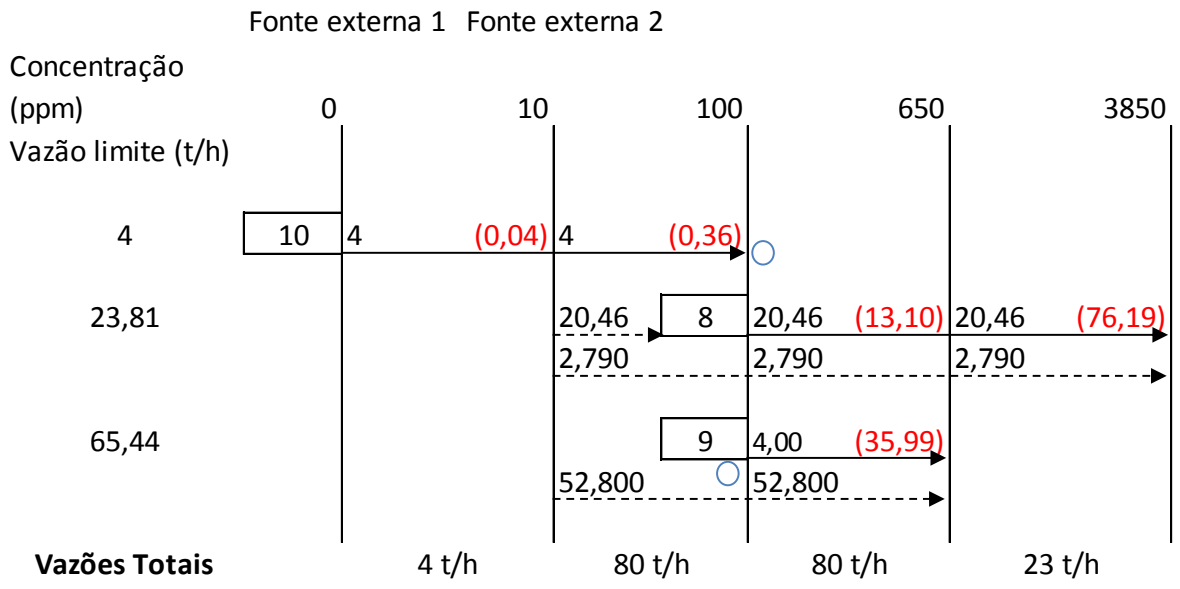

Figura 4.44 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 1 – Cenário 21.

Percebe-se na Figura 4.44 que as operações 8 e 9 partem da mesma concentração, 100 ppm. Nesse mesmo valor, a operação 9 aproveita as 4 t/h disponíveis na operação 10. Essa parcela é somada a 52,8 t/h captados da segunda fonte externa. A operação 8 descarta toda quantidade (23,25 t/h) que recebe a 10 ppm. O fluxograma é mostrado na Figura 4.45.

BLOCO 1

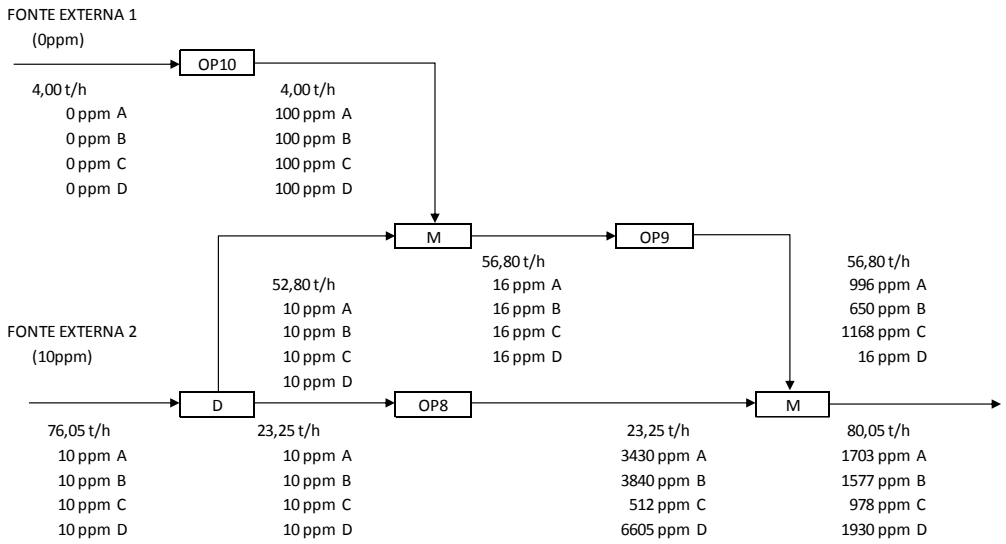

Figura 4.45 - Fluxograma - Bloco 1 - Cenário 21.

Este cenário não apresenta violações, mas nota-se uma maior captação de água pela operação 8. A Tabela 4.22 mostra as vazões totais e individuais das operações.

Tabela 4.22 - Resultados do Bloco 1 – Cenário 21.

BLOCO 1			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
10	4	-	0,84
5	-	-	3,16
9	-	56,24	56,24
TOTAL	**4**	**56,24**	**60,24**

4.1.1.1.22 ***Conclusões Parciais***

Dentre os cenários até aqui expostos, o que apresenta a menor captação e descarte de água (7,12 t/h) é o cenário 16, formado pelas operações: 4, 5 e 10. Este cenário será considerado como referência, pois como será visto mais adiante, ele será a base para análise e decisão do melhor cenário para cada bloco.

A baixa vazão exigida pelas operações 4 e 5 contribuiu para esse baixo consumo. É importante destacar que apesar de possuir um menor valor de consumo, esse cenário não necessariamente representa o cenário final para o bloco 1. É preciso analisar a melhor configu-

ração para os demais blocos e caso haja operações em comum, decidir em qual dos blocos elas deverão permanecer. Logo, a segunda melhor configuração do bloco deverá ser escolhida para os casos em que houver blocos com operações em comum. A princípio, considera-se o cenário 16 como o melhor para compor o primeiro bloco. No próximo tópico serão apresentados os cenários possíveis para compor o bloco 2.

A Tabela 4.23 mostra um resumo dos resultados obtidos em cada cenário.

Tabela 4.23 - Resumo dos resultados obtidos em cada cenário do bloco 1.

	Operações	Consumo FE1 (t/h)	Consumo FE2 (t/h)	Descarte (t/h)	Violação?
Cenário 1	1, 2 e 10	4	59,51	63,51	**SIM**
Cenário 2	1, 3 e 10	4	56,80	60,80	NÃO
Cenário 3	1, 4 e 10	4	24,39	28,14	**SIM**
Cenário 4	1, 5 e 10	4	24,51	28,51	**SIM**
Cenário 5	1, 8 e 10	4	43,63	47,63	**SIM**
Cenário 6	1, 9 e 10	4	74,17	78,17	**SIM**
Cenário 7	2, 3 e 10	4	67,93	71,93	**SIM**
Cenário 8	2, 4 e 10	4	37,98	41,98	**SIM**
Cenário 9	2, 5 e 10	4	39,37	43,37	NÃO
Cenário 10	2, 8 e 10	4	56,96	60,96	**SIM**
Cenário 11	2, 9 e 10	4	70,68	74,68	**SIM**
Cenário 12	3, 4 e 10	4	36,69	40,69	NÃO
Cenário 13	3, 5 e 10	4	36,69	40,69	NÃO
Cenário 14	3, 8 e 10	4	55,78	59,78	NÃO
Cenário 15	3, 9 e 10	4	89,19	93,19	NÃO
Cenário 16	4, 5 e 10	**4**	**3,12**	**7,12**	**NÃO**
Cenário 17	4, 8 e 10	4	23,25	27,25	NÃO
Cenário 18	4, 9 e 10	4	56,24	60,06	NÃO
Cenário 19	5, 8 e 10	4	23,25	27,25	NÃO
Cenário 20	5, 9 e 10	4	56,24	60,24	NÃO
Cenário 21	8, 9 e 10	4	76,05	80,05	NÃO

4.1.1.2 BLOCO 2

Para compor o bloco 2 as operações que participarão das combinações são 1, 2, 3, 4, 5, 8 e 9. Mesmo estando na proposta do bloco 1, as operações 4 e 5 também participam deste bloco, pois no final é decido qual é o melhor cenário, ou seja, aquele que possui o menor descarte global de água. A operação de referência é a 7, que já compõe previamente o bloco. A exemplo do bloco 1, este também será formado por um conjunto de três operações. Sendo assim:

$$Bloco\ 2 = (7, ?, ?) \tag{4.5}$$

Para realizar a combinação utiliza-se a Equação (4.3). Naturalmente ela leva ao mesmo número de combinações encontrado para o bloco 1, visto que o número total de operações e o número a ser combinado são os mesmos.

$$C_2^7 = \frac{7!}{2!\,(7-2)!} = \frac{7!}{2! \times 5!} = \frac{7 \times 6 \times 5!}{2! \times 5!} = \frac{42}{2} = 21 \tag{4.6}$$

4.1.1.2.1 ***Cenário 1 (7, 1, 2)***

Este cenário é composto pelas operações 1, 2 e 7. O DFA é mostrado na Figura 4.46. O contaminante de referência é B, pois na operação de referência 7 sua concentração máxima de entrada é nula.

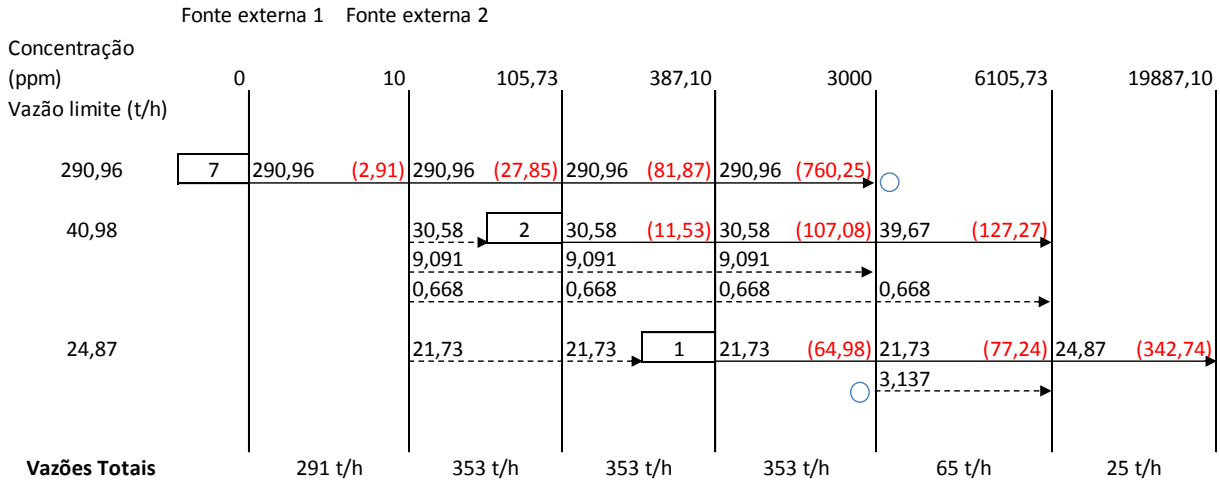

Figura 4.46 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 1.

Nota-se que para a operação 7 (referência) a quantidade de água consumida da primeira fonte externa é bem maior que a operação 10 no bloco 1. Isso representa um maior descarte por parte daquela, mesmo disponibilizando uma parte para reúso. Pelo diagrama a operação 1 recebe 3,137 t/h da operação 7 a 3000 ppm. Este valor soma-se às 21,73 t/h consumidas da segunda fonte externa. A operação 2 descarta toda água que capta, 40,34 t/h. O ponto de *pinch* aparece na transição da vazão total de 353 para 65 t/h O fluxograma da Figura 4.47 mostra melhor o que foi aqui descrito.

BLOCO 2

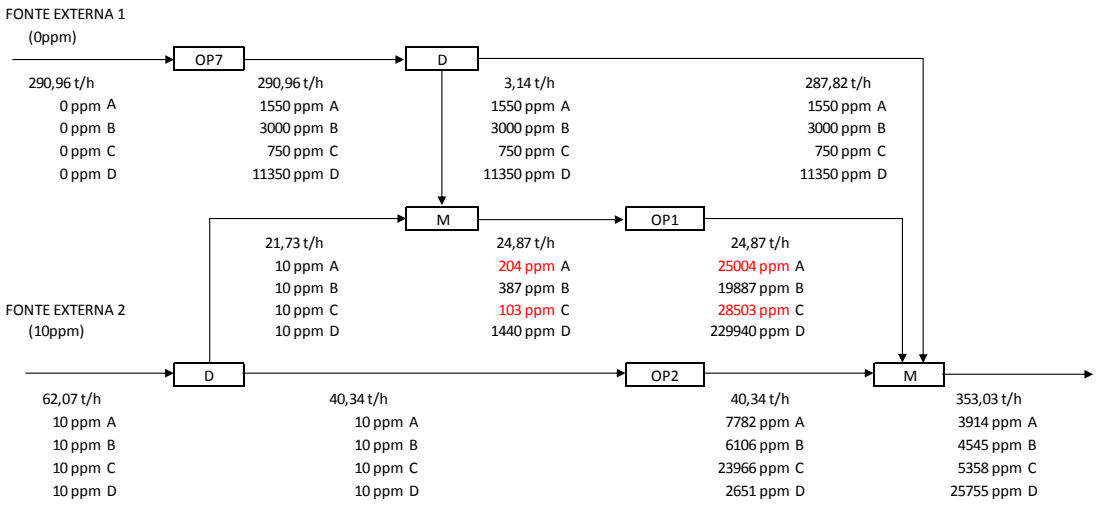

Figura 4.47 - Fluxograma - Bloco 2 - Cenário 1.

A exemplo do cenário 1 do bloco 1 também há violação na entrada e saídas dos contaminantes A e C na operação 1. Este é um fato indicativo da impossibilidade da coexistência das operações 1 e 2 no mesmo bloco. A Tabela 4.24 mostra os dados de vazões de cada operação.

Tabela 4.24 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 1.

BLOCO 2			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
7	290,96	-	287,82
1	-	21,73	24,87
2	-	40,34	40,34
TOTAL	**290,96**	**62,07**	**353,03**

4.1.1.2.2 ***Cenário 2 (7, 1, 3)***

A operação 2 do cenário anterior é substituída pela 3 e o DFA é exibido na Figura 4.48.

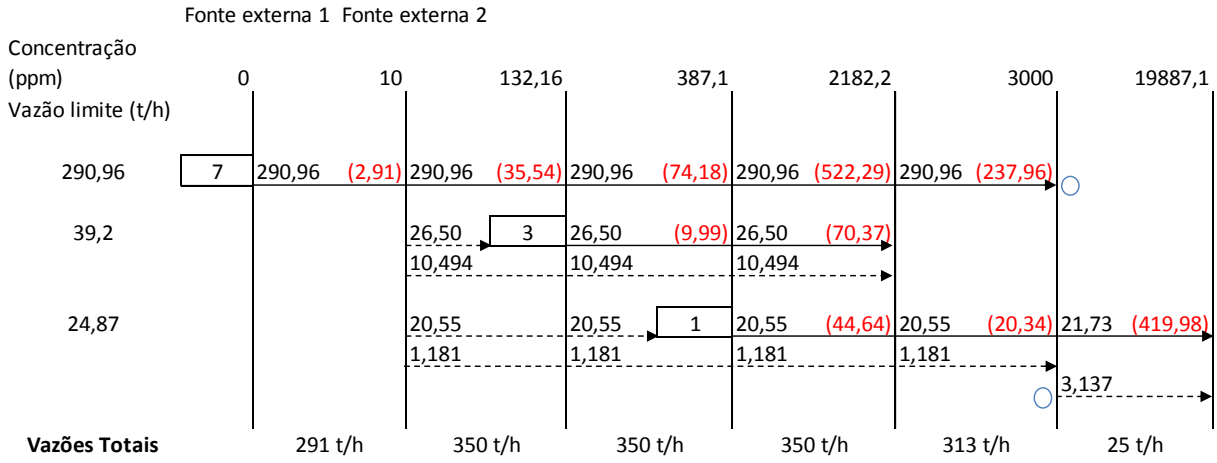

Figura 4.48 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 2.

Essa configuração é semelhante à anterior, em que a operação 7 encaminha 3,14 t/h para a operação 1, que por sua vez também capta 21,8 t/h da segunda fonte externa. A operação 3 descarta toda carga que é consumida da fonte externa 2 a 10 ppm. Observa-se que o ponto de *pinch* está na concentração de 3000 ppm. O fluxograma da rede é mostrado na Figura 4.49.

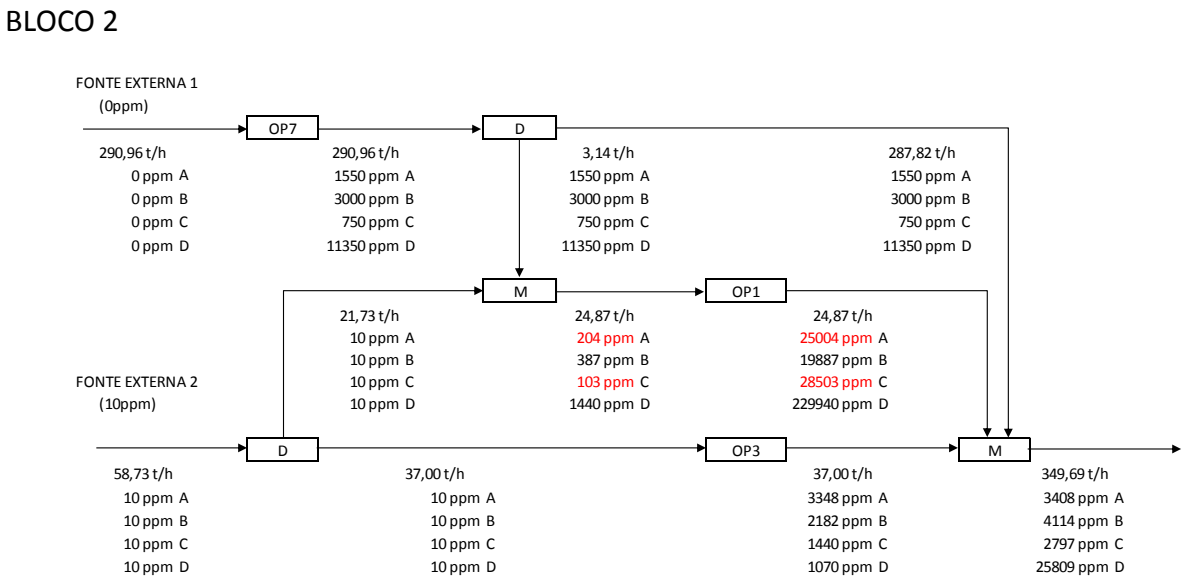

Figura 4.49 – Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 2.

Percebe-se que há violações nas concentrações de entrada e saída dos contaminantes A e C na operação 1. As vazões globais do processo estão presentes na Tabela 4.25.

Tabela 4.25 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 2.

BLOCO 2			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
7	290,96	-	287,82
1	-	21,73	24,87
3	-	37,00	37,00
TOTAL	**290,96**	**58,73**	**349,69**

4.1.1.2.3 ***Cenário 3 (7, 1, 4)***

Para este cenário a operação 4 faz-se presente, como mostra o diagrama da Figura 4.50.

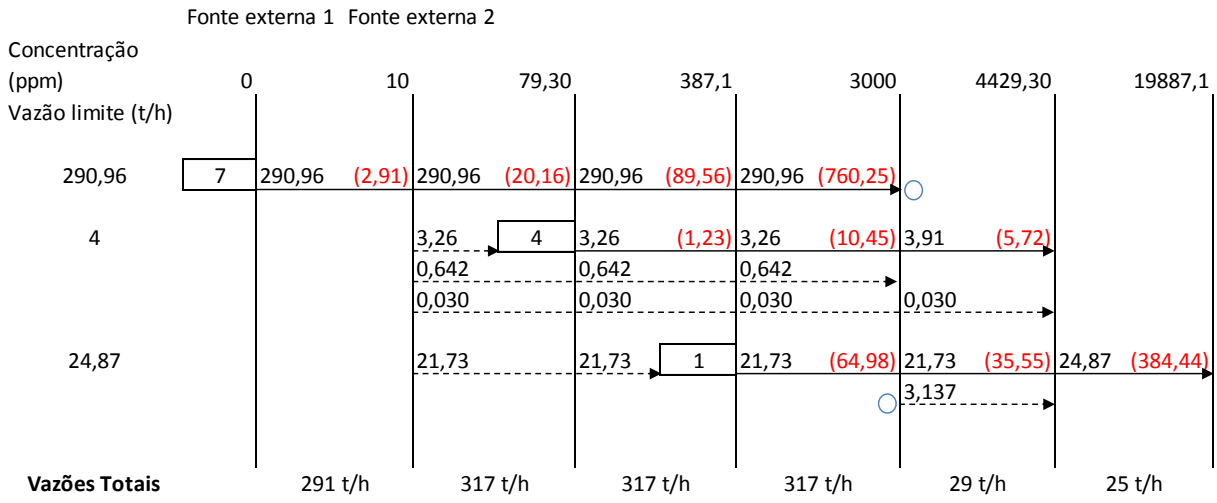

Figura 4.50 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 3.

Mais uma vez a operação 1 recebe 3,14 t/h da operação 7 a 3000 ppm. Essa parcela é somada às 21,73 t/h consumidas da segunda fonte externa. Já a operação 4 não participa do reúso e descarta toda água captada (3,93 t/h). O ponto de *pinch* está presente na concentração de 3000 ppm. A Figura 4.51 mostra o fluxograma da rede.

BLOCO 2

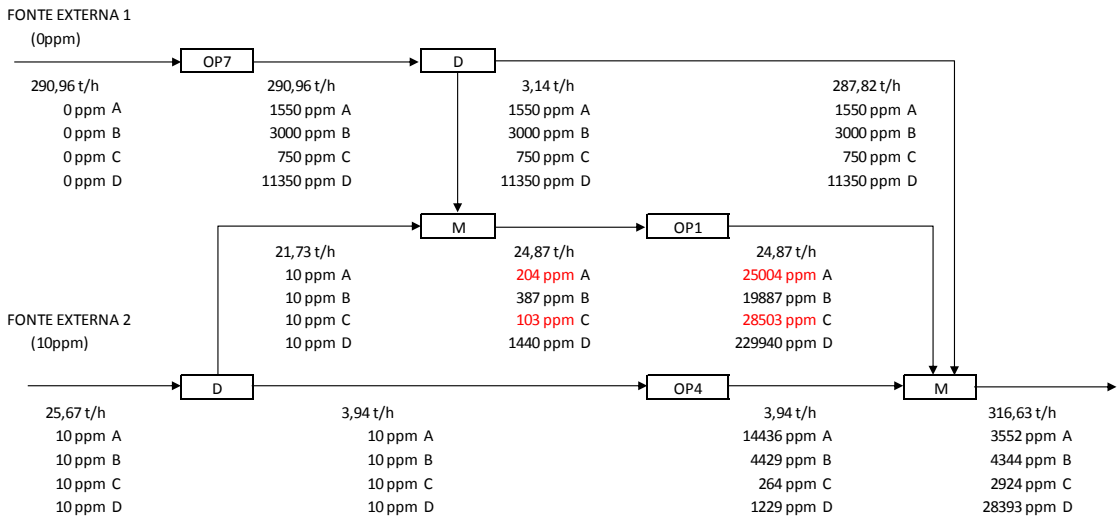

Figura 4.51 - Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 3.

Novamente há violações nas concentrações de entrada e saída dos contaminantes A e C a na operação 1. Nesse caso foi preciso testar outras possibilidades levando em conta as proibições de reúso, dentre as quais algumas também apresentaram violações. O DFA aqui apresentado foi o escolhido por possuir a menor captação dentre as observadas. Em função do consumo relativamente elevado da operação 7, o descarte apresentou um valor bem maior em relação às operações do bloco 1. A Tabela 4.26 mostra as vazões globais do sistema.

Tabela 4.26 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 3.

BLOCO 2			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
7	290,96	-	287,82
1	-	21,73	24,87
4	-	3,94	3,94
TOTAL	**290,96**	**25,67**	**316,63**

4.1.1.2.4 ***Cenário 4 (7, 1, 5)***

A operação 5 substitui a 4 que esteve presente no cenário anterior, conforme mostra o diagrama presente na Figura 4.52.

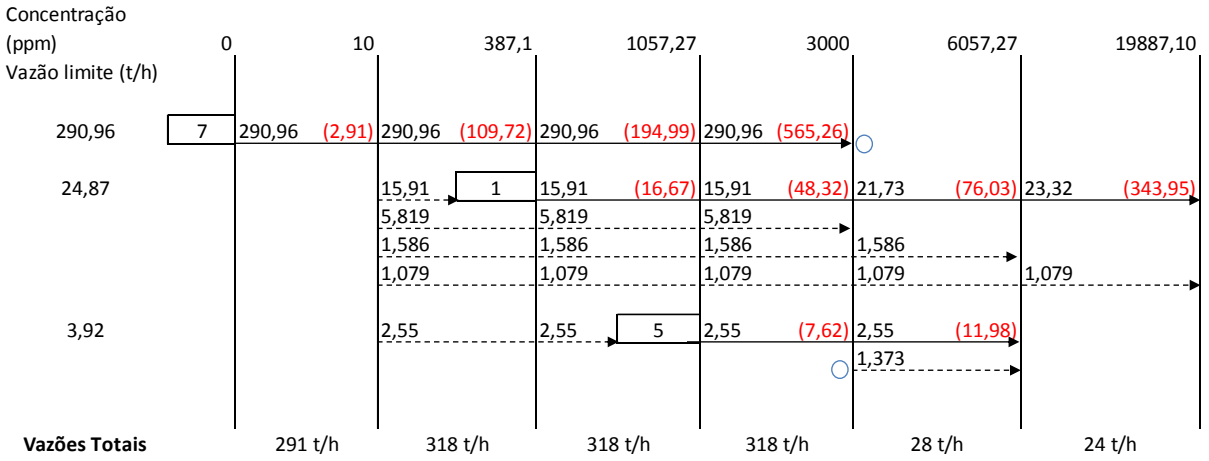

Figura 4.52 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 4.

A exemplo dos cenários anteriores, a operação 5 recebe 1,40 t/h da operação 7 a 3000 ppm. As demais 2,55 t/h são consumidas da segunda fonte externa a 10 ppm. Já a operação 1 descarta toda quantidade consumida da segunda fonte externa. Nota-se o ponto de *pinch* na concentração de 3000 ppm. A Figura 4.53 mostra o fluxograma da rede.

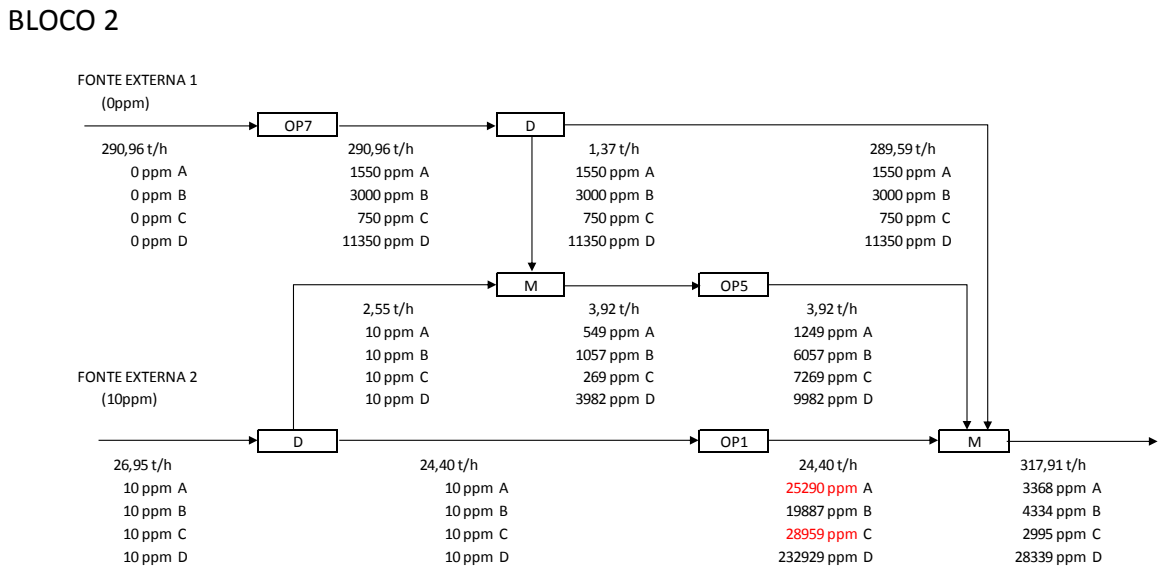

Figura 4.53 - Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 4.

Nota-se que a operação 1 não mais participa de reúso como nos cenários anteriores. Mesmo a busca de água a 10 ppm não foi suficiente para evitar a violação dos contaminantes A e C na saída da operação. As vazões totais das correntes globais estão exibidas na Tabela 4.27.

Tabela 4.27 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 4.

BLOCO 2			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
7	290,96	-	289,59
1	-	24,40	24,40
5	-	2,55	3,92
TOTAL	**290,96**	**26,95**	**317,91**

4.1.1.2.5 ***Cenário 5 (7, 1, 8)***

A operação 8 ocupa o lugar da operação 5 e o DFA é exibido a seguir.

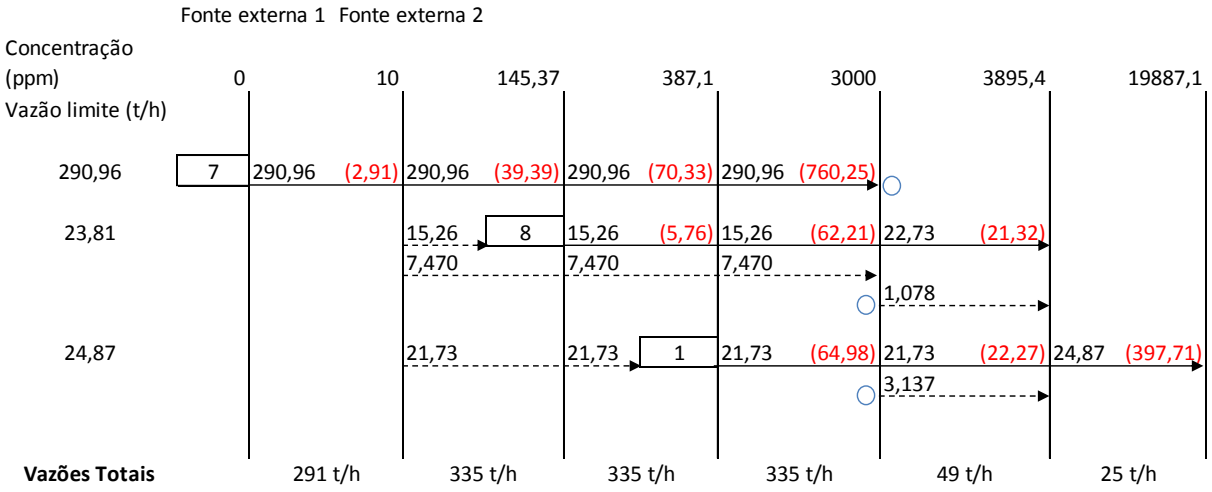

Figura 4.54 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 5.

Nessa configuração as operações 1 e 8 são beneficiadas pela disponibilidade de 290,96 t/h a 3000 ppm. A operação 8 recebe 1,08 t/h que são acrescidos a 22,73 t/h provenientes da segunda fonte externa. A operação 1 recebe 3,14 t/h que se somam às 21,71 t/h também oriundas da fonte externa 2. O ponto de *pinch* está presente na concentração de 3000 ppm. O fluxograma é exibido na Figura 4.55.

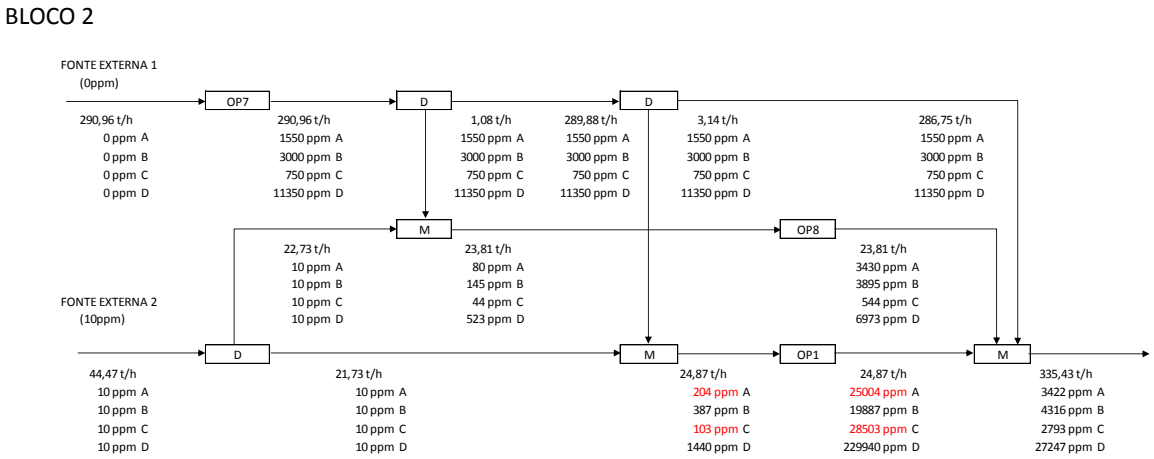

Figura 4.55 - Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 5.

Mesmo com o reúso, a operação 1 continua apresentando extrapolação nos limites máximos das concentrações de entrada e saída dos contaminantes A e C. As vazões globais estão presentes na Tabela 4.28 .

Tabela 4.28 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 5.

