



Redução de Captação de Água em um Complexo Petroquímico

**Jardel Costa Domingos
Laís de Oliveira Ramos
Luciana Gomes Bastos**

Projeto Final de Curso

Orientadores:

**Prof. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D.Sc.
Sara Vasconcelos Marques, M.Sc.**

Abril de 2009

REDUÇÃO DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA EM UM COMPLEXO PETROQUÍMICO

Jardel Costa Domingos
Laís de Oliveira Ramos
Luciana Gomes Bastos

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química,
como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro
Químico.

Aprovado por:

Bernadete Elizardo Pereira da Costa Delgado, D.Sc.

Fabiana V. da Fonseca Araujo, D.Sc.

Juacyara Carbonelli Campos, D.Sc.

Orientado por:

Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D.Sc.

Sara Vasconcelos Marques, M.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Abril de 2009

Domingos, Jardel Costa; Ramos, Laís de Oliveira; Bastos, Luciana Gomes. Redução da Captação de Água em um Complexo Petroquímico/ Jardel Costa Domingos, Laís de Oliveira, Luciana Gomes Bastos. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2009.

xiii, 123 p.; il.

(Projeto Final) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2009.

Orientadores: Fernando Luiz Pellegrini Pessoa e Sara Vasconcelos Marques

1. Reúso de água e efluentes aquosos. 2. Minimização do consumo de água. 3. Projeto Final. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa. I. Redução de Captação de Água em um Complexo Petroquímico.

Citação

“Viver quer dizer a soma dos sacrifícios, das decepções, das derrotas e, finalmente, das vitórias que, um dia, nos permitirão, afinal, colher o fruto de nosso próprio esforço.”

(Paulo Geyer)

AGRADECIMENTOS

A Deus por ser nosso refúgio e fortaleza em meio a toda dificuldade.

A nossas famílias, pelo apoio incondicional e por acreditar que nossos sonhos são possíveis.

Ao nosso orientador, Fernando L. P. Pessoa, pela oportunidade e pela confiança depositada em nosso trabalho.

A nossa co-orientadora e amiga Sara Vasconcelos Marques, não apenas pelos ensinamentos, mas principalmente pela paciência e dedicação.

Ao grupo GIPQ (Grupo de Integração de Processos Químicos) pelos ensinamentos e pela paciência.

E a todos que de alguma forma contribuíram para a realização desse trabalho.

Resumo do Projeto de Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

REDUÇÃO DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA EM UM COMPLEXO PETROQUÍMICO

Jardel Costa Domingos, Laís de Oliveira Ramos, Luciana Gomes Bastos.

Abril, 2009

Orientadores: Prof. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D.Sc.
Sara Vasconcelos Marques, M.Sc.

A água é um recurso natural de valor econômico, social e estratégico, essencial à existência e bem estar do homem e à manutenção dos ecossistemas do planeta. Sua escassez já ocorre em alguns países e as preocupações com sua preservação e uso sustentável intensificam-se. Com leis ambientais cada vez mais severas, as indústrias encontram mais uma preocupação: o descarte de efluentes líquidos. Baseado nisso, este trabalho tem como objetivo apresentar estudos de casos visando a minimização do consumo de água e da geração de efluentes aquosos em uma Unidade de Tratamento de Água de um Complexo Petroquímico.

Diferentes cenários foram gerados, propostos por meio de reúso de correntes, levando-se em conta as restrições da planta. Para isso, foi utilizada a metodologia do Diagrama de Fontes de Água (DFA), um procedimento algorítmico-heurístico, de fácil aplicação, podendo ser feito manualmente. Aplicada a metodologia do DFA, foram geradas Redes de Transferência de Massa (RTM).

Foram estudados os casos para cada contaminante individualmente, obtendo-se reduções do consumo de água de 4,32 até 30,65%, e da geração de efluentes de 0,46 até 29,30%, dependendo do contaminante analisado. A complexidade do problema aumentou, significativamente, ao se aplicar a metodologia do DFA para os casos de múltiplos contaminantes. Para esta abordagem, o melhor cenário apresentou redução do consumo de água de 6,3%, e da geração de efluentes de 7,3%.

De modo geral, os resultados demonstram que aplicando-se a metodologia foi possível obter sucesso na redução do consumo de água e da geração de efluentes aquosos.

Palavras-chave: Reúso de Água, Diagrama de Fontes de Água, Minimização de Efluentes.

ÍNDICE

Capítulo 1: Introdução	1
1.1 Objetivos e apresentação dos capítulos subseqüentes	6
1.1.1 Objetivos Gerais	6
1.1.2 Objetivos Específicos.....	6
Capítulo 2: Revisão Bibliográfica	7
2.1 Observações Finais	16
Capítulo 3: O método Diagrama de Fontes de Água	18
3.1 Procedimento para minimização de efluentes aquosos – Um contaminante	18
3.1.1 Opção de máximo reúso	19
3.1.2 Problemas com múltiplas fontes de água	27
3.2 Procedimento para minimização de efluentes aquosos – Múltiplos contaminantes	31
3.2.1 Opção de máximo reúso	32
3.2.2 Ajuste das concentrações em relação ao contaminante de referência	34
3.2.3 Algoritmo.....	36
Capítulo 4: Descrição do Processo	43
4.1 Introdução	43
4.2 Unidade de tratamento de água – UTA.....	44
4.2.1 Clarificação	45
4.2.2 Filtração	46
4.2.3 Desmineralização	47
4.2.4 Resinas.....	48
4.2.5 Potabilização.....	50
4.3 Balanço Hídrico.....	50
Capítulo 5: Estudos de casos para um único contaminante.....	56
5.1 Estudo de caso para o contaminante Sílica	59
5.1.1 Cenário 1	59
5.1.2 Cenário 2	63
5.1.3 Cenário 3	66
5.1.4 Cenário 4	69

5.1.5	Cenário 5	72
5.1.6	Cenário 6	75
5.2	Estudo de caso para o contaminante Sólidos Totais Dissolvidos	79
5.2.1	Cenário 1	80
5.2.2	Cenário 2	86
5.2.3	Cenário 3	90
5.3	Estudo de caso para o contaminante Sólidos Suspensos	94
5.3.1	Cenário 1	94
5.3.2	Cenário 2	99
5.3.3	Cenário 3	102
5.3.4	Cenário 4	105
Capítulo 6: Estudos de casos para múltiplos contaminantes		109
6.1	Cenário 1	111
6.1	Cenário 2	114
Capítulo 7: Conclusão e Sugestões		118
7.1	Conclusões	118
7.2	Sugestões	119
Capítulo 8: Referências Bibliográficas		120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1: Formas de minimização do consumo de água primária, através de (a) reúso; (b) regeneração com reúso; e (c) regeneração com reciclo.....	5
Figura 3.1: Equipamento de transferência de massa.....	19
Figura 3.2: Representação do diagrama de fontes de água (passo 1).....	22
Figura 3.3: Representação das operações no diagrama de fontes de água (passo2).....	22
Figura 3.4: Representação das operações no diagrama de fontes de água (passo 3).....	23
Figura 3.5: Representação no diagrama de fontes de água das vazões consumidas (passo 4).....	26
Figura 3.6: Rede de transferência de massa para o máximo reúso correspondente ao diagrama da Figura 3.5.....	27
Figura 3.7: Diagrama de Fontes de Água para o problema exemplo com múltiplas fontes de água.....	30
Figura 3.8: Rede de transferência de massa considerando múltiplas fontes de água.....	30
Figura 3.9: Estrutura do diagrama de fontes de água (passo 1) considerando o contaminante A como referência.....	37
Figura 3.10: Representação das operações no diagrama de fontes de água (passo 2) considerando o contaminante A como referência.....	37
Figura 3.11: DFA com operações e respectivas quantidades de massa transferida (passo 3), considerando o contaminante A como referência.....	38
Figura 3.12: Representação no DFA das vazões das correntes (passo 4), considerando o contaminante A como referência.....	39
Figura 3.13: Rede de transferência de massa para o máximo reúso considerando o contaminante A como referência.....	40
Figura 3.14: Diagrama de fontes de água considerando o contaminante B como referência.....	41
Figura 3.15: Rede de transferência de massa para o máximo reúso considerando o contaminante B como referência.....	42
Figura 4.1: Esquema do fluxograma geral dos processos que integram a UTA...	45

Figura 4.2: Fluxograma Geral da UTA.	51
Figura 4.3: Fluxograma da Subunidade de Desmineralização.	52
Figura 4.4: Correntes de efluentes – vasos catiônicos.	53
Figura 4.5: Correntes de efluentes – vasos aniônicos.	54
Figura 4.6: Correntes de efluentes – vasos de leite misto.	55
Figura 5.1: DFA para o cenário 1 do contaminante sílica.	61
Figura 5.2: RTM para o cenário 1 do contaminante sílica.	62
Figura 5.3: DFA para o cenário 2 do contaminante sílica.	64
Figura 5.4: RTM para o cenário 2 do contaminante sílica.	65
Figura 5.5: DFA para o cenário 3 do contaminante sílica.	67
Figura 5.6: RTM para o cenário 3 do contaminante sílica.	68
Figura 5.7: DFA para o cenário 4 do contaminante sílica.	70
Figura 5.8: RTM para o cenário 4 do contaminante sílica.	71
Figura 5.9: DFA para o cenário 5 do contaminante sílica.	73
Figura 5.10: RTM para o cenário 5 do contaminante sílica.	74
Figura 5.11: DFA para o cenário 6 do contaminante sílica.	76
Figura 5.12: RTM para o cenário 6 do contaminante sílica.	77
Figura 5.13: DFA para o cenário 1 do contaminante STD (parte A).	82
Figura 5.14: DFA para o cenário 1 do contaminante STD (parte B).	83
Figura 5.15: RTM para o cenário 1 do contaminante STD.	84
Figura 5.16: DFA para o cenário 2 do contaminante STD (parte A).	87
Figura 5.17: DFA para o cenário 2 do contaminante STD (parte B).	88
Figura 5.18: RTM para o cenário 2 do contaminante STD.	89
Figura 5.19: DFA para o cenário 3 do contaminante STD (parte A).	91
Figura 5.20: DFA para o cenário 3 do contaminante STD (parte B).	92
Figura 5.21: RTM para o cenário 3 do contaminante STD.	93
Figura 5.22: DFA para o cenário 1 do contaminante SS.	96
Figura 5.23: RTM para o cenário 1 do contaminante SS.	97
Figura 5.24: DFA para o cenário 2 do contaminante SS.	100
Figura 5.25: RTM para o cenário 2 do contaminante SS.	101
Figura 5.26: DFA para o cenário 3 do contaminante SS.	103
Figura 5.27: RTM para o cenário 3 do contaminante SS.	104
Figura 5.28: DFA para o cenário 4 do contaminante SS.	106
Figura 5.29: RTM para o cenário 4 do contaminante SS.	107

Figura 6.1: DFA para o cenário 1 de múltiplos contaminantes.....	112
Figura 6.2: RTM para o cenário 1 de múltiplos contaminantes.	113
Figura 6.3: DFA para o cenário 2 de múltiplos contaminantes.....	115
Figura 6.4: RTM para o cenário 2 de múltiplos contaminantes.	116

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1: Dados do exemplo de Wang e Smith (1994).....	18
Quadro 3.2: Dados do problema exemplo (Wang e Smith,1994).....	32
Quadro 3.3: Valores de concentração para os contaminantes A e B nas operações 1 e 2 (contaminante A como referência).....	34
Quadro 3.4: Ajuste dos valores de concentração para os contaminantes A e B nas operações 1 e 2 (contaminante A como referência).	35
Quadro 3.5: Problema exemplo adaptado ao contaminante A.....	36
Quadro 3.6: Valores de concentração para os contaminantes A e B nas operações 1 e 2 (contaminante B como referência).....	40
Quadro 3.7: Ajuste dos valores de concentração para os contaminantes A e B nas operações 1 e 2 (contaminante B como referência).	41
Quadro 3.8: Problema exemplo adaptado ao contaminante B.....	41
Quadro 4.1: Operações básicas de regeneração de resinas trocadoras de íons.....	50
Quadro 5.1: Dados operacionais atuais para Sílica.	59
Quadro 5.2: Fontes externas e internas e suas respectivas concentrações de sílica.	60
Quadro 5.3: Concentrações máximas para sílica permitidas nas operações.	63
Quadro 5.4: Fontes externas e internas e suas respectivas concentrações de STD.....	79
Quadro 5.5 : Dados operacionais atuais para o contaminante STD.....	81
Quadro 5.6: Concentrações máximas de entrada para STD nas operações.	85
Quadro 5.7: Dados operacionais atuais para SS.	94
Quadro 5.8: Concentrações máximas de entrada e saída para SS nas operações.....	98
Quadro 5.9: Fontes externas e internas e suas respectivas concentrações de SS.	99
Quadro 5.10: Resultados obtidos para cada contaminante.....	108
Quadro 6.1: Dados das operações e das concentrações dos contaminantes ((Sílica, STD, SS).....	110
Quadro 6.2: Resultados obtidos para múltiplos contaminantes	Erro! Indicador não definido. 17

NOMENCLATURA

Ce	Concentração de entrada
Ce,Max	Concentração máxima de entrada
Cep	Concentração da fonte externa p
C_{fi}	Concentração final do intervalo i
C_{i,j}	Concentração na qual a fonte interna j é usada no intervalo i
DFA	Diagrama de Fontes de Água
Desmin	Unidade de Desmineralização de Água
f	Vazão volumétrica [m ³ /mês]
EQ	Escola de Química
fep,k,i	Vazão de água da fonte externa p , pela operação k , no intervalo i
Filtrada	Água oriunda da Unidade de Filtração
Fk	Vazão volumétrica da operação k
Lav	Água de Lavagem de Filtros
MINEA	<i>software</i> Minimização de efluentes aquosos de Santos (2007)
mS/cm	Mili Simens/centímetro
MINLP	Programação matemática não-linear inteira mista
N_{fi,i}	Número fontes internas disponíveis no intervalo i
ONU	Organização das Nações Unidas
ppb	Parte por bilhão (mg/m ³)
ppm	Parte por milhão (mg/L)
R1	Restrição Geral 1
RTM	Rede de Transferência de Massa
SS	Sólidos Suspensos
STD	Sólidos Dissolvidos totais
Subter	Água Subterrânea
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
uH	Unidade Hazen de cor
uT	Unidade de Turbidez
UTA	Unidade de Tratamento de Água
Δm	Carga mássica transferida [Kg/mês]

Capítulo 1

Introdução

A água é um recurso natural de valor econômico, social e estratégico, essencial à existência e bem estar do homem e à manutenção dos ecossistemas do planeta. Cerca de 2/3 da superfície terrestre são dominados pelos oceanos, sendo que aproximadamente 0,007% de seu volume total representa água doce, de fácil acesso ao consumo humano (UNIAGUA, 2008).

As águas subterrâneas oferecem um potencial em boa parte ainda não explorado. Ao contrário de outros países, que possuem informações e bancos de dados do potencial subterrâneo de água, no Brasil a matéria é tratada com meros palpites e avaliações grosseiras (CPRM, 1997). O Brasil tem o impressionante volume de 111 trilhões e 661 milhões de metros cúbicos de água em suas reservas subterrâneas, inclusive detendo o maior aquífero do mundo, o Botucatu ou Gigante do MERCOSUL. Muitas cidades já são abastecidas, em grande parte, por águas de poços profundos. A questão crucial do uso da água subterrânea, inclusive para a agricultura, reside no elevado custo de exploração, além de exigir tecnologia avançada para investigação hidrogeológica (NETO, 1997). Portanto, deve ser dada maior prioridade à preservação, ao controle e à utilização racional das águas doces superficiais.

Atualmente, cerca de 1,1 bilhões de pessoas não têm acesso à água potável, 1,8 bilhão não contam com serviços adequados de saneamento básico e anualmente, 10 milhões de pessoas morrem em decorrência de doenças intestinais transmitidas pela água (UNIAGUA, 2008). É estimado um agravamento significativo desses dados com o aumento da população. A escassez da água pode decorrer de fatores como: falta de abastecimento a comunidades; quantidade de água insuficiente para atender ao consumo doméstico, à produção industrial, agrícola ou energética; e quantidade de água

suficiente, porém de tão má qualidade a ponto de ser inutilizável. Essa escassez se agrava em virtude da falta de manejo e uso sustentável dos recursos naturais e da desigualdade social, podendo ser percebida pelas diferenças registradas entre os países desenvolvidos e os em desenvolvimento.

A grande maioria das pessoas tem uma idéia equivocada de que a água é infinitamente abundante. Porém, mantendo-se as taxas de consumo atuais e considerando-se um crescimento populacional geométrico, o esgotamento da potencialidade de recursos hídricos pode ser referenciado por volta do ano de 2053. Assim, as disponibilidades hídricas precisam ser ampliadas e, para tanto, são necessários investimentos em pesquisa e desenvolvimento tecnológico para exploração viável e racional da água (NETO, 1997).

O Programa de Uso Racional da Água (PURA), desenvolvido na Grande São Paulo pela Sabesp em parceria com a USP, mostra que os desperdícios da água utilizada atingem níveis nunca imaginados no Brasil. Alguns exemplos freqüentes são: tomar banhos muito prolongados; lavar calçadas, pátios e carros com o jato da mangueira; usar bacias sanitárias que necessitam de 18 a 20 litros de água por descarga, quando já existem no mercado modelos mais modernos que necessitam de apenas 6 litros; utilizar água tratada em atividades que não exigem água potável, como para irrigar gramados esportivos públicos ou privados; ou utilizar água potável em processos industriais, tais como em torres de resfriamento (REBOUÇAS, 2003). Sendo assim, é necessária a conscientização de toda a população para que o desperdício seja evitado, começando em nossas atitudes cotidianas. Uma boa forma de incentivar essa consciência no uso da água é aumentar seu preço para refletir seu custo.

As preocupações com a necessidade pela preservação da água e seu uso sustentável intensificam-se na medida em que a população cresce e a disponibilidade de água se reduz ante o comprometimento cada vez maior de sua qualidade. Essa sustentabilidade é parte de um dos “Objetivos de Desenvolvimento do Milênio”, assumidos pelos membros da ONU em Setembro de 2000, a serem cumpridos até 2015. A boa gestão da água deve ser objetivo de um plano que contemple os múltiplos usos desse recurso, desenvolvendo e aperfeiçoando as técnicas de utilização, tratamento e recuperação de água.

A crescente valorização econômica dos recursos hídricos é inevitável. As indústrias que desejam obter vantagens competitivas devem promover uma revisão sistemática de seus produtos e processos, a fim de minimizar seus desperdícios, e não mais enxergar este ônus como uma ameaça à sua sobrevivência. Por otimização dos processos de produção de água tratada entende-se a máxima racionalização do recurso primário (água) e dos principais insumos associados ao seu processamento (energia e produtos químicos), o que compreende a eliminação de desperdícios e a redução de resíduos na produção, além, e, sobretudo, de uma política eficaz de incentivo à redução do consumo entre os usuários da água, aí enquadrada, de modo especial, a própria indústria.

A indústria petroquímica, setor importante da indústria química, usa grandes quantidades de água. Tipicamente, a geração de efluentes líquidos nas unidades petroquímicas pode ser categorizada da seguinte forma:

- . Águas residuárias contendo a matéria-prima principal ou produto;
- . Águas residuárias contendo subprodutos produzidos durante as reações;
- . Águas provenientes de derrames, fugas por gotejamentos e outros, lavagem de reatores ou pontos de transbordamento;
- . Águas provenientes de torres de resfriamento, da condensação de vapor, e água de lavagem geral;
- . Águas provenientes de águas pluviais.

As águas residuais ou residuárias são todas as águas descartadas que resultam da utilização para diversos processos.

Muitas indústrias utilizam métodos de controle da poluição baseados no tratamento dos resíduos gerados pelos processos industriais, sendo este tipo de tratamento denominado “end of pipe”, ou final de linha. O procedimento clássico para o tratamento de efluentes líquidos, segundo a legislação vigente, é através de processos de separação químicos, físicos ou físico-químicos. As técnicas utilizadas são classificadas quanto ao grau de tratamento à que se destina o efluente, para que ele atenda os padrões de descarte em vigor.

Uma nova abordagem está sendo feita recentemente em relação aos métodos de controle da poluição industrial, colocando o foco de ação na prevenção da poluição. Ela visa priorizar ações no seio dos processos de

produção, aliando as tecnologias de tratamento e de disposição de efluentes à procedimentos que visem à redução da produção dos efluentes na fonte. Esta abordagem é chamada “in-plant design” e considera o efluente como o resultado de uma série de procedimentos industriais que podem ser analisados, revisados e otimizados.

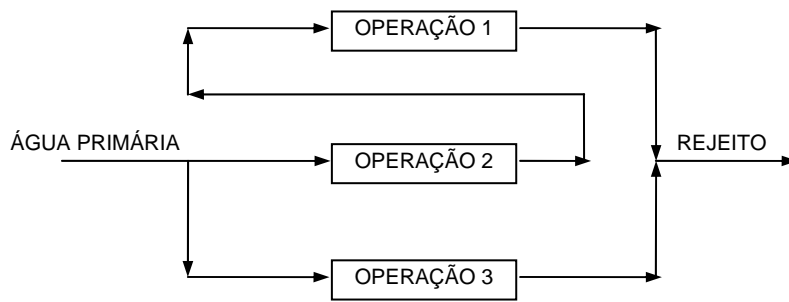
Reusar, na medida do possível, os seus próprios efluentes, após tratamento adequado é uma abordagem bastante atrativa. A reutilização ou o reúso de água ou o uso de águas residuárias não é um conceito novo e tem sido praticado em todo o mundo há muitos anos. Existem relatos de sua prática na Grécia Antiga, com a disposição de esgotos e sua utilização na irrigação. No entanto, a demanda crescente por água tem feito do reúso planejado da água um tema atual e de grande importância. Essa reutilização pode ser direta ou indireta, decorrente de ações planejadas ou não, sendo utilizado pelas indústrias o reúso direto planejado das águas (CETESB, 2001).

Segundo PESSOA (2005), desconsiderando a possibilidade de fazer grandes modificações no processo para diminuir a demanda inerente de água, existem três formas para reduzir a geração de efluentes líquidos:

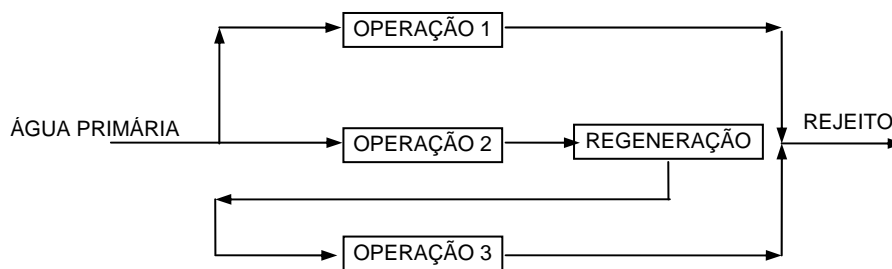
. *Reúso*: o efluente é utilizado em outra operação sem nenhum tratamento prévio, desde que o nível de contaminantes não prejudique o processo nessa operação. Desta forma, consegue-se reduzir o consumo de água primária. Normalmente, a carga de contaminantes na corrente permanece inalterada (Figura 1.1a).

. *Regeneração com reúso*: o efluente de uma ou mais operações passa por um tratamento para remoção parcial de contaminantes, visando possibilitar a sua utilização em outra operação. Com esta opção ocorre uma diminuição no volume consumido de água primária, no volume de efluente gerado e na carga de contaminantes em função da regeneração (Figura 1.1b).

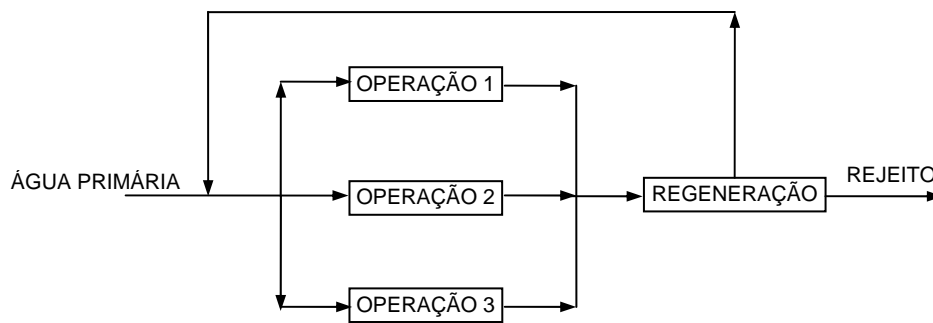
. *Regeneração com reciclo*: o efluente sofre tratamento parcial para remoção de contaminantes e, neste caso, pode ser reutilizado no mesmo processo que o gerou. Novamente há uma diminuição no volume consumido de água primária, no volume de efluente gerado e na sua carga de contaminantes (Figura 1.1c).



(a)



(b)



(c)

Figura 1. 1: Formas de minimização do consumo de água primária, através de (a) reúso; (b) regeneração com reúso; e (c) regeneração com reciclo.

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

1.1 Objetivos e apresentação dos capítulos subseqüentes

1.1.1 *Objetivos Gerais:*

Neste trabalho é utilizado um procedimento algorítmico heurístico, o Diagrama de Fontes de Água (DFA). O procedimento representa uma classe oriunda dos métodos de análise *pinch* e é uma ferramenta de integração mássica para implementação de reúso de água em processos químicos. Este método pode ser aplicado manualmente, sem a necessidade de métodos numéricos para sua resolução. O trabalho foi desenvolvido com a ajuda de um software em linguagem Excel, chamado MINEA (Minimização de Efluentes Aquosos). O procedimento é aplicado de forma a minimizar o consumo de água e, conseqüentemente, a redução da geração de efluentes líquidos de uma Unidade de Tratamento de Água, na subunidade de Desmineralização de Água.

1.1.2 *Objetivos Específicos:*

1. Minimizar o consumo de água e, com isso, a geração de efluentes aquosos em um complexo petroquímico aplicando o procedimento do Diagrama de Fontes de Água (DFA).
2. Propor diferentes cenários com mínimo consumo de água através do reúso máximo.

Sendo assim, no Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica das metodologias existentes para a minimização do consumo de água e efluentes.

O Capítulo 3 apresenta o método Diagrama de Fontes de Água para simples e múltiplos contaminantes.

No Capítulo 4 é feita a descrição do processo.

O Capítulo 5 apresenta o estudo de casos para um contaminante, onde cada contaminante é estudado em particular.

No Capítulo 6 é feito o estudo de casos para múltiplos contaminantes, onde todos os contaminantes são estudados simultaneamente.

A conclusão do trabalho e sugestões são apresentadas no Capítulo 7.

Referências bibliográficas estão no Capítulo 8.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Devido às mudanças na forma de visão da poluição, diferentes abordagens para a síntese de processos industriais foram desenvolvidas sob a visão da Integração de Processos (IP), mudando consideravelmente a forma com que a síntese de processos era realizada. Em geral, estas metodologias não criam novos equipamentos ou operações unitárias. Ao contrário, focam na forma mais efetiva de seleção e conexão de processos tecnológicos já existentes.

A Integração de Processos, frequentemente associada como um campo de aplicação da Tecnologia *Pinch* à rede de trocadores de calor (“Ponto de Estrangulamento Térmico”), difundida por Linnhoff e Hindmarsh (1983), dispõe de um escopo muito mais amplo, voltado não somente ao projeto de equipamentos, mas também a todas as áreas do projeto do processo, onde o principal interesse é a otimização técnico-econômica do processo químico. De acordo com Hallale (2001), a Integração de Processos cobre quatro grandes áreas de aplicação: uso eficiente de matérias-primas; eficiência energética; redução de emissões; e operacionalidade do processo.

Na Integração de Processos existem vários métodos sistemáticos de síntese de processos que vêm sendo utilizados com sucesso em aplicações de prevenção de poluição. Eles podem ser classificados em três linhas, em função da ferramenta utilizada:

- . *Sistemas Especialistas*: termo utilizado para descrever os métodos de síntese e de integração de processos construídos com base no conhecimento acumulado de idéias já testadas. Nesse conjunto estão incluídos os métodos heurísticos, onde a seqüência lógica da evolução do fluxograma segue regras geradas com base em experiências prévias. Muitas vezes essas regras

permitem a identificação e avaliação de opções de minimização de rejeitos. Estes métodos contemplam um esforço menor, porém, em casos mais complexos, como nos sistemas multicomponentes característicos de efluentes, torna-se imprescindível o uso de heurísticas mais flexíveis entre as diversas opções de aplicação de casos reais, além de ter a grande desvantagem de não garantir a obtenção das soluções ótimas.

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

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

Os algoritmos de otimização matemática dividem-se em programação linear (LP), programação não-linear (NLP), programação inteira (IP), programação linear inteira mista (MILP) e programação não-linear inteira mista (MINLP).

Os trabalhos em que se usa programação matemática geram soluções mais aprimoradas, mas o fato de necessitar de uma função objetivo, que na

maioria das vezes não é de fácil obtenção, torna sua implementação mais trabalhosa em virtude do esforço computacional.

A minimização de resíduos através da engenharia de processos, portanto, representa um poderoso procedimento para redução de poluição, de rejeitos e de emissões e, ao mesmo tempo, aumento da eficiência e redução do custo operacional em processos industriais.

Muitos trabalhos têm sido publicados dedicados a utilização de ferramentas para o gerenciamento de processos industriais. Na pauta da gestão de águas está sendo contemplada a minimização da geração de efluentes como uma medida de otimização dos custos de tratamento de efluentes. Os trabalhos encontrados na literatura apresentaram diversas propostas de metodologias para síntese simultânea do sistema de tratamento distribuído de efluentes e redes com menor custo.

TAKAMA *et al.* (1980) apresentaram uma das primeiras abordagens sobre a problemática do gerenciamento hídrico em uma refinaria. Os autores propuseram uma resolução para o problema da síntese de sistemas de tratamento de efluentes juntamente com a questão de reúso de água. O objetivo foi a síntese de um sistema distribuído de tratamento de efluentes e o reúso de águas, a fim de reduzir os custos com a água e o tratamento de efluentes. A programação matemática não linear (NPL) foi utilizada para otimizar as funções custos. Uma superestrutura de todas as operações que utilizam água foi definida, sendo realizada sua otimização. Porém, devido à falta de recursos computacionais na época, foram necessárias algumas simplificações na abordagem do problema, principalmente no caso de múltiplos contaminantes.

EL-HALWAGI e MANOUSIOUTHAKIS (1989) introduziram uma metodologia para a determinação de uma rede, com o objetivo de remover poluentes de um conjunto de correntes ricas e transferí-los para um conjunto de correntes pobres, de modo eficiente, com baixo custo e respeitando as restrições termodinâmicas. Fazendo uma analogia com a rede de Transferência de Energia, desenvolveram então o conceito de Redes de Transferência de Massa (RTM). O procedimento foi aplicado apenas a um componente-chave, onde se estabelecia como metas a busca de redes com um custo mínimo de agentes externos de separação de massa, e com um número mínimo de

unidades de troca de massa. Porém, as metas estipuladas não garantem necessariamente o custo mínimo.

WANG e SMITH (1994a), através de procedimento algorítmico, propuseram uma sistemática para a minimização do consumo de água em sistemas com um ou múltiplos contaminantes, usando o conceito de curva composta e transferência vertical de contaminantes. Os autores utilizaram dois métodos diferentes para minimizar o consumo de água, através da maximização do reúso de água e da identificação de possibilidades de regeneração. No primeiro estágio do procedimento, os dados limites do problema foram apresentados graficamente, no intuito de identificar o ponto *pinch* e traçar a meta de consumo mínimo de água.

DOYLE e SMITH (1997) propuseram um novo método para a maximização do reúso de água em sistemas com múltiplos contaminantes. Foram utilizados dois casos como exemplos. O primeiro foi um estudo de caso de WANG e SMITH (1994a), no qual a transferência de massa foi modelada usando uma carga mássica fixa, e foi resolvido como um problema de otimização não-linear. No segundo caso, a concentração de saída é fixada, levando a um problema de otimização linear. As dificuldades de resolução do problema de otimização não-linear foram facilitadas através da utilização da solução do modelo linear como condições iniciais para o problema não-linear. Ainda é apresentada uma metodologia gráfica para identificação de fatores que não podem ser fornecidos pela programação matemática. Além disso, a representação gráfica fornece informações de parte do problema que exigiriam dados mais precisos, identifica operações que podem ser candidatas a mudanças básicas e onde a regeneração pode ser eficaz.

GALAN e GROSSMANN (1998) apresentaram um procedimento para resolver o problema de síntese de tratamento distribuído de efluentes, em sistemas com múltiplos contaminantes, através de programação matemática não linear e não linear inteira mista, baseados na otimização de uma superestrutura. Devido às dificuldades de convergência e de determinação do ótimo global a utilização de métodos heurísticos torna-se necessária, perdendo-se a garantia de encontrar a solução ótima. Os autores, então, apresentam vários exemplos para constatar a determinação da solução ótima ou muito próxima dela. O interessante deste trabalho repousa na correspondência da síntese de redes de

tratamento de efluentes com a de processos de separação, onde o modelo favorece à seleção de tecnologias de tratamento.

HUANG *et al.* (1999) utilizaram programação matemática para determinar a vazão de consumo ótimo de água, considerando simultaneamente redes de água, regeneração e tratamento de efluentes, utilizando o método optimal *water usage and treatment network* (WUTN) proposto nos trabalhos de El-Halwagi (1989). O modelo matemático incluiu equações de projeto para as unidades de tratamento de efluentes e para todas as unidades que utilizaram água de processo ou utilidades. O procedimento foi aplicado à duas plantas petroquímicas de Taiwan e o melhor fluxograma foi selecionado, levando-se em conta a menor vazão de consumo de água limpa, já que não foram analisados os custos operacionais e os custos fixos.