BLOCO 2			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
7	290,96	-	286,75
1	-	21,73	24,87
8	-	22,73	23,81
TOTAL	**290,96**	**44,47**	**335,43**

4.1.1.2.6 ***Cenário 6 (7, 1, 9)***

Essa é última configuração com a presença da operação 1. Nas próximas combinações estará presente a operação 2. A Figura 4.56 mostra o DFA da rede.

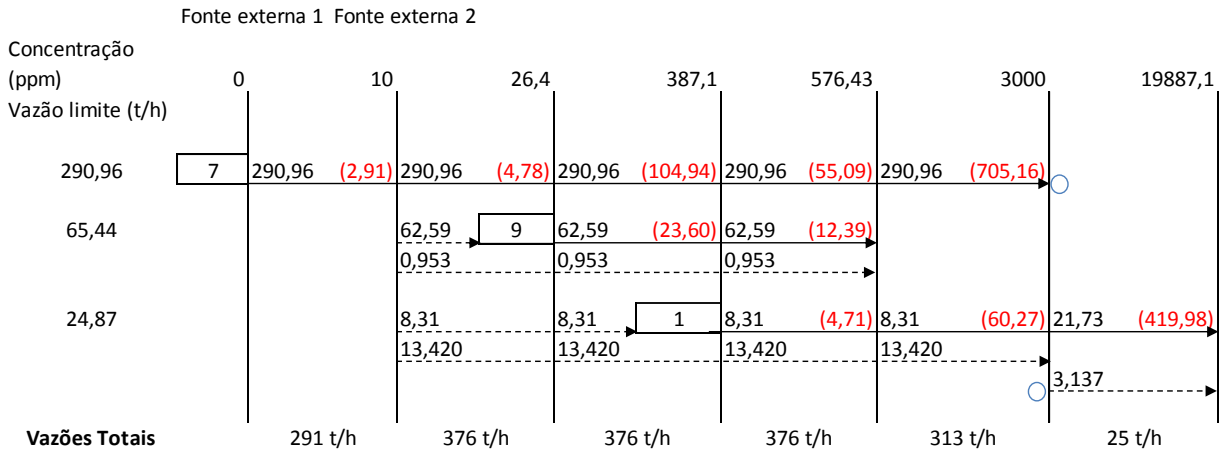

Figura 4.56 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 6.

A operação 1 recebe novamente 3,14 t/h da operação 7 a 3000 ppm. Essa quantidade é misturada com 21,73 t/h provenientes da segunda fonte externa a 10 ppm. A operação 9 descarta toda água que consome (63,54 t/h) da fonte externa 2. O ponto de *pinch* encontra-se na concentração 576,43 ppm, na mudança de vazão total de 376 para 313 t/h. O fluxograma é mostrado a seguir na Figura 4.57.

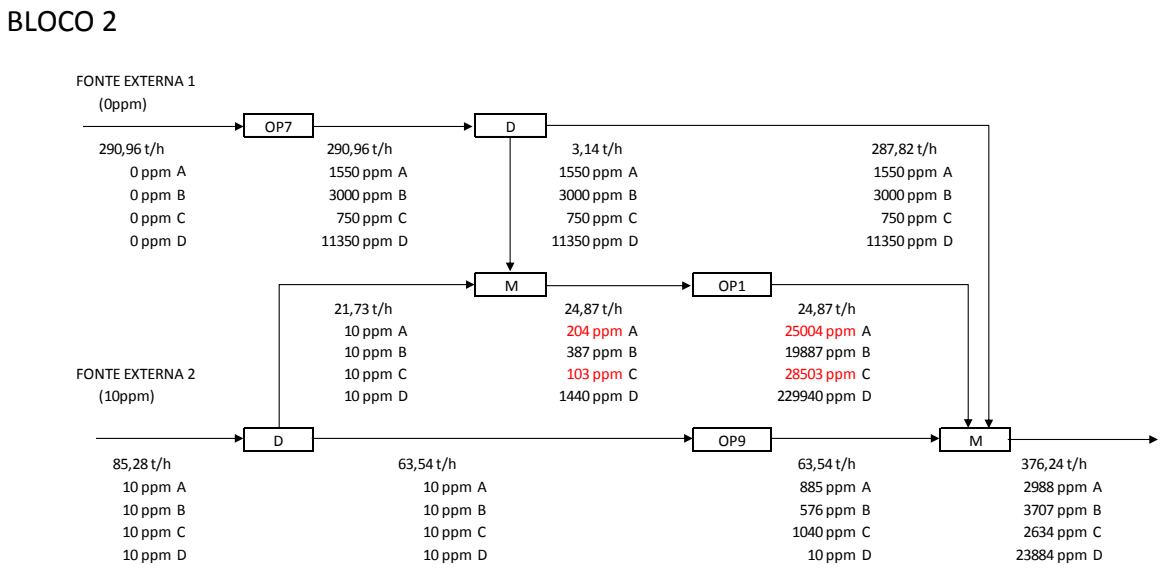

Figura 4.57 - Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 6.

Observam-se as violações nos limites máximos de concentração dos contaminantes A e C na entrada e saída da operação 1. Nota-se que as concentrações dos contaminantes a jusante da operação 7 são elevadas em comparação à entrada a 10 ppm proveniente da segunda fonte externa. Isso provavelmente contribuiu para essa extrapolação nos limites máximos de concentração. A Tabela 4.29 traz as vazões globais do processo.

Tabela 4.29 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 6.

BLOCO 2			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
7	290,96	-	287,82
1	-	21,73	24,87
9	-	63,54	63,54
TOTAL	**290,96**	**85,28**	**376,24**

4.1.1.2.7 ***Cenário 7 (7, 2, 3)***

A partir de agora entra na combinação a operação 2, neste cenário com e a operação 3, conforme mostra o DFA da Figura 4.58.

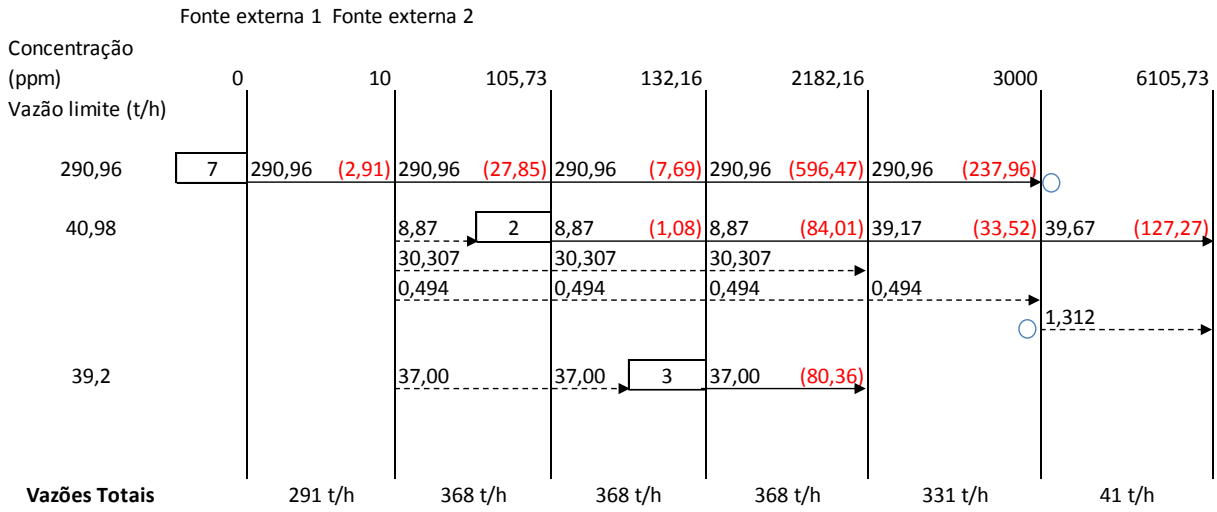

Figura 4.58 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 7.

A operação 7 disponibiliza seus 290,96 t/h a 3000 ppm. Uma parte, 1,13 t/h, é aproveitada pela operação 2 e é somada aos 39,67 t/h provenientes da segunda fonte externa. A operação 3 consome 37 t/h da fonte externa 2 e libera essa quantidade a 2182,16 ppm, sendo esta a concentração do ponto de *pinch*, na mudança de vazão total de 368 para 331 t/h. A Figura 4.59 mostra o fluxograma da rede.

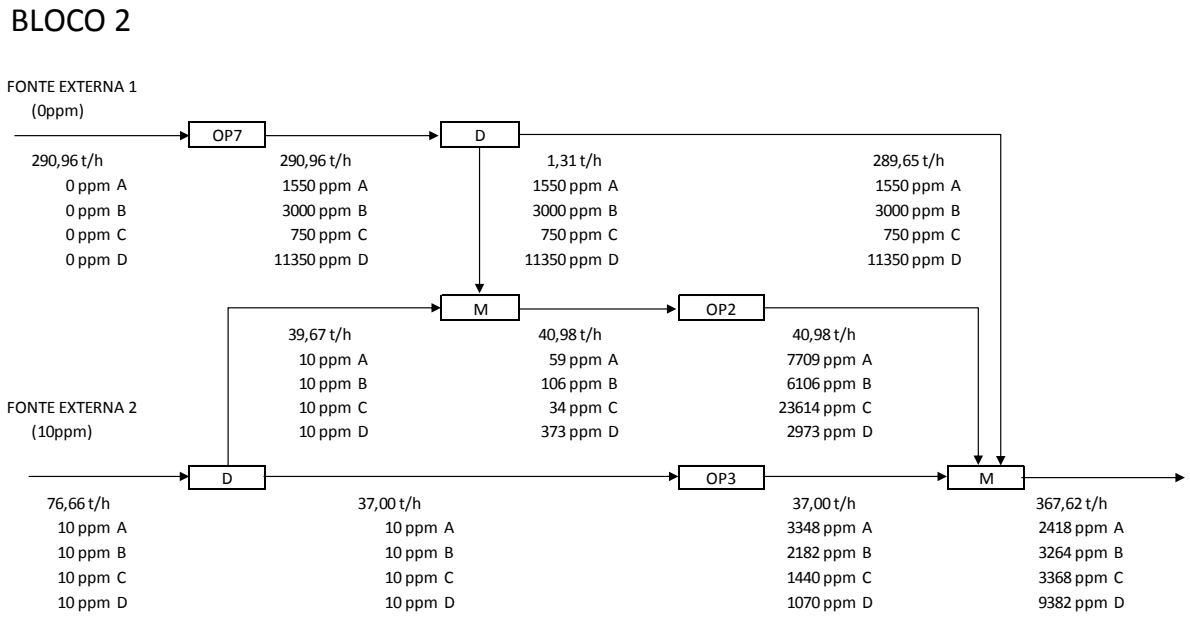

Figura 4.59 - Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 7.

Essa configuração não apresenta violações. Com a ausência da operação 1, isso não mais ocorre. Nota-se que mesmo com as altas concentrações a jusante da operação 7, as concentrações na entrada e saída da operação 2 permanecem dentro dos limites máximos. A Tabela 4.30 mostra as vazões globais do sistema.

Tabela 4.30 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 7.

BLOCO 2			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
7	290,96	-	289,65
2	-	39,67	40,98
3	-	37,00	37,00
TOTAL	**290,96**	**76,66**	**376,62**

4.1.1.2.8 ***Cenário 8 (7, 2, 4)***

Nesta configuração a operação 4 ocupa o lugar da 3 no cenário anterior. O DFA é exibido na Figura 4.60:

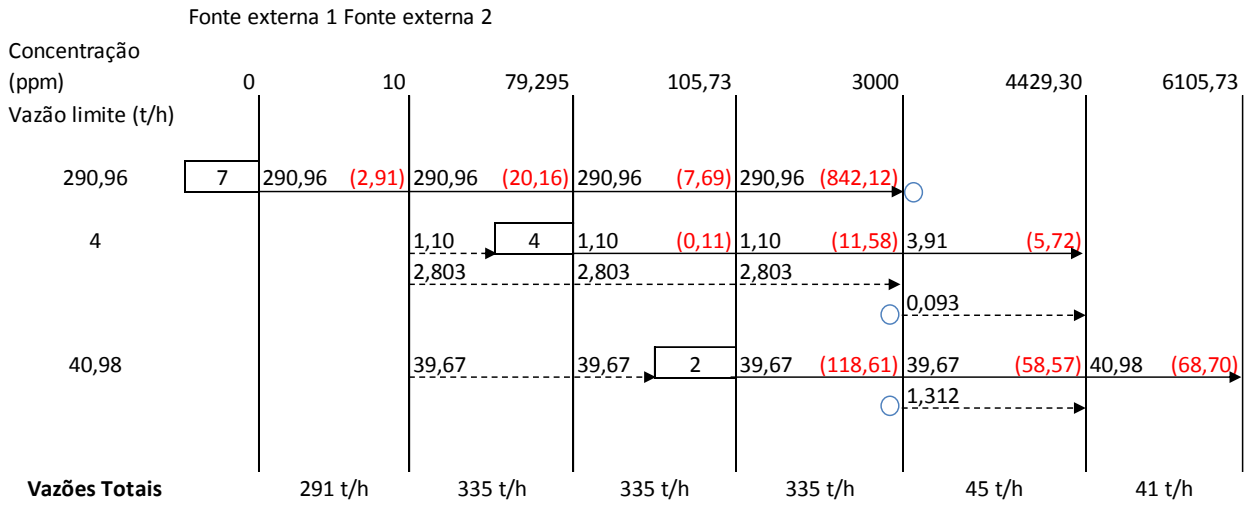

Figura 4.60 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 8.

As operações 3 e 4 são beneficiadas com a disponibilidade de água a 3000 ppm (concentração do *pinch*) pela operação 7. A operação 4 capta 0,093 t/h, que soma-se com 3,9 t/h consumidos da segunda fonte externa. Já a operação 2 recebe 1,31 t/h da operação 7 e consome da fonte externa 2 a 10 ppm, 39,7 t/h. O fluxograma é mostrado na Figura 4.61.

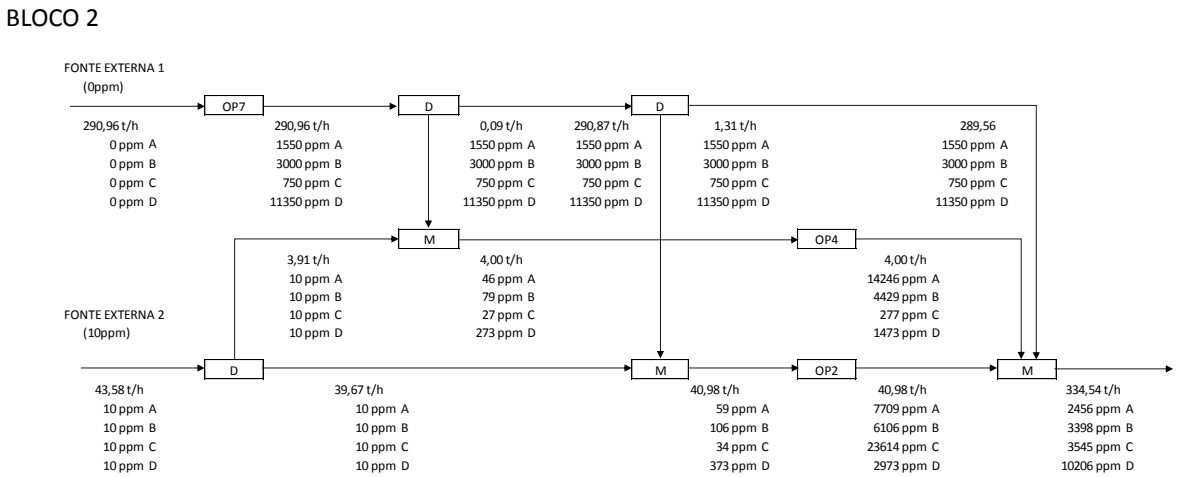

Figura 4.61 - Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 8.

Não há violações nas concentrações dos contaminantes em todas as operações. Observa-se uma diminuição de aproximadamente 9% no consumo global favorecida pela presença da operação 4, que possui limite máximo de 4 t/h, contra 37 t/h da operação 3 no cenário anterior. As vazões totais estão presentes na Tabela 4.31.

Tabela 4.31 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 8.

BLOCO 2			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
7	290,96	-	289,56
2	-	39,67	40,98
4	-	3,91	4,00
TOTAL	**290,96**	**43,58**	**334,54**

4.1.1.2.9 ***Cenário 9 (7, 2, 5)***

A operação 4 é substituída pela 5 para esta combinação, conforme mostra o DFA da Figura 4.62.

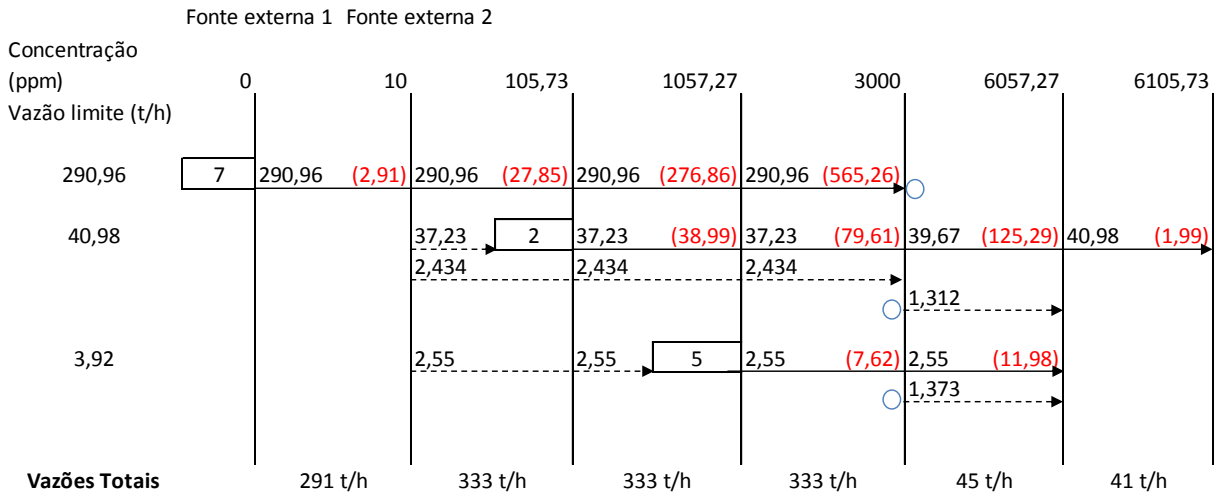

Figura 4.62 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 9.

Como ocorreu no cenário anterior, duas operações são beneficiadas pela fonte interna da operação 7 a 3000 ppm. A operação 2 recebe 1,31 t/h, que soma-se a 2,43 t/h captados da segunda fonte externa. Já a operação 5 recebe 1,37 t/h da operação 7 e consome 2,55 t/h da fonte externa 2.

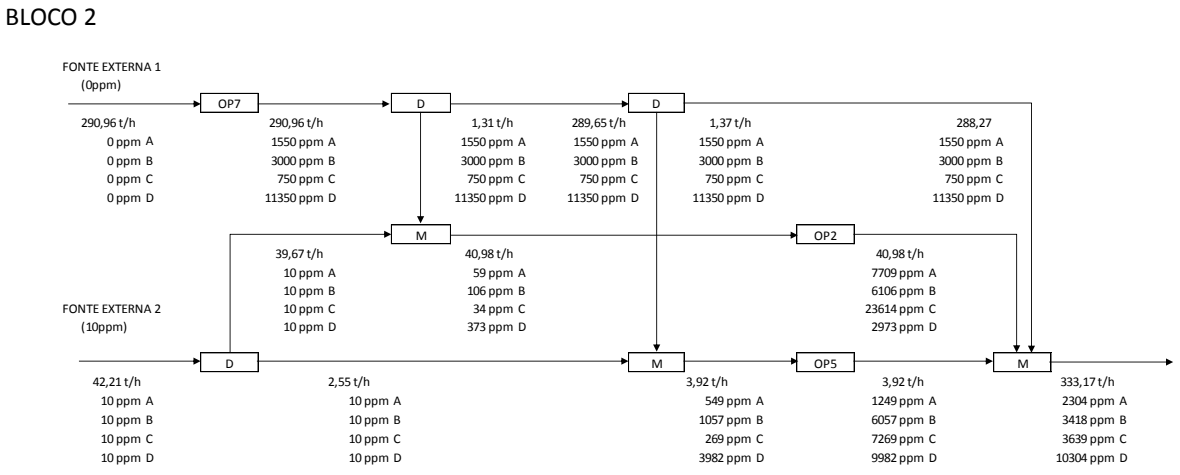

Figura 4.63 - Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 9.

Também não há violações para este cenário e nota-se uma ligeira redução na captação de água em relação ao cenário anterior, conforme apresenta a Tabela 4.32.

Tabela 4.32 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 9.

BLOCO 2			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
7	290,96	-	288,27
2	-	39,67	40,98
5	-	2,55	3,92
TOTAL	**290,96**	**42,21**	**333,17**

4.1.1.2.10 ***Cenário 10 (7, 2, 8)***

Para esta combinação entra a operação 8 em substituição da 5 do cenário anterior. O DFA é mostrado na Figura 4.64.

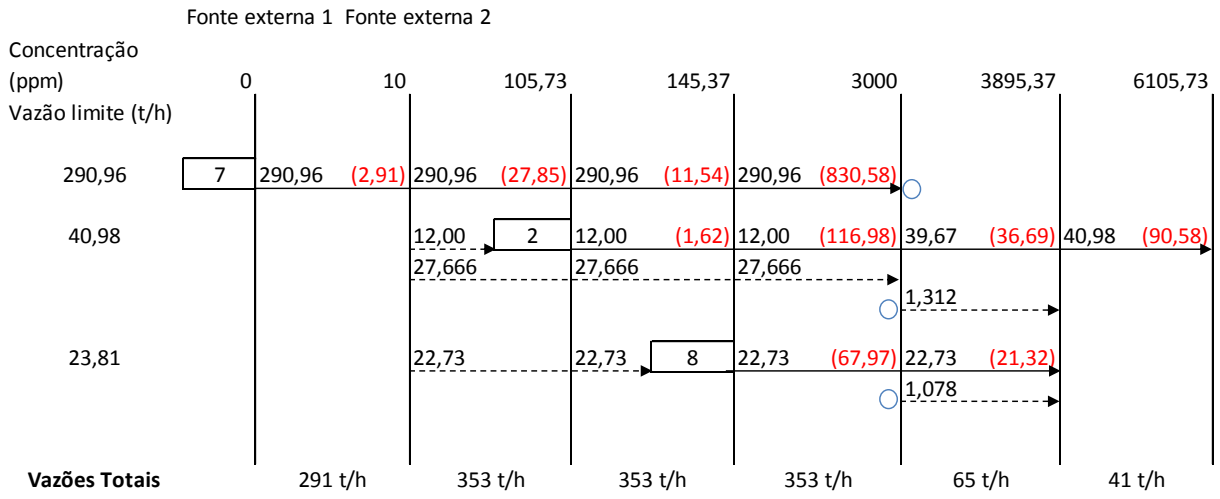

Figura 4.64 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 10.

A substituição da operação 5 pela 8 foi possível sem que houvesse violações nas concentrações dos contaminantes e mantendo o reúso da operação de referência nas demais operações. As operações 2 e 8 recebem 1,31 t/h e 1,078 da operação 7, respectivamente. O total de água consumida por ambas as operações da fonte externa 2 a 10 ppm é 62,39 t/h. O fluxograma é mostrado adiante.

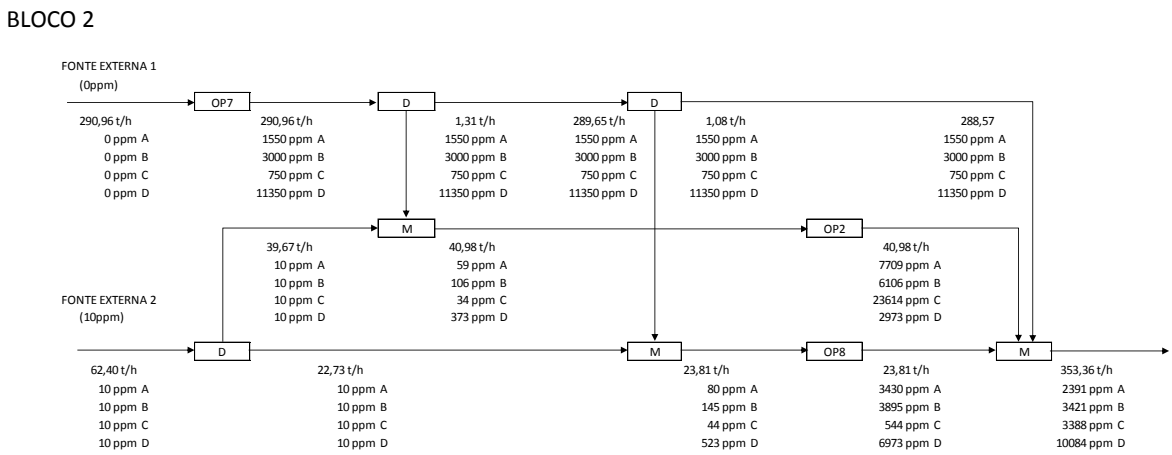

Figura 4.65 - Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 10.

A Tabela 4.33 mostra os dados globais.

Tabela 4.33 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 10.

BLOCO 2			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
7	290,96	-	288,57
2	-	39,67	40,98
8	-	22,73	23
TOTAL	**290,96**	**62,40**	**353,36**

4.1.1.2.11 ***Cenário 11 (7, 2, 9)***

Essa é a última configuração com a presença da operação 2 e a operação 9 substitui a 8 do cenário anterior. O DFA é exibido na Figura 4.66.

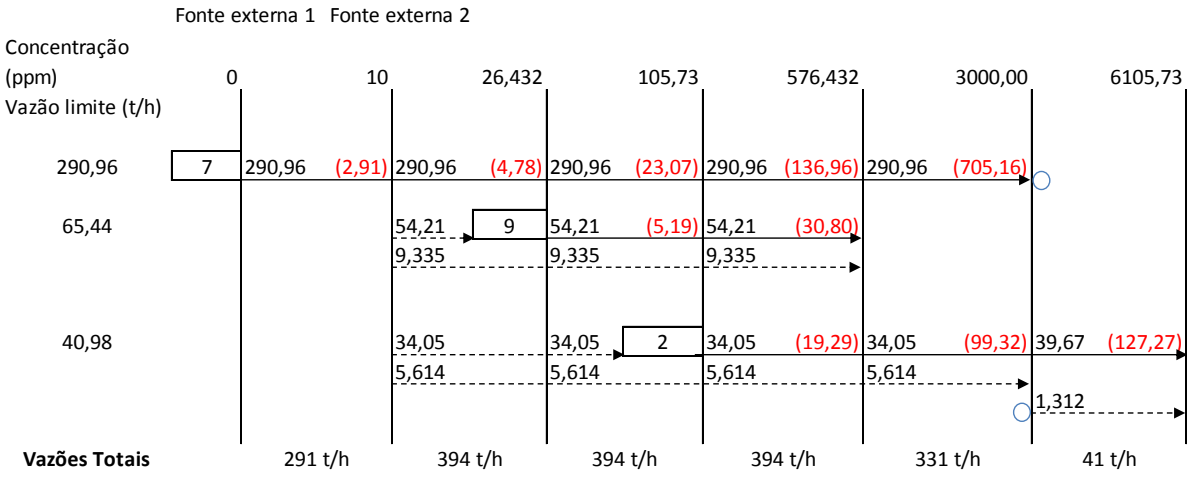

Figura 4.66 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 11.

Desta vez não é possível promover o reúso em mais de uma operação. Apenas a operação 2 se beneficia captando 1,31 t/h da operação 7 e 39,66 t/h da segunda fonte externa. A operação 9 descarta toda água que consome da fonte externa 2 (63,55 t/h). O fluxograma da rede é mostrado na Figura 4.67.

BLOCO 2

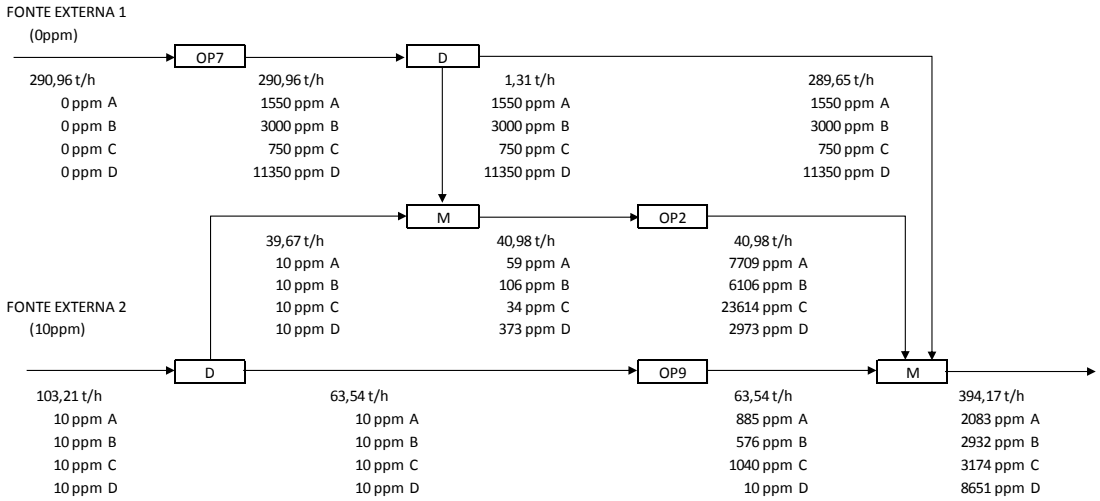

Figura 4.67 - Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 11.

Não há violações e o consumo aumentou em relação aos cenários anteriores, em decorrência do limite máximo de vazão da operação 9. A Tabela 4.34 mostra as vazões globais do processo.

Tabela 4.34 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 11.

BLOCO 2			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
7	290,96	-	289,65
2	-	39,67	40,98
9	-	63,54	63,54
TOTAL	**290,96**	**103,21**	**394,17**

4.1.1.2.12 ***Cenário 12 (7, 3, 4)***

Uma nova série de combinações se inicia a partir desse cenário. As operações 7 e 3 estarão fixas, enquanto que o terceiro campo alternará. O DFA dessa configuração é mostrado na Figura 4.68.

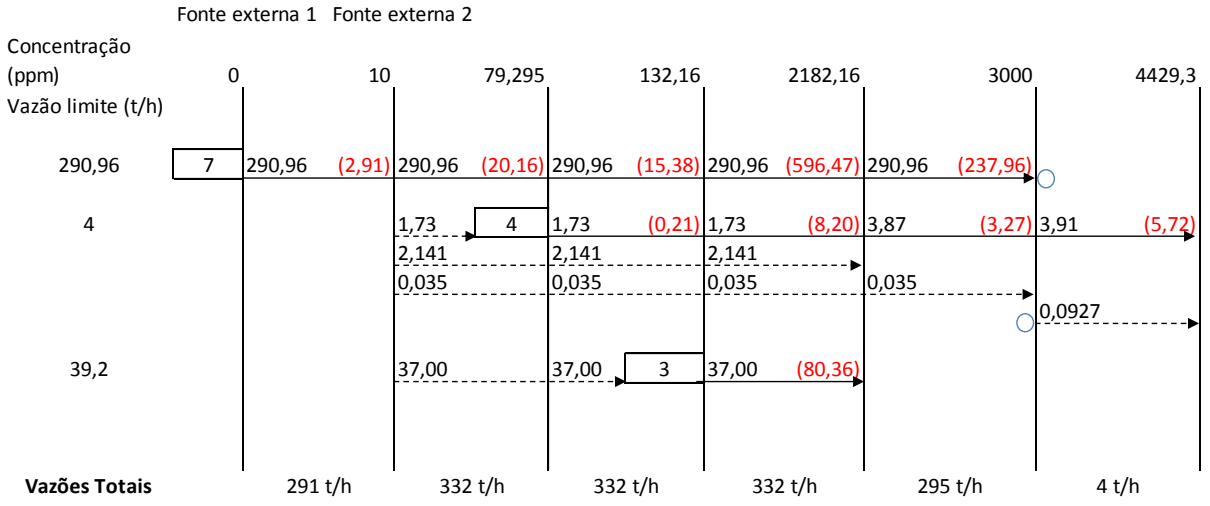

Figura 4.68 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 12.

A operação 7 disponibiliza 290,96 t/h a 3000 ppm. Uma parte, 0,0927 t/h é aproveitada pela operação 4 e soma-se às 3,9 t/h provenientes da segunda fonte externa. A operação 3 descarta toda água que consome da fonte externa 2. O ponto de *pinch* está presente na concentração de 2182,16 ppm, mudança de 332 para 295 t/h na vazão total. O fluxograma é exibido na Figura 4.69.