CASTRO *et al.* (1999) propuseram uma metodologia que visa eliminar eficientemente os problemas do método de Wang e Smith (1994a) através de uma metodologia para alcançar o consumo mínimo de água pela minimização da utilização de fontes externas, de modo que se maximize o reúso. Para tal, foi introduzido o conceito de múltiplos pontos *pinch*, simultaneamente com a síntese de rede de transferência de massa para um único contaminante. O primeiro ponto *pinch* é resultante da minimização do uso de utilidades e os demais pontos provêm da minimização de fontes externas, visando obter um custo mínimo com o sistema de tratamento distribuído de efluentes. O conhecimento dos pontos *pinch* de um dos três métodos apresentados (Quadro de Problema de Massa, Curva Composta Limite e Diagrama de Fontes de Águas), permite obter uma redução no consumo de água fresca e de água regenerada através do algoritmo de reúso com regeneração. O Diagrama de Fontes de Águas apresentado é uma ferramenta de síntese de redes de reúso, que pode usar tanto água fresca quanto regenerada no algoritmo de reúso com regeneração para a construção da rede. O procedimento de construção divide-se em duas partes para evitar que a água não seja utilizada na mesma operação duas vezes. Primeiro, a água fresca deve ser usada para alcançar a vazão de água regenerada necessária e, então, se utiliza, racionalmente, a água regenerada e a fresca. A rede de transferência de massa não é, geralmente, o número mínimo de unidades de transferência, que só é alcançado com o emprego de uma regra heurística, acarretando um pequeno aumento do consumo de água fresca.

Porém, esta metodologia não foi utilizada para problemas de múltiplos contaminantes, nem para casos com múltiplas fontes de água, perdas inerentes ao processo ou restrições de vazão.

BAGAJEVIWICZ (2000) apresentou uma revisão dos métodos voltados para a síntese de redes de água e consumo mínimo presentes na literatura até aquele ano. Os métodos foram divididos em dois grupos: i) métodos que visam o máximo reúso e/ou regeneração de correntes de efluentes para a redução do consumo de água limpa (fonte externa) e; ii) métodos que visam a síntese de redes de tratamento de efluentes. Embora seja feita uma compilação de todos os métodos existentes até aquele momento, o autor enfatiza que métodos de programação matemática poderiam fornecer soluções ótimas globais a partir de valores gerados pelos métodos algorítmicos. Importantes soluções sub-ótimas são obtidas quando conceitos de projeto são empregados na construção dos modelos. É importante observar as contribuições para os problemas de múltiplos contaminantes e de síntese de redes energéticas e materiais simultâneas, além de relacionar sugestões para trabalhos futuros para o tratamento distribuído de efluentes.

FREITAS *et al.* (2000) desenvolveram um programa computacional para a seleção da sequência de etapas do tratamento primário e secundário de efluentes. No entanto, o procedimento não leva a seleção ótima, pois se baseia em regras heurísticas. Ou seja, cada etapa do fluxograma gerado pelo procedimento tem seu nível de decisão regido por regras heurísticas. O procedimento foi aplicado a três efluentes líquidos gerados por uma indústria de couro, onde o sistema secundário já era conhecido. São requeridos do usuário informações mínimas do programa, como o tipo de indústria, o tipo de efluente e as concentrações de entrada e saída dos contaminantes. O procedimento gerou três fluxogramas distintos para os três casos estudados, mas não propôs encontrar a solução ótima nem realizou uma análise de custo dos fluxogramas gerados, apesar da facilidade que o programa demonstra para realizar a análise de custos.

GOMES *et al.* (2002), seguindo a mesma vertente de Castro (1999), através do algoritmo Diagrama de fontes de Água (DFA) considerou o problema tanto para um contaminante quanto para múltiplos contaminantes. Além disso, foram consideradas situações com múltiplas fontes de água, operações com

perda de água, regeneração com reúso e com reciclo. No caso de múltiplos contaminantes, determina-se um contaminante de referência e executa-se o algoritmo como se fosse um único contaminante. O algoritmo utiliza as concentrações máximas de entrada e de saída e permite localizar o ponto pinch global. Gomes testou o algoritmo em várias situações envolvendo exemplos da literatura, em opções como reúso e regenerações com reúso e com reciclo, e com seus respectivos custos totais anuais para comparar com as alternativas geradas.

KOPPOL *et al.* (2003) empregaram programação matemática para avaliar a viabilidade de descarte zero de efluentes para sistemas com um ou múltiplos contaminantes em quatro diferentes indústrias. Em cada estudo de caso foram exploradas várias configurações de regeneração e tratamento “end of pipe”, utilizando diferentes tecnologias de tratamento para se determinar a possibilidade de descarte zero e sua viabilidade econômica. Os autores concluíram que a relação entre o custo de regeneração e o custo da água fresca, assim como a concentração de descarte do tratamento, são fatores determinantes tanto na viabilidade técnica quanto econômica para ciclos de descarte zero ou parcial de efluentes. Dentre os casos estudados, apenas na indústria de papel foi possível o descarte zero (economicamente viável). Nos outros casos, as maiores reduções em relação ao descarte de efluentes e aos custos de operação foram alcançados com emprego de reúso e regeneração dos efluentes.

WANG *et al.* (2003) utilizaram um procedimento para a síntese de redes com múltiplos contaminantes usando uma única fonte interna de água (internal water mains) e introduziram um novo conceito de fator de economia de água (water-saving factor). São mostrados três exemplos envolvendo diferentes operações com três contaminantes. É determinada a concentração da fonte interna de água e calculado o fator de economia de cada operação. O posicionamento adequado da nova fonte interna é direcionado para se obter a máxima economia de água. Constatou-se que as redes de água com apenas uma fonte interna podem reduzir o consumo de água, e a inclusão de novas fontes internas permite obtenção de melhorias à economia de água. Neste caso, a metodologia necessita ser estendida para adequar a possibilidade de adição de fontes internas de água.

AL-REDHWAN *et al.* (2005) atentaram para o problema da incerteza associado aos procedimentos de otimização de redes de água nos processos industriais. As incertezas destacadas pelos autores estão associadas às possibilidades de mudanças, tanto na vazão dos efluentes quanto nos níveis e variedades de contaminantes resultantes de mudanças operacionais. As redes ótimas geradas pelos procedimentos devem ser robustas frente à tais variações. A metodologia desenvolvida nesta pesquisa segue 3 etapas: na primeira, um modelo de otimização determinístico é desenvolvido e testado, buscando a configuração de rede com mínimo consumo de água limpa e o ponto ótimo do reúso ou da regeneração com reúso; a segunda etapa envolve uma análise de sensibilidade para verificar os valores máximos e mínimos de condições operacionais; e na terceira e última etapa, uma formulação estocástica foi desenvolvida baseada na técnica de análise de cenários. Tanto os modelos determinísticos quanto os estocásticos são formulações NPL e foram testados em um estudo de caso que consistiu em uma típica refinaria contendo 4 contaminantes (NH_3 , Cl_2 , H_2S e HCN). A principal origem de incertezas considerada foi a variação das condições operacionais. Os resultados obtidos mostraram uma redução de 58% no consumo de água limpa, por meio de reúso e regeneração com reúso. A rede ótima resultante do modelo estocástico teve um baixo custo adicional devido à incerteza, de apenas 3,5% do custo total.

ZHENG *et al.* (2006) propuseram regras para se determinar os contaminantes e seus limites de entrada e saída das operações de um sistema integrado de uso de água. Os autores foram os primeiros a estudarem os aspectos relevantes na determinação das concentrações máximas de entrada e saída nas operações dos sistemas distribuídos de reúso de água. Se todos os contaminantes são considerados, resolver a rede integrada torna-se uma tarefa complexa. Caso seja considerado apenas um número limitado de contaminantes, alguns contaminantes desconsiderados podem ter efeitos graves sobre as operações. E se os dados obtidos sobre os limites de concentrações permitidos nas operações forem baseados em estimativas conservadoras, as redes obtidas poderão apresentar um desvio muito grande, em relação tanto à solução ótima de consumo de água fresca quanto ao descarte mínimo de efluentes, e conseqüentemente, oportunidades de reúso serão perdidas. Em contrapartida, se os dados das concentrações limites obtidos estiverem muito

acima do que realmente são, alguns processos poderão ter problemas de operação e de qualidade do produto da planta. Como exemplo, os autores aplicam as regras propostas em uma planta de produção de hidróxido de sódio e PVC (cloreto de polivinila) para sintetizarem um sistema integrado de uso da água. Primeiro é estudado a otimização do reúso de água baseando-se apenas em fontes internas. Para reduzir o consumo de água fresca e de descarte de efluentes, a regeneração nas correntes de reciclo é instituída. Depois da integração do sistema de uso de água os autores obtiveram uma redução de 25,5 e 48% no consumo de água fresca e no descarte de efluentes, respectivamente.

GOMES *et al.* (2007) apresentaram um procedimento algorítmico heurístico, Diagrama de Fontes de Águas (DFA), para a síntese de redes de transferência de massa visando à minimização da geração de efluentes. A metodologia é aplicada para um contaminante nos seguintes casos: (i) reúso; (ii) avaliação de várias fontes externas; (iii) perdas de águas no processo; (iv) regeneração antes do reúso em outra operação e; (vi) regeneração seguida de reciclo. O procedimento fundamenta-se na hipótese da relação entre a taxa de transferência de contaminante entre as correntes ser constante. O procedimento gera fluxogramas com informações que permitem estimar o custo do sistema de tratamento dos efluentes. O método pode ser aplicado manualmente sem a necessidade de métodos numéricos para sua resolução.

SANTOS (2007) automatizou o Diagrama de Fontes de Água através do desenvolvimento de um software em linguagem Excel, o qual batizou de MINEA (Minimização de Efluentes Aquosos). Além disso, Santos (2007) identificou a necessidade e desenvolveu algoritmos para a escolha do contaminante e da operação de referência para os casos de múltiplos contaminantes, o que não tinha sido feito anteriormente. No trabalho ele levou em conta restrições de processos, tais como operações de perda e proibições de reúso em processos com um ou múltiplos contaminantes, bem como consolidou estes algoritmos e o software através de estudos de casos da literatura envolvendo um e múltiplos contaminantes. Todos os estudos envolveram opções apenas para máximo reúso. Foi alcançada uma redução do consumo inicial de água maior ou igual aos correspondentes apresentados na literatura.

JIYONG *et al.* (2008) apresentaram uma nova metodologia para projetar redes de trocadores de calor e minimizar a geração de efluentes para processos industriais envolvendo múltiplos contaminantes. Os autores propuseram um modelo matemático baseado na estimativa de custo para resolver simultaneamente problemas envolvendo integração energética e minimização da geração de efluentes. O método proposto emprega programação não-linear inteira mista (MINLP) e baseava-se na análise “water-pinch”. A função objetivo era o custo total anual. Um estudo de caso com três operações e três contaminantes revelou que o emprego da metodologia reduziu em 76,4% os custos anuais em relação ao caso base, que não empregava reuso nem tampouco integração energética. Os custos relacionados ao caso em que possuía reuso e a integração energética foram reduzidos em 3,6% e foi resolvido por otimização em dois estágios.

LIAO *et al.* (2008) propuseram um algoritmo de otimização através de uma programação matemática não-linear inteira mista (MINLP) para a minimização do consumo de água fresca e aumento simultâneo da eficiência de aproveitamento da energia, associado a um sistema que utilize água a uma dada temperatura e qualidade. O objetivo dos autores foi gerar uma rede que integrasse as vazões entre os processos com uma rede de trocadores de calor entre essas correntes, levando desse modo à minimização simultânea do consumo de água e energia associada. Para exemplificar, os autores utilizaram o mesmo exemplo de um trabalho anterior com apenas um contaminante e obtiveram uma redução de 4% nos custos totais anuais. No entanto, o modelo pode levar a ótimos locais, o que prejudica a aplicação do método. Mas os autores apontam para a simplicidade de aplicação do método em relação a outros procedimentos que objetivam o mesmo alvo, o que pode ser favorável às indústrias.

2.1 Observações Finais:

Como pode ser observada, a problemática da minimização do consumo de água tem sido abordada por diversas metodologias e ferramentas, que podem ser agrupadas em duas grandes classes: Procedimentos Algorítmicos e Programação Matemática. Porém, devido à complexidade do assunto, há uma

necessidade crescente em aprimorar essas tecnologias a fim de abarcar todas as exigências e restrições, tanto dos próprios procedimentos quanto dos sistemas existentes.

Dada a complexidade do problema, a maioria dos trabalhos aborda estes temas através da Programação Matemática. Contudo, esta abordagem gera soluções mais aprimoradas a custo da elaboração de funções objetivo, dispendiosas em relação a tempo e esforço computacional. Em sistemas multicomponentes, apesar de serem mais realistas em relação às composições das operações, exigem um esforço computacional ainda maior. No entanto, para contornar este problema, uma significativa parcela dos trabalhos encontrados na literatura utiliza procedimentos algorítmicos baseados na Tecnologia *Pinch*.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo a aplicação de um procedimento algorítmico para a realização da síntese de redes de equipamentos de transferência de massa (RTM), enfocando principalmente o reúso máximo das correntes aquosas. O Diagrama de Fontes de Água (DFA) contempla a presença de correntes com um ou mais contaminantes, além de ser uma metodologia de fácil implementação. Pode ser utilizada no dia a dia do engenheiro de processos, sem que haja a necessidade de grandes esforços computacionais e, dependendo do número de correntes e operações, ela poderá até ser aplicada manualmente pelo próprio engenheiro.

Capítulo 3

O método Diagrama de Fontes de Água

O método Diagrama de Fontes de Água (DFA) é algorítmico e pode ser aplicado na solução de problemas com um ou múltiplos contaminantes para os casos de reúso, regeneração com reúso e regeneração com reciclo em processos com restrição de vazão, com múltiplas fontes de água e com perdas inerentes ao processo.

Aqui o método será apresentado em forma de passos sequenciais, sendo primeiramente focado o reúso com um contaminante e em seguida serão feitas as considerações para situações com múltiplos contaminantes.

3.1 Procedimento para minimização de efluentes aquosos – Um contaminante

Será utilizado um exemplo apresentado em Wang e Smith (1994), cujos dados estão apresentados no Quadro 3.1:

Operação (k)	F_k (t/h)	C_{ekmax} (ppm)	C_{skmax} (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

Quadro 3.1: Dados do exemplo de Wang e Smith (1994).

Onde:

F_k é a vazão limite da operação k ,

C_{ekmax} é a concentração máxima de entrada da operação k ,

C_{skmax} é a concentração máxima de saída da operação k e,

Δm_k é a carga de contaminante da operação k .

3.1.1 Opção de máximo reúso

Considere um conjunto de correntes de processo no qual há a necessidade de reduzir a carga de alguma espécie (contaminante) através de um agente extrator. Esta operação será realizada em equipamentos que serão chamados de equipamentos de transferência de massa. Cada corrente de processo tem uma vazão G_k e deve ser levada de uma concentração inicial $C_{PROC, Ik}$ até uma composição desejada final $C_{PROC, Fk}$ da espécie contaminante. Cada corrente do agente extrator tem uma vazão f_k , com uma concentração inicial do contaminante C_{ik} e uma concentração final C_{fk} . No presente trabalho o agente extrator será sempre a água.

Considere o equipamento de transferência de massa representado na Figura 3.1. A taxa de massa de contaminante a ser transferida entre as correntes (Δm_k) pode ser determinada através do balanço de massa em relação ao contaminante pela Eq. 3.1.

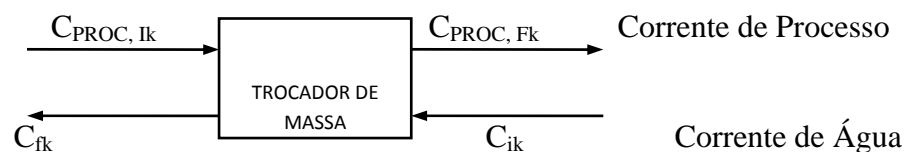


Figura 3 1: Equipamento de transferência de massa.

$$\Delta m_k = G_k \times (C_{PROC, ik} - C_{PROC, Fk}) = f_k \times (C_{fk} - C_{ik}) \quad \text{(Eq. 3.1)}$$

Onde, C está em ppm, G e F estão em t/h e Δm está em g/h.

De acordo com a Eq. (3.1), deve-se maximizar a composição de saída da corrente de água (C_{fk}) de modo a se necessitar de sua menor vazão. Esta

concentração máxima de saída é especificada considerando-se os seguintes fatores: solubilidade máxima do contaminante, limite de corrosão, limite de deposição, mínima força motriz de transferência de massa no equipamento e máxima concentração de entrada para os processos de tratamento. Note também que a utilização de água primária, $C_{ik} = 0$, minimiza o consumo de água e, como conseqüência, a geração de efluentes.

Quando se tem mais de uma operação envolvida, o uso de água primária em todas as operações não garante o seu mínimo consumo global, já que pode haver a possibilidade de utilização de parte do efluente de uma operação como fonte (alimentação) em outra operação. A possibilidade de reutilização de efluentes é determinada pela máxima concentração de entrada da corrente de água ($C_{ikmáx}$) nas diversas operações. Note que esse reuso contribui para a diminuição do consumo de água primária. Assim, considerando somente o reuso, quando ele for máximo o consumo de água fresca será mínimo.

Para minimizar a vazão de água global, deve haver uma análise envolvendo todas as operações que utilizam água. As concentrações de entrada e de saída das correntes aquosas em cada operação definem um intervalo de concentração. Assim, o conjunto forma um número de intervalos de concentração (N_{int}) que pode ser relacionado ao número de operações (N_{op}) através da Eq. 3.2.

$$N_{int} \leq (2xN_{op}) - 1 \quad \text{(Eq. 3.2)}$$

Nessa expressão, a igualdade somente ocorrerá quando não houver coincidência entre quaisquer das concentrações das operações.

O procedimento proposto é apresentado a seguir de forma seqüencial.

Passo 1:

O problema é dividido em intervalos de concentração, limitados pela fonte de água primária, definida como fonte externa ($f_{p,k,i}^e$), e as fontes de água com concentrações iguais as de entrada e de saída das operações, definidas como fontes internas ($f_{p,k,i}^i$). As fontes são colocadas em ordem crescente de concentração, definindo os intervalos de concentração, e por conseqüência, o diagrama de fontes de água, conforme apresentado na Figura 3.2. Para o problema exemplo, temos somente uma fonte externa, com concentração nula, então $C'_{fea} = \{0\}$. A partir das fontes internas temos, $C'_{fia} = \{50, 100, 400, 800\}$. Os valores de concentração que definirão os limites dos intervalos serão dados pela Eq. 3.3.

$$C' = C'_{fea} \cup C'_{fia} \quad \text{(Eq. 3.3)}$$

Onde C' são os valores de concentração de todas as fontes disponíveis de água. Para o problema exemplo, $C' = \{0, 50, 100, 400, 800\}$.

O número de intervalos de concentração (N_{int}) pode ser então definido através da Eq. 3.4.

$$N_{int} = N_{C'} - 1 \quad \text{(Eq. 3.4)}$$

Onde $N_{C'}$ é o número de elementos do conjunto C' .

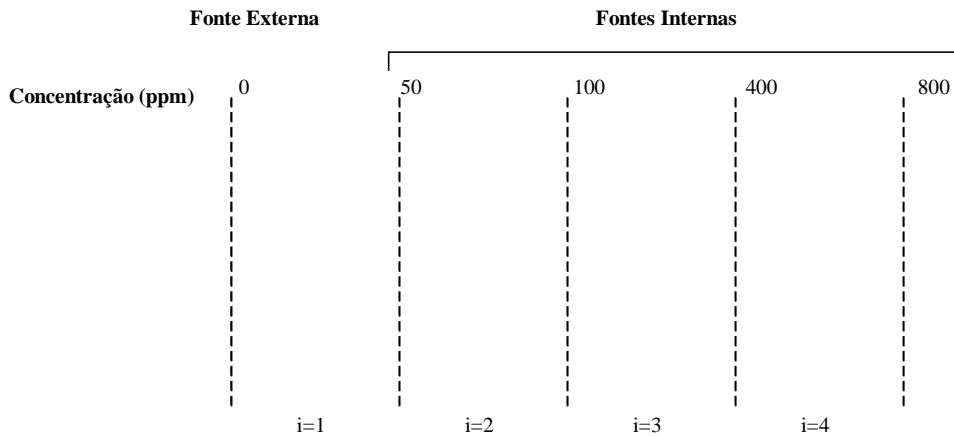


Figura 3.2: Representação do diagrama de fontes de água (passo 1).

Passo 2:

As operações de transferência de massa são representadas por setas, cuja origem é uma caixa de identificação da operação, posicionada na respectiva concentração máxima de entrada; e a ponta, corresponde à concentração máxima de saída. As vazões limites das operações, f_k , são escritas no lado esquerdo do diagrama, conforme representado na Figura 3.3. Para facilitar a visualização, recomenda-se ainda que as operações sejam colocadas no diagrama, de cima para baixo, em função da ordem crescente das concentrações de entrada.

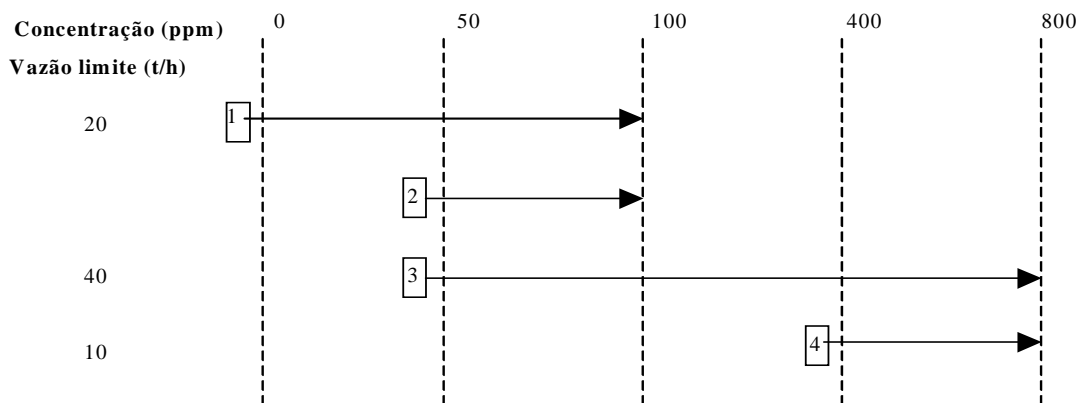


Figura 3.3: Representação das operações no diagrama de fontes de água (passo 2).

Passo 3:

A quantidade de massa transferida em cada processo k e em cada intervalo i (Δm_{ki}) é calculada pela Eq. 3.5.

$$\Delta m_{ki} = f_k x(C_{fi} - C_{ii}) \quad \text{(Eq. 3.5)}$$

Onde C_{fi} é a concentração final do intervalo i , C_{ii} é a concentração inicial do intervalo i , f_k é a vazão mássica limite da corrente k , $k=1, \dots, N_{op}$ e $i=1, \dots, N_{int}$. Os resultados obtidos para o problema exemplo podem ser observados na Figura 3.4 entre parênteses sobre as setas, sendo expressos em kg/h.

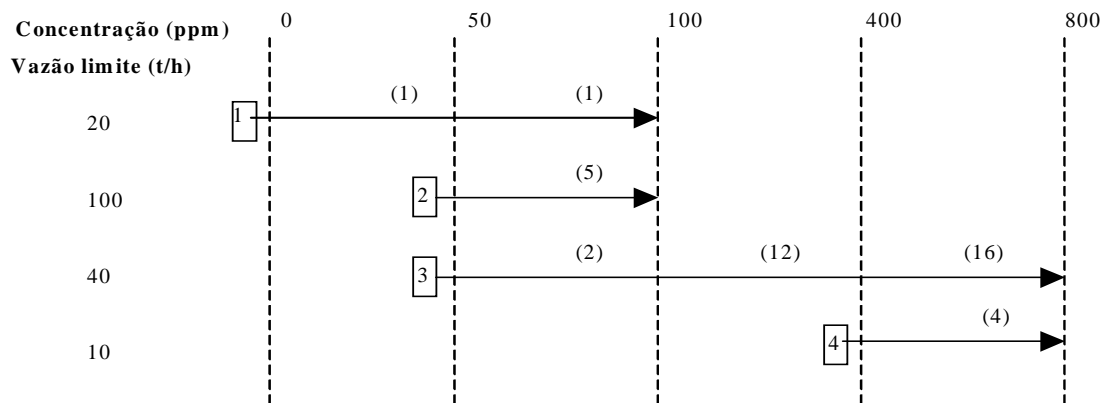


Figura 3.4: Representação das operações no diagrama de fontes de água (passo 3).

Passo 4:

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

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

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

Inicialmente são identificadas e contadas todas as fontes de água, internas e externas, disponíveis nos intervalos. O número de fontes externas de água (N_{fea}) é um dado do problema e deve ser verificado em termo de qualidade (concentração) em cada intervalo i , gerando $N_{fea,i}$. O número de possíveis fontes internas de água ($N_{fia,i}$) em cada intervalo é dado pelo número de operações presentes nos intervalos anteriores. Para o problema exemplo, temos que $N_{fea}=\{1, 1, 1, 1\}$ e $N_{fia}=\{0, 1, 3, 3\}$ como pode ser visto na Figura 3.4. No primeiro intervalo de concentração existe somente uma fonte externa de água e nenhuma fonte interna encontra-se disponível.

A vazão de água requerida da fonte de água p pela operação k , no intervalo de concentração i , pode ser determinada pelas Eq. 3.6 e Eq. 3.7, apresentadas a seguir.

Para fontes externas:

$$f_{pki}^e = \frac{\Delta m_{ki} - \sum_{j=1}^{N_{fia,i}} (f_{jki}^i x [C_{fi} - C_{ij}])}{C_{fi} - C_p^e} \quad \text{(Eq. 3.6)}$$

Onde C_{ij} é a concentração na qual a fonte interna j é usada no intervalo j , C_p^e a concentração da fonte externa p , C_{fi} a concentração final do intervalo i e $N_{fia,i}$ é o número de fontes internas disponíveis no intervalo i . Pela ordem de cálculo, se houver utilização de fonte interna no intervalo, os valores dos respectivos f_{jki}^i são calculados antes do f_{pki}^e . A parcela do somatório na Eq. 3.6 representa a quantidade de contaminante retirada pelas fontes internas, na operação k no intervalo i , que tem preferência sobre as fontes externas.

Para fontes internas:

$$f_{pki}^i = \frac{\Delta m_{ki} - \sum_{j=p-1}^p (f_{jki}^i x [C_{fi} - C_{ij}])}{C_{fi} - C_p^i} \quad (\text{Eq. 3.7})$$

Parte-se então para o cálculo da vazão necessária de água em cada operação por cada intervalo de concentração. Para o problema exemplo, no primeiro intervalo (i=1) tem-se que $f_{111}^e = 20\text{t/h}$, onde f_{111}^e é a vazão da fonte externa identificada por $p=1$, na operação 1, no intervalo 1.

No segundo intervalo de concentração, estão disponíveis 20t/h (50ppm) vindos da operação 1 no intervalo 1 e água primária. Para que a operação não seja dividida, devemos utilizar a vazão consumida na operação 1 no intervalo de concentração anterior (Regra 1). Assim, para a operação 1 no intervalo 2, $f_{112}^i = 20\text{t/h}$ (50ppm), vazão que satisfaz completamente a exigência desta operação neste intervalo. Terminada a fonte interna, nas operações 2 e 3, é utilizada a água primária disponível. As respectivas vazões da fonte externa 1 são $f_{122}^e = 50\text{t/h}$ e $f_{132}^e = 20\text{t/h}$.

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

No terceiro intervalo de concentração estão disponíveis 20t/h (100ppm) da operação 1, 50t/h (100ppm) da operação 2, 20t/h (100ppm) da operação 3 e água primária. Há somente a operação 3 no intervalo 3, que, de acordo com a Eq. 2.7, necessita de $f_{333}^i = 40\text{t/h}$ (100ppm), as quais não podem ser completamente fornecidas pela fonte interna originada da operação 3 no intervalo 2. A vazão adicional necessária é igual a 20t/h (100ppm). Esta vazão pode ser fornecida pelas fontes internas disponíveis nas operações 1 e 2, do intervalo 2. A escolha entre as duas opções, operação 1 ou operação 2, originará diferentes redes com diferentes custos. A seta macejada (linha traço-ponto) na Figura 3.5 representa a vazão adicional requerida pela operação 3. Nesta solução é utilizada a saída da operação 1 para suprir a vazão exigida (ver os dois círculos indicados na Figura 3.5).

No quarto intervalo estão disponíveis três fontes, a fonte externa de água primária e duas fontes internas: 50t/h (100ppm) disponíveis na operação 2 e 40t/h (400ppm) na operação 3. Existem as operações 3 e 4 neste intervalo. Para a operação 3, $f_{334}^i=40\text{t/h}$ (400ppm), valor que pode ser completamente suprido com a vazão vinda da mesma operação no intervalo 3. Agora, há 50t/h (100ppm) disponíveis na operação 2 e água primária para a operação 4. Devendo utilizar a fonte interna com maior nível de concentração, neste ponto as fontes com 400ppm estão esgotadas e passa-se então para a fonte interna da operação 2, (ver os dois triângulos indicados na Figura 3.5). Agora, de acordo com a Eq. 3.7, $f_{244}^i=5,7\text{t/h}$ (100ppm).

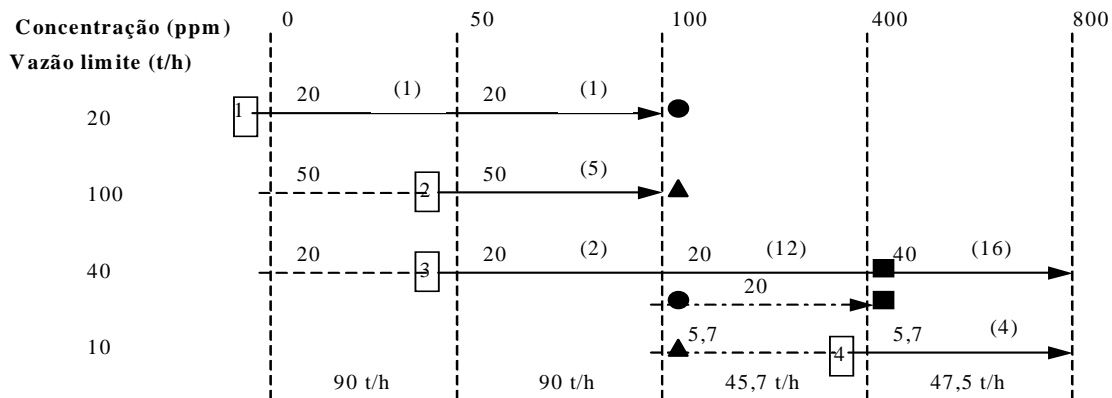


Figura 3.5: Representação no diagrama de fontes de água das vazões consumidas (passo 4).

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

A vazão mínima de água da fonte externa p pode ser calculada pela Eq. 3.8.

$$f_p^e = \sum_{k=1}^{N_{op}} \sum_{i=1}^{N_i} f_{pki}^e \quad (\text{Eq. 3.8})$$

Através da Figura 3.5 pode-se notar que no exemplo em questão a mínima vazão de água primária (0ppm) pode ser obtida pela soma das vazões do intervalo 1, em concordância com a Eq. 3.8. Já o ponto de pinch, localizado na concentração de 100 ppm, pode ser percebido quando o somatório das vazões em cada intervalo muda de 90t/h, que é a vazão do pinch, para 45,7t/h. A partir dos resultados obtidos e representados na Figura 3.5, a Rede de Transferência de Massa (RTM) para o mínimo consumo de água primária é montada, conforme mostrado na Figura 3.6.

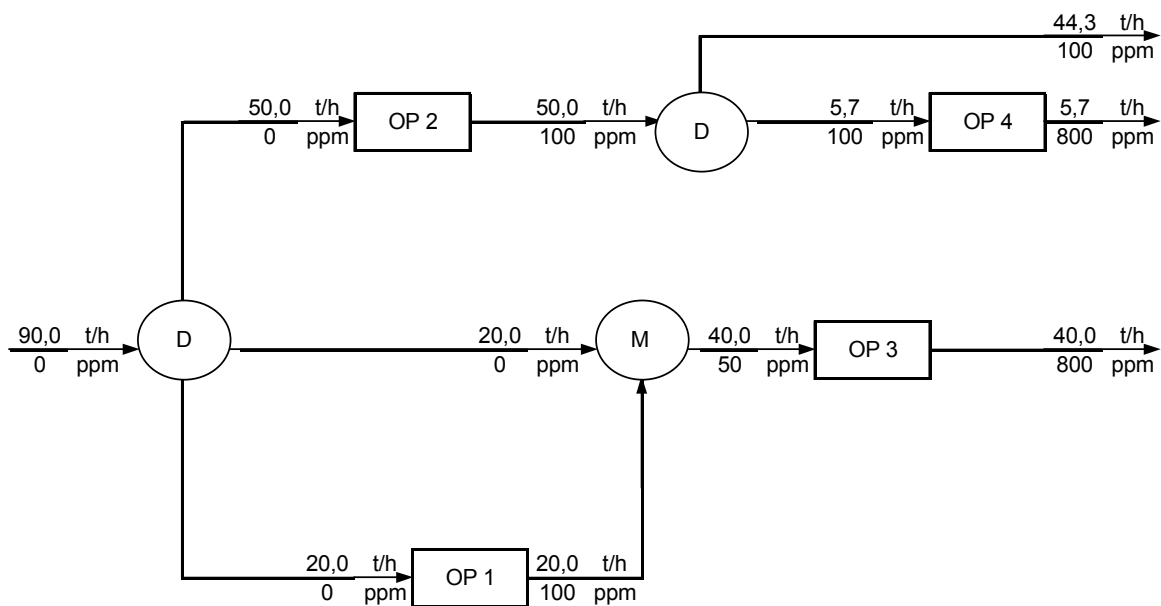


Figura 3.6: Rede de transferência de massa para o máximo reúso correspondente ao diagrama da Figura 3.5.

3.1.2 Problemas com múltiplas fontes de água

Geralmente existem disponíveis nas indústrias várias fontes de água primária com diferentes qualidades. Como regra, o custo da água é proporcional à sua qualidade. Desta forma, com o objetivo de minimizar o custo operacional, deve-se utilizar preferencialmente a fonte de água mais contaminada.

O algoritmo é similar ao apresentado para o máximo reúso. Porém, as concentrações de todas as fontes externas devem ser consideradas (inseridas) no diagrama de fontes de água, podendo gerar novos intervalos de

concentração. A prioridade de utilização continua sendo das fontes internas, mas deve ser considerada uma escala de preferência para o uso das fontes externas, de acordo com o custo desta água. No procedimento aqui apresentado considera-se que, quanto maior a concentração da fonte externa, menor o seu custo. Assim, as fontes externas a serem utilizadas primeiro são as de maior concentração.