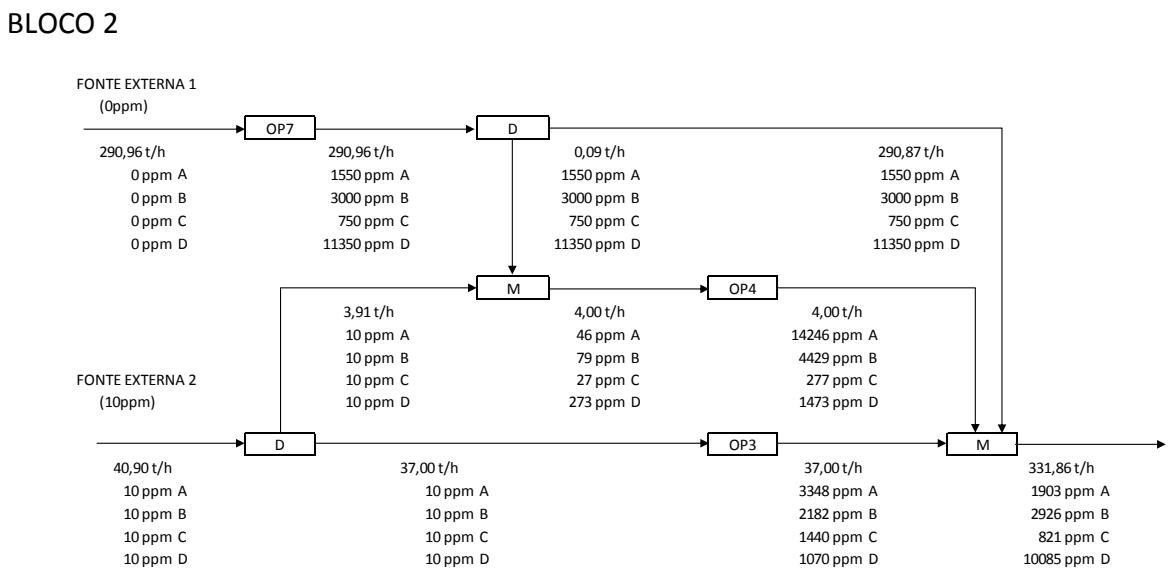

Figura 4.69 - Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 12.

O consumo e descarte diminuíram em relação ao cenário anterior em virtude da presença da operação 4. A Tabela 4.34 contendo as vazões globais da rede é mostrada a seguir:

Tabela 4.35 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 12.

BLOCO 2			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
7	290,96	-	290,87
3	-	37,00	37,00
4	-	3,91	4,00
TOTAL	**290,96**	**40,90**	**331,86**

4.1.1.2.13 ***Cenário 13 (7, 3, 5)***

Agora a operação 4 dá lugar para a 5 como mostra o DFA da Figura 4.70.

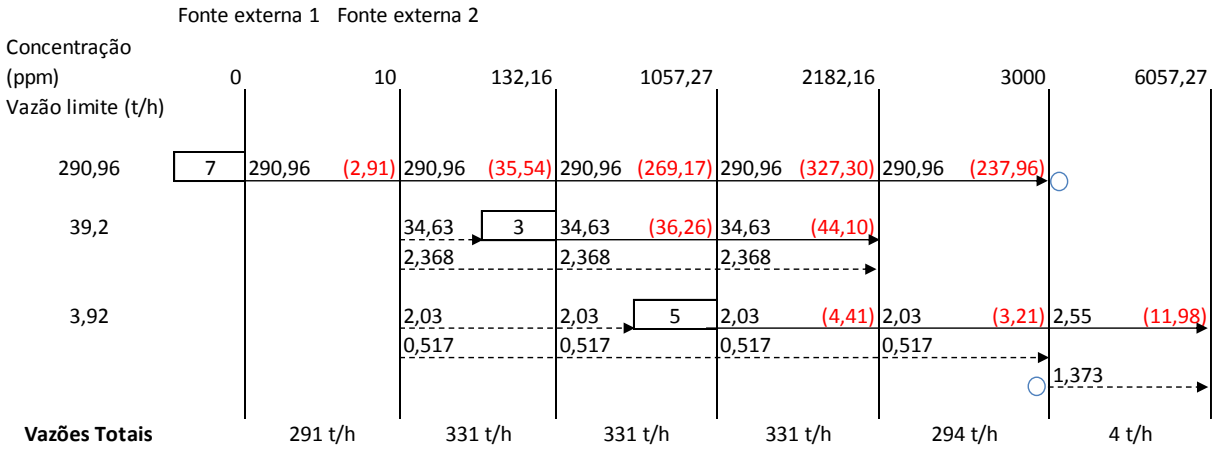

Figura 4.70 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 13.

A operação 5 recebe 1,37 t/h da operação 7 a 3000 ppm. Essa quantidade se soma com 2,55 t/h oriundas da segunda fonte externa. Já a operação 3 descarta toda vazão (36,99 t/h) que consome da fonte externa 2. A concentração do *pinch* é igual a 2182,16 ppm. O fluxograma é mostrado na Figura 4.71.

BLOCO 2

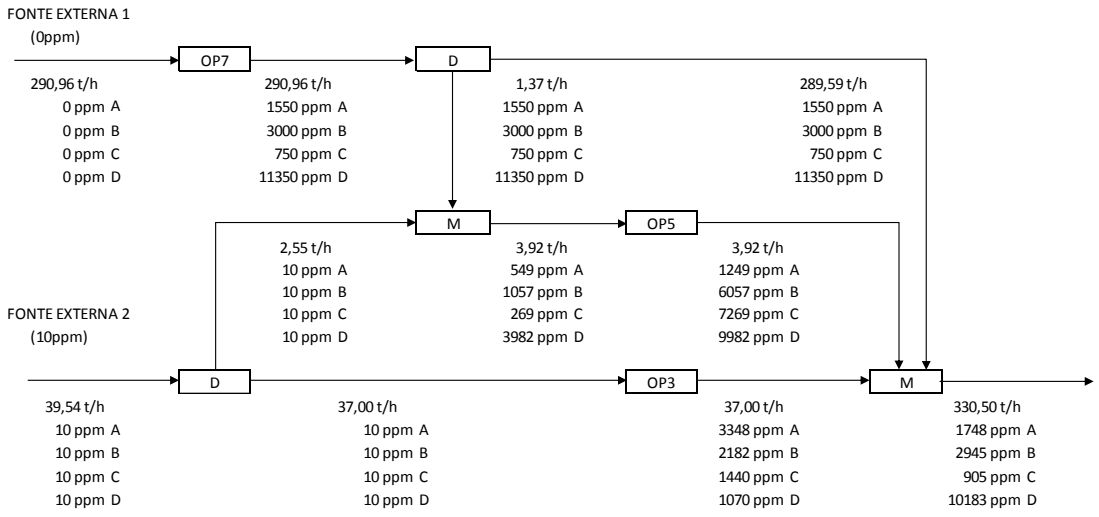

Figura 4.71 - Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 13.

Não há violações e a quantidade captada é semelhante a do cenário anterior. As vazões globais são mostradas na Tabela 4.36.

Tabela 4.36 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 13.

BLOCO 2			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
7	290,96	-	289,59
3	-	37,00	37,00
5	-	2,55	3,92
TOTAL	**290,96**	**39,54**	**330,50**

4.1.1.2.14 ***Cenário 14 (7, 3, 8)***

Nesse cenário a operação 8 ocupa o lugar da 5 conforme mostra o DFA da Figura 4.72.

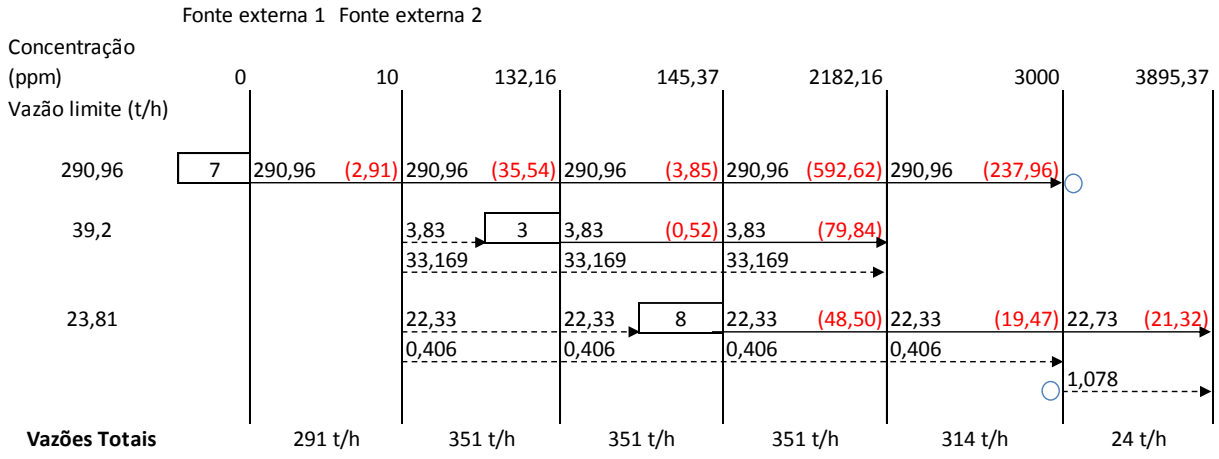

Figura 4.72 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 14.

A operação 8 recebe 1,078 t/h da operação 7 a 3000 ppm. O restante (22,73 t/h) é consumido da segunda fonte externa a 10 ppm. A operação 3 mais uma vez descarta a vazão consumida de 36,99 t/h. A concentração do *pinch* é de 3282,16 ppm. O fluxograma correspondente é mostrado na Figura 4.73.

BLOCO 2

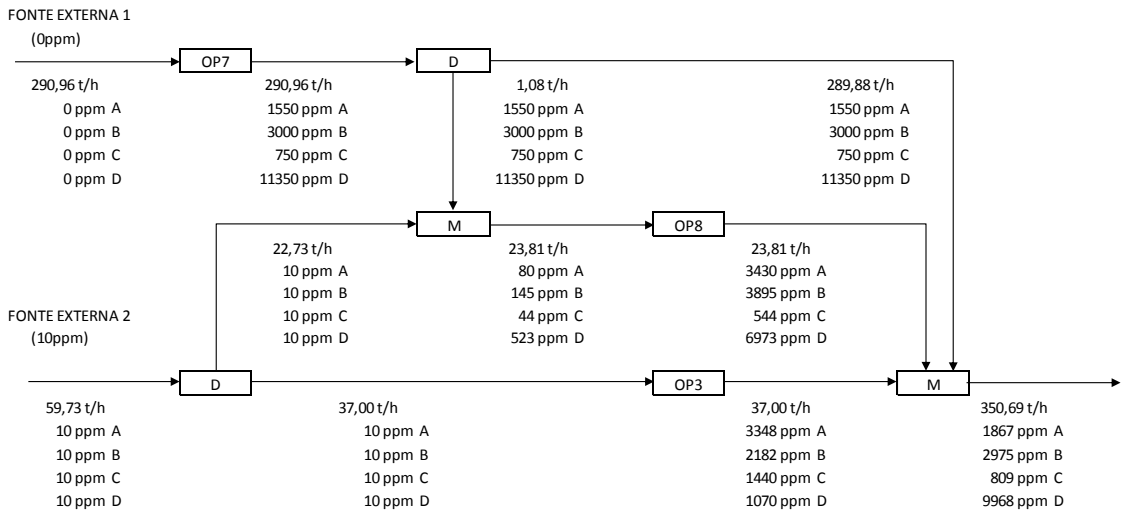

Figura 4.73 - Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 14.

Não há violações e a presença da operação 8 resulta em um maior consumo de água da segunda fonte segunda fonte externa. A

Tabela 4.37 mostra as vazões da rede.

Tabela 4.37 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 14.

BLOCO 2			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
7	290,96	-	289,88
3	-	37,00	37,00
8	-	22,73	23,81
TOTAL	**290,96**	**59,73**	**350,69**

4.1.1.2.15 ***Cenário 15 (7, 3, 9)***

A operação 8 dá lugar a 9 e o DFA é mostrado na Figura 4.74.

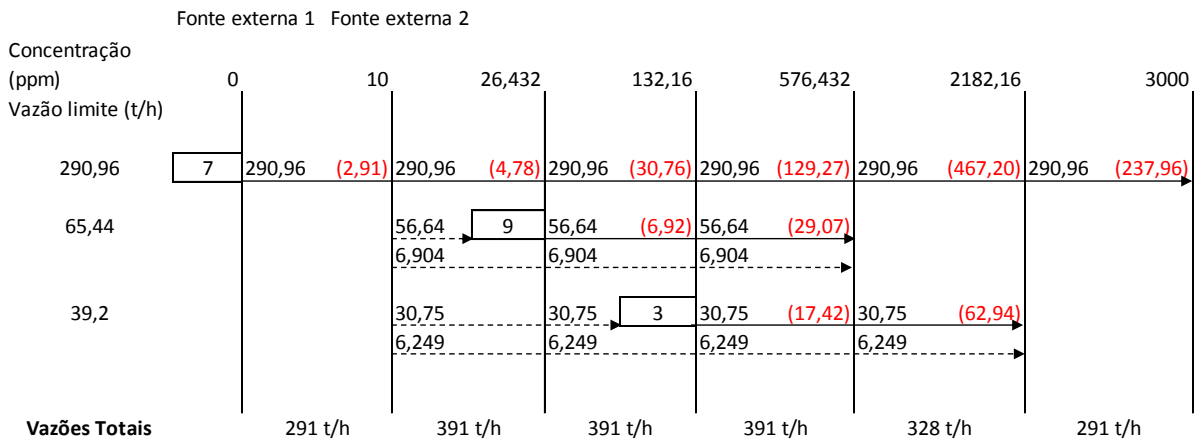

Figura 4.74 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 15.

Nesse cenário não há reúso em qualquer operação, pois a última concentração deslocada é de 3000 ppm, que é a máxima concentração na saída da operação 7. Não havendo para quem distribuir, toda vazão é descartada. De maneira análoga a operação 9 descarta 63,54 t/h consumidos da fonte externa 2, assim como a operação 3, que consome 36,99 t/h da segunda fonte externa. O fluxograma da rede é exibido a na Figura 4.75.

BLOCO 2

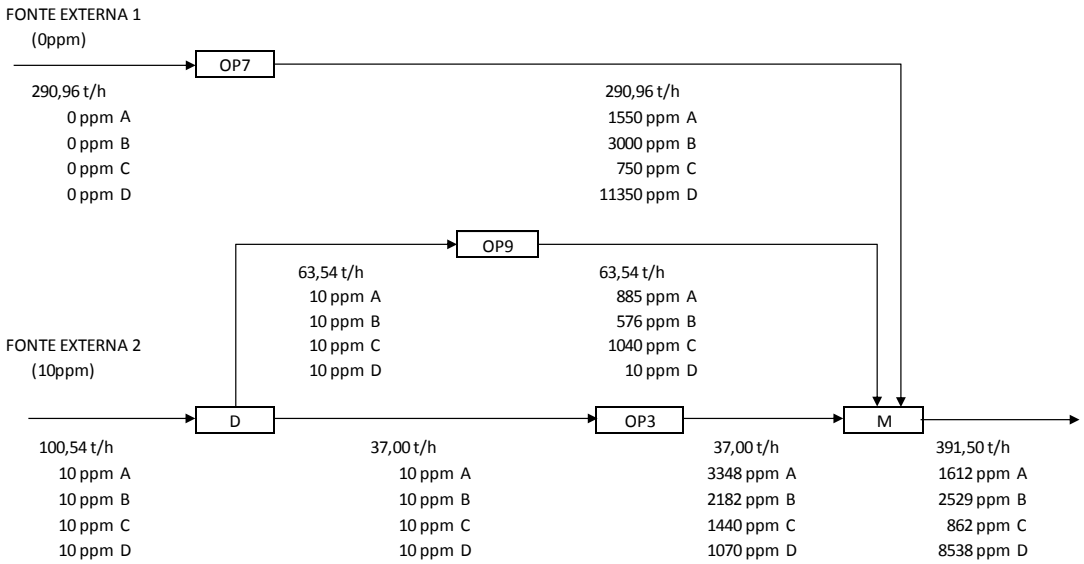

Figura 4.75 - Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 15.

Não há violações, entretanto como não foi possível disponibilizar água para reúso, o consumo aumentou significativamente conforme mostra a Tabela 4.38.

Tabela 4.38 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 15.

BLOCO 2			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
7	290,96	-	290,96
3	-	37,00	37,00
9	-	63,54	63,54
TOTAL	**290,96**	**100,54**	**391,50**

4.1.1.2.16 ***Cenário 16 (7, 4, 5)***

As operações 3 e 9 dão lugar às operações 4 e 5 nessa nova combinação. O DFA é mostrado na Figura 4.76.

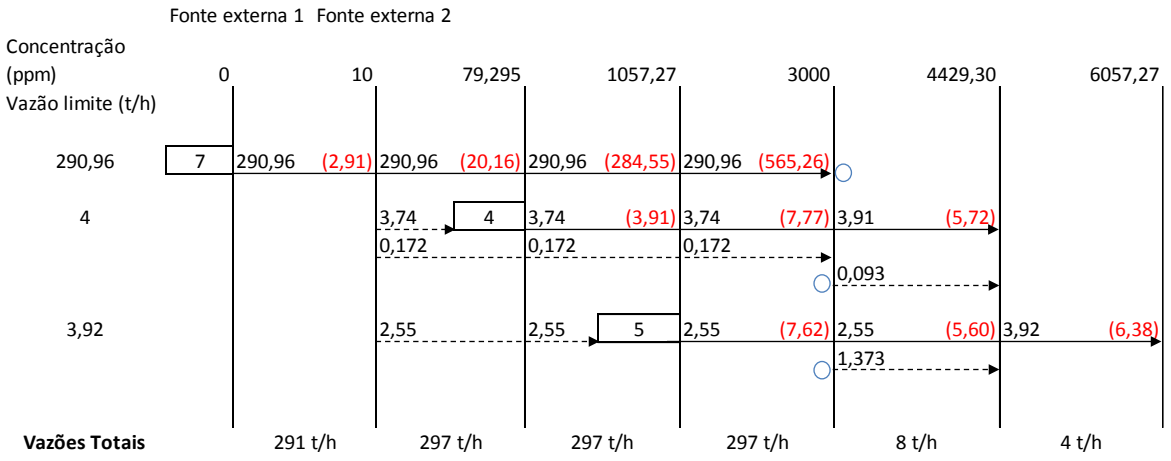

Figura 4.76 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 16.

As operações 4 e 5 recebem 0,093 e 1,37 t/h da operação 7 a 3000 ppm (concentração do *pinch*), respectivamente. Elas consomem ao todo 6,46 t/h. Este é o menor descarte até então observado para o bloco 2. O fluxograma é mostrado na Figura 4.77.

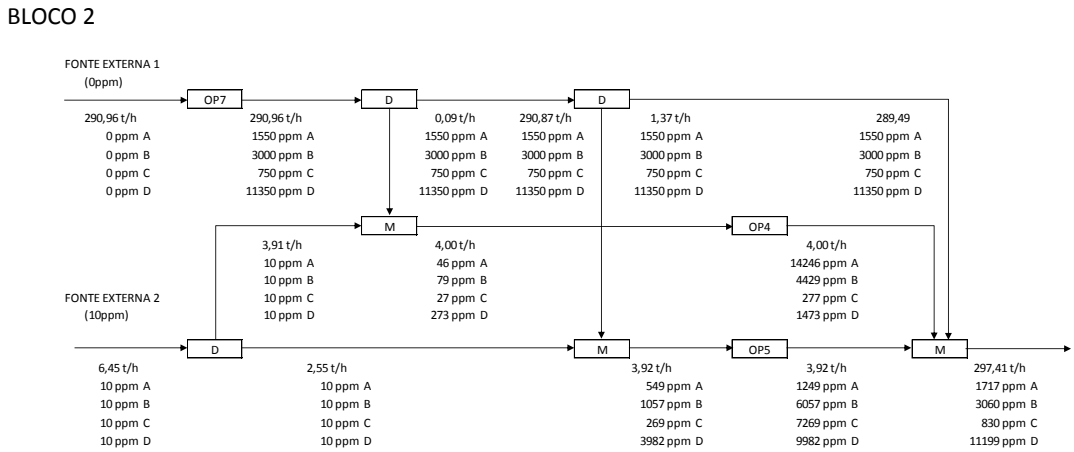

Figura 4.77 - Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 16.

Não há violações e como já foi dito a presença das operações 4 e 5 contribuem para o descarte de 297,41 t/h. Os dados globais são mostrados na Tabela 4.39.

Tabela 4.39 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 16.

BLOCO 2			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
7	290,96	-	289,49
4	-	3,91	4,00
5	-	2,55	3,92
TOTAL	**290,96**	**6,45**	**297,41**

4.1.1.2.17 ***Cenário 17 (7, 4, 8)***

Agora a operação 8 faz parte do cenário. O DFA é mostrado na Figura 4.78.

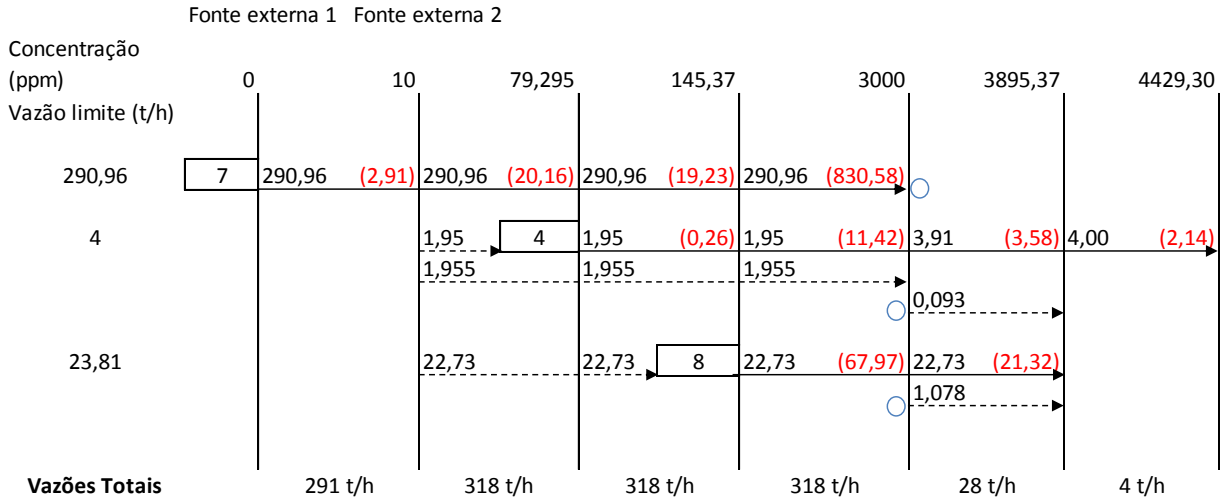

Figura 4.78 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 17.

As operações 4 e 8 recebem 0,093 e 1,078 t/h de água da operação 7 a 3000 ppm (concentração do *pinch*), respectivamente. Ambas totalizam um consumo de 26,64 t/h da fonte externa 2. O fluxograma da rede é mostrado a seguir.

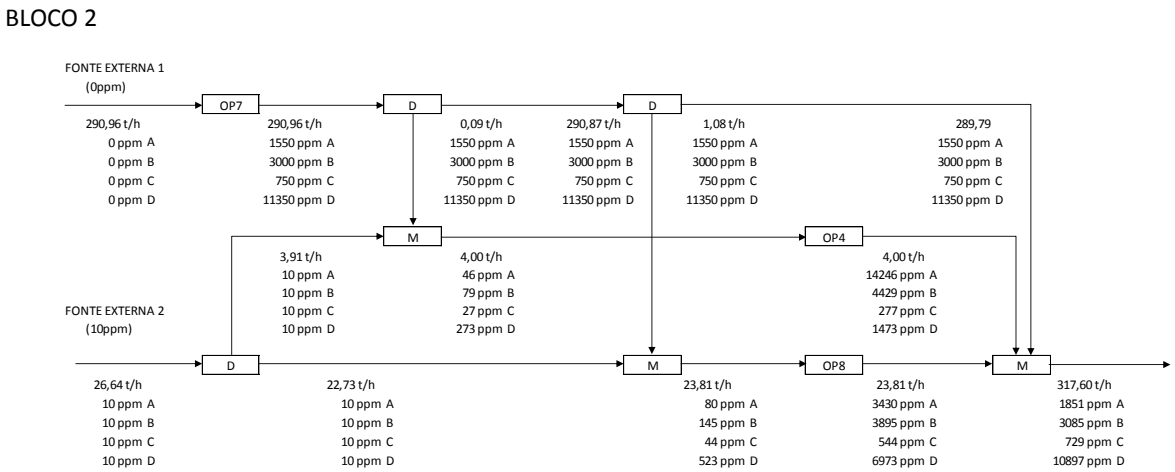

Figura 4.79 - Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 17.

Também não há violações nesse cenário e as vazões globais são mostradas na Tabela 4.40.

Tabela 4.40 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 17.

BLOCO 2			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
7	290,96	-	289,79
4	-	3,91	4,00
8	-	22,73	23,81
TOTAL	**290,96**	**26,64**	**317,60**

4.1.1.2.18 ***Cenário 18 (7, 4, 9)***

A operação 9 toma o lugar da 8 no cenário anterior para compor o DFA mostrado na Figura 4.80.

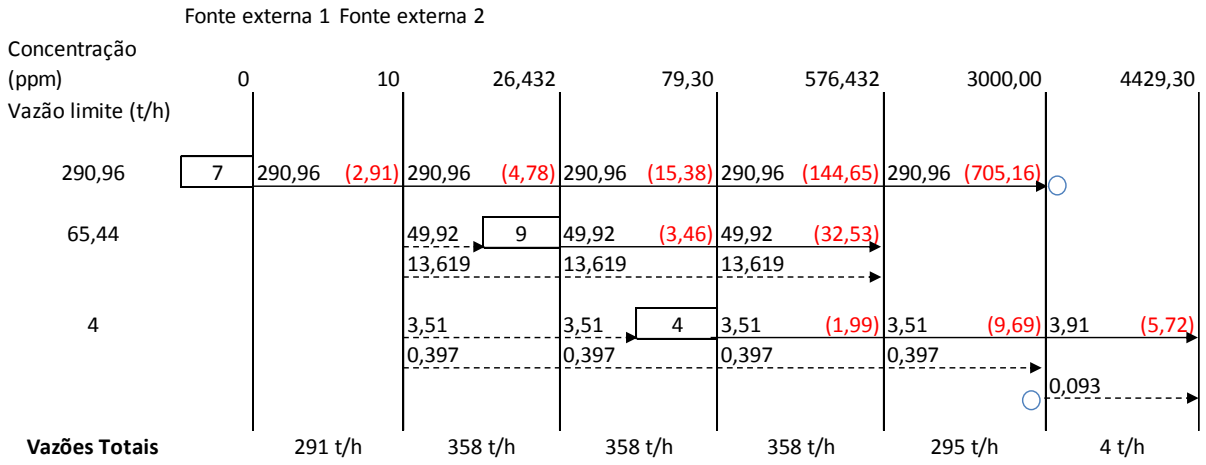

Figura 4.80 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 18.

Apenas a operação 4 recebe água da operação 7. Já a operação 9 descarta toda água consumida da fonte externa 2 (63,54 t/h). O fluxograma é exibido na Figura 4.81.

BLOCO 2

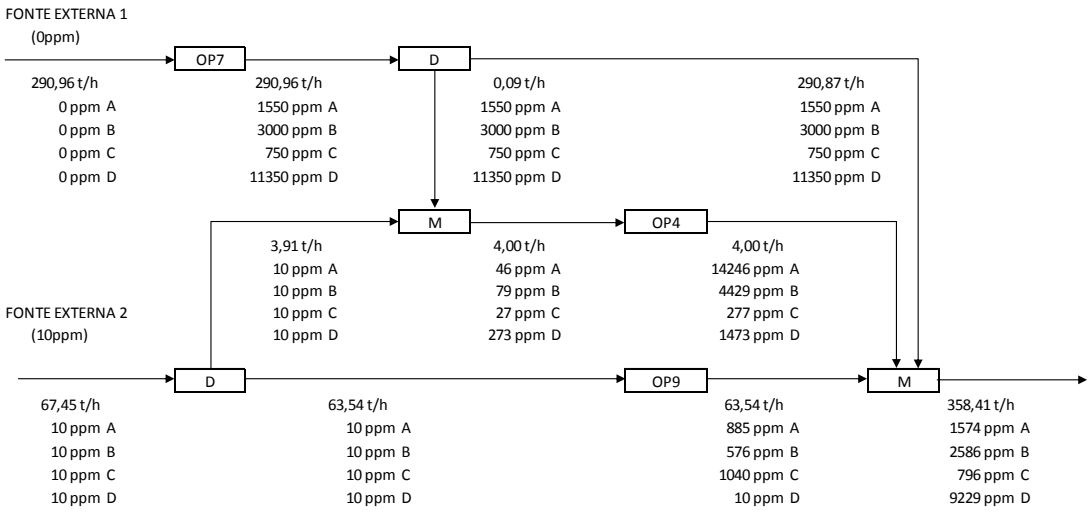

Figura 4.81 - Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 18.

Não ocorrem violações e a presença da operação 9 provoca um aumento do consumo de água da fonte externa 2. As vazões são mostradas na

Tabela 4.41.

Tabela 4.41 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 18.

BLOCO 2			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
7	290,96	-	290,87
4	-	3,91	4,00
9	-	63,54	63,54
TOTAL	**290,96**	**67,45**	**358,41**

4.1.1.2.19 ***Cenário 19 (7, 5, 8)***

Nesse cenário são introduzidas a operação 5 e a 8 e o DFA contém os cálculos mostrados na Figura 4.82.

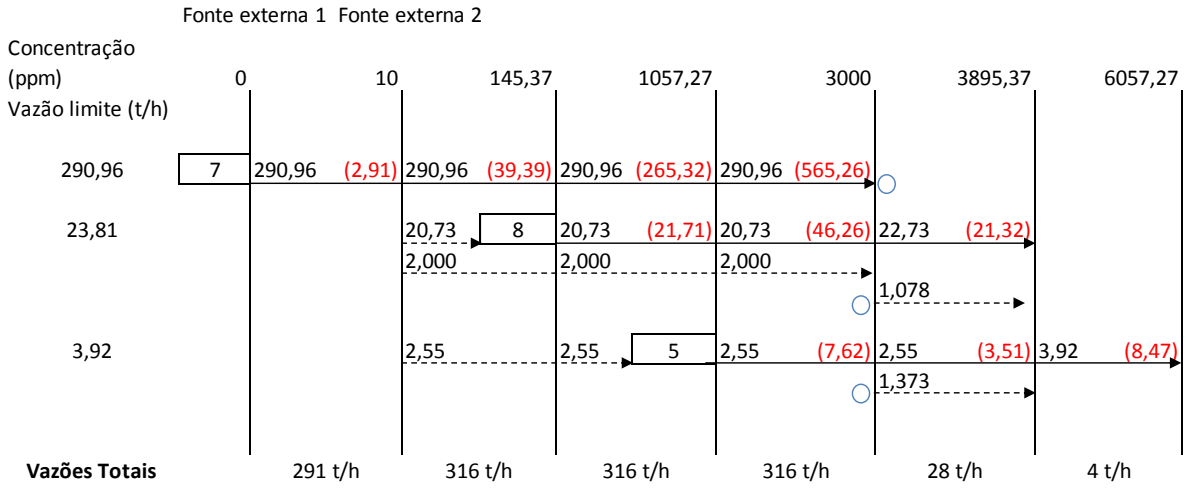

Figura 4.82 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 19.

As operações 5 e 2 são beneficiadas pela disponibilidade de água a 3000 ppm da operação 7. Elas consomem juntas 25,28 t/h da fonte externa 2.O fluxograma é exibido na Figura 4.83.

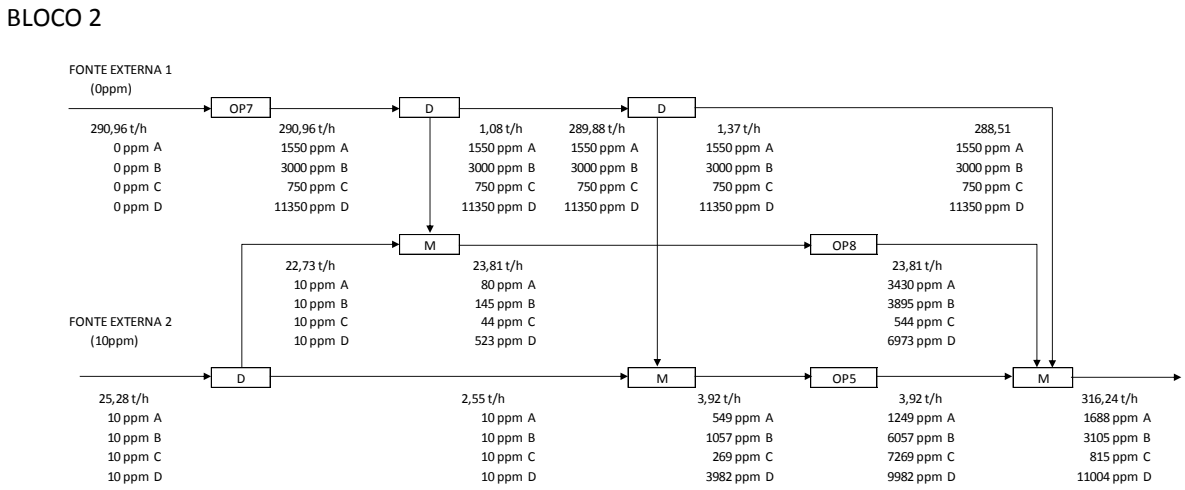

Figura 4.83 - Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 19.

Não há violações e o consumo de água tem um aumento por conta da presença da operação 8. As vazões são mostradas na

Tabela 4.42.

Tabela 4.42 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 19.

BLOCO 2			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
7	290,96	-	288,51
5	-	2,55	3,92
8	-	22,73	23,81
TOTAL	**290,96**	**25,28**	**316,24**

4.1.1.2.20 ***Cenário 20 (7, 5, 9)***

A operação 9 dá lugar à operação 8 do cenário anterior e o DFA é mostrado na Figura 4.84.

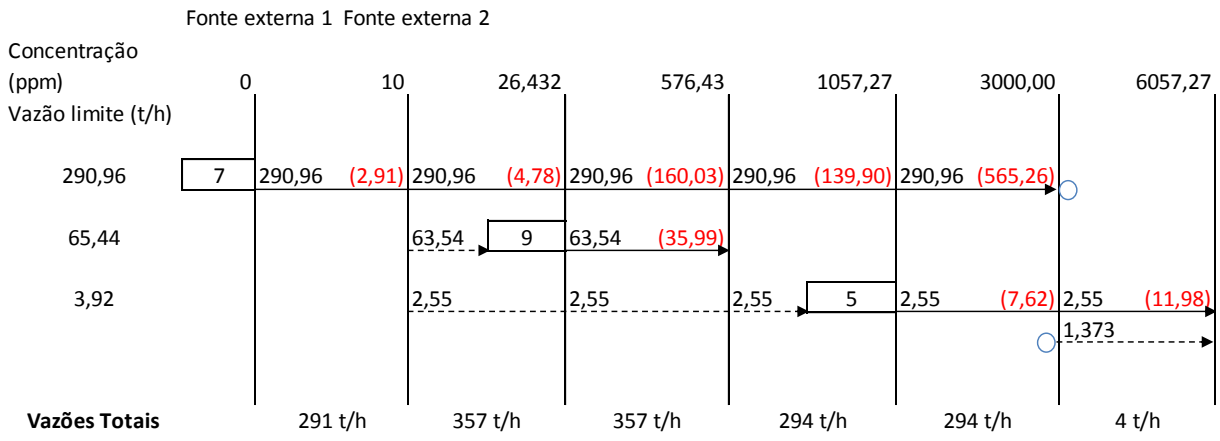

Figura 4.84 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 20.

A operação 5 consome 1,37 t/h da operação 7 a 3000 ppm que se somam às 2,55 t/h consumidas da fonte externa 2 a 10 ppm. Já a operação 9 descarta toda água que consome a 10 ppm. A concentração do *pinch* é igual a 576,43 ppm. O fluxograma é mostrado na Figura 4.85.

BLOCO 2

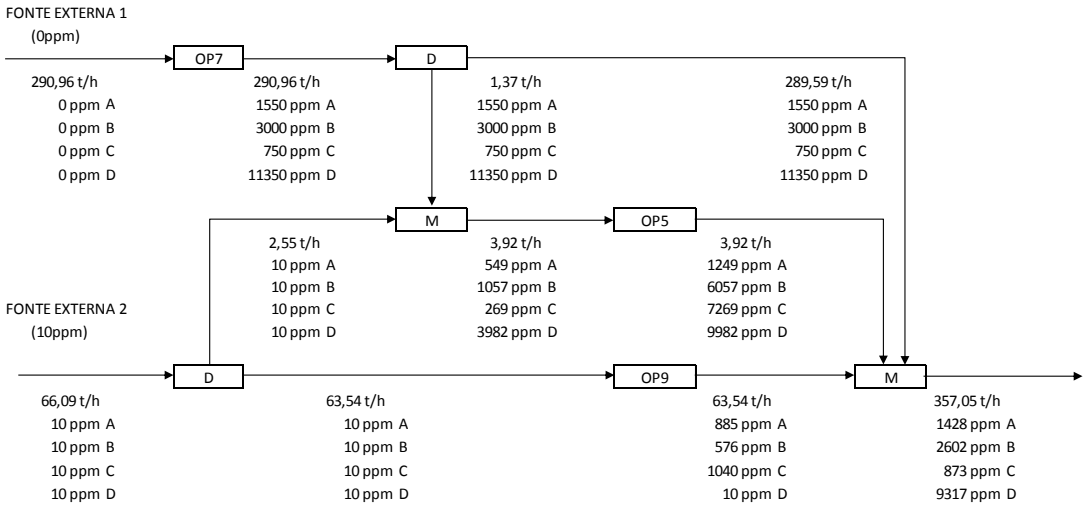

Figura 4.85 - Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 20.

Assim como no cenário anterior não ocorrem violações nas concentrações dos contaminantes e as vazões globais são mostradas na Figura 4.45.

Tabela 4.43 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 20.

BLOCO 2			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
7	290,96	-	289,59
5	-	2,55	3,92
9	-	22,73	63,54
TOTAL	**290,96**	**66,09**	**357,05**

4.1.1.2.21 ***Cenário 21 (7, 8, 9)***

O último cenário possível para o bloco 2 é composto pelas operações 7, 8 e 9. O DFA é mostrado na Figura 4.86.

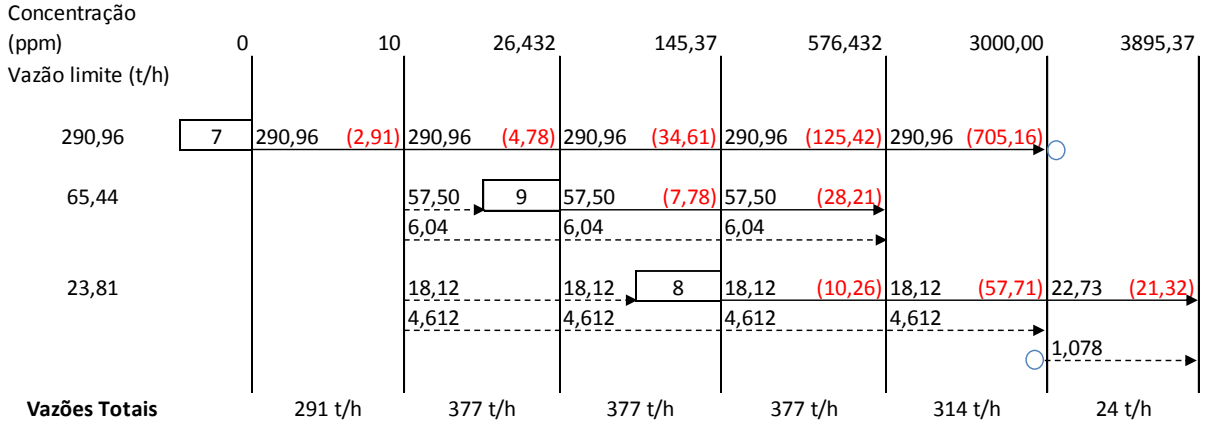

Figura 4.86 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 2 – Cenário 21.

A operação 8 recebe 1,078 t/h da operação 7 a 3000 ppm. Os demais 22,73 t/h são consumidos da fonte externa 2 a 10 ppm. A operação 9 não participa do reúso e descarta toda água que consome (63,54 t/h). O fluxograma da rede é exibido a seguir.

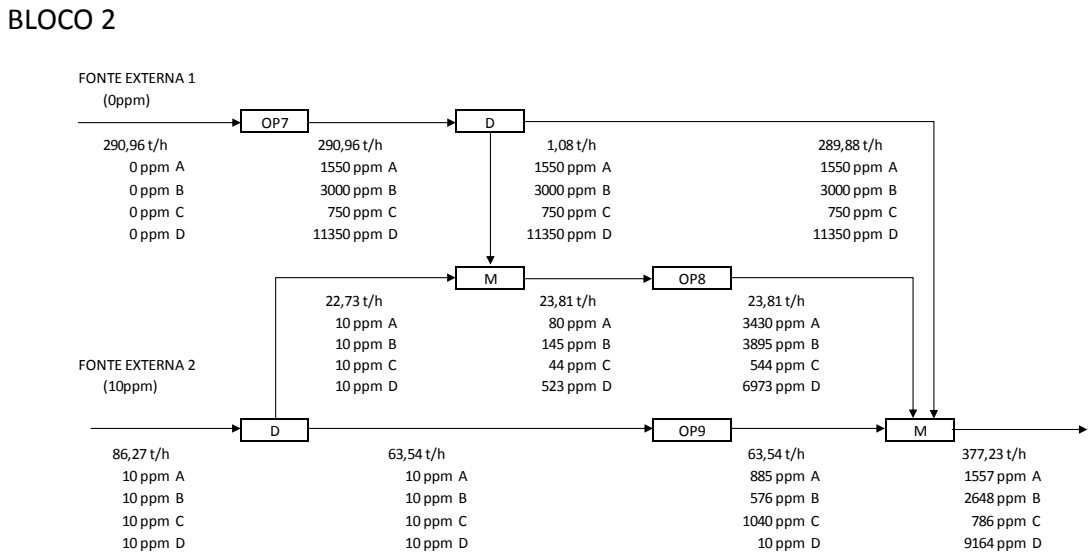

Figura 4.87 - Fluxograma – Bloco 2 – Cenário 21.

Não há violações, mas se nota um aumento considerável na captação de água. Os limites máximos das operações 8 e 9 justificam esse variação. Os dados de vazão são mostrados na Tabela 4.44.

Tabela 4.44 - Resultados do Bloco 2 – Cenário 21.

BLOCO 2			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
7	290,96	-	289,88
8	-	22,73	23,81
9	-	63,54	63,54
TOTAL	**290,96**	**86,27**	**377,23**

4.1.1.2.22 ***Conclusões Parciais***

Mais uma vez a presença das operações 4 e 5 determina que o cenário 16 forme o bloco 2. Em função da menor captação/descarte de água, este será utilizado como referência para decidir a melhor opção para este bloco. A captação total de água foi de 297,41 t/h. No entanto, estas operações já fazem parte do cenário 16 do bloco 1. Resta saber se é melhor deixar as operações 4 e 5 no bloco 1, cuja captação total foi de 7,12 t/h, ou no 2. A Tabela 4.45 mostra um resumo dos resultados obtidos em cada bloco.

Tabela 4.45 - Resumo dos resultados obtidos em cada cenário do bloco 2.

	Operações	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**	**Violação?**
Cenário 1	1, 2 e 7	290,96	62,07	353,03	**SIM**
Cenário 2	1, 3 e 7	290,96	58,73	349,69	**SIM**
Cenário 3	1, 4 e 7	290,96	25,67	316,63	**SIM**
Cenário 4	1, 5 e 7	290,96	26,95	317,91	**SIM**
Cenário 5	1, 8 e 7	290,96	44,47	335,43	**SIM**
Cenário 6	1, 9 e 7	290,96	85,28	376,24	**SIM**
Cenário 7	2, 3 e 7	290,96	76,66	376,62	NÃO
Cenário 8	2, 4 e 7	290,96	43,58	334,54	NÃO
Cenário 9	2, 5 e 7	290,96	42,21	333,17	NÃO
Cenário 10	2, 8 e 7	290,96	62,40	353,36	NÃO
Cenário 11	2, 9 e 7	290,96	103,21	394,17	NÃO
Cenário 12	3, 4 e 7	290,96	40,90	331,86	NÃO
Cenário 13	3, 5 e 7	290,96	39,54	330,50	NÃO
Cenário 14	3, 8 e 7	290,96	59,73	350,69	NÃO
Cenário 15	3, 9 e 7	290,96	100,54	391,50	NÃO
Cenário 16	4, 5 e 7	290,96	6,45	297,41	**NÃO**
Cenário 17	4, 8 e 7	290,96	26,64	317,60	NÃO
Cenário 18	4, 9 e 7	290,96	67,45	358,41	NÃO
Cenário 19	5, 8 e 7	290,96	25,28	316,24	NÃO
Cenário 20	5, 9 e 7	290,96	66,09	357,05	NÃO
Cenário 21	8, 9 e 7	290,96	86,27	377,23	NÃO

Caso o cenário 16 do bloco 2 seja o escolhido, a escolha do cenário 16 do primeiro bloco fica inviável, pois uma vez escolhido o cenário 16 do bloco 2, nenhum outro cenário do bloco 1 que contenha as operações 4 ou 5, bem como apresentem violações, poderá ser escolhido. Logo, o segundo cenário com melhor resultado no bloco 1 é o cenário 5 composto pelas operações 10, 1 e 8, apresentando uma vazão total de captação/descarte de 47,63 t/h. Dessa forma apresentam-se como alternativas para a escolha de uma possível configuração, os cenários: 2, 5, 14, 15 e 21. O cenário 16 não é o definitivo, pois qualquer um dos demais pode ser escolhido como o melhor. Antes porém, é preciso investigar o terceiro e último bloco.

4.1.1.3 BLOCO 3

Para compor este bloco é necessário incluir uma operação a mais, já que os demais são formados por três operações cada. As operações que participam das combinações para compor o bloco são a 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 e 9. Deste modo, sabendo que agora a operação de referência é a 6, contaminante de referência o D e optando pela presença necessária da operação 1, tem-se que:

$$Bloco\ 2 = (6, 1, ?, ?) \tag{4.7}$$

Para determinar as combinações, é utilizada a já conhecida Equação (4.4). Com o objetivo de reduzir o número de cenários, decidiu-se por manter fixa a presença da operação 1 em cada cenário, reduzindo as possibilidades de 35 para 15, que são suficientes para se ter uma ideia da robustez do método. Não existiu nenhum motivo em especial para que a operação 1 fosse escolhida em detrimento das demais. Qualquer outra operação poderia ter sido escolhida em seu lugar. A combinação então será de 2 operações num conjunto de 6. Logo tem-se a Equação (4.8).

$$C_2^6 = \frac{6!}{2!\,(6-2)!} = \frac{6!}{2! \times 4!} = \frac{6 \times 5 \times 4!}{2! \times 4!} = \frac{30}{2} = 15 \tag{4.8}$$

4.1.1.3.1 ***Cenário 1 (6, 1, 2, 3)***

As operações 1, 2, 3 e 6 comporão este cenário. O DFA é mostrado na Figura 4.88.

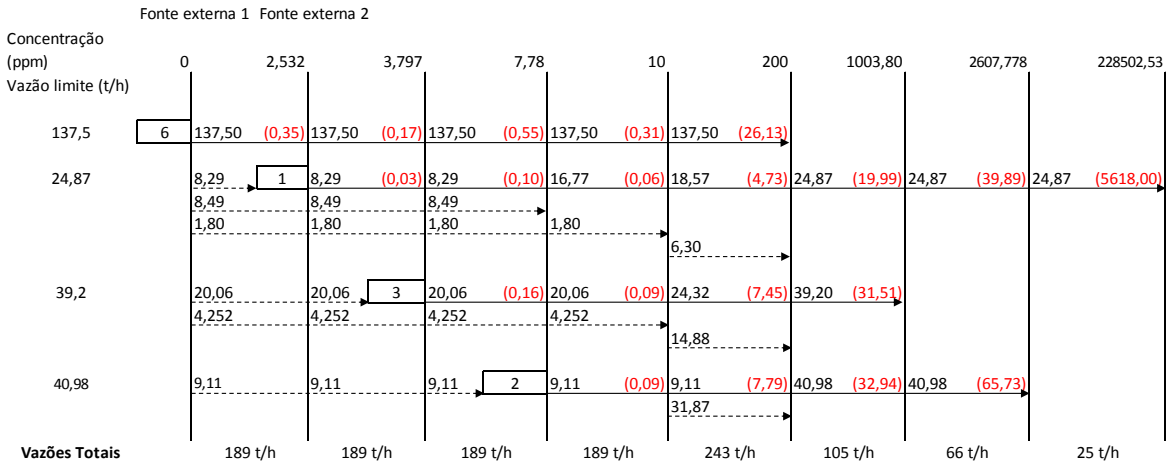

Figura 4.88 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 3 – Cenário 1.

Para que não houvesse violações, esse cenário não apresentou reúso em nenhuma das operações. O total de água limpa captada é de 189 t/h. Da fonte externa 2 são consumidos ao todo 53,06 t/h, como mostra a Figura 4.89. O ponto de *pinch* está na concentração de 10 ppm.

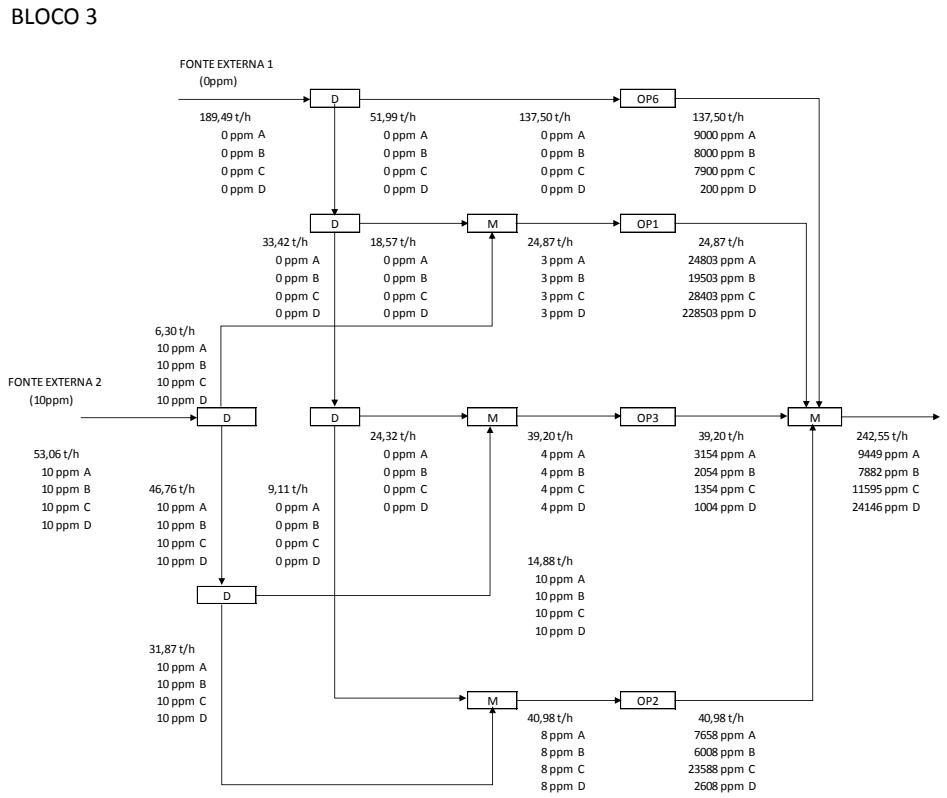

Figura 4.89 - Fluxograma – Bloco 3 – Cenário 1.

Ao todo há um consumo de 189,49 t/h de água limpa, 53,06 t/h da fonte externa a 10 ppm, resultando em um descarte de 242,55 t/h. Estes valores estão representados na Tabela 4.46.

Tabela 4.46 - Resultados do Bloco 3 – Cenário 1.

BLOCO 3			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
6	137,50	-	137,50
1	18,57	6,30	24,87
2	9,11	31,87	40,98
3	24,32	14,88	39,20
TOTAL	**189,49**	**53,06**	**242,55**

4.1.1.3.2 ***Cenário 2 (6, 1, 2, 4)***

Esse cenário é composto pelas operações 1, 2, 4 e 6. O DFA é mostrado na Figura 4.90.

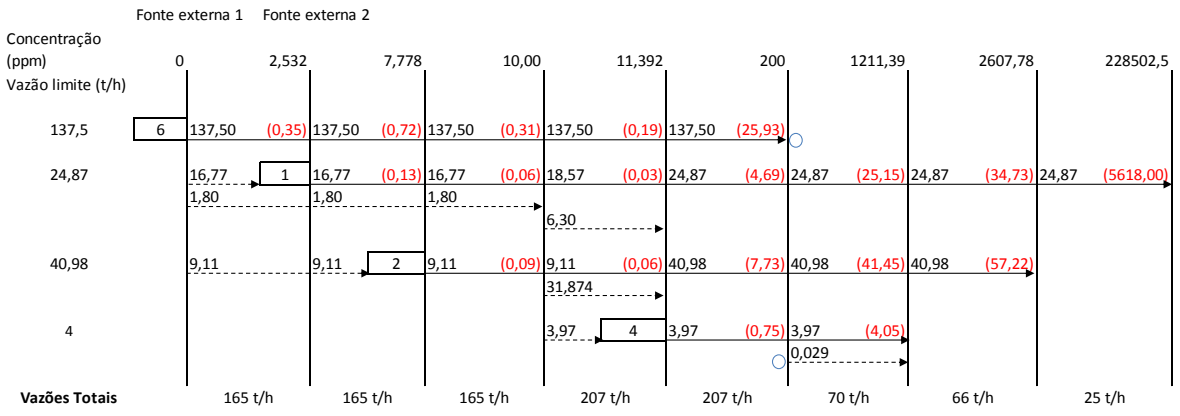

Figura 4.90 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 3 – Cenário 2.

A operação 6 disponibiliza 135,50 t/h, sendo 0,029 t/h aproveitadas pela operação 4 a 200 ppm. Essa quantidade soma-se às 3,97 t/h provenientes da fonte externa 2. As demais operações descartam toda água que captam. O fluxograma da rede é mostrado na Figura 4.91.

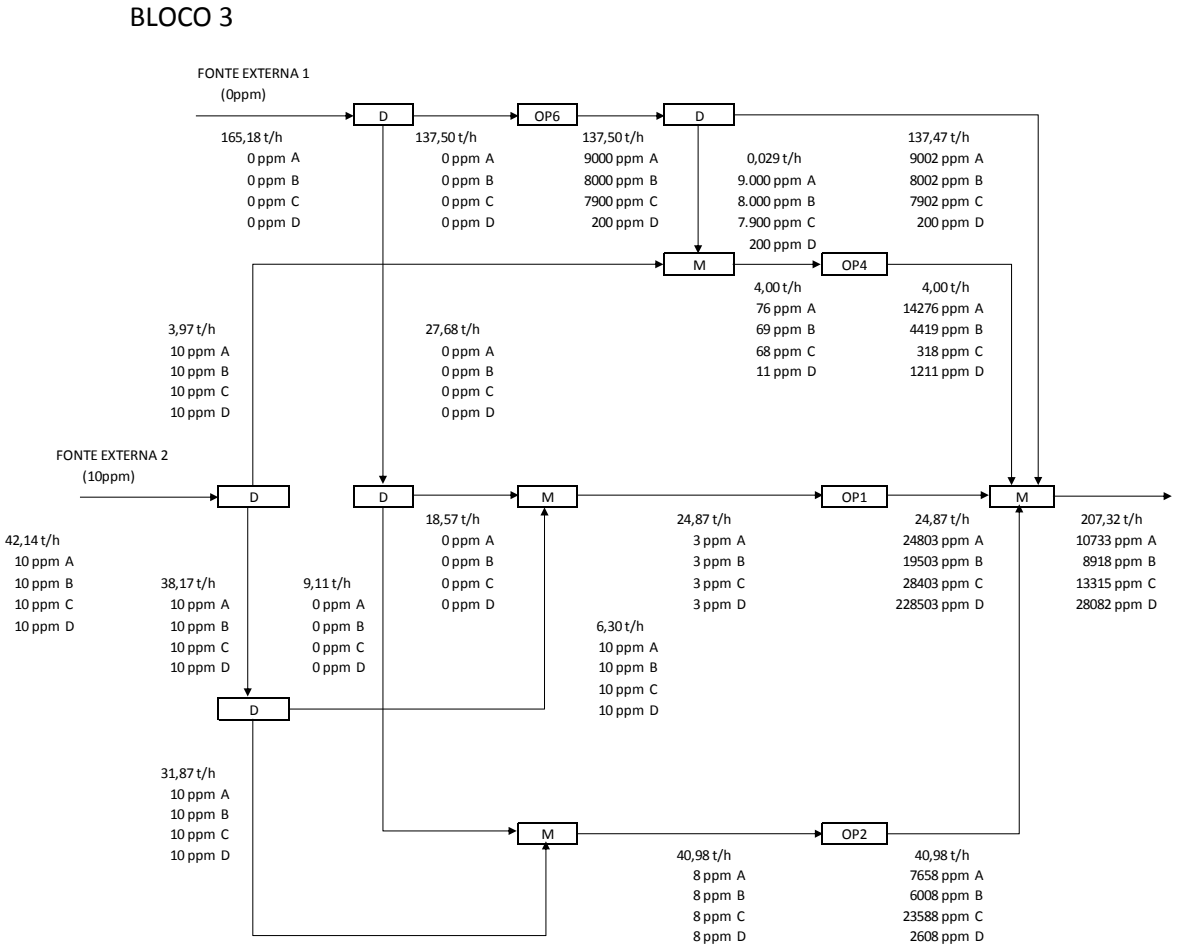

Figura 4.91 - Fluxograma – Bloco 3 – Cenário 2.

Nota-se que não há violações nos limites máximos de entrada e saídas dos contaminantes nas operações. Houve uma diminuição na quantidade de água captada. Os valores são mostrados na Tabela 4.47.

Tabela 4.47 - Resultados do Bloco 3 – Cenário 2.

BLOCO 3			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
6	137,50	-	137,47
1	18,57	6,30	24,87
2	9,11	31,87	40,98
4	-	3,97	4,00
TOTAL	**165,18**	**42,14**	**207,32**

4.1.1.3.3 ***Cenário 3 (6, 1, 2, 5)***

A operação 4 dá lugar à 5 nessa configuração, conforme mostra o DFA na Figura 4.92.

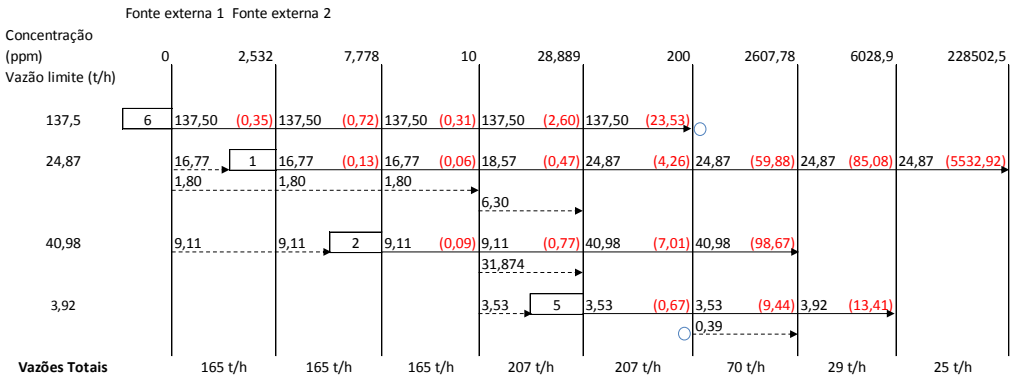

Figura 4.92 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 3 – Cenário 3.

Assim como há reúso do efluente da operação 6 na operação 4, a operação 5 também aproveita essa disponibilidade, captando 0,39 t/h a 200 ppm. Esse valor soma-se a 3,53 t/h provenientes da fonte externa 2. A operação 2 consome uma parte (31,87 t/h) e a outra (9,11 t/h) é oriunda da primeira fonte externa a 0ppm. A operação 1 capta 6,30 t/h da fonte externa 2 que une-se a 18,57 t/h da fonte externa a 0 ppm. O fluxograma é mostrado na Figura 4.93.

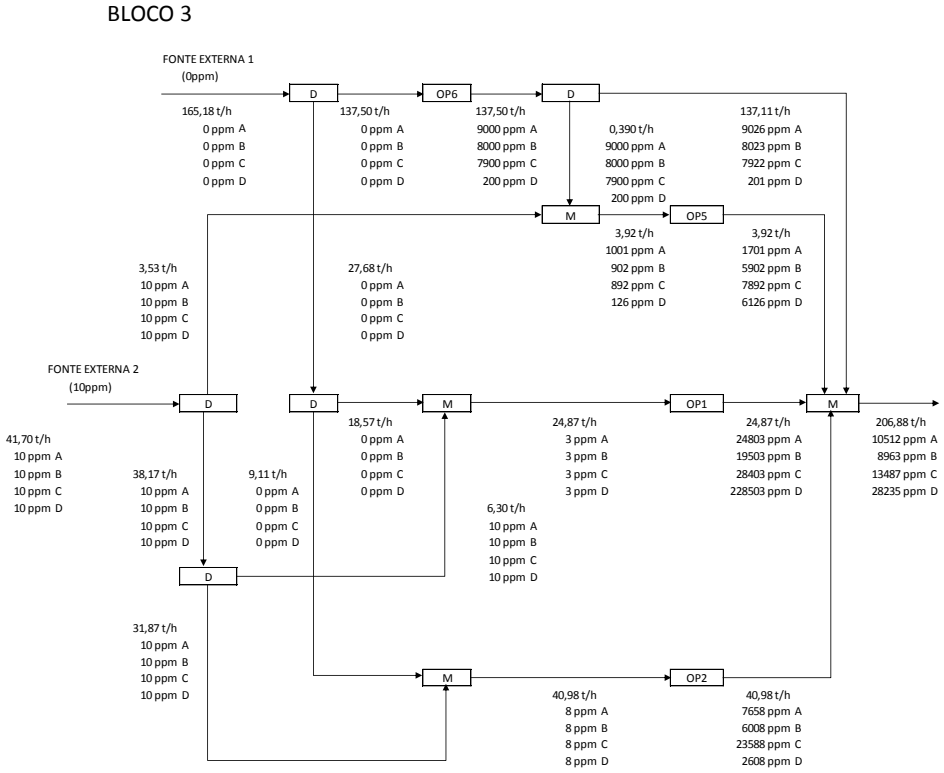

Figura 4.93 - Fluxograma – Bloco 3 – Cenário 3.

Não há violações e a captação/descarte é semelhante a do cenário anterior, envolvendo 206,88 t/h. Isso é justificado pela presença da operação 5, que possui um limite máximo semelhante ao da operação 4. As vazões globais são exibidas na Tabela 4.48.

Tabela 4.48 - Resultados do Bloco 3 – Cenário 3.

BLOCO 3			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
6	137,50	-	137,11
1	18,57	6,30	24,87
2	9,11	31,87	40,98
5	-	3,53	3,92
TOTAL	**165,18**	**41,70**	**206,88**

4.1.1.3.4 ***Cenário 4 (6, 1, 2, 8)***

A operação 8 entra no lugar da 5 e o DFA é mostrado na Figura 4.94.

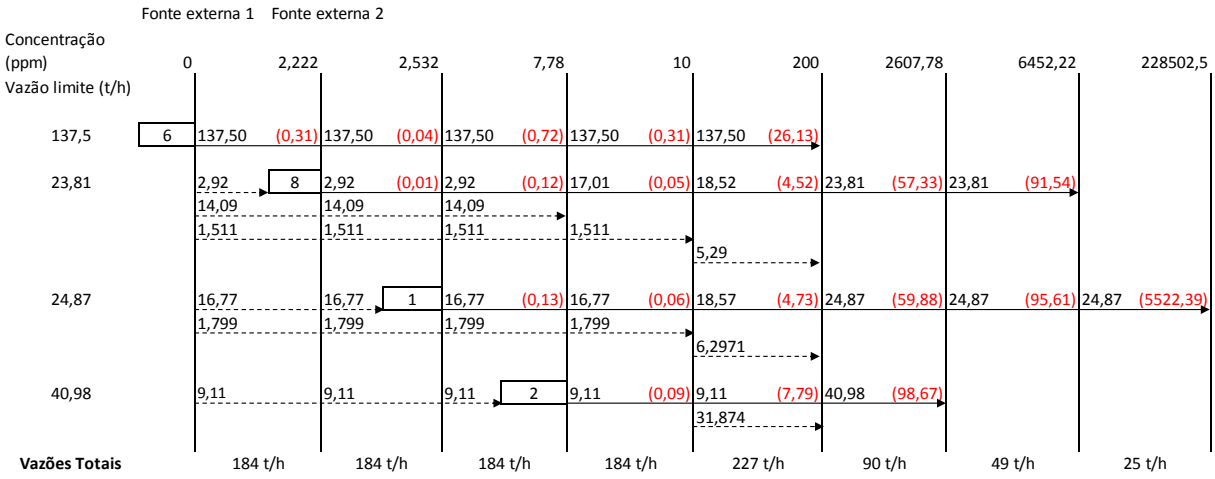

Figura 4.94 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 3 – Cenário 4.

Não há reúsos para este cenário e a quantidade de água consumida aumenta por conta da presença da operação 8. O fluxograma da rede é mostrado na Figura 4.95.

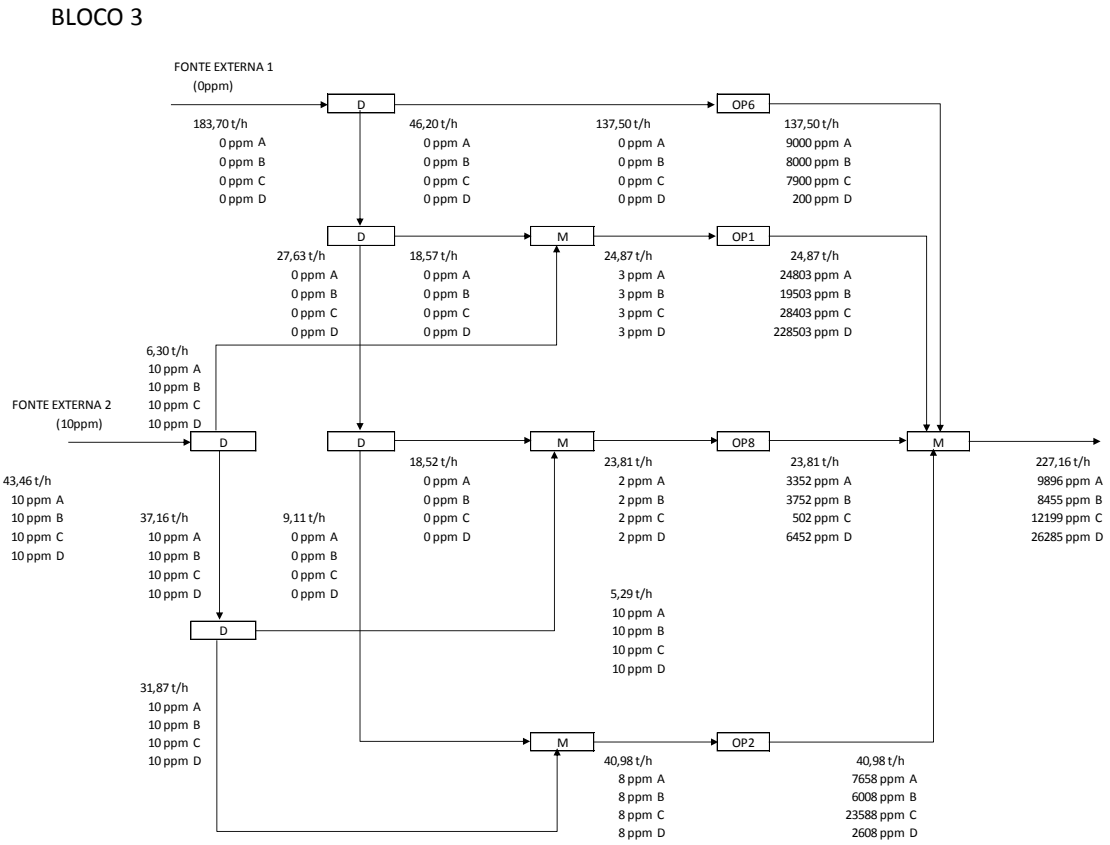

Figura 4.95 - Fluxograma – Bloco 3 – Cenário 4.