Para o problema exemplo, considera-se agora que existam duas fontes externas disponíveis, uma a 0ppm e outra com contaminante a uma concentração de 25ppm. O procedimento é o mesmo apresentado para o máximo reúso, com as modificações nos passos 1 e 4 descritas a seguir.

Passo 1:

Há agora duas fontes de água como fontes externas e as novas concentrações dos intervalos serão:

$$C'_{fea} = \{0, 25\};$$

$$C'_{fia} = \{50, 100, 400, 800\}$$

$$\Rightarrow C' = C'_{fea} \cup C'_{fia} = \{0, 25, 50, 100, 400, 800\}.$$

Passo 4:

Com a nova fonte externa e um novo limite entre intervalos, os conjuntos de número de fontes disponíveis em cada intervalo mudam. Os novos conjuntos são:

$$N_{fea} = \{1, 2, 2, 2, 2\} \text{ e } N_{fia} = \{0, 1, 1, 3, 3\}.$$

No intervalo 1 (de 0ppm a 25ppm) há somente água primária (0ppm) disponível e somente a operação 1 presente. De acordo com a Eq. 3.6, $f'_{111} = 20\text{t/h}$ (0ppm). No intervalo 2 (de 25ppm a 50ppm), três fontes de água estão disponíveis: fonte externa 1 de água (0ppm); fonte externa 2 de água (25ppm); fonte interna 1 da operação 1, vinda do intervalo 1, com 20t/h (25ppm); e somente a operação 1 presente. Selecionando a fonte interna e seguindo a Eq. 3.7, $f'_{112} = 20\text{t/h}$ (25ppm). Como a vazão disponível é igual à quantidade necessária para a operação, não há necessidade de utilizar mais água neste intervalo.

No intervalo 3 (de 50ppm a 100ppm), novamente três fontes de água estão disponíveis: fonte externa 1 de água (0ppm); fonte externa 2 de água (25ppm); fonte interna 1 da operação 1, vinda do intervalo 2, com 20t/h (50ppm); e as operações 1, 2 e 3 estão presentes. A operação 1 necessita de $f_{113}^i=20\text{t/h}$ (50ppm), que é igual a vazão disponível na fonte interna oriunda dessa operação. A operação 2, de acordo com a regra das prioridades, irá utilizar a fonte externa 2 de 25ppm. De acordo com a Eq. 3.6, $f_{223}^e=66,7\text{t/h}$ (25ppm). A operação 3, pelos mesmos motivos, também utilizará a fonte externa 2 de 25ppm, sendo necessários $f_{233}^e=26,7\text{t/h}$ (25ppm) (Eq. 3.6).

No intervalo 4 (de 100ppm a 400ppm), cinco fontes de água estão disponíveis: fonte externa 1 de água (0ppm); fonte externa 2 de água (25ppm); fonte interna 1, da operação 1 vinda do intervalo 3, com 20t/h (100ppm); fonte interna 2, da operação 2, vinda do intervalo 3, com 66,7t/h (100ppm); e fonte interna 3 da operação 3, vinda do intervalo 3, com 26,7t/h (100ppm). Somente a operação 3 encontra-se presente. De acordo com a Eq. 3.7, a vazão necessária para a operação 3 é igual a $f_{334}^i=40\text{t/h}$ (100ppm), maior que a fonte interna 3 disponível na mesma operação, no intervalo anterior. São então utilizadas 26,7t/h (100ppm) vindas da operação 3 e, para completar o valor necessário, 13,3t/h (100ppm) vindas da operação 2. Note que a fonte interna oriunda da operação 1 também poderia ter sido utilizada, opção que geraria um fluxograma diferente, com o mesmo consumo total de água.

Continuando o algoritmo, no intervalo 5 (de 400ppm a 800ppm) cinco fontes de água estão disponíveis: fonte externa 1 de água (0ppm); fonte externa 2 de água (25ppm); fonte interna 1 da operação 1, vinda do intervalo 4 com 20t/h (100ppm); fonte interna 2 da operação 2, vinda do intervalo 4 com 53,4t/h (100ppm), e fonte interna 3 da operação 3, vinda do intervalo 4 com 40t/h (400ppm). As operações 3 e 4 estão presentes nesse intervalo. Seguindo a prioridade das fontes, analisando a operação 3 e de acordo com a Eq. 3.7, a vazão necessária nesse intervalo é de $f_{335}^i=40\text{t/h}$ (400ppm), igual a vazão disponível no intervalo anterior na mesma operação 3. Assim, na operação 3 nesse intervalo não há necessidade de se usar água de outra fonte. Na operação 4, devem ser utilizadas $f_{2,4,5}^i=5,7\text{t/h}$ (100ppm) vindas da fonte interna 2 da operação 2.

Os resultados deste procedimento para múltiplas fontes de água podem ser visto na Figura 3.7 e a rede de transferência de massa correspondente está representada na Figura 3.8.

Comparando com o resultado encontrado para máximo reúso (item 3.1.1), vimos que a maior vazão total utilizada nos intervalos é de 113,4t/h, dos quais 20t/h são da fonte primária (0ppm) e 93,3t/h da fonte de 25ppm. Há assim uma diminuição no consumo de água a 0ppm.

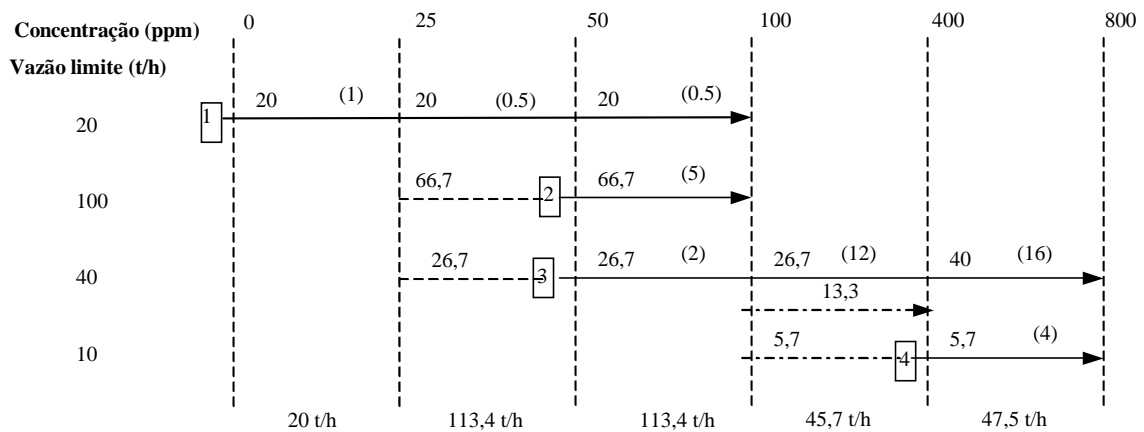


Figura 3.7: Diagrama de Fontes de Água para o problema exemplo com múltiplas fontes de água.

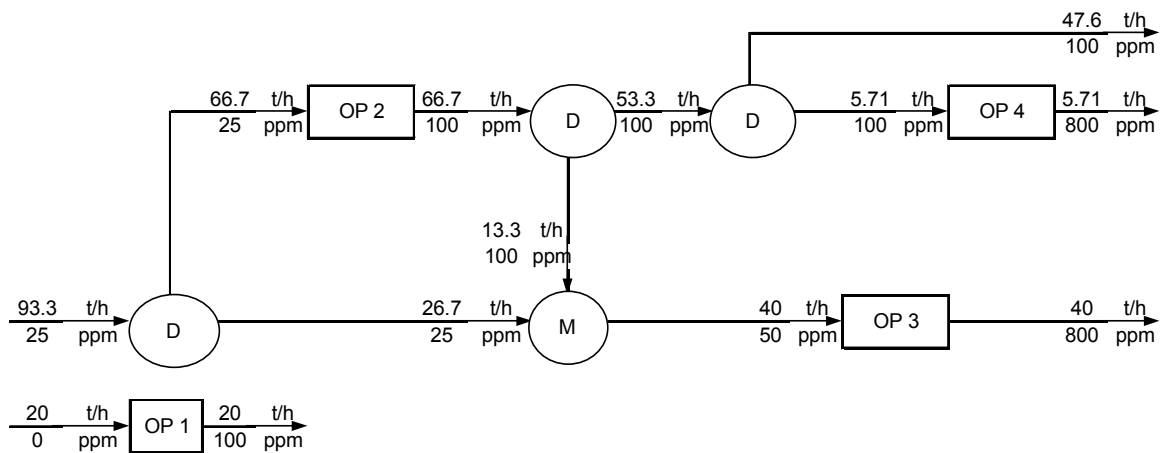


Figura 3.8: Rede de transferência de massa considerando múltiplas fontes de água.

3.2 Procedimento para minimização de efluentes aquosos – Múltiplos contaminantes

No item 3.1 foi apresentado um procedimento para minimização de efluentes aquosos em sistemas com um contaminante. Porém, sabemos que efluentes aquosos com apenas um contaminante ocorrem muito raramente. Grande parte dos processos químicos envolve mais de um contaminante.

Em muitos casos são vários os processos que utilizam água e seus efluentes aquosos apresentam vários contaminantes. Como exemplo, tem-se as refinarias que são constituídas de vários sistemas. Em uma unidade de hidrodessulfurização com carga de aproximadamente $5.000\text{m}^3/\text{d}$ de água, a vazão de efluente é cerca de 5% da vazão volumétrica da carga e apresenta múltiplos contaminantes, tipicamente, 5ppm de NH_3 , 1ppm de H_2S e 100ppm de hidrocarboneto.

Pelo exposto, verifica-se que o consumo de água para este tipo de indústria é elevado e que se faz necessário desenvolver uma metodologia para múltiplos contaminantes, de modo que problemas mais próximos da realidade industrial possam ser analisados.

Anteriormente, na presença de sistemas com múltiplos contaminantes, a síntese da rede de efluentes aquosos era executada para cada contaminante individualmente, como se apenas ele existisse no processo. Era obtido um número de redes equivalente ao número de contaminantes no processo e todas eram testadas para verificar qual rede atendia as restrições dos outros contaminantes. Feito isso, pontos onde os balanços de massa não eram satisfeitos (pontos violados) eram identificados e estes eram recalculados a fim de obter uma rede que atendesse a todas as restrições do processo.

Porém esta metodologia mostrou-se adequada em apenas aos sistemas com pequeno número de contaminantes, no máximo dois. Para processos com um mínimo de contaminantes aquosos, faz-se necessário um procedimento para redução dos cálculos e das possibilidades a serem analisadas e compatibilizadas.

O procedimento para minimização de efluentes aquosos para múltiplos contaminantes proposto a seguir é uma extensão do procedimento visto

anteriormente para um contaminante e representa uma alternativa ao procedimento tradicional de tratar os contaminantes individualmente.

Problema Exemplo

Os procedimentos aqui propostos para a especificação de metas para a síntese da rede de equipamentos de transferência de massa são aplicados em um exemplo apresentado por Wang e Smith (1994), cujos dados limites para as correntes de água encontram-se no Quadro 3.2. São apresentadas as vazões limites (f_k) e respectivas concentrações máximas na entrada e na saída ($C_{ik,max}$, $C_{fk,max}$) dos dois contaminantes, bem como as cargas de contaminante correspondentes (Δm_k), nas correntes de água que alimentam as duas operações (k).

Operação k	f_k (t/h)	Contaminante	$C_{ik,max}$ (ppm)	$C_{fk,max}$ (ppm)	Δm_k (kg/h)
1	40	A	0	100	4
		B	25	75	2
2	35	A	80	240	5,6
		B	30	90	2,1

Quadro 3.2: Dados do problema exemplo (Wang e Smith,1994).

3.2.1 Opção de máximo reúso

Todas as considerações feitas na metodologia apresentada no item 3.1 são estendidas para múltiplos contaminantes.

Em problemas com múltiplos contaminantes a transferência dos contaminantes ocorre simultaneamente. Desta forma, existe a possibilidade de que ao se analisar um contaminante, as concentrações de entrada do outro contaminante sejam violadas. Isto é, os limites definidos de concentração de entrada podem não ser atendidos para todos os contaminantes. Visando garantir o mínimo consumo de água no processo, temos que garantir que a taxa de massa de cada contaminante a ser transferida entre as correntes (Δm_k) sejam atendidas.

Assim, faz-se necessária a análise dos dados de entrada e seu possível ajuste (para um menor valor de concentração de entrada), de modo a não violar a taxa de transferência de massa dos contaminantes entre as correntes e nem ultrapassar a mínima concentração de entrada na operação.

As técnicas tradicionais de minimização do uso de água com múltiplos contaminantes consideravam os contaminantes individualmente no processo, não considerando as relações entre as transferências de massa de cada contaminante, que ocorrer simultaneamente.

Os contaminantes são transferidos seguindo uma lei de transferência de massa nas operações. No presente trabalho, considera-se que as relações entre as transferências dos contaminantes são lineares nas operações. Isto é, considerando o exemplo problema, o contaminante A irá ser transferido na mesma proporção que o contaminante B, conforme Eq. 3.9.

$$\frac{\Delta C_{B,k}}{\Delta C_{A,k}} = cte \quad \text{(Eq. 3.9)}$$

Onde k representa a operação.

Desta forma, a diferença de concentração (concentração de saída menos a concentração de entrada) do contaminante B na operação k é proporcional à diferença de concentração (concentração de saída menos a concentração de entrada) do contaminante A na mesma operação k.

Definidos os limites de concentração de um contaminante, pode-se então determinar os limites de concentração dos outros contaminantes na mesma operação, caso haja variação em suas concentrações de entrada.

Para o exemplo problema, aplicando a Eq. 3.9, tem-se:

$$\frac{\Delta C_{B,1}}{\Delta C_{A,1}} = \frac{75 - 25}{100 - 0} = 0,5, \text{ na operação 1 e}$$

$$\Delta C_{A,1} = 100 - 0$$

$$\frac{\Delta C_{B,2}}{\Delta C_{A,2}} = \frac{90 - 30}{240 - 80} = 0,375, \text{ na operação 2.}$$

$$\Delta C_{A,2} = 240 - 80$$

Estas relações devem ser preservadas em cada operação, mesmo que haja variação nos valores das concentrações de entrada ocasionada pela via de fontes externas de água ou mesmo pelo reúso ou via de água regenerada.

Para garantir o máximo reúso de água no processo, um dos contaminantes deve ter seus limites de concentração mantidos como limitantes do processo. Esse contaminante é então chamado de contaminante de referência. Qualquer contaminante pode ser escolhido para ser utilizado como referência nos cálculos. Os cálculos são efetuados com base no contaminante de referência e todos os contaminantes necessitarão da mesma vazão de água para atender as restrições do processo, desde que o ajuste das concentrações seja feito de forma correta.

3.2.2 Ajuste das concentrações em relação ao contaminante de referência

Em primeiro lugar define-se o contaminante de referência. Depois se deve ajustar as concentrações dos outros contaminantes obedecendo-se os limites máximos, indicados na definição do problema, e a relação de transferência adotada (no presente trabalho representada pela Eq. 3.9).

No exemplo, define-se o contaminante A como referência. As suas concentrações são então levantadas e as concentrações correspondentes ao contaminante B determinadas para cada operação como pode ser visto no Quadro 3.3.

<i>Contaminantes</i>	<i>Concentrações</i>			
A:	0	80	100	240
B (OP.1):	0	[40]	[50]	-
B (OP.2):	0	[30]	-	[90]

Quadro 3.3: Valores de concentração para os contaminantes A e B nas operações 1 e 2 (contaminante A como referência).

Os valores entre colchetes no Quadro 3.3 são calculados a partir da Eq. 3.9. Pode-se verificar que, para a concentração do contaminante A de 80ppm, encontra-se uma concentração para o contaminante B de 40ppm para a operação 1 e 30ppm para a operação 2, supondo-se a alimentação com fonte externa a 0ppm dos dois contaminantes. Note que na concentração de 80ppm, a concentração correspondente de B é de 40ppm, o que não permite a sua utilização na operação 2. Faz-se então necessário um ajuste das concentrações de entrada do contaminante A de forma a possibilitar o reúso também para o contaminante B.

Assim, para possibilitar o reúso da corrente B na operação 2 deve-se ajustar a concentração de entrada de A nessa operação de forma que a concentração equivalente do contaminante B na operação 1 atenda a restrição de 30ppm. Utilizando novamente a relação de transferência dos contaminantes na operação dada pela Eq. 3.9, conclui-se que a concentração do contaminante B de 30ppm na operação 1 equivale a uma concentração de 60 ppm do contaminante A (relação de transferência = 0,5). Esse resultado pode ser visto no Quadro 3.4.

<i>Contaminantes</i>	<i>Concentrações</i>					
A*:	0	[60]	80	100	[220]	240
B (OP.1):	0	30	-	50	-	-
B (OP.2):	0	30	-	-	90	-

Quadro 3.4: Ajuste dos valores de concentração para os contaminantes A e B nas operações 1 e 2 (contaminante A como referência).