As vazões globais estão representadas na Tabela 4.49.

Tabela 4.49 - Resultados do Bloco 3 – Cenário 4.

BLOCO 3			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
6	137,50	-	137,50
1	18,57	6,30	24,87
2	9,11	31,87	40,98
8	18,52	5,29	23,81
TOTAL	**183,70**	**43,46**	**227,16**

4.1.1.3.5 ***Cenário 5 (6, 1, 2, 9)***

Observando a Tabela 4.1percebe-se que o contaminante D na operação 9 possui seus limites de concentração de entrada e saída iguais a 100 ppm. Deste modo, como o contaminante de referência é o D, o deslocamento dos demais contaminantes na entrada da operação seguirá a mesma posição na escala de concentrações para os demais contaminantes. Sendo

assim, o mais coerente é retirar a operação 9 do deslocamento e anexá-la ao bloco 3, utilizando os seus limites máximos de concentração, ou até mesmo utilizá-la como uma fonte externa.

Optou-se então por deixar a operação 9 em seus limites máximos de concentração tratando-a de forma independe, influenciando apenas a concentração final e incluí-la no bloco 3. Assim tem-se o seguinte DFA:

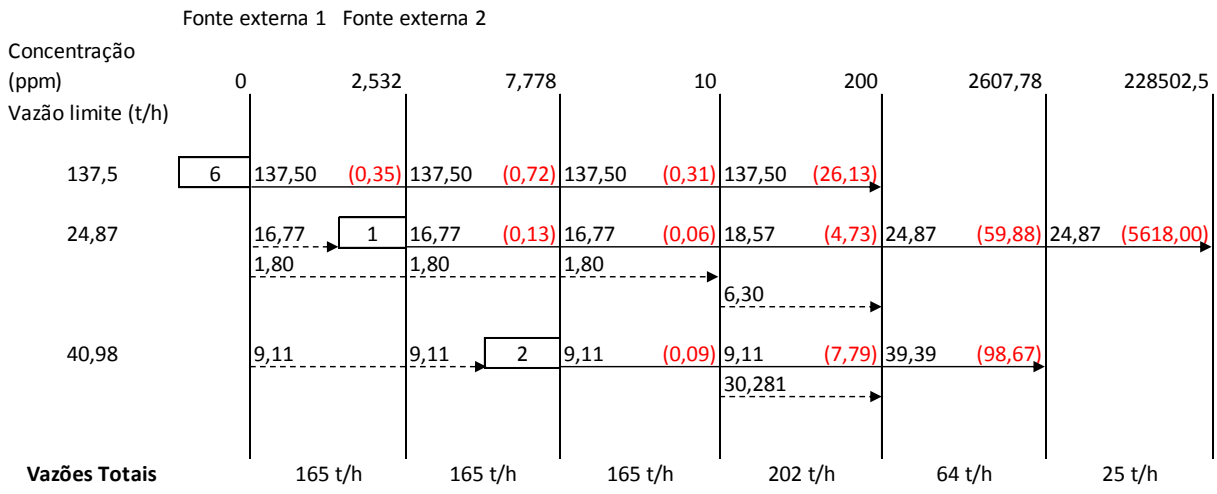

Figura 4.96 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 3 – Cenário 5.

Para este cenário também não há reúso nas operações e não há violações nas concentrações dos contaminantes. O consumo/descarte foi reduzido, pois não há mais a presença de uma quarta operação. Desse modo tem-se o fluxograma mostrado na Figura 4.97.

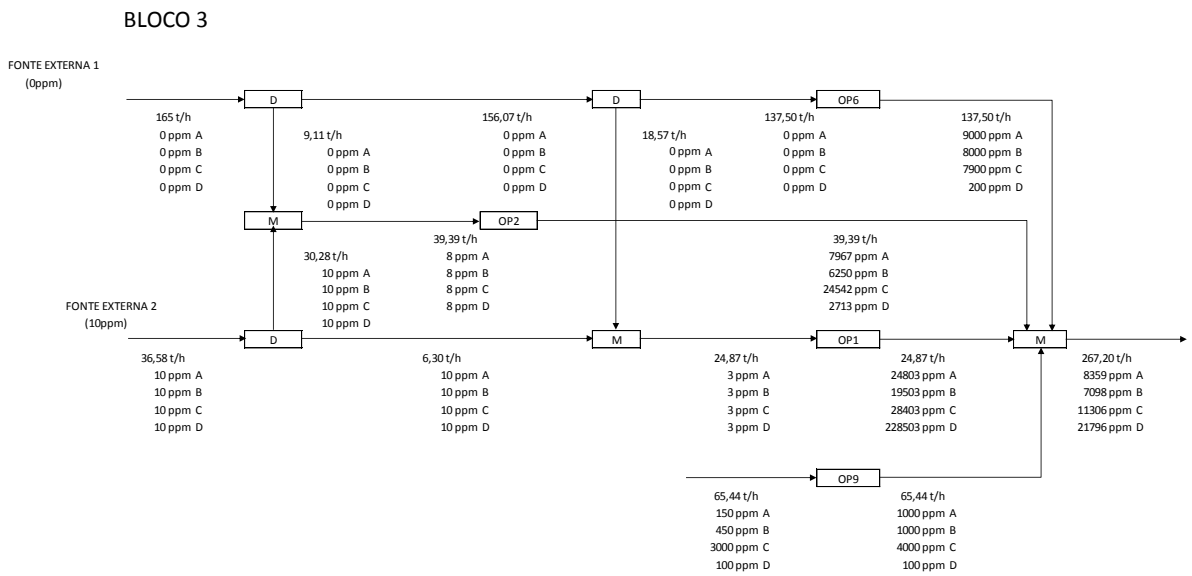

Figura 4.97 - Fluxograma – Bloco 3 – Cenário 5.

As vazões globais são mostradas na Tabela 4.50.

Tabela 4.50 - Resultados do Bloco 3 – Cenário 5.

BLOCO 3			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
6	137,50	-	137,50
1	18,57	6,30	24,87
2	9,11	30,28	39,39
9	-	-	65,44
TOTAL	**165,18**	**36,58**	**267,20**

4.1.1.3.6 ***Cenário 6 (6, 1, 3, 4)***

Neste cenário estão novamente presentes quatro operações. As operações 1, 2 e 9 dão lugar às operações 1, 3 e 4, como ilustra a Figura 4.98.

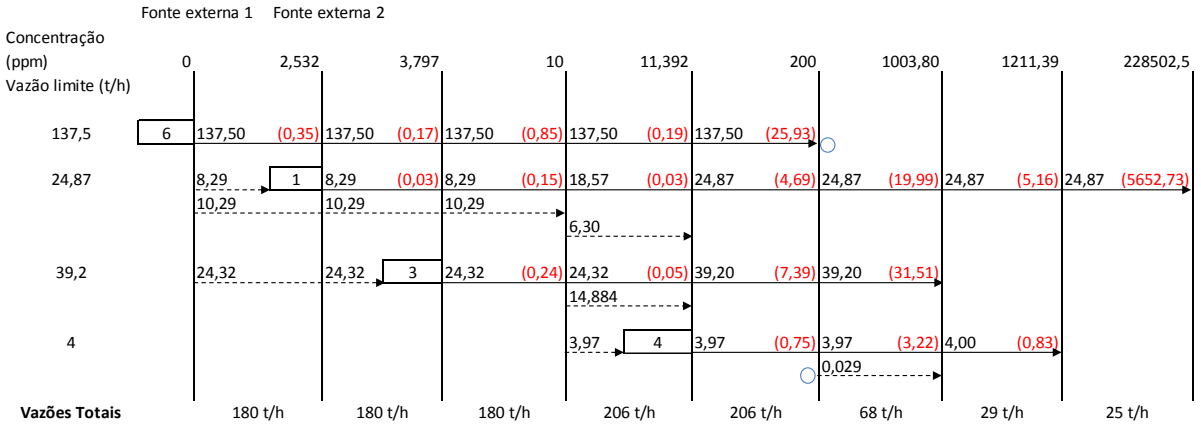

Figura 4.98 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 3 – Cenário 6.

Observando a figura acima, nota-se apenas o reúso do efluente da operação 6 na 4. A operação 6 consome 137,5 t/h de água primária (0 ppm) e a disponibiliza a 200 ppm (concentração do *pinch*). A operação 1 capta 18,58 t/h da fonte externa 1 a 0 ppm e consome 6,3 t/h da segunda fonte externa a 10 ppm. A operação 3 consome 24,32 t/h da fonte externa a 0 ppm que soma-se a 14,88 t/h da fonte externa 2. A operação 4 consome 3,97 t/h da segunda fonte externa e os demais 0,029 t/h são provenientes da operação 6 a 200 ppm. O fluxograma do processo é mostrado na Figura 4.99.

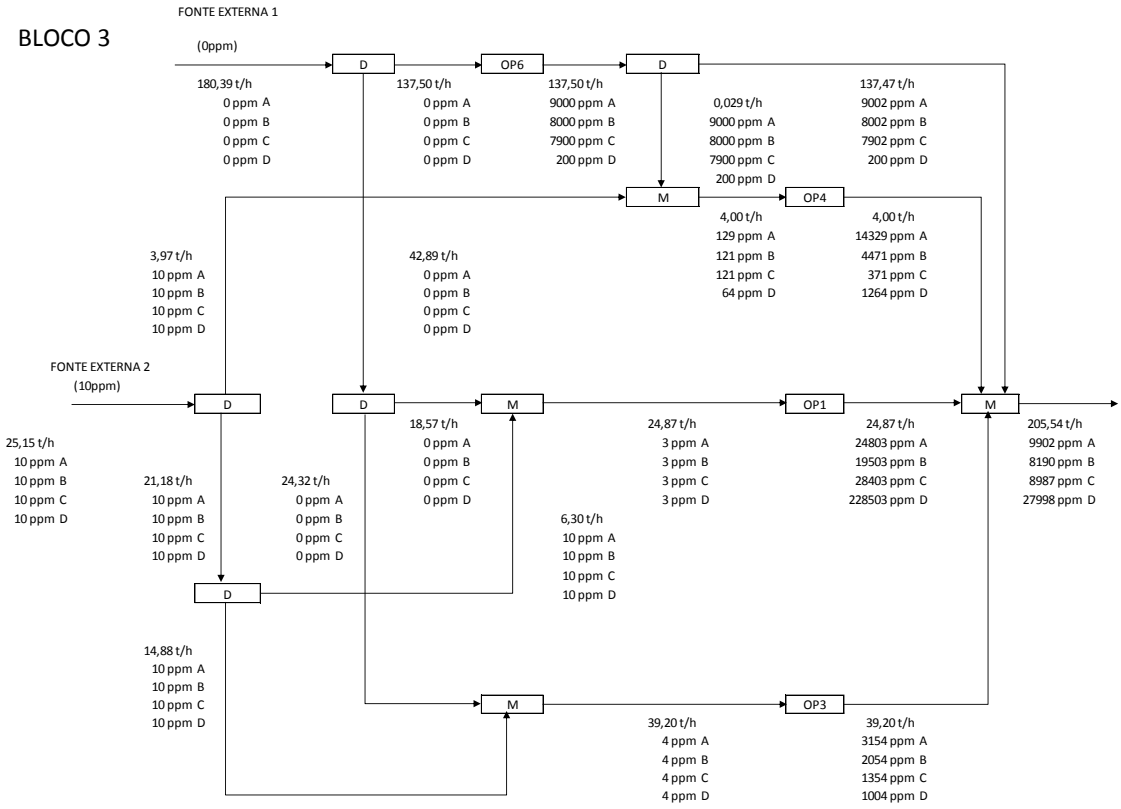

Figura 4.99 - Fluxograma – Bloco 3 – Cenário 6.

Não há violações nas concentrações dos contaminantes. Nota-se que o descarte foi menor em relação ao cenário anterior, representando uma diminuição de 23,07%. A Tabela 4.51 mostra as vazões globais do processo.

Tabela 4.51 - Resultados do Bloco 3 – Cenário 6.

BLOCO 3			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
6	137,50	-	137,47
1	18,57	6,30	24,87
3	24,32	14,88	39,20
4	-	3,97	4,00
TOTAL	**180,39**	**25,15**	**205,54**

4.1.1.3.7 ***Cenário 7 (6, 1, 3, 5)***

A operação 4 do cenário anterior dá agora lugar à operação 5. O DFA é exibido a seguir.

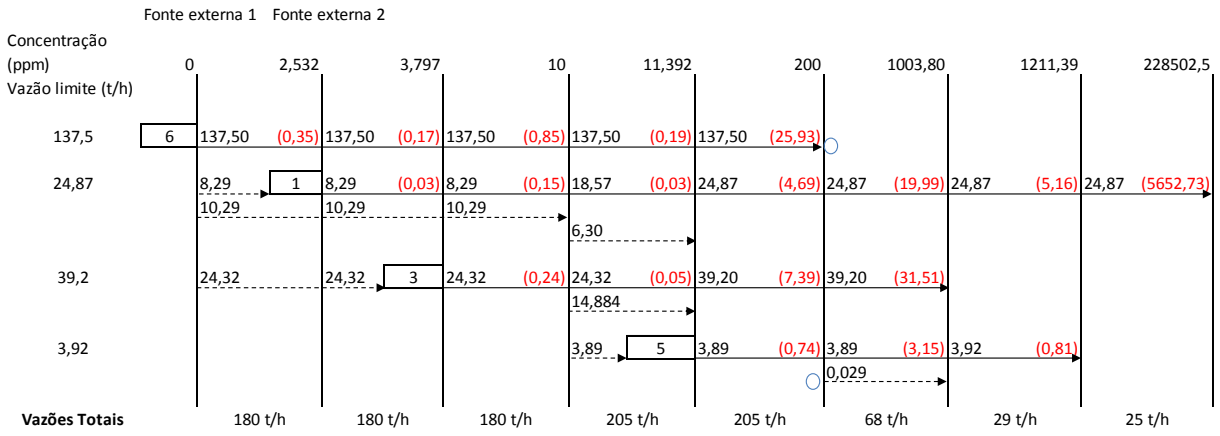

Figura 4.100 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 3 – Cenário 7.

Semelhante ao cenário anterior, a operação 5 aproveita 0,029 t/h disponíveis a 200 ppm na operação 6. O fluxograma é mostrado na Figura 4.101.

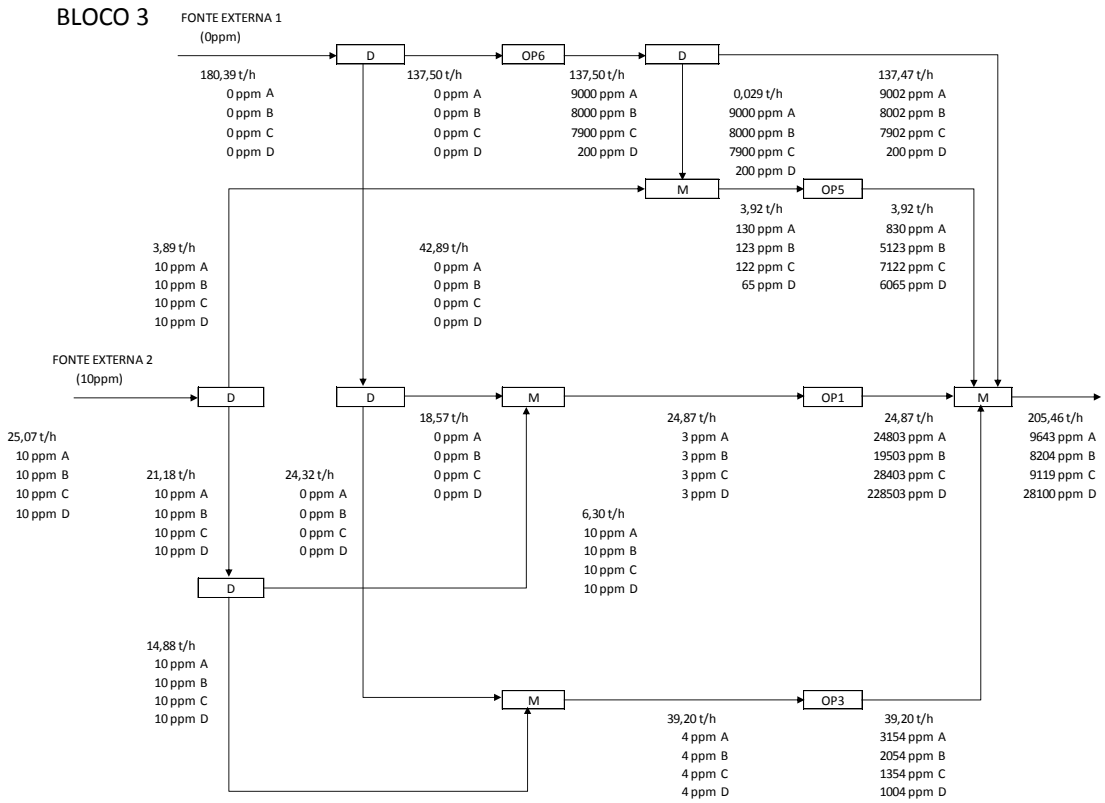

Figura 4.101 - Fluxograma – Bloco 3 – Cenário 7.

Também não há violações nesse cenário. Os resultados são bastante semelhantes ao anterior, haja vista a também semelhança no limite máximo de vazão das operações 4 e 5. A Tabela 4.52 mostra as vazões do processo.

Tabela 4.52 - Resultados do Bloco 3 – Cenário 7.

BLOCO 3			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
6	137,50	-	137,47
1	18,57	6,30	24,87
3	24,32	14,88	39,20
5	-	3,89	3,92
TOTAL	**180,39**	**25,07**	**205,46**

4.1.1.3.8 ***Cenário 8 (6, 1, 3, 8)***

Neste cenário a operação 8 dá lugar à 5 e o DFA é mostrado na Figura 4.102.

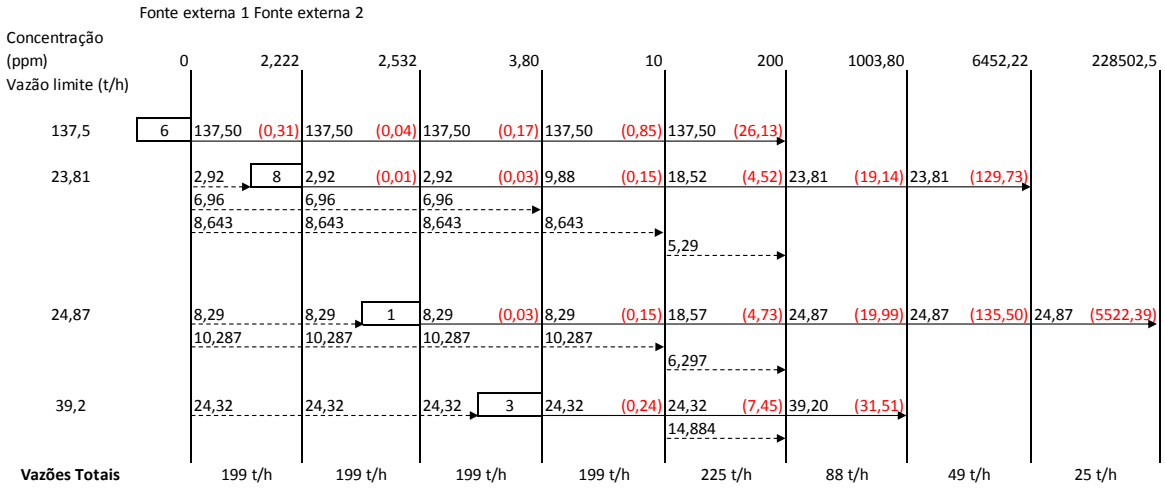

Figura 4.102 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 3 – Cenário 8.

Não há reúso em qualquer operação. As operações 1, 3 e 8 consomem juntas 30,16 t/h da segunda fonte externa. O total de água primária consumida é de 199 t/h. O fluxograma é exibido na Figura 4.103.

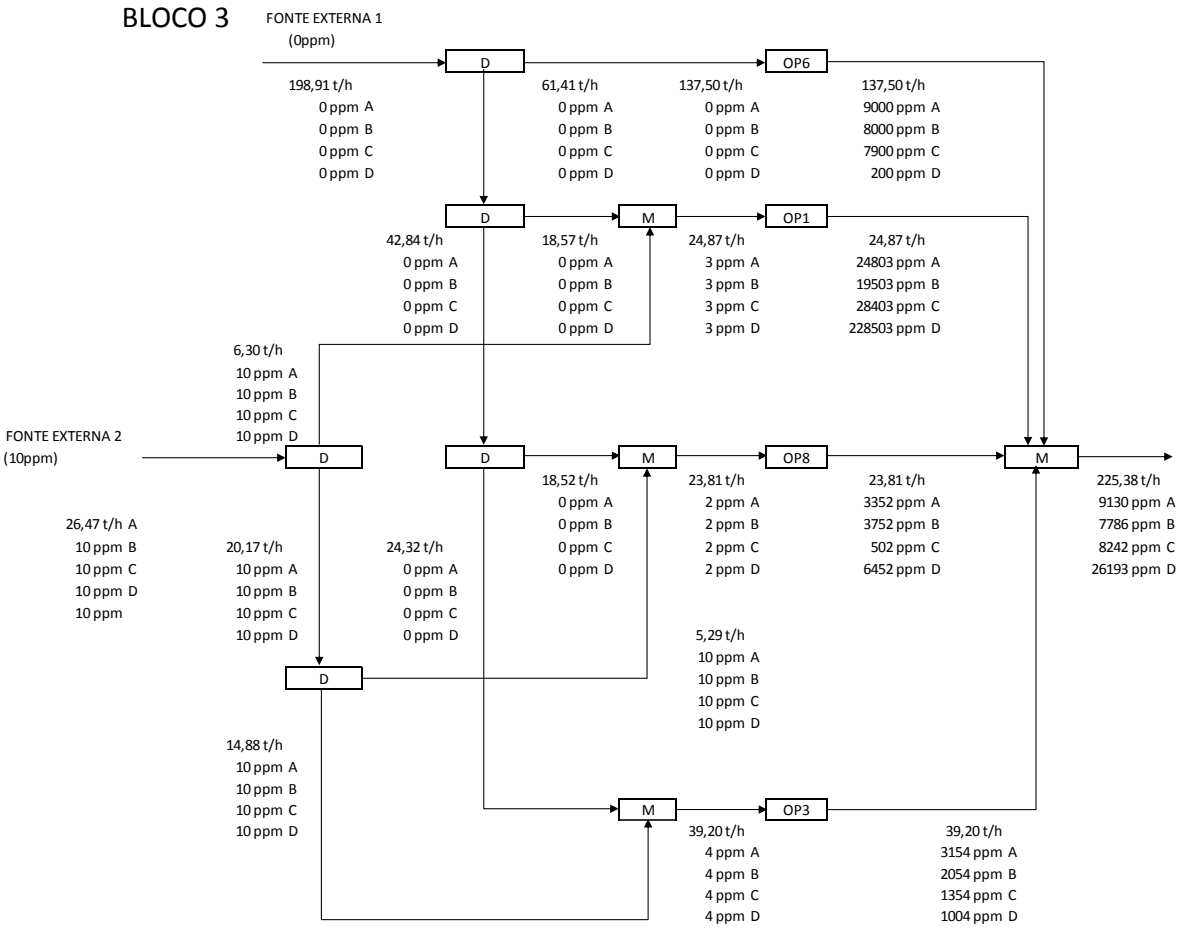

Figura 4.103 - Fluxograma – Bloco 3 – Cenário 8.

Não á violações e percebe-se um ligeiro aumento no consumo em virtude da presença da operação 8. A Tabela 4.53 mostra as vazões globais.

Tabela 4.53 - Resultados do Bloco 3 – Cenário 8.

BLOCO 3			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
6	137,50	-	137,47
1	18,57	6,30	24,87
3	24,32	14,88	39,20
8	18,52	5,29	23,81
TOTAL	**198,91**	**26,47**	**225,38**

4.1.1.3.9 ***Cenário 9 (6, 1, 3, 9)***

A operação 9 dá lugar a 8 do cenário anterior, conforme mostra o DFA da Figura 4.104.

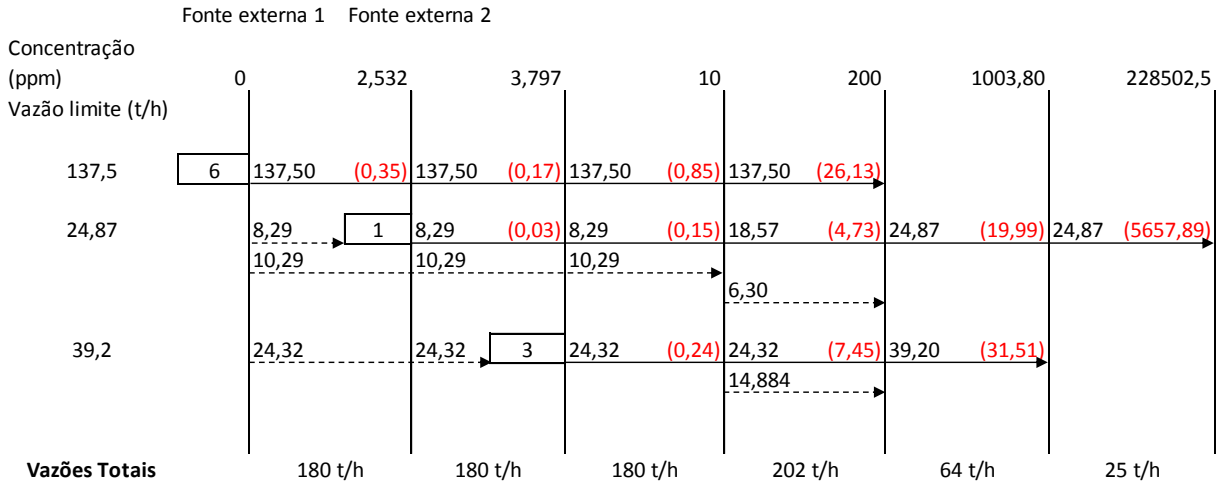

Figura 4.104 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 3 – Cenário 9.

Mais uma vez a operação 9 não participa dos deslocamento de concentrações. Observando a figura anterior, nota-se que as operações 1 e 3 captam juntas 21,18 t/h, da fonte externa 2. O fluxograma é mostrado na Figura 4.105.

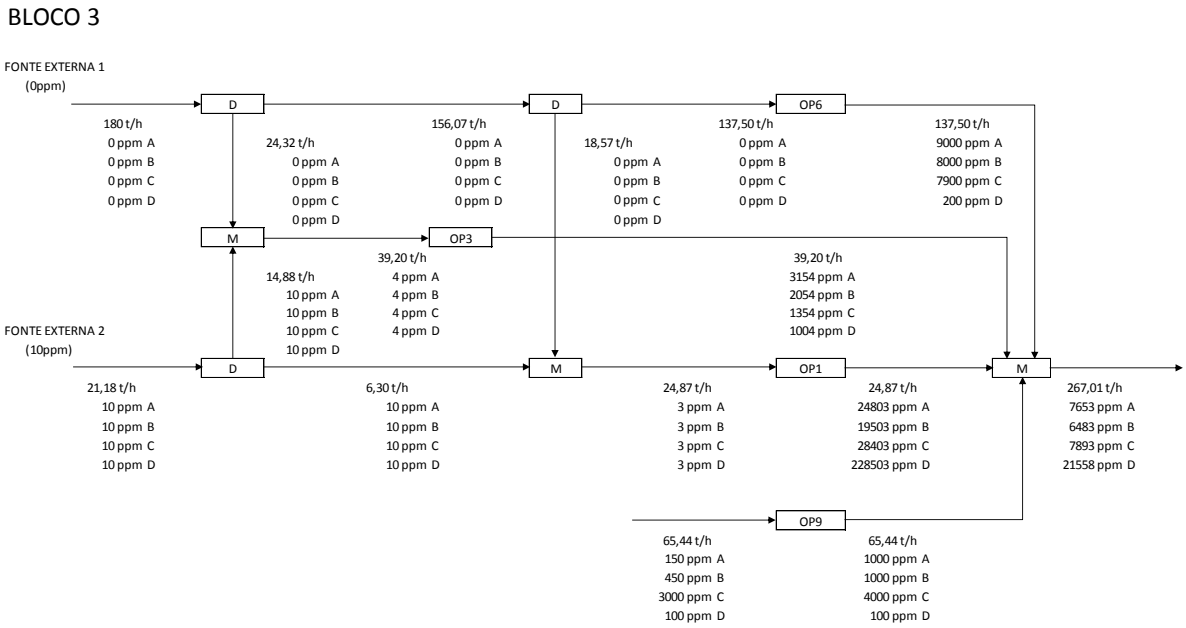

Figura 4.105 - Fluxograma – Bloco 3 – Cenário 9.

Com a presença da operação 9 em seus limites máximos, houve um aumento no consumo/descarte como mostram os dados da Tabela 4.54.

Tabela 4.54 - Resultados do Bloco 3 – Cenário 9.

BLOCO 3			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
6	137,50	-	137,50
1	18,57	6,30	24,87
3	24,32	14,88	39,20
9	-	-	65,44
TOTAL	**180,39**	**21,18**	**267,01**

4.1.1.3.10 ***Cenário 10 (6, 1, 4, 5)***

Chega-se então ao cenário 10, no qual estão presentes as operações 4 e 5 que possuem os menores limites máximos de vazão. O DFA é mostrado na Figura 4.106.

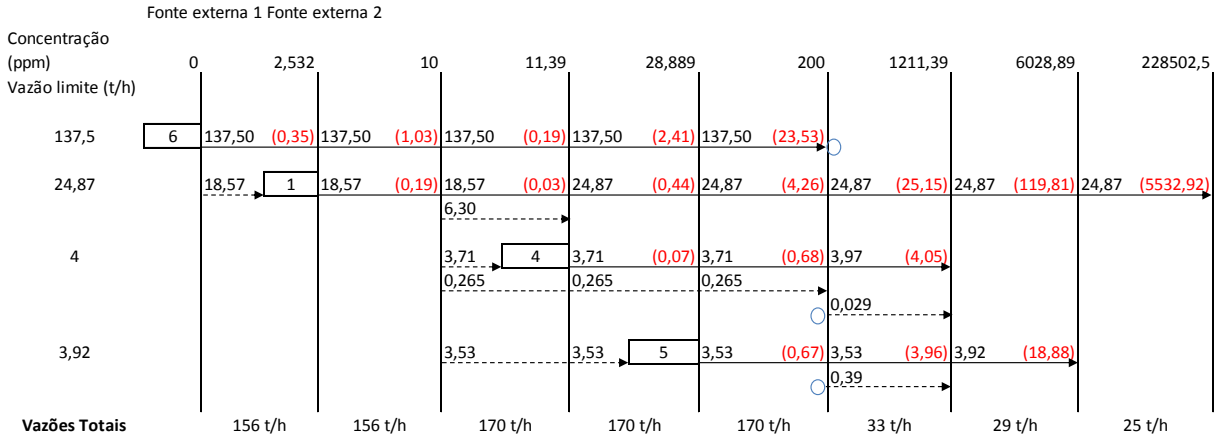

Figura 4.106 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 3 – Cenário 10.

Além de possuírem limites baixos de vazão, as operações 4 e 5 recebem 0,029 e 0,39 t/h da operação 6 a 200 ppm, respectivamente. As duas juntas consomem 7,505 t/h da fonte externa 2. Apenas as operações 1 e 6 consomem água primária, num total de 156 t/h. O fluxograma é mostrado na Figura 4.107.

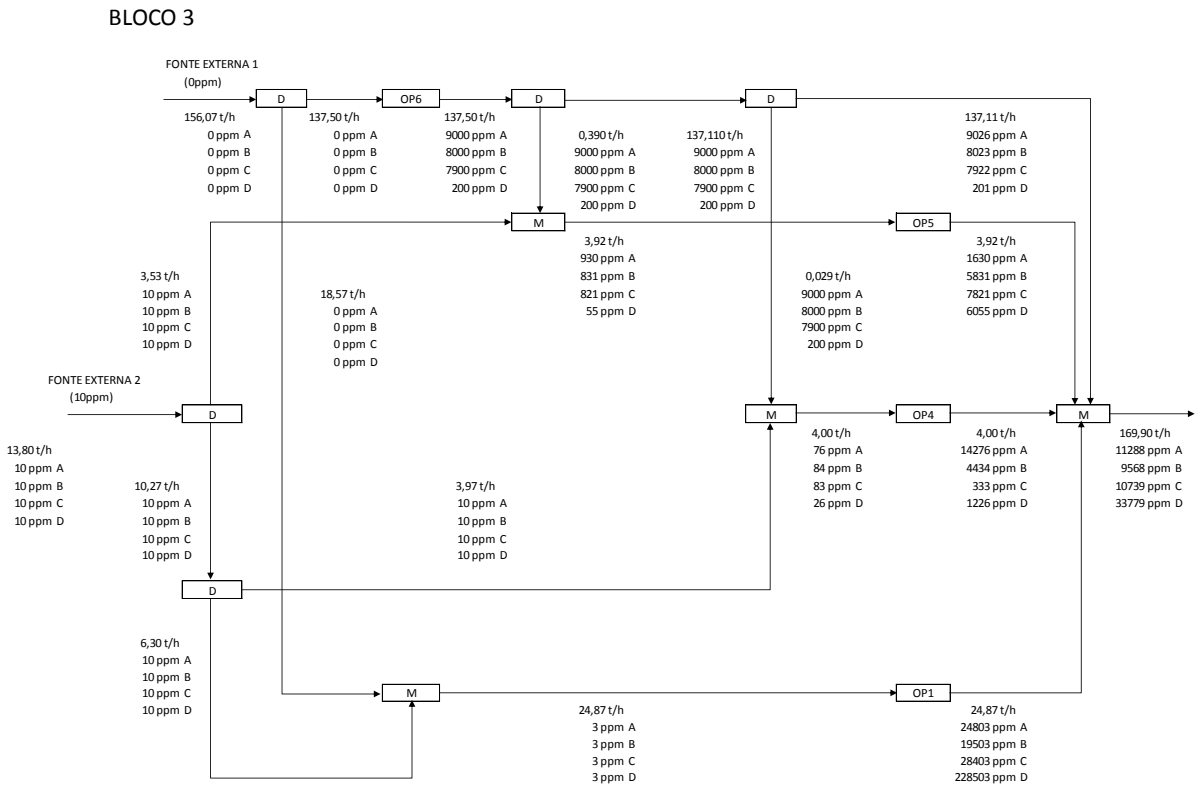

Figura 4.107 - Fluxograma – Bloco 3 – Cenário 10.