Note também que a nova concentração de A em 2 deve ter recalculada a concentração de saída correspondente (220ppm). Isto feito, os novos valores de concentração para o problema, tomando a como referência, são apresentados no Quadro 3.5. Note que os valores máximos definidos no Quadro 3.2 não são violados, nem as taxas transferidas em cada operação.

Operação k	f_k (t/h)	Contaminante	$C_{ik,max}$ (ppm)	$C_{fk,max}$ (ppm)	Δm_k (kg/h)
1	40	A	0	100	4
		B	0	50	2
2	35	A	60	220	5,6
		B	30	90	2,1

Quadro3.5: Problema exemplo adaptado ao contaminante A.

3.2.3 Algoritmo

Assim, para determinar as vazões de água e a composição do fluxograma para minimização do consumo de água será considerado, após o ajuste das concentrações, apenas um contaminante nos cálculos (contaminante A), pois o balanço para os outros contaminantes fica garantido no ajuste das concentrações em relação ao contaminante de referência.

O algoritmo para a especificação de metas para a síntese da rede de equipamentos de transferência de massa a ser utilizado seguirá os mesmos passos definidos no item 3.1 no procedimento para minimização de efluentes para um contaminante.

Passo 1:

Definidos os intervalos de concentração conforme o item 3.1.1, chega-se a um o diagrama de fontes de água como apresentado na Figura 3.9. No novo problema exemplo, após o ajuste de concentração e tomando o contaminante A como referência, há somente água primária como fonte externa, $C'_{fea} = \{0\}$, e como fontes internas, $C'_{fia} = \{60, 100, 220\}$. Assim, os valores de concentração que definirão os intervalos serão dados por: $C' = \{0, 60, 100, 220\}$.

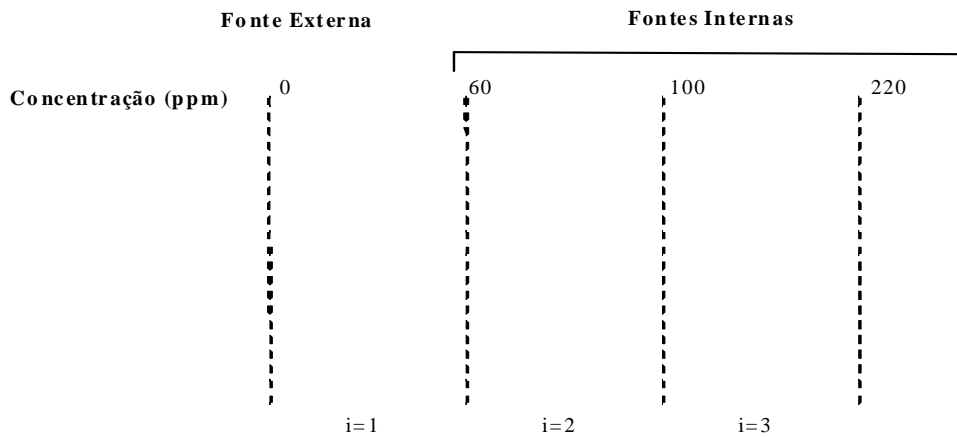


Figura 3.9: Estrutura do diagrama de fontes de água (passo 1) considerando o contaminante A como referência.

Passo 2:

As operações de transferência de massa e as vazões limites das operações são incluídas no DFA, como pode ser visto na Figura 3.10.

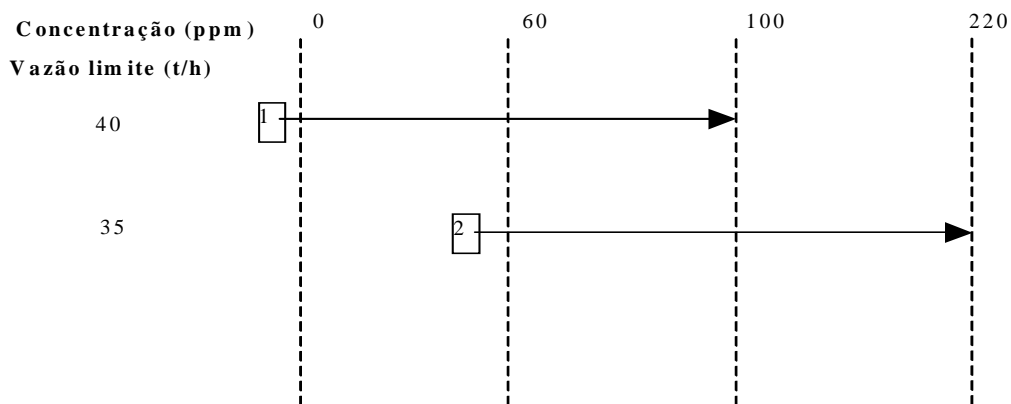


Figura 3.10: Representação das operações no diagrama de fontes de água (passo 2) considerando o contaminante A como referência.

Passo 3:

Neste passo, a quantidade de massa transferida em cada processo e em cada intervalo são calculados e adicionados ao DFA, como pode ser visto na Figura 3.11 entre parênteses, expressos em kg/h.

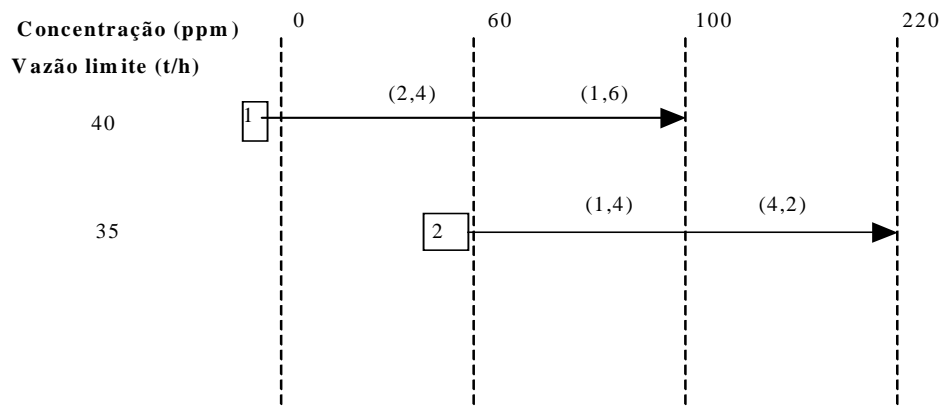


Figura 3.11: DFA com operações e respectivas quantidades de massa transferida (passo 3), considerando o contaminante A como referência.

Passo 4:

Seguindo o procedimento descrito no item 3.1.1, a vazão necessária de água para cada intervalo de concentração é calculada. Para o problema exemplo, tem-se $f_{111}^e = 40 \text{ t/h}$, onde f_{111}^e é a vazão da fonte externa de água a 0ppm para a operação 1, no intervalo 1.

No segundo intervalo de concentração, estão disponíveis 40t/h (60ppm) vindos da operação 1 no intervalo 1 (fonte interna) e água primária (fonte externa). Segundo os critérios de prioridade, verifica-se a necessidade de água à 60ppm na operação 1. A quantidade necessária é igual a $f_{112}^i = 40 \text{ t/h}$ (60ppm), valor igual ao disponível. Na operação 2 deve-se então usar a água primária disponível. A vazão de água a 0ppm necessária na operação 2 é de $f_{122}^e = 14 \text{ t/h}$. No terceiro intervalo de concentração estão disponíveis 40t/h (100ppm) da operação 1, 14t/h (100ppm) da operação 2 e água primária. Somente a operação 2 está presente no intervalo 3 e necessita de $f_{223}^i = 35 \text{ t/h}$ (100ppm). Novamente, seguindo as regras de prioridade, as 35t/h (100ppm) são obtidas com as 14t/h vindas da operação 2 e 21t/h da operação 1. A seta pontilhada na Figura 3.12 representa essa vazão adicional requerida pela operação 2 que é suprida pela operação 1.

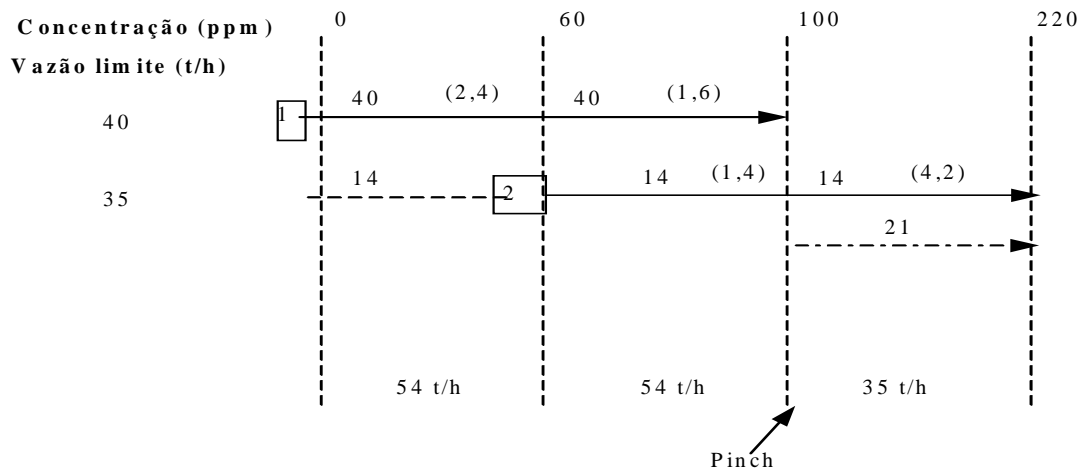


Figura 3.12: Representação no DFA das vazões das correntes (passo 4), considerando o contaminante A como referência.

Na Figura 3.12 verifica-se que a mínima vazão de água primária (0ppm) é de 54t/h, que é a vazão do ponto pinch. O ponto pinch de concentração é igual a 100ppm.

A partir dos resultados obtidos para o problema exemplo considerando o contaminante A como referência (Figura 3.12), monta-se a Rede de Transferência de Massa (RTM) para o mínimo consumo de água primária, conforme mostrado na Figura 3.13. As concentrações correspondentes ao contaminante B são calculadas através de balanços de massa, considerando as vazões totais determinadas e as quantidades de massa a serem transferidas em cada operação (Quadro 3.2).

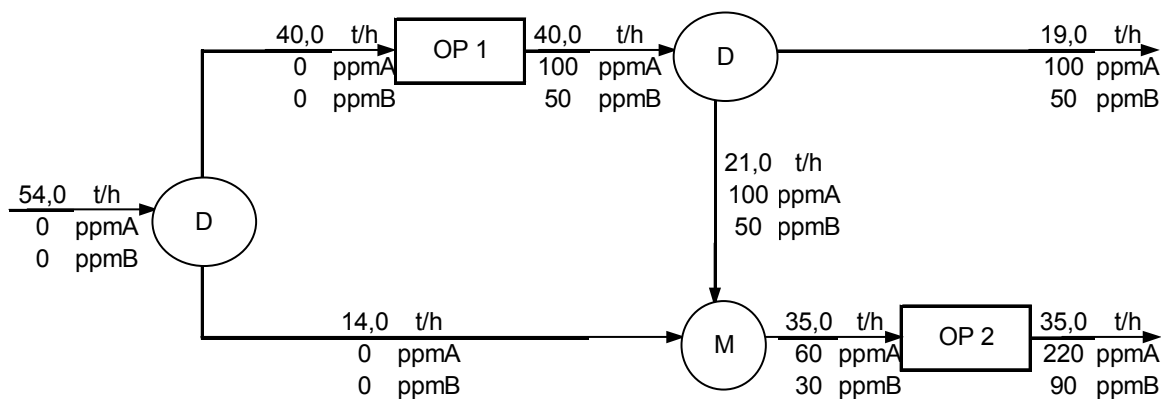


Figura 3.13: Rede de transferência de massa para o máximo reúso considerando o contaminante A como referência.

Uma análise do o fluxograma apresentado na Figura 3.13 mostra que todas as restrições de concentração máxima de entrada para o contaminante B são atendidas a partir dos resultados de vazão obtidos considerando como referência o contaminante A.

Visando demonstrar que os resultados independem da escolha do contaminante de referência na determinação do consumo mínimo de água, desde que o ajuste inicial das concentrações seja feito de forma correta, a seguir o algoritmo é repetido considerando-se o contaminante B como referência.

Assim, considerando agora como referência o contaminante B, os valores de concentrações de entrada do exemplo problema são ajustados, conforme mestrado no Quadro 3.6. Note que a disponibilidade da fonte externa a 0ppm deve ser considerada.

<i>Contaminantes</i>	<i>Concentrações</i>			
B:	25	30	75	90
A1 [OP.1]:	0	[60]	100	-
A2 [OP.2]:	-	80	-	240

Quadro 3.6: Valores de concentração para os contaminantes A e B nas operações 1 e 2 (contaminante B como referência).

Com B como referência os limites de concentração são atendidos, tanto para o contaminante A quanto para o contaminante B. Porém, como a água utilizada para atender o contaminante A deve ser água limpa (concentração de 0ppm), deve-se também ajustar os valores de B para a nova concentração de entrada, mantendo as quantidades de massa transferidas por intervalo. As novas concentrações são mostradas no Quadro 3.7.

<i>Contaminantes</i>	<i>Concentrações</i>			
	B*:	0	30	50
A1 [OP.1]:	0	[60]	100	-
A2 [OP.2]:	-	[60]	-	[220]

Quadro 3.7: Ajuste dos valores de concentração para os contaminantes A e B nas operações 1 e 2 (contaminante B como referência).

Os novos valores de concentração para o problema exemplo tomando B como referência são apresentados no Quadro 3.8.

Operação k	f_k (t/h)	Contaminante	$C_{ik,max}$ (ppm)	$C_{fk,max}$ (ppm)	Δm_k (kg/h)
1	40	A	0	100	4
		B	0	50	2
2	35	A	60	220	5,6
		B	30	90	2,1

Quadro 3.8: Problema exemplo adaptado ao contaminante B.

Comparando os Quadros 3.8 e 3.5, observa-se que os valores de concentração encontrados são idênticos determinados tomando como referência o contaminante A. Desenvolvendo o algoritmo com base no contaminante B, os principais resultados podem ser visto no DFA na Figura 3.14.

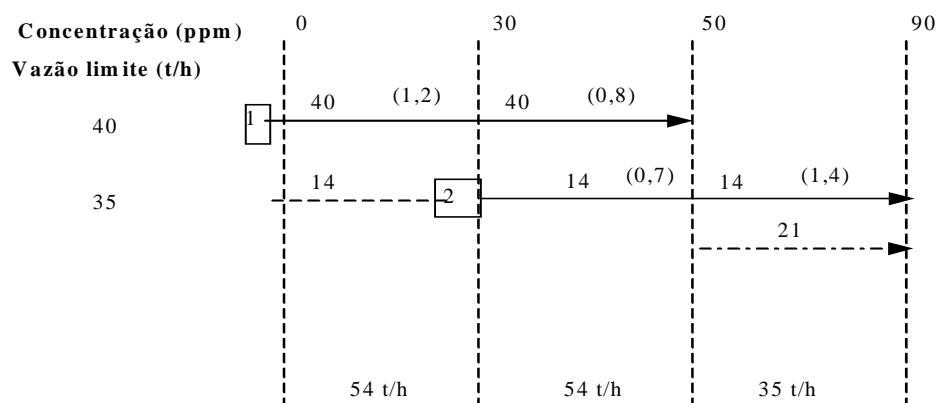


Figura 3.14: Diagrama de fontes de água considerando o contaminante B como referência.

Na Figura 3.14 observa-se que a mínima vazão de água primária (0ppm) é de 54t/h, que é a vazão pinch e igual a obtida com a como referência. O ponto

pinch de concentração encontra-se na concentração de 50ppm de B, exatamente o valor correspondente ao 100ppm de A obtido tomando-se A como referência.

A partir dos resultados obtidos para o problema exemplo considerando o contaminante B como referência, a Rede de Transferência de Massa (RTM) para o mínimo consumo de água primária mostrada na Figura 3.15, é montada.

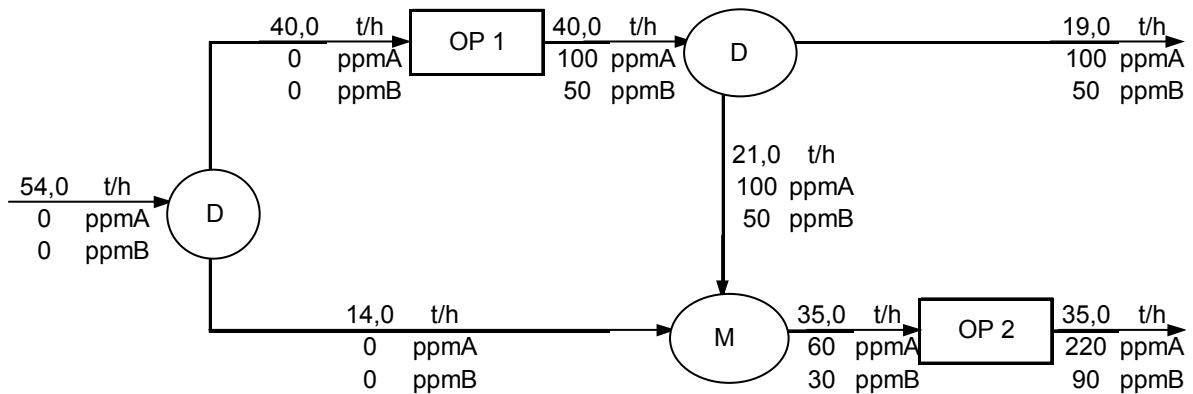


Figura 3.15: Rede de transferência de massa para o máximo reúso considerando o contaminante B como referência.