Não há violações e como era esperado o consumo e o descarte total superaram o de todos os demais cenários, num total de 169,90 t/h. Esses dados estão presentes na Tabela 4.55.

Tabela 4.55 - Resultados do Bloco 3 – Cenário 10.

BLOCO 2			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
6	137,50	-	137,11
1	18,57	6,30	24,87
4	-	3,97	4,00
5	-	3,53	3,92
TOTAL	**156,07**	**13,80**	**169,90**

4.1.1.3.11 ***Cenário 11 (6, 1, 4, 8)***

Nessa configuração a operação 5 dá lugar à 8 conforme mostra o DFA da Figura 4.108.

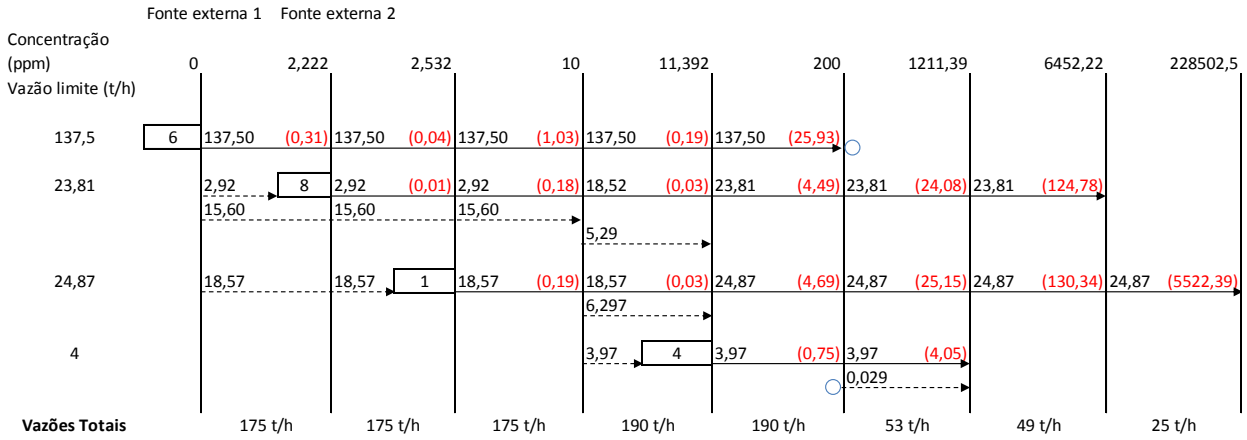

Figura 4.108 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 3 – Cenário 11.

A única operação a aproveitar a disponibilidade de água a 200 ppm é a 4, captando 0,029 t/h. O fluxograma é exibido a seguir.

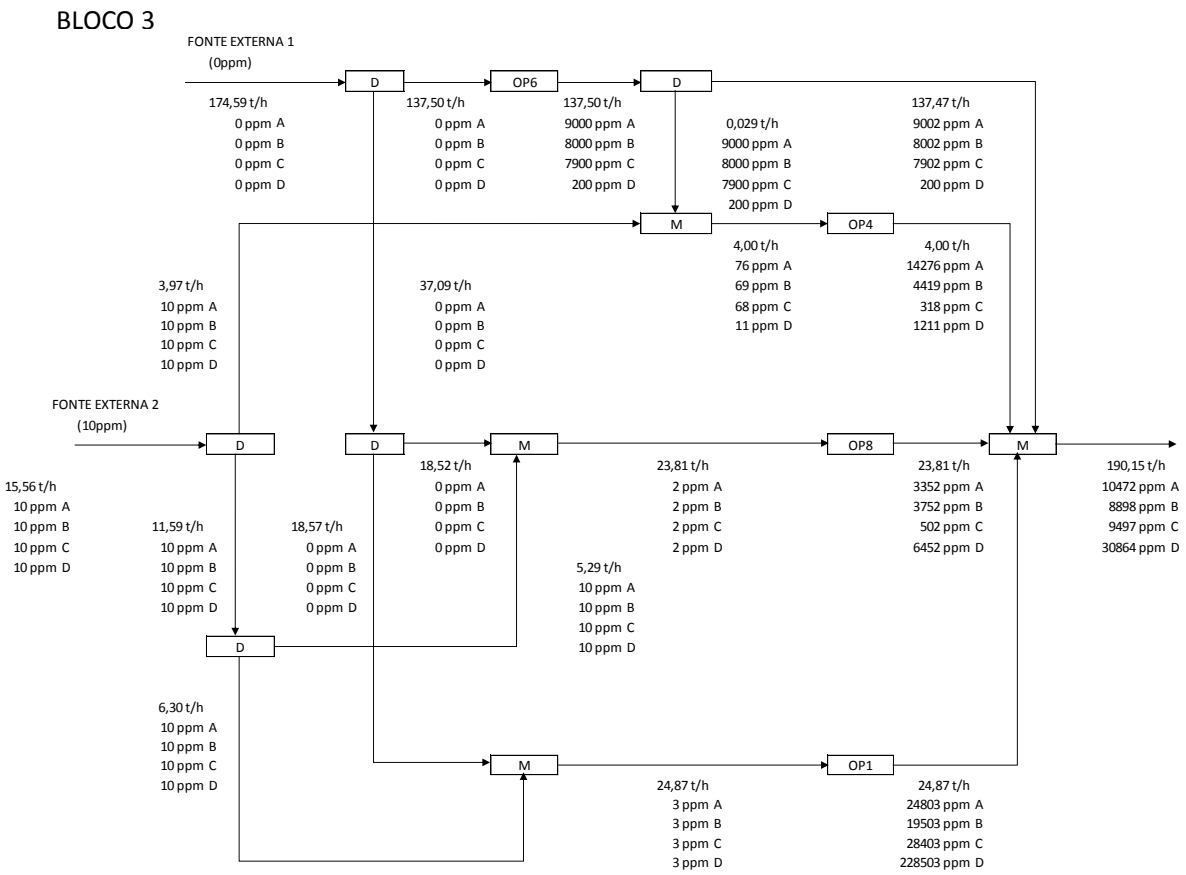

Figura 4.109 - Fluxograma – Bloco 3 – Cenário 11.

Não há violações e a presença da operação 4 contribui para que o descarte e consumo sejam menores do que os até então obtidos. As vazões estão representadas na Tabela 4.56.

Tabela 4.56 - Resultados do Bloco 3 – Cenário 11.

BLOCO 3			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
6	137,50	-	137,47
1	6,30	6,30	24,87
4	-	3,97	4,00
8	-	5,29	23,81
TOTAL	**162,32**	**15,56**	**190,15**

4.1.1.3.12 ***Cenário 12 (6, 1, 4, 9)***

A operação 8 cede lugar para a 9 nessa nova combinação. O DFA é mostrado na Figura 4.110.

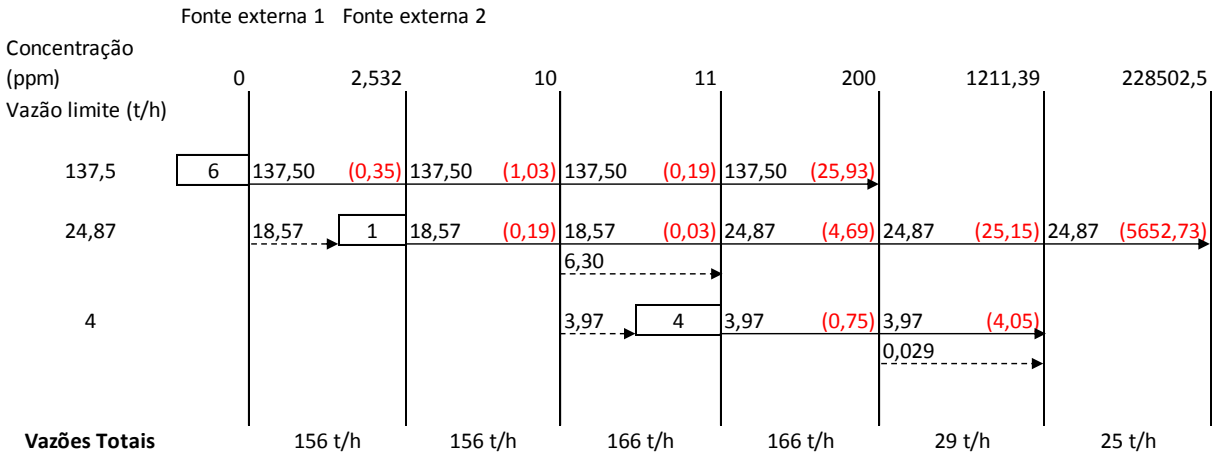

Figura 4.110 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 3 – Cenário 12.

Como a operação 9 não participa da construção do diagrama, apenas a operação 6 disponibiliza água que é aproveitada pela operação 4 a 200 ppm, consumindo 0,029 t/h. Essa parcela soma-se a 3,97 t/h provenientes da fonte externa 2. O fluxograma da rede é mostrado na Figura 4.111.

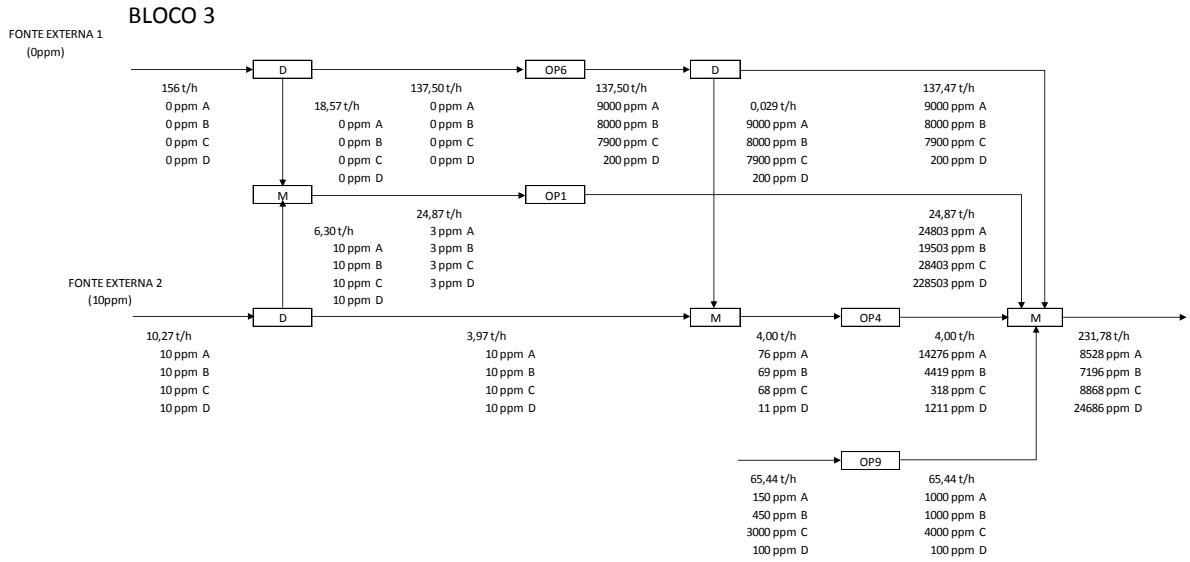

Figura 4.111 - Fluxograma – Bloco 3 – Cenário 12.

Não há violações, mas observa-se um aumento significativo no descarte de água em função da presença da operação 9. A Tabela 4.57 mostra os dados das vazões do sistema.

Tabela 4.57 - Resultados do Bloco 3 – Cenário 12.

BLOCO 3			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
6	137,50	-	137,47
1	18,57	6,30	24,87
4	-	3,97	4,00
9	-	-	65,44
TOTAL	**156,07**	**10,27**	**231,78**

4.1.1.3.13 ***Cenário 13 (6, 1, 5, 8)***

De volta à combinação de quatro novas operações, tem-se o seguinte DFA mostrado na Figura 4.112.

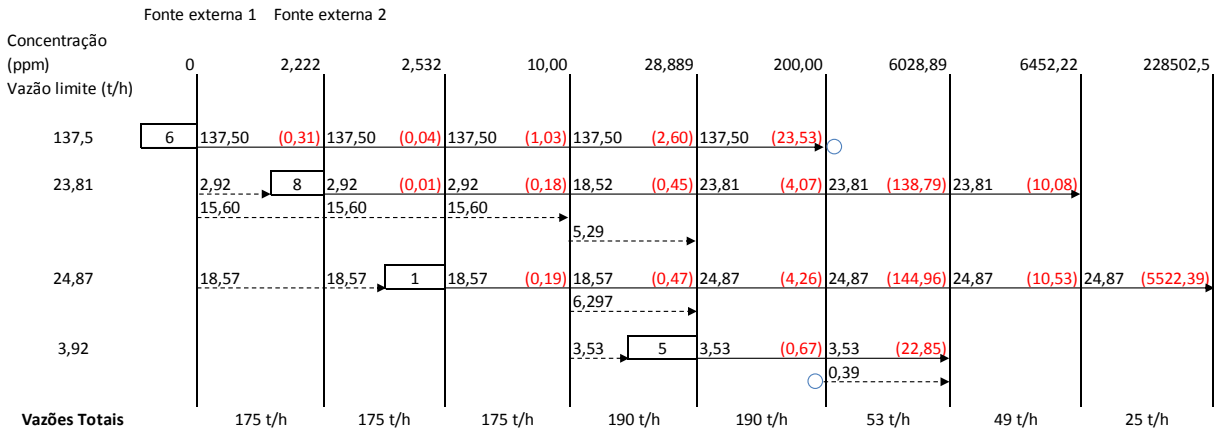

Figura 4.112 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 3 – Cenário 13.

Nota-se que apenas a operação 5 aproveita a disponibilidade de água a 200 ppm da operação 6. A operação 5 consome 0,39 t/h da operação 6 e 3,53 t/h da fonte externa a 10 ppm. O fluxograma da rede é mostrado na Figura 4.113.

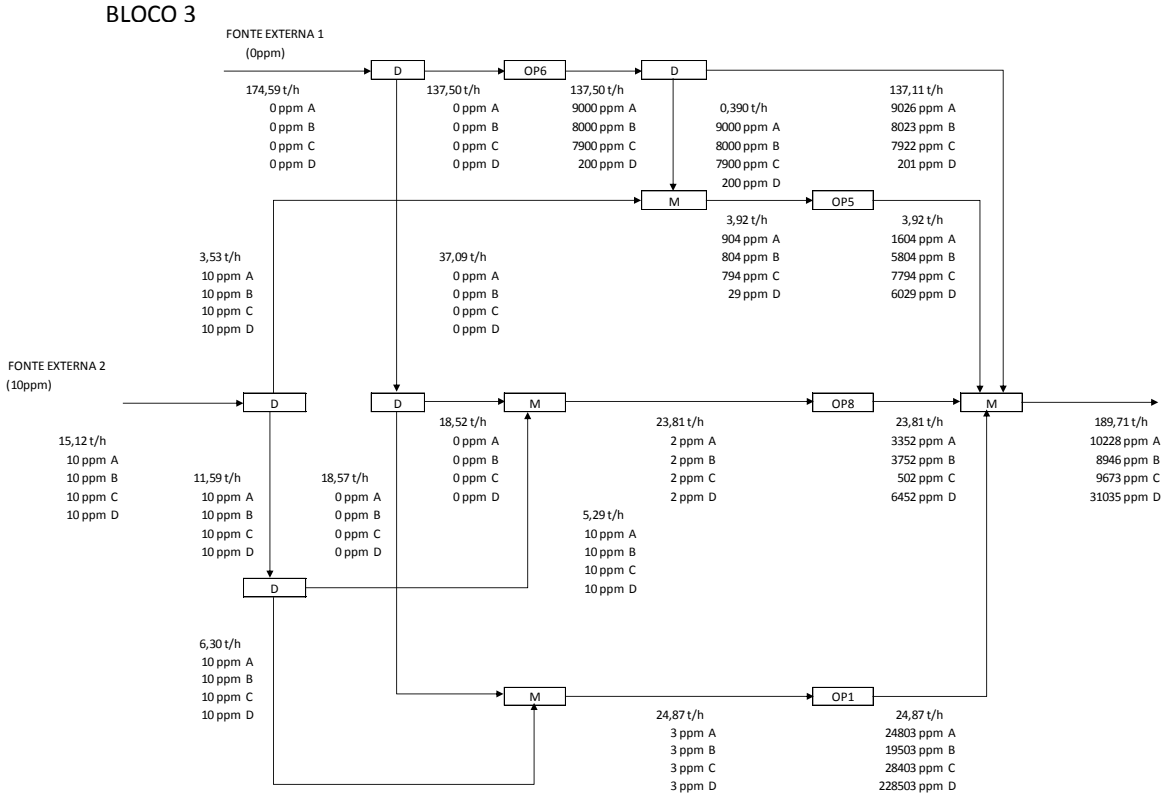

Figura 4.113 - Fluxograma – Bloco 3 – Cenário 13.

Observa-se que o descarte aqui obtido foi semelhante ao do cenário anterior. Não há violações e a Tabela 4.58 apresenta os dados globais.

Tabela 4.58 - Resultados do Bloco 3 – Cenário 13.

BLOCO 2			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
6	137,50	-	137,11
1	18,57	6,30	24,87
5	-	3,53	3,92
8	18,52	5,29	23,81
TOTAL	**174,59**	**15,12**	**189,71**

4.1.1.3.14 ***Cenário 14 (6, 1, 5, 9)***

A operação 8 dá espaço para a operação 9 e a permanência da operação 5 garantirá um menor consumo, como pode ser visto na Figura 4.114.

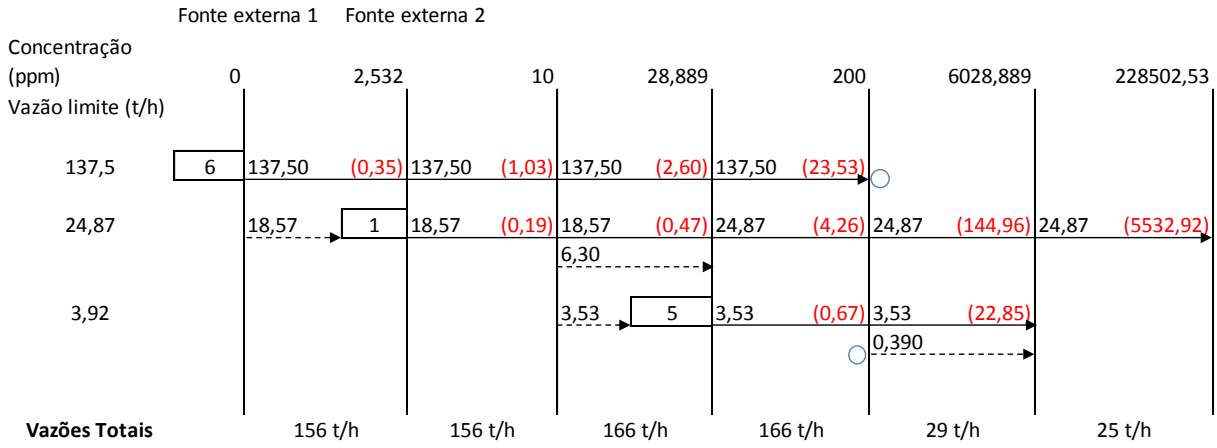

Figura 4.114 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 3 – Cenário 14.

A operação 9 mais uma vez não participa do DFA e a operação 5 recebe 0,390 t/h da operação 6 a 200 ppm. Essa vazão é misturada com 3,53 t/h recebidas da fonte externa 2 a 10 ppm. A operação 1 consome 18,57 t/h de água primária da fonte externa 1 (0 ppm). As demais 6,3 t/h são provenientes da segunda fonte externa. O fluxograma é mostrado na Figura 4.115.

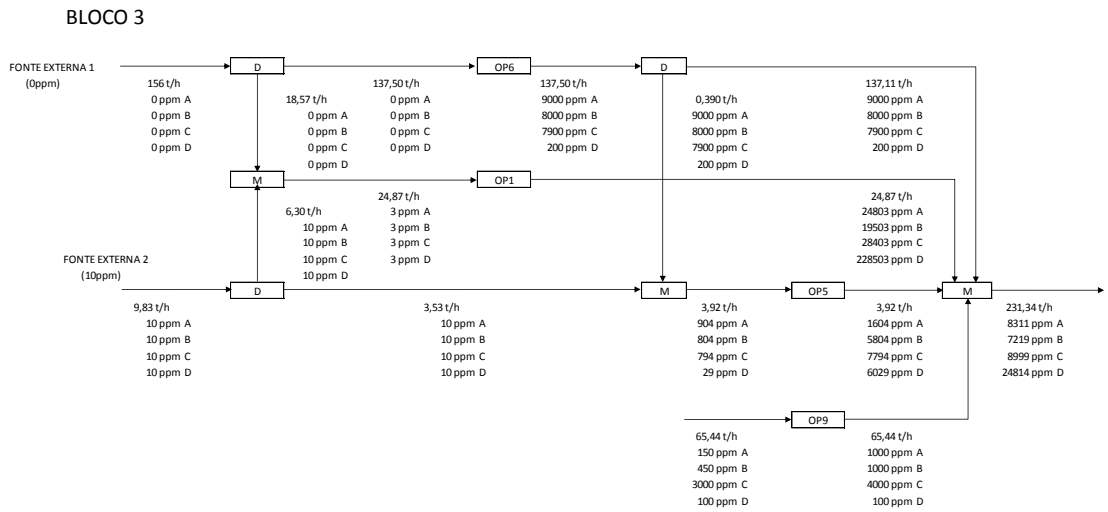

Figura 4.115 - Fluxograma – Bloco 3 – Cenário 14.

Também não há violações nesse cenário a as vazões são agrupadas na Tabela 4.59.

Tabela 4.59 - Resultados do Bloco 3 – Cenário 14.

BLOCO 3			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
6	137,50	-	137,11
1	18,57	6,30	24,87
5	-	3,53	3,92
8	-	-	65,44
TOTAL	**156,07**	**9,83**	**231,34**

4.1.1.3.15 ***Cenário 15 (6, 1, 8, 9)***

Essa é a última combinação para o bloco 3 e o DFA é mostrado na Figura 4.116.

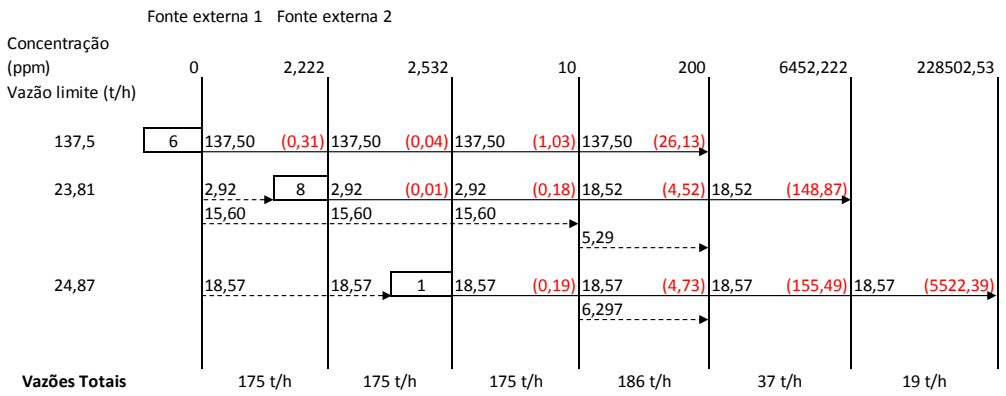

Figura 4.116 - Diagrama de fonte de Águas – Bloco 3 – Cenário 15.

Como já se sabe, a operação 9 não participa dos deslocamentos. Logo, observando o diagrama acima, nota-se que a operação 1 consome 6,29 t/h da operação 6, que soma-se a 18,57 t/h da fonte externa a 0 ppm. A operação 8 consome 18,52 t/h de água limpa da fonte externa 1 e 5,29 t/h da fonte externa 2. O fluxograma é mostrado na Figura 4.117.

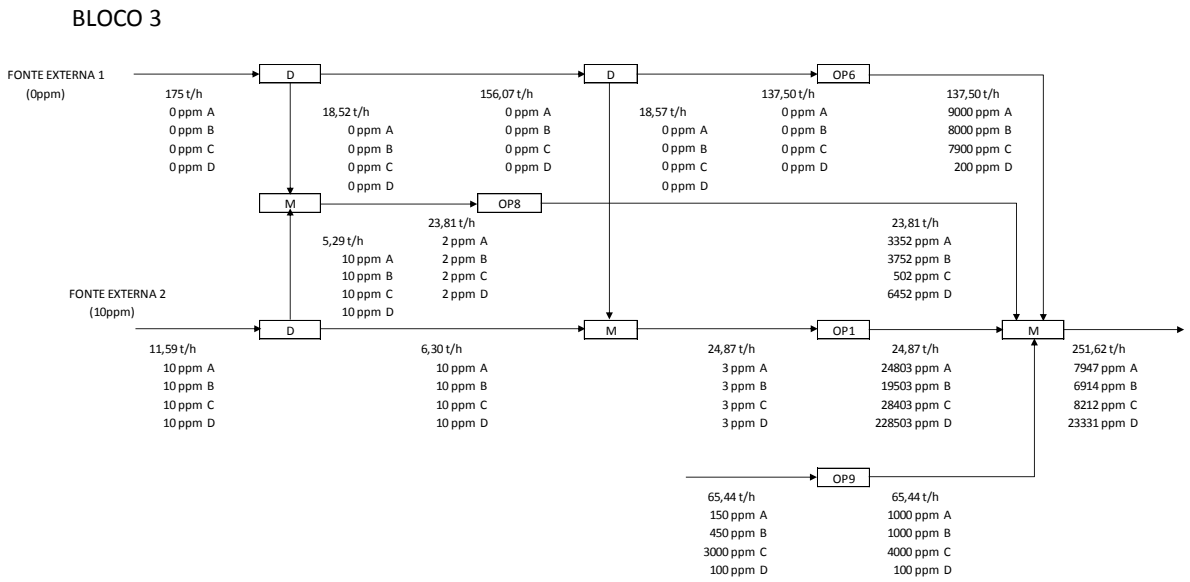

Figura 4.117 - Fluxograma – Bloco 3 – Cenário 15.

Não ocorrerem violações nos limites máximos de concentrações dos contaminantes nas operações. Há um aumento no consumo e descarte em razão da presença da operação 9, que encontra-se em seus limites máximos. As vazões do bloco estão presentes na Tabela 4.60.

Tabela 4.60 - Resultados do Bloco 3 – Cenário 15.

BLOCO 3			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
6	137,50	-	137,50
1	18,57	6,30	24,87
8	18,52	5,29	23,81
9	-	-	65,44
TOTAL	**174,59**	**11,59**	**251,62**

4.1.1.3.16 ***Conclusões Parciais***

O cenário 10 apresenta o melhor resultado para o consumo e descarte de 169,90 t/h no total. Ele será considerado o cenário de referência para que sejam escolhidas as operações do bloco. Uma vez escolhida a operação 1 para fazer parte do bloco, automaticamente estão descartados os cenários que possuem esta operação nos demais blocos. Deste modo, o próximo passo é decidir qual o melhor cenário para cada bloco e formar uma superestrutura composta de todos os blocos, sem a repetição de operações nos blocos. A Tabela 4.61 mostra um resumo dos resultados obtidos em cada bloco.

Tabela 4.61 - Resumo dos resultados obtidos em cada cenário do bloco 3.

	Operações	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**	**Violação?**
Cenário 1	1, 2, 3 e 6	189,49	53,06	242,55	NÃO
Cenário 2	1, 2, 4 e 6	165,18	42,14	207,32	NÃO
Cenário 3	1, 2, 5 e 6	165,18	41,70	206,88	NÃO
Cenário 4	1, 2, 8 e 6	183,70	43,46	227,16	NÃO
Cenário 5	1, 2, 9 e 6	165,18	36,58	267,20	NÃO
Cenário 6	1, 3, 4 e 6	180,39	25,15	205,54	NÃO
Cenário 7	1, 3, 5 e 6	180,39	25,07	205,46	NÃO
Cenário 8	1, 3, 8 e 6	198,91	26,47	225,38	NÃO
Cenário 9	1, 3, 9 e 6	180,39	21,18	267,01	NÃO
Cenário 10	1, 4, 5 e 6	156,07	13,80	169,90	**NÃO**
Cenário 11	1, 4, 8 e 6	162,32	15,56	190,15	NÃO
Cenário 12	1, 4, 9 e 6	156,07	10,27	231,78	NÃO
Cenário 13	1, 5, 8 e 6	174,59	15,12	189,71	NÃO
Cenário 14	1, 5, 9 e 6	156,07	9,83	231,34	NÃO
Cenário 15	1, 8, 9 e 6	174,59	11,59	251,62	NÃO

4.1.1.4 BLOCO FINAL

4.1.1.4.1 *Análise Preliminar*

No bloco 1, viu-se que o melhor cenário foi o 16. Descartando a operação 1 do bloco 1, pois ela já faz parte do bloco 3, restam ainda os cenários 14 OPs(10, 3, 8), 15 OPs(10, 3, 9) e 21 OPs(10, 8, 9). No bloco 1 o consumo e descarte de água totais para estes cenários são 59,78, 93,19 e 80,05 t/h, respectivamente. Pela lógica, a melhor combinação corresponderia ao **cenário 14**, pois possui a menor vazão total de descarte. Entretanto, será analisada nos demais blocos a seguir a viabilidade de escolha para cada um desses cenários. O cenário 14 permanece como um provável melhor cenário para o bloco 1.

No bloco 2, o melhor cenário foi também o 16. Eliminando as combinações que possuem a operação 1 (lembrando que esta já faz parte do bloco 3), restam os cenários: 7 OPs(7, 2, 3), 10 OPs(7, 2 8), 11 OPs(7, 2, 9), 14 OPs (7, 3, 8), 15 OPs(7, 3, 9) e 21 OPs(7, 8, 9). As vazões de consumo e descarte totais de água para estas combinações são: 367,32, 353,36, 394,17, 350,50, 391,50 e 377,23 t/h, respectivamente. A combinação que apresenta menor vazão é referente ao **cenário 14**. Este cenário é um provável candidato a compor o bloco 2, restando apenas a última análise no bloco 3.

No bloco 3, o cenário com menor descarte foi o 10 (referência). Além deste as demais configurações também podem ser escolhidas, tais como o cenário 1 OPs(6, 1, 2 3), 4 OPs(6, 1, 2, 8), 5 OPs(6, 1, 2, 9), 8 OPs(6, 1, 3, 8), 9 OPs(6, 1, 3, 9) e 15 OPs(6, 1, 8, 9). As vazões de descarte destes cenários são respectivamente: 242,55, 227,16, 267,20, 225,38, 267,01 e 251,62 t/h. **O cenário 8** é o que apresenta a menor vazão de descarte, depois do cenário de referência. Logo, este cenário é um possível candidato a fazer parte do bloco 3.

A Tabela 4.62 mostra os dados de vazão para cada cenário apresentado na análise preliminar.

Tabela 4.62 - Resumo dos resultados levantados na análise preliminar para cada bloco.

Blocos	Melhor cenário	Cenários	Operações	Descarte (t/h)
BLOCO 1	**Cenário 16** (7,12 t/h)	**Cenário 14**	**3, 8 e 10**	**59,78**
		Cenário 15	3, 9 e 10	93,19
		Cenário 21	8, 9 e 10	80,05
BLOCO 2	**Cenário 16** (297,41 t/h)	Cenário 7	2, 3 e 7	367,32
		Cenário 10	2, 8 e 7	353,36
		Cenário 11	2, 9 e 7	394,17
		Cenário 14	**3, 8 e 7**	**350,50**
		Cenário 15	3, 9 e 7	391,50
		Cenário 21	2, 9 e 7	377,23
BLOCO 3	**Cenário 10** (169,90 t/h)	Cenário 1	1, 2, 3 e 6	242,55
		Cenário 4	1, 2, 8 e 6	227,16
		Cenário 5	1, 2, 9 e 6	267,20
		Cenário 8	**1, 3, 8 e 6**	**225,38**
		Cenário 9	1, 3, 9 e 6	267,01
		Cenário 15	1, 8, 9 e 6	251,62

4.1.1.4.2 *Propostas – BLOCO FINAL*

Se no bloco 1 o cenário de referência 16 for o escolhido, restam como alternativas para o bloco 2 os cenários 14 e 15. O cenário 14 possui menor vazão de descarte (350,69 t/h). Caso este seja o escolhido, resta para o bloco 3 apenas o cenário 5. Tem-se a seguinte proposta para o conjunto de blocos mostrada na Tabela 4.63.

Tabela 4.63 - Proposta 1 para o Bloco Final.

PROPOSTA 1 - BLOCO FINAL				
Bloco	**Melhor cenário**	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
1	**16**	4,00	3,12	7,12
2	14	290,96	59,73	350,69
3	5	165,18	36,58	267,20
TOTAL		**460,14**	**99,43**	**625,01**

Caso o cenário de referência 16 seja o escolhido para compor o bloco 2, restam como alternativas para o bloco 1 os cenários 14, 15 e 21. Dentre os três o 14 é o que apresenta me-

nor vazão, 59,78 t/h. Logo, sendo este escolhido para o bloco 2, resta apenas como possibilidade o cenário 5. A Tabela 4.64 mostra a segunda proposta para o bloco final.

Tabela 4.64 - Proposta 2 para o Bloco Final.

PROPOSTA 2 - BLOCO FINAL				
Bloco	**Melhor cenário**	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
1	14	4,00	55,78	59,78
2	**16**	290,96	6,45	297,41
3	5	165,18	36,58	267,20
TOTAL	**-**	**460,14**	**98,81**	**624,39**

No entanto, quando o cenário 16 é escolhido para compor o bloco 2 é também possível decidir qual é a melhor combinação para o bloco 3. Nesse caso, os cenários 1, 4, 5, 8, 9 e 15 são possíveis. Caso o cenário 1 seja escolhido, resta como possibilidade para o bloco 1, o cenário 21. A Tabela 4.65 mostra mais esta proposta.

Tabela 4.65 - Proposta 3 para o Bloco Final.

PROPOSTA 3 - BLOCO FINAL				
Bloco	**Melhor cenário**	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
1	21	4,00	76,05	80,05
2	**16**	290,96	6,45	297,41
3	1	189,49	53,06	242,55
TOTAL	**-**	**460,14**	**98,81**	**620,02**

Nas escolhas dos cenários 8, 9 e 15 no bloco 3, os cenários escolhidos para o bloco 1 são 11, 10 e 7, respectivamente. Em todos estes ocorre violação nas concentrações dos contaminantes na operação 2. Por tanto, os cenários 11, 10 e 7 não serão considerados nos cálculos. Se o cenário 5 for escolhido para o bloco 3, resta para o bloco 1 o cenário 14 e chega-se aos mesmos resultados apresentados na Tabela 4.64.

Por fim, se o cenário 4 for o escolhido para o bloco 3, resta para o bloco 1 o cenário 15. Tem-se então os seguintes resultados.

Tabela 4.66 - Proposta 4 para o Bloco Final.

PROPOSTA 4 - BLOCO FINAL				
Bloco	**Melhor cenário**	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
1	15	4,00	89,19	93,19
2	**16**	290,96	6,45	297,41
3	4	183,70	43,46	227,16
TOTAL	**-**	**478,66**	**139,1**	**617,76**

Para a terceira e última análise (melhor cenário) é necessário avaliar a possibilidade do cenário 10 compor o bloco 3. Nesse caso restariam para o bloco 1 os cenários 14, 15 e 21. O cenário 14 apresenta o menor descarte. Logo, resta apenas a possibilidade do cenário 11 para o bloco 2. A Tabela 4.67 traz os resultados.

Tabela 4.67 - Proposta 5 para o Bloco Final.

PROPOSTA 5 - BLOCO FINAL				
Bloco	**Melhor cenário**	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
1	14	4	55,78	59,78
2	11	290,96	103,21	394,17
3	**10**	156,07	13,80	169,90
TOTAL	**-**	**451,03**	**172,79**	**623,85**

Mas caso o cenário 14 não seja o escolhido para compor o bloco 1, resta como opção para fazer parte do bloco 2 os cenários 7,10, 11, 14, 15 e 21. No entanto, não é possível levar os cálculos adiante para os cenários 14, 15 e 21, uma vez que para o bloco 1 os cenários restantes a serem analisados seriam 7, 10 e 11. Em todos estes cenários (bloco 1) a operação 2 está presente e apresenta violação nas concentrações dos contaminantes, conforme mostrado na Tabela 4.23. Restam os cenários 7, 10 e 11 como possíveis candidatos para compor o bloco 2. Se o cenário 11 for selecionado, então o cenário escolhido no bloco 1 é o 14 e o resultado será o mesmo da Tabela 4.67. Se o cenário escolhido for o 7, então para o cenário 1 restará como possibilidade o cenário 21. Dessa forma, tem-se a proposta apresentada na Tabela 4.68.

Tabela 4.68 - Proposta 6 para o Bloco Final.

PROPOSTA 6 - BLOCO FINAL				
Bloco	**Melhor cenário**	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
1	21	4	76,05	80,05
2	7	290,96	76,66	367,62
3	**10**	156,07	13,80	169,90
TOTAL	**-**	**451,03**	**166,51**	**617,57**

E por fim escolhendo-se o cenário 10 para compor o bloco 2 resta para o bloco 1 o cenário 15. Assim chega-se à possibilidade mostrada na Tabela 4.69.

Tabela 4.69 - Proposta 7 para o Bloco Final.

PROPOSTA 7 - BLOCO FINAL				
Bloco	**Melhor cenário**	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
1	15	4	89,19	93,19
2	10	290,96	62,40	353,36
3	**10**	156,07	13,80	169,90
TOTAL		**451,03**	**165,39**	**616,45**

A proposta 7 representa o melhor resultado obtido para a estratégia de blocos sugerida. Vale salientar que outras combinações poderiam ter sido feitas, tais como aumentar o número de blocos (2 operações por bloco, por exemplo), verificar as 25 possibilidades restantes para o bloco 3 ao invés de fixar a operação 1. Com os valores apresentados na Tabela 4.69, é possível montar uma superestrutura. A Figura 4.118 mostra o resultado dessa combinação para a proposta 7.

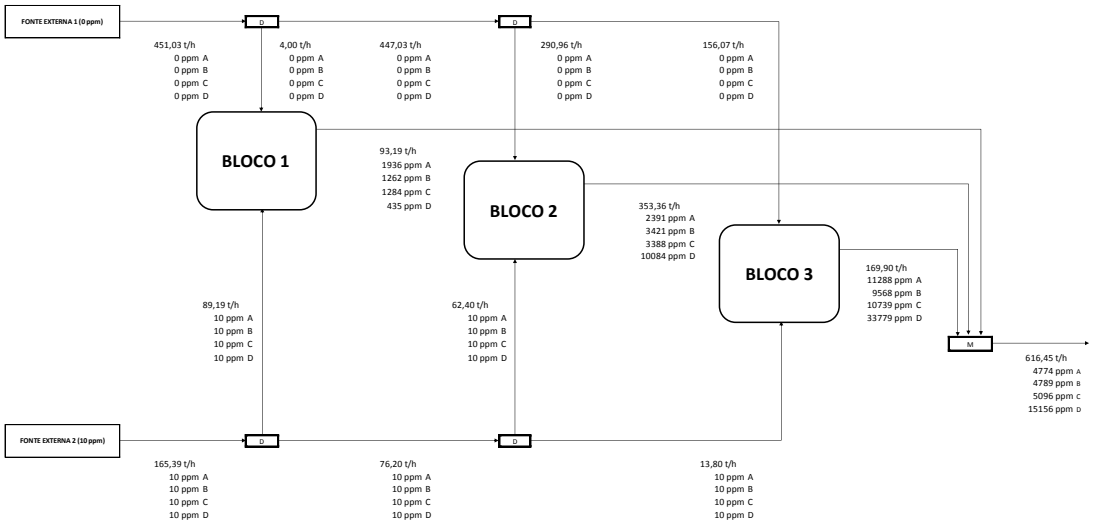

Figura 4.118 - Superestrutura - Bloco Final.

Com a superestrutura montada é possível fazer um comparativo com os resultados obtidos via programação matemática por Leewongtanawit e Kim (2008), mostrados na Figura 4.119. Os autores fizeram uso de programação não linear inteira mista (MINLP) e desenvolveram uma função objetivo para minimizar o custo global anualizado associado consumo de água limpa, tubulação (conexões, comprimento, material, etc.), utilidades e trocador de calor. A Equação (4.9) mostra a função objetivo utilizada.

$$P^{MINLP} = \min\{\mathrm{Cost}_{\mathrm{fwc}}^{\mathrm{WAN}} + \mathrm{Cost}_{\mathrm{pwc}}^{\mathrm{WAN}} + \mathrm{Cost}_{\mathrm{utc}}^{\mathrm{WAN}} + \mathrm{Cost}_{\mathrm{hec}}^{\mathrm{WAN}}\} \tag{4.9}$$

O $\mathrm{Cost}_{\mathrm{fwc}}^{\mathrm{WAN}}, \mathrm{Cost}_{\mathrm{pwc}}^{\mathrm{WAN}}, \mathrm{Cost}_{\mathrm{utc}}^{\mathrm{WAN}}$ *e* $\mathrm{Cost}_{\mathrm{hec}}^{\mathrm{WAN}}$, são os custos com água limpa a 0 ppm, com tubulação, utilidades e trocador de calor respectivamente.

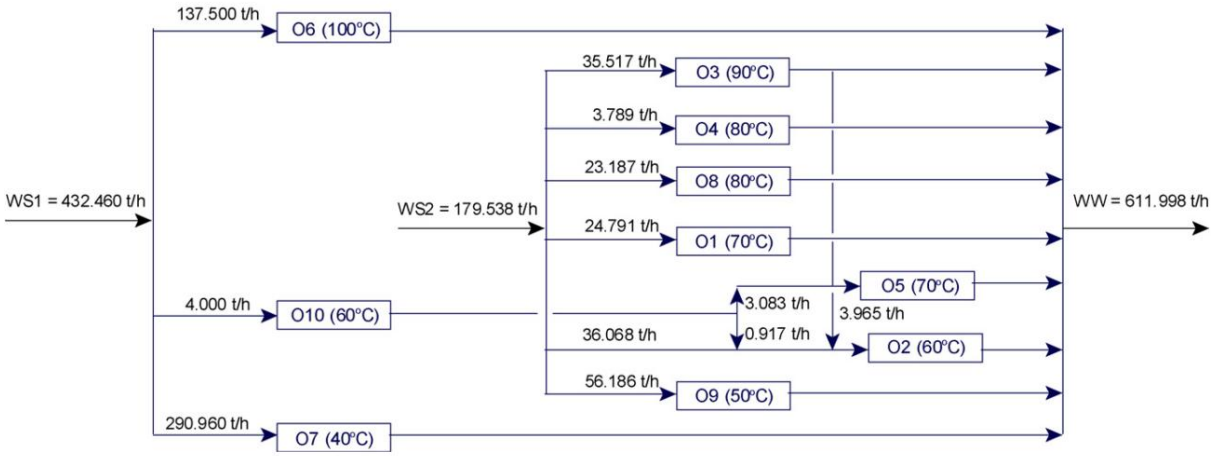

Figura 4.119 - Resultados obtidos por Leewongtanawit e Kim (2008).

Os resultados de Leewongtanawit e Kim (2008) mostram uma captação de água primária da fonte externa 1 (WS1) de 432,46 t/h com um consumo da segunda fonte externa (WS2) de 179,54 t/h e um descarte total de (WW) 612 t/h.

Nota-se que com relação à captação de água primária há uma diferença de 4,11% a mais para o resultado do presente trabalho. Por outro lado o consumo de água a 10 ppm foi 7,88% menor para a estratégia proposta. No descarte total a diferença foi de 0,722%, o que representa um resultado do ponto de vista de otimização, bastante significativo em compara-

ção ao obtido pelo pacote computacional WATER©[10] utilizado por Leewongtanawit e Kim (2008).

O ajuste fino que a estratégia proposta precisaria para reduzir ainda mais o consumo e consequente descarte de água talvez esteja no desenvolvimento de um pacote computacional que possibilite a escolha do número de blocos para um dado sistema e que forneça todas as possibilidades de cenários, apontando aqueles em que há ou não violações. A implementação da lógica do deslocamento para montar as múltiplas tabelas de possibilidades já poderia ser fornecida "built in".

A seguir será feita uma comparação entre a estratégia *Total Site* proposta e a forma como o DFA vem sendo aplicado em outros trabalhos.

4.1.1.5 Comparativo DFA tradicional e Estratégia *TOTAL SITE*

Para realizar esse comparativo são formados quatro cenários do mesmo processo com quatro diferentes contaminantes de referência. A operação de referência para cada um deles é a 10, pois ela faz uso de água primária (0 ppm) e todos os seus contaminantes possuem essa restrição. Estes cenários são referentes aos deslocamentos realizados para cada contaminante e operação de referencia no estudo de caso proposto. O DFA é aplicado a cada um dos cenários sem que haja divisão em blocos, ou seja, o sistema é considerado como um todo (DFA Global). O objetivo dessa análise é verificar a quantidade de água captada e descartada sem haver as divisões por blocos e contestar a deficiência do DFA quando aplicado em problemas contendo mais de uma operação na qual pelo menos um de seus contaminantes possua concentração máxima nula na entrada.

4.1.2 Cenário 1

A Figura 4.120 mostra o diagrama gerado a partir dos dados limites que o definem, mostrados na Tabela 4.1 o qual está dividido em 16 intervalos.

[10] WATER©(Version 2.0), Centre for Process Integration, The University of Manchester, Manchester, UK, 2006.

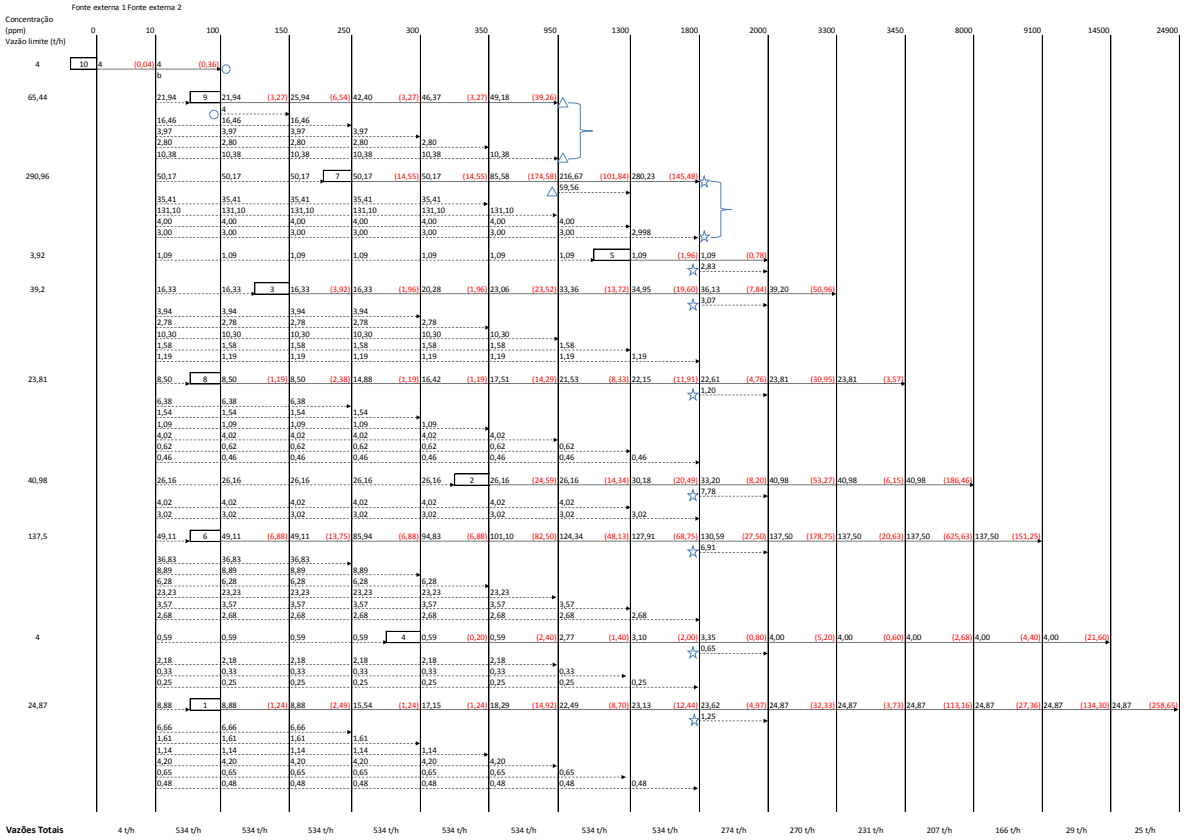

Figura 4.120 - Diagrama de Fontes de Água para o cenário 1 (contaminante A e operação 10 como referências).

No primeiro intervalo está disponível a fonte externa com água primária (0 ppm) e apenas a operação 10 participa, sendo transferida uma carga de 4 t/h. No segundo intervalo há uma mudança e as operações consomem um total de 534 t/h, que se mantém até o nono intervalo. Em seguida observa-se o ponto de *pinch* a 274 t/h, onde há uma diminuição na vazão total que participa do décimo intervalo. Após isso, percebe-se uma diminuição progressiva nesse valor até atingir 25 t/h no último intervalo. Na Figura 4.121 é mostrado o fluxograma correspondente ao DFA da Figura 4.120.

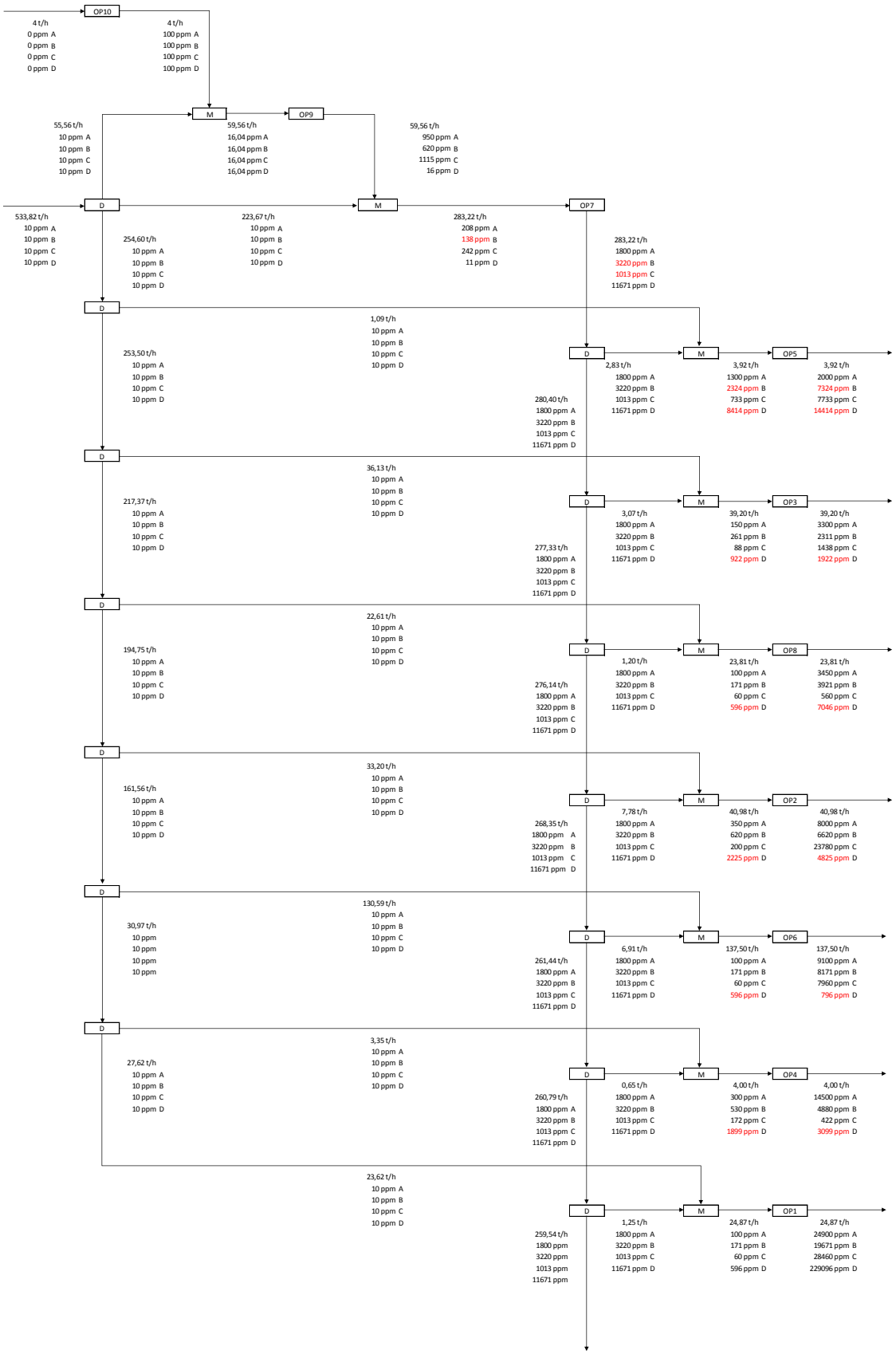

Figura 4.121 - Fluxograma da rede de transferência de massa (cenário 1).

A Tabela 4.70 mostra as vazões globais de captação e descarte de água.

Tabela 4.70 – Resultados DFA Global – Cenário 1.

DFA GLOBAL			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
1	-	23,62	24,87
2	-	33,20	40,98
3	-	36,13	39,20
4	-	3,35	4,00
5	-	1,09	3,92
6	-	130,59	137,50
7	-	223,67	259,54
8	-	22,61	23,81
9	-	55,56	-
10	4,00	-	-
TOTAL	**4,00**	**529,82**	**533,82**

Nota-se na Tabela 4.68 que o consumo total de água da segunda fonte externa foi bem superior ao consumo da superestrutura do bloco final. No entanto, o consumo total foi de 533,82 t/h, ou seja, 12,77% menor em relação ao trabalho de Leewongtanawit e Kim (2008) e 13,40% menor em relação ao bloco final. Percebe-se também que o descarte para tratamento difere do consumo nas fontes externas. Isso é justificado pelos grandes reúsos da operação 9 na 7 e da 7 nas demais. Não foi levada em conta a proibição de reúso em nenhuma das operações e algumas apresentaram violação (valores em vermelho) em suas concentrações limites de entrada e saída. A maioria das violações ocorreu com respeito ao contaminante D.

Vale salientar que estes resultados não representam a realidade uma vez que houve violações nas concentrações limites de entrada e saída dos contaminantes. A possibilidade de aumentar a vazão a montante das operações nas quais ocorreram violações é uma alternativa. Entretanto isso não é possível para as operações que possuem contaminantes com concentrações de entrada iguais a zero, como é o caso das operações 6 e 7. Isso pode ser verificado mediante um balanço de massa a montante da operação 7, conforme mostra a Figura 4.122.

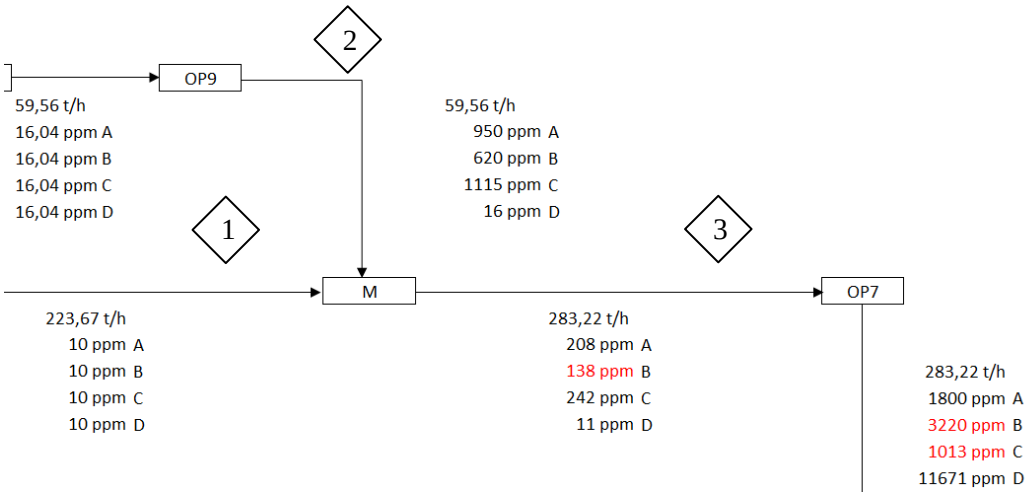

Figura 4.122 - Balanço de massa a montante da operação 7.

Nota-se que a violação na concentração de entrada do contaminante B é de 138 ppm. A pergunta a ser feita é: *Qual é a vazão necessária na entrada da operação 7 de modo que a concentração de B seja igual a zero?* Para responder a esta questão tem-se o seguinte balanço de massa:

$$F_1 + F_2 = F_3$$
$$F_1 C_B^1 + F_2 C_B^2 = F_3 C_B^3 \tag{4.10}$$

F_1, F_2, F_3 são as vazões totais das correntes 1, 2 e 3, respectivamente. C_B^1, C_B^2 *e* C_B^3 são as concentrações do contaminante B nas correntes 1, 2 e 3, respectivamente. Deseja-se encontrar F_3 de modo que $C_B^3 = 0$. Logo:

$$F_3 = \frac{F_1 C_B^1 + F_2 C_B^2}{C_B^3} = \frac{F_1 C_B^1 + F_2 C_B^2}{0} \rightarrow \infty \tag{4.11}$$

A Equação (4.11) mostra a impossibilidade do aumento da vazão a montante da operação 7. O consumo de água primária deve ser imediato, sem sofrer influência de concentrações provenientes de outras operações.

4.1.3 Cenário 2

Para este cenário considerou-se como referências a operação 10 e o contaminante B. A Figura 4.123 mostra o diagrama de fontes de água gerado.

Diferente do DFA anterior, este consome mais água limpa (0 ppm), chegando a um total de 314 t/h no primeiro intervalo, o que representa um aumento de 98,7%, conforme exibe a Figura 4.123. No segundo intervalo, o total utilizado é de 562 t/h e assim permanece até o oitavo intervalo, quando há uma queda para 235 t/h no nono intervalo (ponto de *pinch*). Depois há uma queda contínua que finaliza com 25 t/h no último intervalo. Houve um aumento de 4,98% na captação de água da segunda fonte externa a 10 ppm em relação ao cenário anterior.

Conforme mostra o fluxograma da Figura 4.124, o contaminante C é o que apresenta o maior número de violações nas concentrações de entrada e saída das operações. Aqui também não foi levada em conta a proibição de reúso em nenhuma dessas.

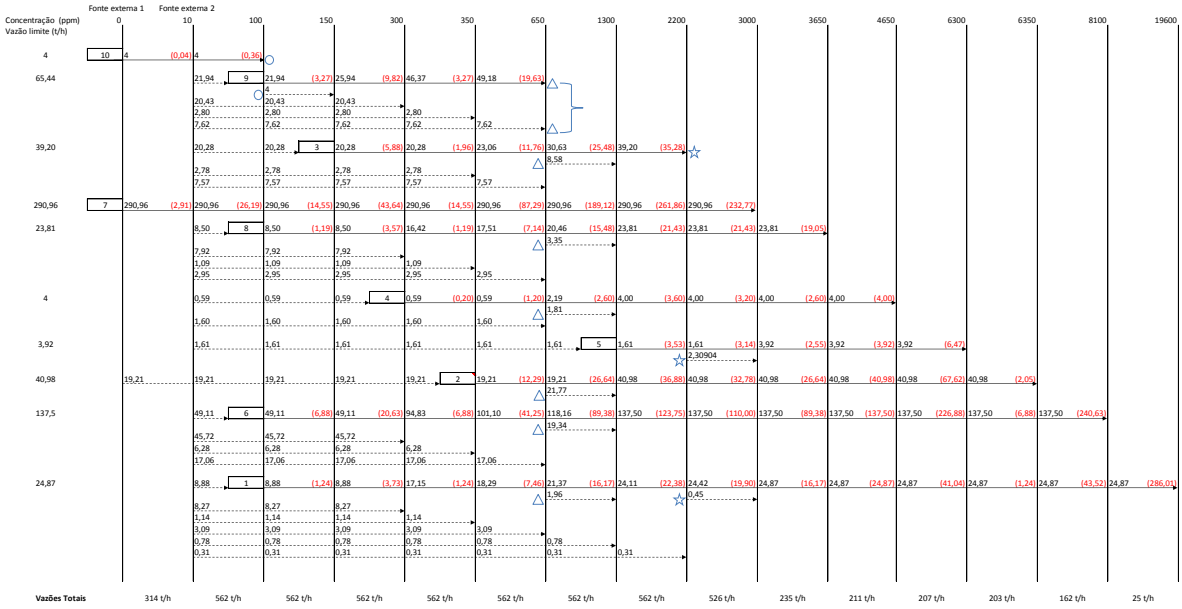

Figura 4.123 - Diagrama de Fontes de Água para o cenário 2 (contaminante B e operação 10 como referências).

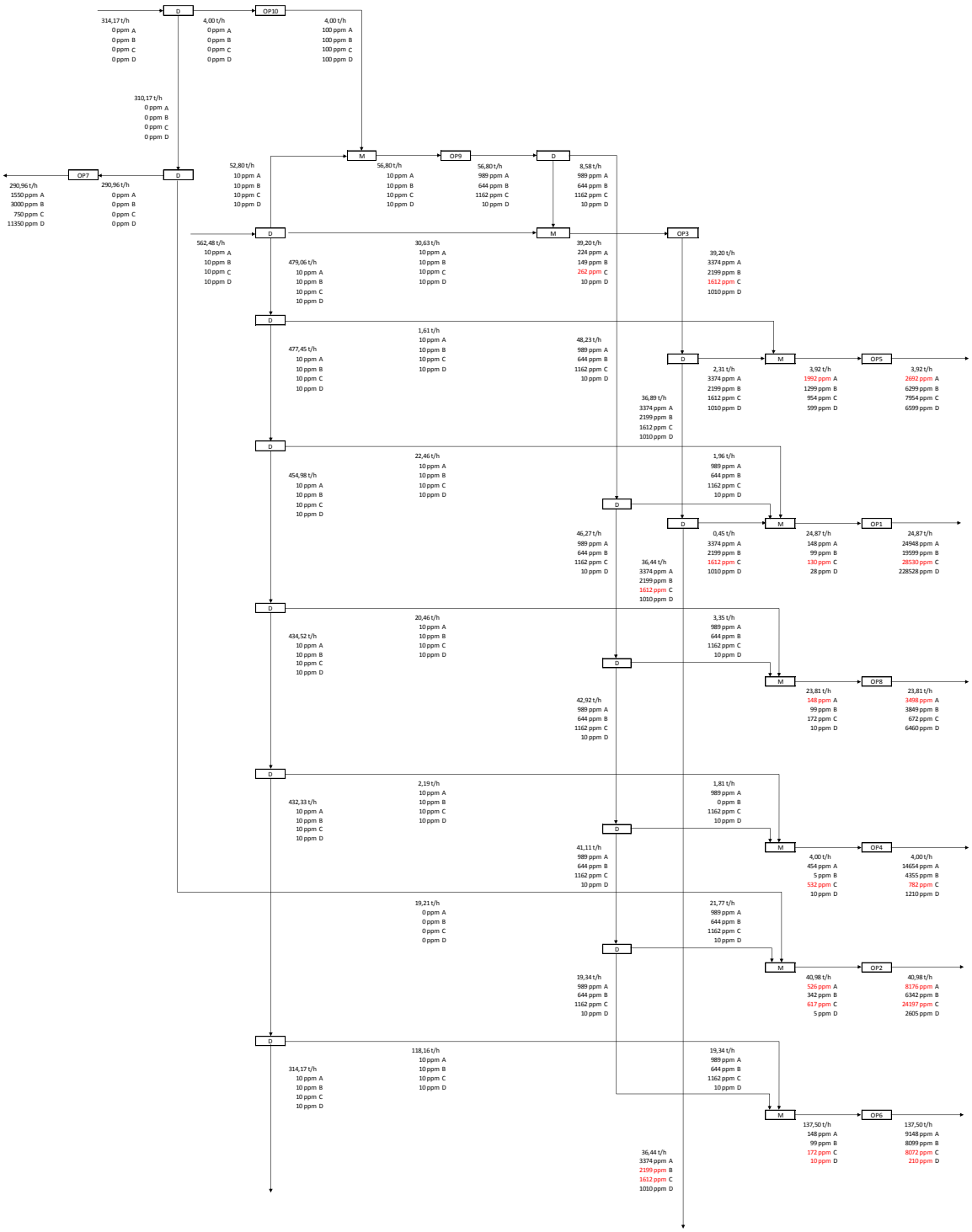

Figura 4.124 - Fluxograma da rede de transferência de massa (cenário 2).

A Tabela 4.71 mostra as vazões globais.

Tabela 4.71 – Resultados DFA Global – Cenário 2.

DFA GLOBAL			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
1	-	22,46	24,87
2	19,21	-	40,98
3	-	30,63	36,44
4	-	2,19	4,00
5	-	1,61	3,92
6	-	118,16	137,50
7	290,96	-	290,96
8	-	20,46	23,81
9	-	52,80	-
10	4,00	-	-
TOTAL	**314,17**	**248,31**	**562,48**

Observando a tabela anterior nota-se que houve mais consumo da fonte externa 1 do que da 2 e o descarte total igualou-se ao consumo total de 562,48 t/h. Esse valor representa uma diminuição de 8,09 t/h em comparação com os resultados obtidos por Leewongtanawit e Kim (2008) e de 8,75% em relação ao obtido via divisão de blocos.

Mais uma vez não é possível levar em consideração estes resultados uma vez que houve violações nas concentrações máximas dos contaminantes em algumas operações. Desta vez a operação 7 não sofre violações. O mesmo não ocorre com a operação 6 e o problema mostrado na Equação (4.11) permanece, pois o contaminante D nesta operação necessita de água a 0 ppm.