O fluxograma apresentado na Figura 3.15 é idêntico ao obtido considerando o contaminante A como referência (Figura 3.13). Da mesma forma, todas as restrições de concentração do contaminante A são atendidas no fluxograma com B como referência.

Desta forma, observa-se que não importa o contaminante de referência na determinação do consumo mínimo de água com a opção de máximo reúso.

Capítulo 4

Descrição do Processo

4.1 Introdução

A indústria que está sendo analisada é uma petroquímica que combina operações de primeira e segunda geração da cadeia produtiva do plástico. A primeira geração caracteriza-se pelo ciclo de negócios ligados à produção de matérias-primas básicas fundamentais para a segunda geração, a qual é responsável pelo ciclo das resinas termoplásticas. Seu complexo industrial, composto por unidades de insumos básicos, desenvolvimento de negócios, poliolefinas e vinílicos, fornece utilidades como energia elétrica, vapor, água e ar comprimido às demais indústrias do pólo petroquímico.

Pode-se destacar o consumo de água como sendo uma das grandezas que expressam a dimensão desta petroquímica. Comparando-se com abastecimento urbano, seu consumo da ordem de 4 mil m³/h equivale ao de uma cidade com população superior a 500 mil habitantes, ou seja, no estado da Bahia seu consumo é superado apenas pelas cidades de Salvador e Feira de Santana.

Dentro da indústria este volume de água se divide em aproximadamente 2 mil m³/h para a unidade de insumos básicos, dos quais 1,9 mil m³/h correspondem ao consumo requerido no processo petroquímico, nas caldeiras (água desmineralizada) e nas torres de resfriamento (água clarificada); os 100 m³/h restantes destinam-se ao consumo humano e à limpeza geral. Adicionalmente, circulam outros 2 mil m³/h de água clarificada que tem como objetivo o suprimento das torres de resfriamento das demais unidades de produção desta indústria e das outras indústrias do Pólo Petroquímico.

4.2 Unidade de tratamento de água – UTA

Diferenciando-se de outros trabalhos nos quais se aplicou a metodologia DFA no processo produtivo, este projeto tem como objeto de estudo a UTA desta petroquímica, a qual é composta por subunidades de Clarificação, Filtração, Desmineralização e Potabilização.

Utiliza-se de duas fontes externas de água bruta: um manancial (o Rio Joanes) e um subterrâneo (o aquífero de São Sebastião). A captação de água bruta a partir do manancial é feita através de 4 bombas centrífugas com capacidade de 2500 m³/h cada e enviada para o processo de clarificação através de duas adutoras. A captação de água subterrânea é realizada através de 12 poços tubulares localizados em áreas afastadas do complexo industrial e enviada para etapa de desmineralização por outras três adutoras. Devido à qualidade desta água, não é necessário um pré-tratamento antes de enviá-la para desmineralização.

A água bruta do Rio Joanes, como a maior parte das águas superficiais naturais, caracteriza-se por amplas variações de qualidade. Contudo, essencialmente, pode ser caracterizada como uma água com baixo teor de sólidos dissolvidos (STD \leq 250 ppm) e moderado a médio teor de sólidos em suspensão (turbidez \leq 75 uT e/ou cor \leq 300 uH). Apresenta, todavia, conteúdo variável de matéria orgânica, indicando uma possível contaminação do manancial por esgoto doméstico e/ou despejo industrial (matadouros, indústrias de alimentos, etc.).

A água subterrânea caracteriza-se por possuir um baixíssimo teor de sólidos dissolvidos (STD \leq 100 ppm) e por apresentar-se praticamente isenta de sólidos em suspensão. Entretanto, é naturalmente corrosiva, sendo esta característica responsável por dano em tubos de revestimento de poços.

Em virtude do incomum baixo teor de sólidos dissolvidos das águas brutas disponíveis na região, supõem-se que os mananciais possuem qualidade privilegiada, concorrendo para a obtenção de água, sob o ponto de vista do uso industrial (geração de vapor, refrigeração, processo, etc.), de boa qualidade a custo unitário potencialmente baixo.

Toda água captada do Rio Joanes é submetida a um processo de clarificação no qual ocorre a remoção de sólidos suspensos. A maior parte desta água clarificada (90%) está apta a ser usada como água de resfriamento dos processos industriais e água de serviço. O restante desta água (10%) segue para uma etapa de filtração e depois torna a dividir-se em duas partes: uma dirige-se ao sistema de água potável do Pólo Petroquímico e outra junta-se a água proveniente do aquífero para produção de água desmineralizada.

Cada subunidade da UTA será descrita mais detalhadamente tendo como base o fluxograma da Figura 4.1.

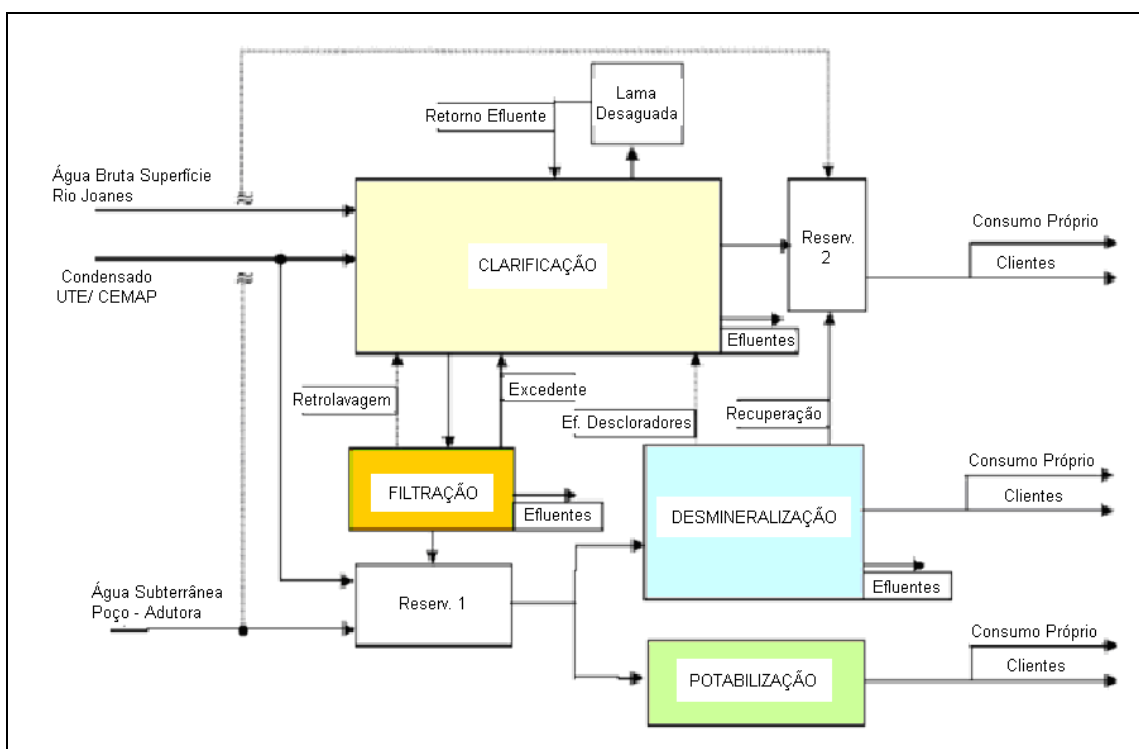


Figura 4.1: Esquema do fluxograma geral dos processos que integram a UTA.

4.2.1 Clarificação

O tratamento nesta subunidade tem como objetivo a remoção de sólidos em suspensão da água bruta proveniente do manancial. Para isto são usados

três clarificadores tipo compacto, de baixo tempo de residência e com pequena agitação, que funcionam sob o princípio de “filtração em manto de lodo”.

Nos clarificadores, a água bruta passa por correção de alcalinidade (pH) com soda cáustica, oxidação de matéria orgânica, desinfecção da água com cloro, coagulação com sulfato de alumínio e, finalmente, por floculação com polieletrólito não iônico. Neste momento inicia-se o escoamento desta água por aberturas localizadas no fundo da câmara de floculação, desembocando em um ambiente periférico de grande área superficial. A água segue um fluxo ascendente de baixa velocidade até o nível dos coletores situados na superfície, e então os flocos recém-formados entram em contato e são “filtrados” pelo “colchão” ou “manto” de lodo (previamente formados através do acúmulo de flocos anteriores compactados e mantidos retidos no ambiente em suspensão graças ao equilíbrio de forças entre seu peso e a força de arraste da água), resultando em uma água clarificada, com baixo teor de sólidos em suspensão (turbidez < 5 uT; cor < 15 uH). A lama decantada nos concentradores é drenada por gravidade através de válvulas pneumáticas e enviada para o sistema de desidratação de lama, atingindo uma concentração de aproximadamente 16% antes de ser enviada para uma empresa de fabricação de blocos cerâmicos.

A água clarificada é enviada para tanques com capacidade total de aproximadamente 8000 m³, nos quais é realizado o ajuste final de pH com hidróxido de cálcio (cal). Como resultado, grande parte desta água é usada como água de serviço e água de resfriamento. Neste caso, o tratamento final é simples, realizado por empresas tratadoras de sistemas de resfriamento, com o uso dos tradicionais dispersantes e inibidores de corrosão.

4.2.2 Filtração

A pequena fração de água clarificada (cerca de 10%) que destina-se ao sistema de água potável do Pólo Petroquímico ou à subunidade de desmineralização deve ter o teor de sólidos suspensos diminuído através de filtração. Para que isso ocorra, a água clarificada passa por filtros rápidos de

areia, operando em paralelo, de taxa declinante, por gravidade. A fração filtrada, que será enviada ao sistema de água potável, ainda deve ter o pH reajustado com carbonato de sódio e o teor de cloro livre reajustado com cloro gás.

4.2.3 Desmineralização

A desmineralização é a etapa crítica da UTA, pois é partir dela que se obtém a água necessária à geração de vapor nas caldeiras para aquecimento do processo e acionamento de equipamentos rotativos (turbo-geradores de energia elétrica, bombas e compressores). A principal operação que ocorre nesta fase é a substituição dos cátions (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+) e ânions (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- , SiO_2^-) por íons H^+ e íons OH^- respectivamente.

A UTA possui duas plantas de desmineralização por troca iônica operando num sistema tipo contra-corrente com selagem na regeneração. Juntas elas possuem uma vazão de 2 mil m^3/h . A água de alimentação desta subunidade, proveniente da água dos poços e da subunidade de filtração, passa por uma bateria de equipamentos (bombas de alimentação, filtros de carvão ativado, vasos de resina catiônica, torres descarbonatadoras, vasos de resina aniônica e vasos de leito misto) até estar apta a ser usada como água de processo. O efluente proveniente das regenerações dos vasos de troca iônica é enviado a um sistema automatizado de tratamento de efluentes, no qual realiza-se a especificação do pH de acordo com os padrões de controle ambiental.

Os filtros de carvão ativado, também chamados vasos descloradores, funcionam como filtros de sólidos em suspensão. Porém sua principal função é a remoção de cloro livre que prejudicaria o desempenho das resinas trocadoras da etapa subsequente (são resinas muito sensíveis às substâncias oxidantes e por esse motivo seriam desativadas na presença de cloro).

O início efetivo do processo de troca iônica se dá com a alimentação dos dez trocadores catiônicos com água desclorada e a obtenção de uma corrente de saída de água “decationizada” com pH bastante ácido. Em seguida, a água passa por seis descarbonatadoras para eliminação de gás carbônico (reação entre H^+ , CO_3^- e HCO_3^-), viabilizando uma água mais adequada aos trocadores

aniônicos. Operando de forma análoga aos primeiros trocadores, dez trocadores aniônicos são utilizados para a substituição dos ânions por íons OH⁻, formando novas moléculas de água e recompondo um pH neutro (6,5 – 7,5).

A desmineralização termina com uma última bateria de dez trocadores de “leito misto” que funcionam como sistema de controle e contingência, evitando que cátions ou ânions, que possam ter passado pelos trocadores anteriores, sigam na água de processo. Este tipo de trocador é composto por resinas fortemente ácidas e básicas que têm a propriedade de absorver e permutar íons de ambas naturezas.

Finalmente, a água resultante desta subunidade é armazenada em quatro tanques com capacidade total de 24 000 m³ e é considerada de alta pureza com condutividade na faixa de 0,1 a 0,3 mS/ cm.

4.2.4 Resinas

Os trocadores iônicos são equipamentos compostos por resinas de troca iônica. Estas são substâncias sintéticas, insolúveis, de forma esférica (~0,5 mm), composta por uma matriz e por grupos fixos de íons, sendo por esta última característica dividida em dois grupos: resinas de troca catiônica e resinas de troca aniônica. Essas resinas possuem um tempo de campanha que é marcado pela saturação das mesmas por íons presentes na água os quais substituem os íons H⁺ e OH⁻ originais dessas resinas. Ao término deste tempo de operação, o sistema de monitoramento começa a detectar a fuga freqüente de íons indesejáveis sinalizando assim o fim de um determinado ciclo (volume tratado) e indicando a necessidade do início da etapa de regeneração.

O processo de regeneração tem como objetivo a reposição de íons H⁺ e OH⁻. Caracteriza-se pela passagem e distribuição uniforme de uma contracorrente de ácidos ou bases pelo leito de resina, processo exatamente contrário à desmineralização. Na UTA, os regenerantes utilizados nas resinas catiônicas e aniônicas são ácido sulfúrico e soda cáustica respectivamente. As operações básicas de uma regeneração são: Contra-lavagem, Aplicação de

regenerante, Deslocamento (lavagem lenta) e Enxágüe (lavagem rápida) e são apresentadas no Quadro 4.1.

Contra-lavagem	<p>É a passagem de um fluxo ascendente de água através do leito de resinas com a finalidade de remover qualquer material retido pela ação filtrante da resina. Reclassificação da resina em termos de partículas a fim de minimizar problemas hidromecânicos, tais como perdas de carga no leito e percolação do regenerante. Durante esta fase o leito deverá sofrer uma expansão de pelo menos 50 %, a um máximo de 80 %. Nos vasos de leito misto esta etapa também tem a finalidade de separar as resinas aniônicas e catiônicas para regeneração distintas ou separadas.</p>
Aplicação de regenerantes	<p>É a etapa em que realmente se repõe o íon de troca da resina (H^+ ou OH^-). Consiste na passagem de uma solução ácida ou básica, de concentração pré-definida, de maneira a retornar a resina para a forma química de interesse (condição regenerada).</p> <p>É a etapa mais importante do processo de “regeneração”, uma vez que dela dependerá a qualidade da água produzida, o consumo específico de regenerantes e, por conseqüência, a durabilidade da resina.</p>

Deslocamento (lavagem lenta)	É a passagem de um fluxo de água pelo leito, com baixa velocidade, de maneira a deslocar o regenerante residual ainda existente nas tubulações e no vaso que ainda não teria entrado em contato com o leito de resinas.
Enxágüe (lavagem rápida)	É a passagem de um fluxo de água pelo leito, com velocidade próxima à da etapa de operação, de maneira a remover o restante de regenerante ainda existente no leito. Esta velocidade é necessária para romper o equilíbrio iônico entre os íons e os grupos funcionais da resina. Nesta fase, após determinado período, o efluente já é recuperado para o tanque de água clarificada.

Quadro 4.1: Operações básicas de regeneração de resinas trocadoras de íons.

4.2.5 Potabilização

O tratamento de potabilização tem como corrente de entrada a parcela de água proveniente dos poços e da etapa de filtração. Esta água é adicionada de dosagens de barrilha e cloro para neutralização do pH e desinfecção respectivamente, seguindo para um reservatório e posteriormente distribuída para as demais indústrias e clientes.

4.3 Balanço Hídrico

Pelo fluxograma de processos hídricos da petroquímica em estudo observa-se que existem correntes de reúso de água entre as subunidades da UTA (Figura 4.2). Objetivando uma melhor compreensão do processo e o estudo de possibilidade de reúso de água, a subunidade de desmineralização está representada de forma mais detalhada no fluxograma da Figura 4.3.

Sendo a desmineralização a etapa crítica da UTA, é importante garantir que a água resultante desta etapa esteja dentro das especificações para o uso de geração de vapor. Por se tratar de uma subunidade complexa, composta de vasos trocadores de íons (vasos catiônicos, vasos aniônicos e vasos de leito misto) nos quais se passam diversas operações (totalizando 23 operações), a análise das concentrações de contaminantes deverá ser feita operação a operação. A partir dos dados das concentrações atuais de entrada e saída permitidas por cada operação e das concentrações máximas de entrada, foi possível a obtenção de um balanço hídrico detalhado da subunidade de desmineralização considerando SS (sólidos suspensos), STD (sólidos totais dissolvidos) e Sílica os principais contaminantes do processo (Figura 4.4, Figura 4.5 e Figura 4.6).