4.1.4 Cenário 3

Desta vez o contaminante de referência escolhido é o C e o DFA é mostrado na Figura 4.125. O montante de água limpa recebida da fonte externa a 0 ppm continua igual ao observado no primeiro cenário, igual a 4 t/h. Já no segundo intervalo, o total captado da segunda fonte externa a 10 ppm é de 336 t/h e isso representa uma diminuição de 37,07% e 59,78% em relação aos cenários 1 e 2, respectivamente. Essa vazão é a mesma até o nono intervalo, quando há um aumento para 582 t/h (ponto de *pinch*). Já no intervalo seguinte esse valor diminui

para 234 t/h, que também é o mesmo valor do décimo segundo intervalo. Depois há uma diminuição até que no último intervalo a vazão total atinge 25 t/h.

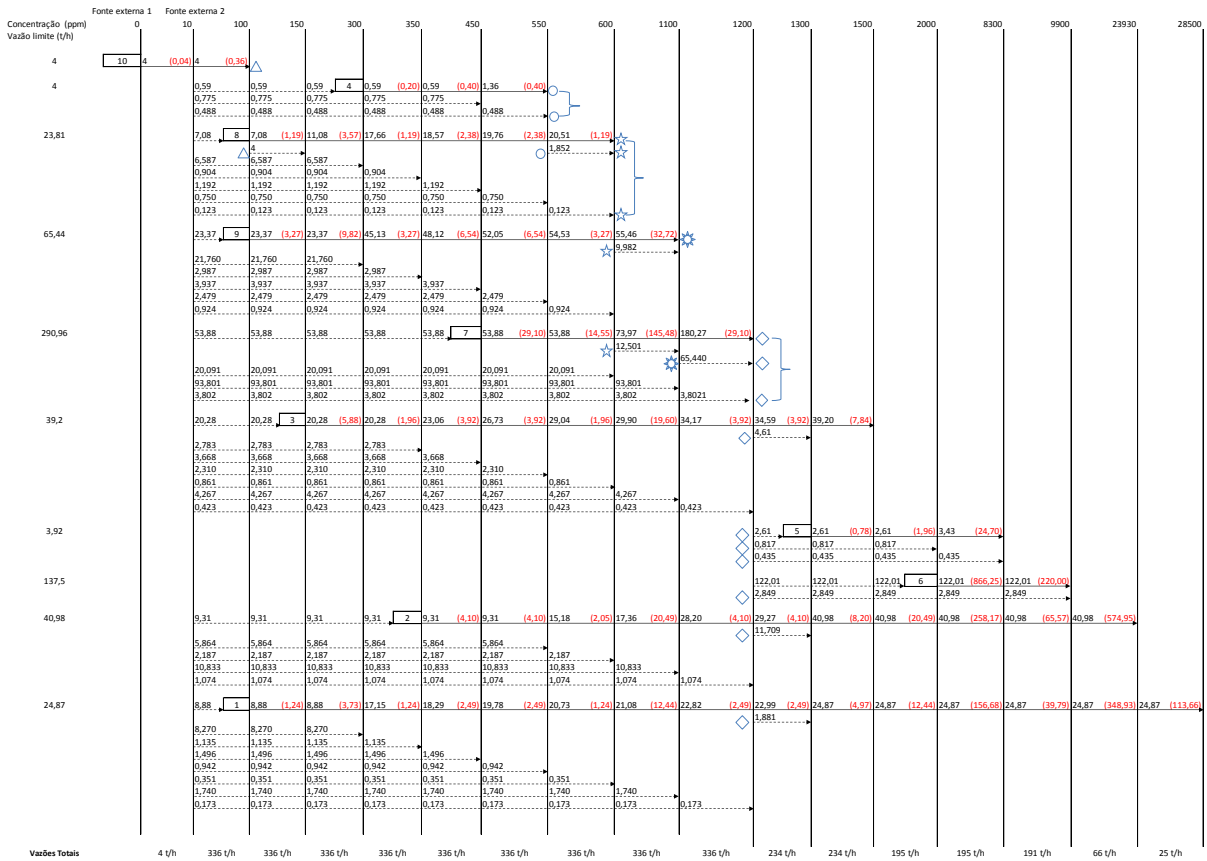

Figura 4.125 - Diagrama de Fontes de Água para o cenário 3 (contaminante C e operação 10 como referências).

Pelo fluxograma exibido na Figura 4.126 é possível notar que houve poucas violações nas operações. No entanto nas operações em que houve violação nas concentrações de entrada e saída todos os contaminantes foram afetados.

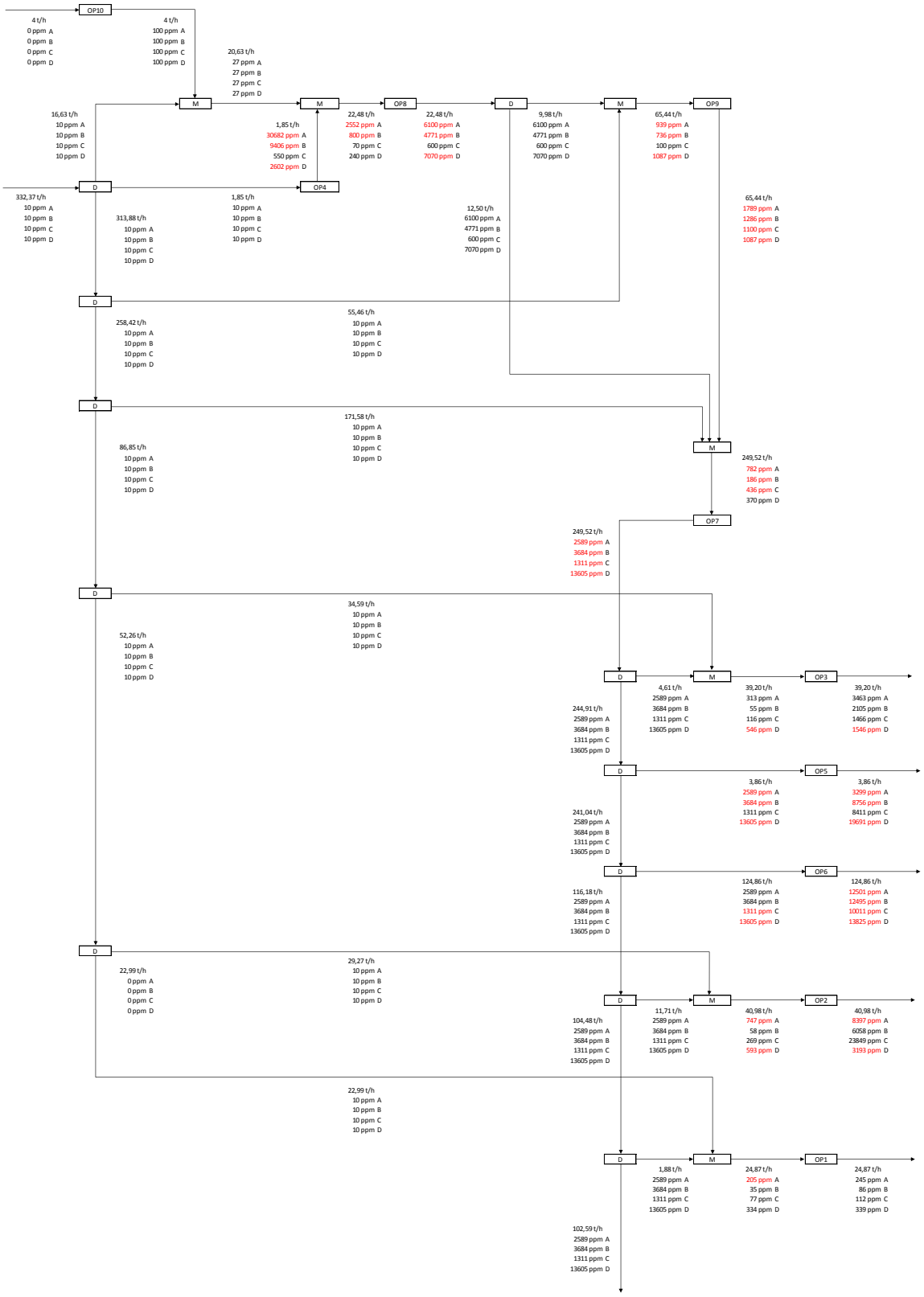

Figura 4.126 - Fluxograma da rede de transferência de massa (cenário 3).

A Tabela 4.72 mostra as vazões globais.

Tabela 4.72 – Resultados DFA Global – Cenário 3.

DFA GLOBAL			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
1	-	22,99	24,87
2	-	29,27	40,98
3	-	34,59	39,20
4	-	1,85	-
5	-	-	3,86
6	-	-	124,86
7	-	171,58	102,59
8	-	16,63	-
9	-	55,46	-
10	4,00	-	-
TOTAL	**4,00**	**332,37**	**336,37**

Esse foi o menor valor de consumo/descarte até então observado. A vazão de 336,36 t/h representa uma diferença de 45,04% em relação ao trabalho de Leewongtanawit e Kim (2008) e 45,44% em relação ao procedimento *Total Site*. Mesmo sendo um bom resultado, não reflete a realidade, pois as violações ainda persistem. As operações 6 e 7 voltam a sofrer violações nas concentrações máximas impossibilitando o acréscimo de vazão na entrada como possível alternativa, como já mostrado na Equação (4.11).

4.1.5 Cenário 4

Este é o último cenário, o qual traz o contaminante D como referência. A quantidade de água primária aumentou para 142 t/h, algo em torno de 97,18% em relação cenário anterior. Já do segundo ao décimo primeiro intervalos a vazão total é de 377 t/h, o que representa um aumento de 12,20% em relação ao cenário 3 e uma diminuição de 29,40% e 32,92% em comparação com os cenários 1 e 2, respectivamente.

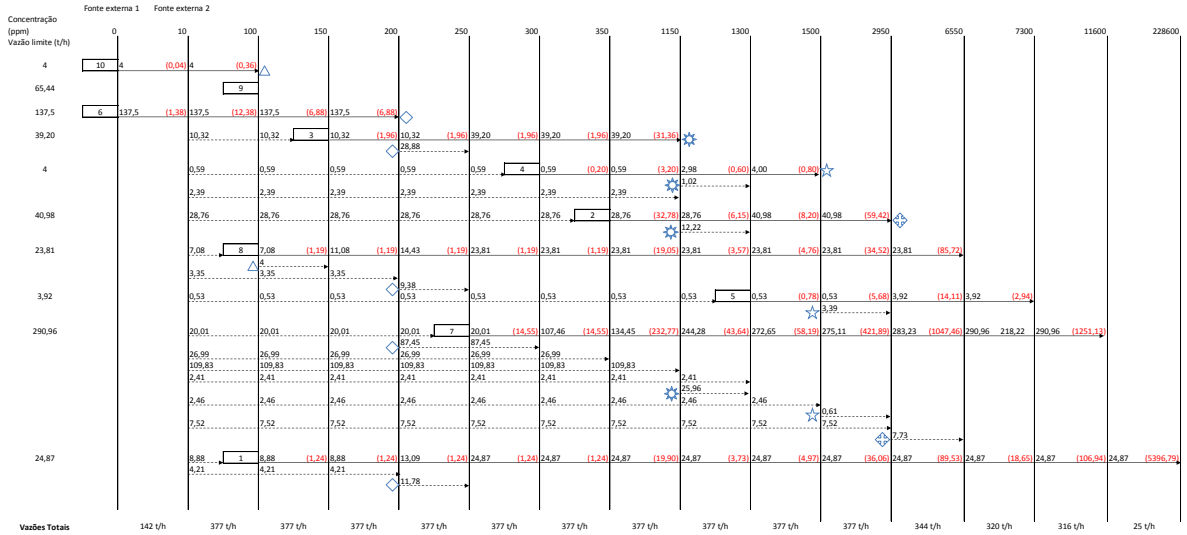

Figura 4.127 - Diagrama de Fontes de Água para o cenário 4 (contaminante D e operação 10 como referências).

Observando o fluxograma da Figura 4.128 nota-se que houve violação dos valores limites das concentrações de entrada e saída em algumas operações.

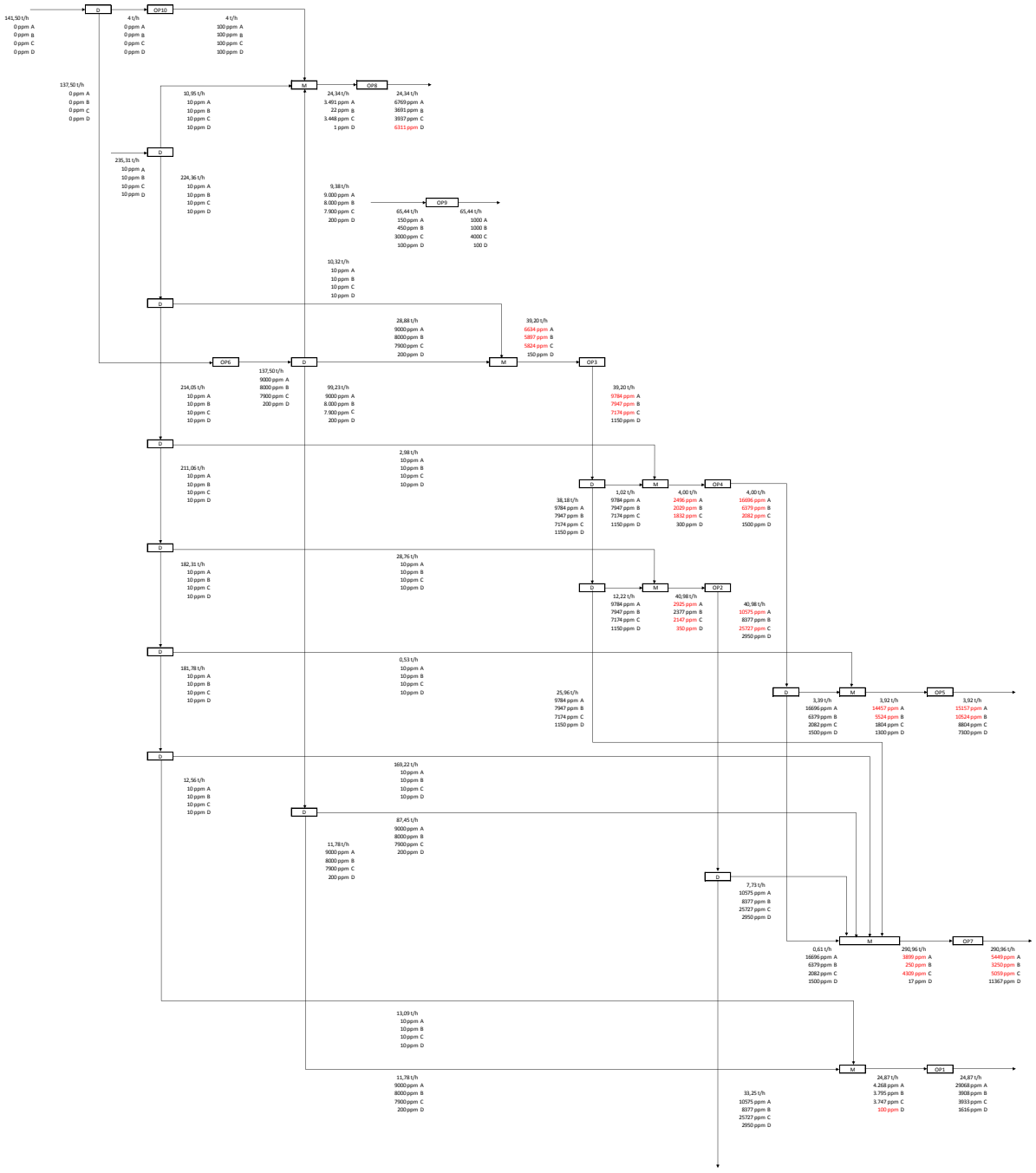

Figura 4.128 - Fluxograma da rede de transferência de massa (cenário 4).

A Tabela 4.73 mostra as vazões globais do processo.

Tabela 4.73 – Resultados DFA Global – Cenário 4.

DFA GLOBAL			
Operação	**Consumo FE1 (t/h)**	**Consumo FE2 (t/h)**	**Descarte (t/h)**
1	-	13,09	24,87
2	-	28,76	33,25
3	-	10,32	-
4	-	2,98	-
5	-	0,53	3,92
6	137,5	-	-
7	-	169,22	290,96
8	-	10,95	24,34
9	65,44	-	65,44
10	4,00	-	-
TOTAL	**206,94**	**235,85**	**442,78**

Pelo fato do contaminante de referência nesse cenário ser o D, a operação 9 ficou de fora do deslocamento do DFA. Entretanto, ela consome 65,44 t/h da fonte externa a 0 ppm.

4.1.5.1.1 *Conclusões Parciais*

Dentre os cenários produzidos, aquele que apresentou a menor captação de água primária e consequente descarte foi o 3, com um valor de 336,37 t/h, que representa um desvio para menos de 45,44% em relação ao procedimento proposto. As violações observadas já eram esperadas, uma vez em que as operações 6 e 7 não poderiam receber água a 10 ppm em nenhum dos cenários. Isso se deve ao fato dos contaminantes B e D, respectivamente, nessas operações, possuírem na entrada a restrição máxima de concentração de 0 ppm. Desse modo, o uso do aplicativo MINEA se tornou inviável, pois este possibilita apenas a escolha um contaminante de referência por DFA gerado. Ou seja, se existem mais de uma operação candidata a operação de referência (pelo menos um contaminante com concentração máxima na entrada igual a zero), as que não forem escolhidas sofrerão violação nas suas concentrações, como foi mostrado nos quatros cenários anteriores.

No exemplo em questão, quando por exemplo o contaminante escolhido é o A, automaticamente as operações 6 e 7 ficam comprometidas pelas restrições dos contaminantes B e D. Mesmo assim se o contaminante escolhido for o D, após o deslocamento, a operação 6 possuirá limite mínimo de concentração igual a zero, no entanto a operação 7 não possuirá, pois nesse caso o contaminante escolhido deveria ser o D. O mesmo é observado caso o contaminante D seja escolhido. A operação 6 estaria comprometida, pois o deslocamento não seria feito de modo que o contaminante B possuísse limite mínimo igual a zero.

Esses problemas dificultaram ainda mais a procura por uma estratégia que abrangesse múltiplos contaminantes de referência e múltiplas operações de referência. Baseado nos teoremas de Savelski e Bagajewickz (2003), surgiu a ideia de criar uma superestrutura onde fosse possível aplicar a lógica do DFA em cada subestrutura formada.

CAPÍTULO 5

"*Tudo está conectado a tudo. Tudo vai para algum lugar. Nada é de graça. A natureza sabe o que é melhor*". Ernest Callenbach

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Foi testada a eficácia e a robustez do procedimento *TOTAL SITE* proposto. O exemplo tomado como base para a análise foi suficientemente grande e complexo para analisar os principais problemas que o DFA tem enfrentado. Dois grandes entraves que o DFA não conseguia solucionar com as ferramentas atuais foram resolvido: *a escolha do contaminante e da operação de referência*. A divisão do processo em blocos facilitou esta escolha, que é efetuada em cada bloco.

O principal critério observado para a seleção e posterior distribuição das operações de referências nos blocos é verificar se estas possuem algum contaminante com limite máximo de entrada igual a zero. Caso alguma possua um ou mais contaminantes nessa situação, será eleita como operação de referência. Se esta possuir apenas um contaminante com concentração na entrada zero, este contaminante será o de referência. Caso contrário, a Equação (2.1) deverá ser utilizada. O contaminante que apresentar o maior valor do parâmetro G será escolhido como contaminante de referência. Como observou-se nesse exemplo, podem existir casos em que os valores de G coincidam. Nessas situações, qualquer um dos contaminantes pode ser escolhido para ser referência.

Tendo em vista o grande número de cenários gerados em cada bloco e até mesmo a divisão e seleção dos blocos, torna-se necessária a automatização desse procedimento mediante o desenvolvimento de um pacote computacional. As etapas de escolha do número de blocos e de escolha dos contaminantes e operações de referência poderiam servir como entrada ou opção de escolha no software. A verificação do melhor cenário em cada bloco pode ser feita mediante a combinação entre as operações em cada bloco, descartando aquelas em que houve violações.

Percebe-se então que a estratégia proposta no presente trabalho pode se tornar referência na alocação dos recursos hídricos de uma planta química, petroquímica ou refinarias.

Basta que para isso haja uma sistematização dos cálculos (implementação computacional do algoritmo proposto) para diminuir o tempo de análise e tomada de decisões.

O uso do DFA tradicional sem a abordagem *TOTAL SITE* no estudo de caso proposto mostrou-se ineficaz, pois foram verificadas violações num número extenso de operações. Em alguns casos as violações podem ser contornadas mediante o acréscimo de água a montante das operações. No entanto, 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. Essa problemática corrobora a importância do uso do algoritmo *TOTAL SITE* proposto.

Para a melhoria do procedimento *TOTAL SITE* ficam as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Desenvolver um aplicativo computacional para automatizar os cálculos;
- Realizar um estudo para a escolha do número ótimo de blocos (quantas e quais operações devem estar contidas em cada um);
- Realizar um estudo para prever as possíveis combinações nas quais haveria violações, visando descarta-las a *priori*;
- Investigar a não linearidade da transferência de massa entre os contaminantes e a sua influência nos resultados;
- Realizar um estudo econômico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVA-ARGÁEZ, A.; KOKOSSIS, A. C.; SMITH, R. Wastewater minimisation of industrial systems using an integrated approach. **Computers & Chemical Engineering**, v. 22, n. Suppl., p. S741-S744, 1998.

ALVA-ARGÁEZ, A.; VALLIANATOS, A.; KOKOSSIS, A. A multi-contaminant transhipment model for mass exchange networks and wastewater minimisation problems. **Computers and Chemical Engineering**, v. 23, n. 10, p. 1439–1453, 1999.

ALVES, J. J. **Design and Analysis of Refinery Hydrogen Distribution Systems**. 1999 PhD thesis, [S.l.].

ANDERSON, D. Practical aspects of industrial reuse. **International Chemical Engineering Symposium Series.**, v. 52, 1977.

BAGAJEWICZ, M. A review of recent design procedures for water networks in refineries and process plants. **Computers & Chemical Engineering**, v. 24, n. 9-10, p. 2093-2113, 2000.

BAGAJEWICZ, M. J.; FARIA, D. C. **On the appropriate architecture of the water/wastewater allocation problem in process plants**. Computer Aided Chemical Engineering. [S.l.]: [s.n.], p. 1-20, 2009.

BAGAJEWICZ, M.; RIVAS, M.; SAVELSKI, M. **A new approach to the design of water utilization systems with multiple contaminants in process plant**. Annual American Institute of Chemical Engineering Meeting. [S.l.]: [s.n.], 1999.

BAGAJEWICZ, M.; SAVELSKI, M. On the Use of Linear Models for the Design of Water Utilization Systems in Process Plants with a Single Contaminant. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 79, n. 5, p. 600-610, 2001.

BAGAJEWIKCZ, M. J.; RIVAS, M.; MARIANO, S. J. A Robust Method to Obtain Optimal and Sub-Optimal Design and Retrofit Solutions of Water Utilization Systems with Multiple Contaminants in Process Plants. **Computers and Chemical Engineering**, v. 24, n. 2-7, p. 1461-1466, 2000.

BANDYOPADHYAY, S. Source composite curve for waste reduction. **Chemical Engineering Journal**, v. 125, n. 2, p. 99-110, 2006.

BANDYOPADHYAY, S.; CORMOS, C. C. Water Management in Process Industries Incorporating Regeneration and Recycle through a Single Treatment. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 47, n. 4, p. 1111–1119, 2008.

BERTAZZOLI, et al. NEI - Noticiário de Equipamentos Industriais. **Site da NEI**, 2010. Disponivel em: <http://www.nei.com.br/artigos/artigo.aspx?i=9>. Acesso em: 24 jul. 2010.

CARNES, B. A.; FORD, D. L.; BRAD, S. O. Treatment of Refinery Watewaters for Reuse. **Proceedings of the national conference on complete water reuse**, Wasshington, DC, 1973.

CARVALHO, B. S. et al. Application of Water Source for Multiple Sources and Multiple Contaminants Processes. **10th International Symposium on Process Systems Engineering - PSE 2009**, Salvador, p. 453-458, Outubro 2009.

CASTRO, P. et al. Improvements for mass-exchange networks design. **Chemical Engineering Science**, v. 54, n. 11, p. 1649-1665, 1999.

DELGADO, B. E. P. D. C. **Síntese de Sistemas de Regeneração e Tratamento Final de Efluentes**. 2008. 468 f. Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos), Escola de Química - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

DHOLE, R. V. et al. Pinch technology can be harnessed to minimize raw-water demand and wastewater generation alike. **Chemical Engineering**, p. 100-103, 1996.

DHOLE, V. R. et al. Make your process water pay for itself. **Chemical Engineering**, v. 103, p. 100-103, 1996.

EL-HALWAGI, M. M.; GABRIEL, F.; HARELL, D. Rigorous Graphical Targeting for Resource Conservation via Material Recycle/Reuse Networks. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 42, n. 19, p. 4319-4328, 2003.

EL-HALWAGI, M. M.; MANOUSIOUTHAKIS, V. Mass exchanger networks. **A.I.Ch.E. Journal**, v. 35, n. 8, p. 1233-1244, Aug 1989.

EL-HALWAGI, M. M.; MANOUSIOUTHAKIS, V. Automatic Synthesis of Mass-exchange Networks with Single-component Targets. **Chemical Engineering Science**, v. 45, n. 9, p. 2813-2831, 1990.

FARIA, D. C. **Reuso das correntes de efluentes aquosos em refinarias de petróleo**. 2004. 246 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

FARIA, D. C.; BAGAJEWICZ, M. J. On the Appropriate Modeling of Process Plant Water Systems. **AIChE Journal**, v. 56, n. 3, p. 668-689, 2010.

FOO, D. Water Cascade Analysis for Single and Multiple Impure Fresh Water Feed. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 85, n. 8, p. 1169-1177, 2007.

FOO, D. C. Y. State-of-the-Art Review of Pinch Analysis Techniques for Water Network Synthesis. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 48, n. 11, p. 5125–5159, 2009.

GABRIEL, F. B.; EL-HALWAGI, M. M. Simultaneous synthesis of waste interception and material reuse networks: Problem reformulation for global optimization. **Environmental Progress**, v. 24, n. 2, p. 171-180, 2005.

GALAN, B.; GROSSMANN, I. E. Optimal Design of Distributed Wastewater Treatment Networks. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 37, n. 10, p. 4036-4048, 1998.

GOMES, J. F. S. **Procedimento para Minimização de Efluentes Aquosos**. 2002 Dissertação de Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, EQ/DEQ/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ.

GOMES, J. F. S.; QUEIROZ, E. M.; PESSOA, F. L. P. Design procedure for water/wastewater minimization: single contaminant. **Journal of Cleaner Production**, v. 15, n. 5, p. 474-485, 2007.

GRANZIERA, M. L. M. **Direito de Águas - Disciplina Jurídica das Águas Doces**. 3ª Edição. ed. São Paulo: Atlas, 2006. 252 p.

HALLALE, N. A new graphical targeting method for water minimisation. **Advances in Environmental Research**, v. 6, n. 3, p. 377-390, 2002.

HOSPONDAREC, R. W.; THOMPSON, S. J. Oil-steam system for water reuse. **Proceedings of the American Institute of Chemical Engineering workshop.**, v. 7, 1974.

HUANG, C.-H.; CHANG, C.-T.; LING, H.-C. A Mathematical Programming Model for Water Usage and Treatment Network Design. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 38, n. 3, p. 2666-2679, 1999.

HUNGARO, M. **Desenvolvimento de Algoritmo para Síntese de Tratamento Distribuído para Efluentes Líquidos**. 2005. 145 f. Dissertação (Mestrado em engenharia química - COPPE), Rio de Janeiro.

JEŻOWSKI, J. Review of Water Network Design Methods with Literature Annotations. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 49, n. 10, p. 4475-4516, 2010.

KARUPPIAH, R.; GROSSMANN, I. E. Global optimization for the synthesis of integrated water systems in chemical processes. **Computers & Chemical Engineering**, v. 30, n. 4, p. 650-673, 2006.

KOPPOL, A. P. R. et al. On zero water discharge solutions in the process industry. **Advances in Environmental Research**, v. 8, n. 2, p. 151-171, 2004.

KUO, W. C. J.; SMITH, R. Effluent Treatment System Design. **Chemical Engineering Science**, v. 52, n. 23, p. 4273–4290, 1997.

LEEWONGTANAWIT, B.; KIM, J. Synthesis and optimisation of heat-integrated multiple-contaminant water systems. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 47, n. 4, p. 670-694, 2008.

LI, B.; FAN, X.; YAO, P. A. A New Method for Effluent Treatment System Design. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, v. 10, n. 3, p. 273-280, 2002.

LINNHOFF, B. **Thermodynamic Analysis in the Design of Process Networks**. 1979 [S.l.].

LINNHOFF, B. **Pinch Analysis - A State-of-the-art Overview**. [S.l.]: [s.n.], p. 503-522, Sep 1993.

LIU, Z.-Y. et al. Wastewater Minimisation Using a Heuristic Procedure. **International Journal of Chemical Reaction Engineering**, v. 2, n. A25, p. 1-10, 2004.

MAJOZI, T.; GOUWS, J. F. A mathematical technique for the design of near-zero-effluent batch processes. **Water SA**, v. 34, n. 3, p. 291-296, 2008.

MANAN, Z. A.; TAN, Y. L.; FOO, D. C. Y. Targeting the minimum water flow rate using water cascade analysis technique. **AIChE Journal**, v. 50, n. 12, p. 3169-3183, 2004.

MEYER, C. A.; FLOUDAS, C. A. Global optimization of a combinatorially complex generalized pooling problem. **AIChE Journal**, v. 52, n. 3, p. 1027–1037, 2006.

MIRRE, R. C. **Recuperação e Reúso de Água na Indústria de Petróleo Síntese de Redes de Transferência de Massa**. 2007. 215 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos), Escola de Química - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MISHRA, P. N.; FAN, L. T.; ERICKSON, L. E. Application of mathematical optimization techniques in computer aided design of wastewater treatment systems. Water (II). **American Institute of Chemical Engineering Symposium Series**, v. 71, p. 145, 1975.

NG, D. K. S. et al. Automated targeting for conventional and bilateral property-based resource conservation network. **Chemical Engineering Journal**, p. 87-101, 2009.

NG, D. K. S.; FOO, D. C. Y.; TAN, R. R. Targeting for Total Water Networks-Part 1: Waste Stream Identification. **Ind. Eng. Chem. Res**, v. 46, p. 9107–9113, 2007a.

NG, D. K. S.; FOO, D. C. Y.; TAN, R. R. Targeting for Total Water Networks-Part 2: Waste Treatment Targeting and Interactions with Water System Elements. **Ind. Eng. Chem. Res**, v. 46, p. 9114–9125, 2007b.

POLLEY, G. T.; POLLEY, H. L. Design better water networks. **Chemical Engineering Progress**, v. 96, p. 47-52, 2000.

PRAKASH, R.; SHENOY, U. Targeting and design of water networks for fixed flowrate and fixed contaminant load operations. **Chemical Engineering Science**, v. 60, p. 255-268, 2005.

PRAKOTPOL, D.; SRINOPHAKUN, T. GAPinch: genetic algorithm toolbox for water pinch technology. **Chemical Engineering and Processing**, v. 43, p. 203-217, 2004.

RUIZ, J. P.; GROSSMANN, I. E. **Global Optimization of Nonconvex Generalized Disjunctive Programs**. 10th International Symposium on Process Systems Engineering: Part A. [S.l.]: Computer Aided Chemical Engineering, p. 879-884, 2009.

SANE, M.; ATKINS, U. S. Industrial water management. **International Chemical Engineering Symposium Series.**, v. 52, 1977.

SANTOS, R. P. **Extenção e Automatização do Diagrama de Fontes de Água Usado no Gerenciamento e Redução do Consumo de Água em Plantas Industriais**. 2007. 176 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos), Escola de Química - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SAVELSKI, M.; BAGAJEWICKZ, M. On the optimality conditions of water utilization systems in process plants with single contaminants. **Chemical Engineering Science**, v. 55, p. 5035-5048, 2000.

SAVELSKI, M.; BAGAJEWICKZ, M. On the necessary conditions of optimality of water utilization systems in process plants with multiple contaminants. **Chemical Engineering Science**, v. 58, p. 5349-5362, 2003.

TAKAMA, N. et al. Optimal water allocation in a petroleum refinery. **Computers & Chemical Engineering**, v. 4, p. 251–258, 1980.

TELES, J.; CASTRO, P.; NOVAIS, A. LP-based solution strategies for the optimal design of industrial water networks with multiple contaminants. **Chemical Engineering Science**, v. 63, p. 376-394, 2008.

ULLMER, C. et al. WADO™: water design optimization-methodology and software for the synthesis of process water systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 13, p. 485-494, 2005.

ULSON DE SOUZA, A. A. et al. Application of Water Source Diagram (WSD) method for the reduction of water consumption in petroleum refineries. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 53, n. 3, p. 149-154, 2009.

ULSON DE SOUZA, A. et al. The modified water source diagram method applied to reuse of textile industry continuous washing water. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 12, p. 1405-1411, 2010.

WANG, Y. P.; SMITH, R. Design of Distributed Effluent Treatment Systems. **Chemical Engineering Science**, v. 48, p. 3127–3145, 1994.

WANG, Y. P.; SMITH, R. Wastewater minimization. **Chemical Engineering Science**, v. 49, p. 981, 1994.

WANG, Y. P.; SMITH, R. Wastewater Minimization with Flowrate Constraints. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 73, p. 889–904, 1995.