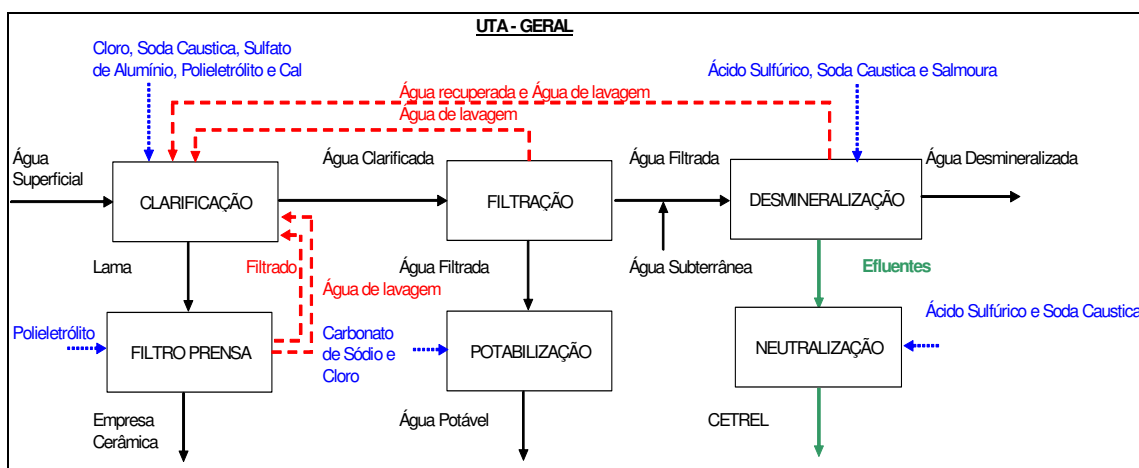


Figura 4.2: Fluxograma Geral da UTA.

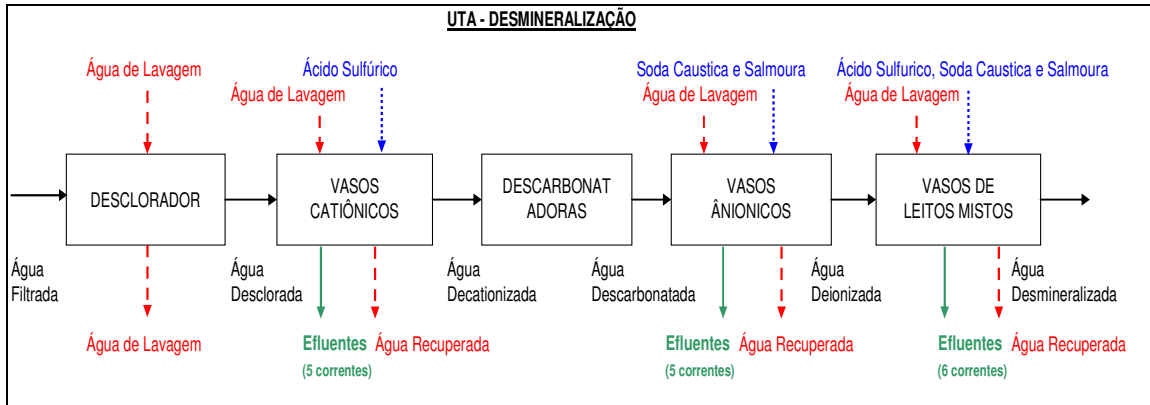


Figura 4.3: Fluxograma da subunidade de Desmineralização.

Correntes de Efluentes – Vasos Catiônicos

	Cmáx	Catual	Op1	Cout
Vazão (m ³ / mês)		91,43	Contra-lavagem dos Cátions I e II	91,43
SS (ppm)	5,00	0,00		47,00
STD (ppm)	200,00	71,25		112,50
Sílica (ppm)	20.000,00	15.000,00		15.000,00
Vazão (m ³ / mês)			Op2 Rebaixamento dos Cátions I	100,00
SS (ppm)				7,33
STD (ppm)				155,33
Sílica (ppm)				15.000,00
Vazão (m ³ / mês)	Cmáx	Catual	Op3 Aplicação ³ dos Cátions I	500,00
SS (ppm)	5,00	0,00		8,00
STD (ppm)	1.000,00	140,00		62.385,33
Sílica (ppm)	20.000,00	15.000,00		15.000,00
Vazão (m ³ / mês)	Cmáx	Catual	Op4 Aplicação I ³ dos Cátions II	213,33
SS (ppm)	5,00	0,00		33,33
STD (ppm)	1.000,00	100,00		20.156,67
Sílica (ppm)	20.000,00	15.000,00		15.000,00
Vazão (m ³ / mês)	Cmáx	Catual	Op5 Aplicação II ³ dos Cátions II	240,00
SS (ppm)	5,00	0,00		31,33
STD (ppm)	1.000,00	100,00		56.133,33
Sílica (ppm)	20.000,00	15.000,00		15.000,00
Vazão (m ³ / mês)	Cmáx	Catual	Op6 Deslocamento ³ dos Cátions I e II	820,00
SS (ppm)	5,00	0,00		33,00
STD (ppm)	140,00	120,00		65.260,00
Sílica (ppm)	20.000,00	15.000,00		15.000,00
Vazão (m ³ / mês)	Cmáx	Catual	Op7 Enxague dos Cátions I e II	856,67
SS (ppm)	0,00	0,00		22,00
STD (ppm)	52,00	46,00		4.176,50
Sílica (ppm)	20.000,00	15.000,00		15.000,00

Obs: I - 1ª Unidade de Desm.
II - 2ª Unidade de Desm.

Figura 4.4: Correntes de efluentes – vasos catiônicos.

Correntes de Efluentes - Vasos Aniônicos

	C m á x	C a t u a l	O p	C o u t
Vazão (m ³ / mês)		12,50	O p 8 Contra-lavagem dos Ânions I	12,50
SS (ppm)	5,00	0,00		6,67
STD (ppm)	200,00	1,20		1,20
Sílica (ppm)	10.000,00	90,00		16.050,00
Vazão (m ³ / mês)		16,00	O p 9 Lavagem All dos Ânions II	16,00
SS (ppm)	5,00	0,00		10,67
STD (ppm)	200,00	100,00		100,00
Sílica (ppm)	10.000,00	15.000,00		75.800,00
Vazão (m ³ / mês)		16,00	O p 10 Lavagem Al dos Ânions II	16,00
SS (ppm)	5,00	0,00		15,00
STD (ppm)	200,00	100,00		100,00
Sílica (ppm)	10.000,00	15.000,00		14.950,00
Vazão (m ³ / mês)			O p 11 Rebaixamento dos Ânions I	100,00
SS (ppm)				4,67
STD (ppm)				14,33
Sílica (ppm)				11.466,67
Vazão (m ³ / mês)		240,00	O p 12 Aplicação ³ dos Ânions I	240,00
SS (ppm)	5,00	0,00		4,00
STD (ppm)	1.000,00	1,50		85.700,00
Sílica (ppm)	20.000,00	100,00		409.700,00
Vazão (m ³ / mês)		144,00	O p 13 Aplicação I ³ dos Ânions II	144,00
SS (ppm)	5,00	0,00		42,33
STD (ppm)	1.000,00	3,00		46.509,67
Sílica (ppm)	20.000,00	100,00		9.485.833,33
Vazão (m ³ / mês)		192,00	O p 14 Aplicação II ³ dos Ânions II	192,00
SS (ppm)	5,00	0,00		25,00
STD (ppm)	1.000,00	3,00		17.682,00
Sílica (ppm)	20.000,00	100,00		294.600,00
Vazão (m ³ / mês)		240,00	O p 15 Deslocamento ³ dos Ânions I	240,00
SS (ppm)	5,00	0,00		16,67
STD (ppm)	137,00	1,50		6.520,00
Sílica (ppm)	15.000,00	100,00		38.200,00
Vazão (m ³ / mês)		288,00	O p 16 Deslocamento I ³ dos Ânions II	288,00
SS (ppm)	5,00	0,00		19,00
STD (ppm)	100,00	3,00		50.550,00
Sílica (ppm)	15.000,00	100,00		202.625,00
Vazão (m ³ / mês)		200,00	O p 17 Deslocamento II ³ dos Ânions II	200,00
SS (ppm)	0,00	0,00		10,00
STD (ppm)	100,00	100,00		5.600,00
Sílica (ppm)	15.000,00	15.000,00		10.750,00
Vazão (m ³ / mês)		90,00	O p 18 Enxague dos Ânions I e II	90,00
SS (ppm)	0,00	0,00		25,67
STD (ppm)	137,00	118,50		3.495,67
Sílica (ppm)	15.000,00	15.000,00		12.621,67

Obs: I - 1ª Unidade de Desm.
II - 2ª Unidade de Desm.

Figura 4.5: Correntes de efluentes – vasos aniônicos.

Correntes de Efluentes - Vasos de Leito Misto

	Cmáx	Catual	Op19	Cout
Vazão (m³ / mês)		20,33	Contra-lavagem dos Leitos Misto I e II	20,33
SS (ppm)	5,00	0,00		14,83
STD (ppm)	1,50	1,95		1,95
Sílica (ppm)	300,00	100,00		309,17
Vazão (m³ / mês)		17,33	Aplicação ³ dos Leitos Misto I e II	17,33
SS (ppm)	0,00	0,00		31,33
STD (ppm)	1.000,00	2,25		20.377,13
Sílica (ppm)	1.000,00	100,00		56.921,00
Vazão (m³ / mês)		15,17	Deslocamento ³ dos Leitos Misto I e II	15,17
SS (ppm)	0,00	0,00		30,84
STD (ppm)	1,50	2,25		25.550,00
Sílica (ppm)	100,00	100,00		34.711,67
Vazão (m³ / mês)			Rebaixamento dos Leitos Misto I e II	25,00
SS (ppm)				12,00
STD (ppm)				4.155,00
Sílica (ppm)				569,83
Vazão (m³ / mês)		3,33	Enxague dos Leitos Misto I e II	3,33
SS (ppm)	0,00	0,00		16,00
STD (ppm)	1,50	1,95		435,00
Sílica (ppm)	100,00	100,00		385,00

Obs: I - 1ª Unidade de Desm.
II - 2ª Unidade de Desm.

Figura 4.6: Correntes de efluentes – vasos de leito misto.

Capítulo 5

Estudos de casos para um contaminante

O procedimento do Diagrama de Fontes de Água (DFA) foi aplicado para verificar a minimização do consumo de água e, conseqüentemente, da geração de efluentes aquosos oriundos da presença dos três contaminantes analisados: Sílica, Sólidos Suspensos (SS) e Sólidos Totais Dissolvidos (STD). O método foi aplicado para cada contaminante em particular e adiante (Capítulo 6) será feito o mesmo para a situação de múltiplos contaminantes. O algoritmo foi utilizado para a opção de máximo reuso.

Foram gerados diversos cenários para cada contaminante, utilizando o método do DFA, descrito no Capítulo 3, a fim de verificar a redução da utilização de água primária e da geração de efluentes aquosos. Restrições do processo, informadas no projeto por especialistas ou pelos fabricantes das resinas de troca iônica, são aplicadas em todos os cenários.

As operações utilizadas para aplicação do método DFA no desenvolvimento de todos os cenários a seguir, foram escolhidas com a finalidade de concentrar esforços naquelas com maior potencial de minimização de efluentes aquosos, desconsiderando, assim, as operações que geram menos de 20 m³/mês de efluente. Também foram eliminadas as operações em que não ocorre a transferência de massa do contaminante avaliado do processo para a corrente de água, ou seja, as operações em que a contaminação não aumenta. As operações 2, 11 e 22 são consideradas fontes internas de água, visto que são operações de remoção de cátions e ânions e não utilizam água primária.

Visando obter dados mais próximos da realidade de operação da Desmin, nos cenários de cada contaminante analisado, serão feitas as seguintes alterações nos dados obtidos pelo DFA:

- Na vazão de água primária será acrescentado um valor fixo, correspondente à vazão de todas as operações da Desmin que não foram utilizadas para gerar o respectivo DFA, visto que estas operações também consomem água primária. Só não entrará a vazão das operações 2, 11 e 22, pois estas não consomem água primária.

- Na vazão de efluente a ser tratado será acrescentado, além do valor fixo citado acima, o valor correspondente à vazão das operações 2, 11 e 22 (visto que também geram efluentes), que não tenha sido utilizada no respectivo DFA.

O Cenário 1 de cada contaminante apresenta a condição atual de operação da UTA, onde não é feito nenhum reúso. Os demais cenários foram gerados utilizando as concentrações máximas de entrada e de saída das operações, visto que assim será obtido o máximo reúso de água (conforme exposto no Capítulo 3).

Com posse das concentrações máximas de entrada das operações, as concentrações máximas de saída foram calculadas através da premissa de que a carga mássica transferida (Δm) é constante. Para isso foi utilizada a Equação 5.1.

$$C_{s,Max} = C_{e,Max} + \Delta m / (f * 10^n) \quad \text{(Eq. 5.1)}$$

Onde:

$C_{s,Max}$ → Concentração máxima de saída [ppb]

$C_{e,Max}$ → Concentração máxima de entrada [ppb]

Δm → Carga mássica transferida [kg/mês]

f → Vazão volumétrica [$m^3/mês$]

$n = 6$ para o contaminante Sílica

$n = 3$ para os contaminantes SS e STD

São quatro as restrições a reúso existentes no processo e independem do contaminante escolhido:

1. Vazões fixas, em função da necessidade de um tempo mínimo de contato entre o fluido regenerante e o de processo (R1).
2. Concentrações máximas de entrada, ou seja, qual seria o máximo admissível de contaminação na entrada de cada operação, mantendo a segurança do processo e a qualidade do produto final.
3. O efluente das operações de aplicação de regenerante nas resinas catiônicas não pode ser reusado na entrada da operação de aplicação de regenerante nas resinas aniônicas e vice-versa, para evitar a neutralização prévia do excesso de regenerante necessário nestas operações.
4. O efluente da aplicação de regenerante nas resinas catiônicas não pode ser reusado nas operações de aplicação dos Cátions I nem na aplicação I dos Cátions II, para evitar a precipitação de sulfato de cálcio na resina, o que comprometeria o desempenho da mesma.

Ao final do capítulo todos os resultados dos estudos de casos serão apresentados em um quadro, de forma a facilitar a visualização dos mesmos.

5.1 Estudo de caso para o contaminante Sílica

5.1.1 Cenário 1:

No Quadro 5.1 é apresentada a condição geral das operações com suas respectivas concentrações atuais de operação para o contaminante Sílica na Unidade de Tratamento de Água (UTA).

Operação	Vazão limite (m ³ /mês)	C _e (ppb)	C _s (ppb)	Δm (kg/mês)	Descrição da operação
19	20,33	100	309,17	0,004	Contra-lavagem dos Leitos Misto I e II
15	240	100	38.200,00	9,14	Deslocamento dos Ânions I
16	288	100	202.625,00	58,33	Deslocamento I dos Ânions II
14	192	100	294.600,00	56,54	Aplicação II dos Ânions II
12	240	100	409.700,00	98,30	Aplicação dos Ânions I
13	144	100	9.485.833,33	1365,95	Aplicação I dos Ânions II

Quadro 5.1: Dados operacionais atuais para Sílica.

Para a geração dos cenários pelo DFA, foram consideradas tanto fontes externas quanto internas, conforme Quadro 5.2. As fontes internas são operações da própria Desmin disponíveis para reuso.

Operação	Vazão limite (m ³ /mês)	C _e Máx (ppb)	Fonte	Descrição da operação
2	100	15.000,00	Interna	Remoção dos Cátions I
11	100	11.466,67	Interna	Remoção dos Ânions I
22	25	569,83	Interna	Remoção dos Leitos Misto I e II
Água Filtrada	"infinita"	15.000,00	Externa	Água filtrada
Água Subterrânea	"infinita"	16.350,00	Externa	Água subterrânea
Água de Lavagem	"infinita"	100,00	Externa	Água de Lavagem dos Filtros

Quadro 5.2: Fontes externas e internas e suas respectivas concentrações de Sílica.

Aplicando-se o procedimento algorítmico descrito no Capítulo 3, foi obtido o DFA para as condições atuais de operação da Desmin, ilustrado na Figura 5.1.

Intervalo		1	2	3	4	5	6						
Conc. (ppb)		100,000	309,170	38200,000	202625,000	294600,000	409700,000	9485833,330					
Vazão (m ³ /mês)													
20,33	OP 19	20,33	4,25										
240,00	OP 15	240,00	50,20	240,00	9093,80								
288,00	OP 16	288,00	60,24	288,00	10912,56	288,00	47354,40						
144,00	OP 13	144,00	30,12	144,00	5456,28	144,00	23677,20	144,00	13244,40	144,00	16574,40	144,00	1306963,20
192,00	OP 14	192,00	40,16	192,00	7275,04	192,00	31569,60	192,00	17659,20				
240,00	OP 12	240,00	50,20	240,00	9093,80	240,00	39462,00	240,00	22074,00	240,00	27624,00		
m ³ /mês		1124,33	1104,00	864,00	576,00	384,00	144,00						

Figura 5.1: DFA para o cenário 1 do contaminante Sílica.

Verifica-se no DFA dos dados atuais de contaminação para Sílica (Figura 5.1), que não há nenhum tipo de reúso de correntes dentro da Desmin. Nesta configuração, o consumo de Água de Lavagem, com 100 ppb de Sílica, é de 4216,1 m³/mês e a carga de efluente a ser tratada é de 4441,1 m³/mês. Este cenário é ilustrado na Figura 5.2.

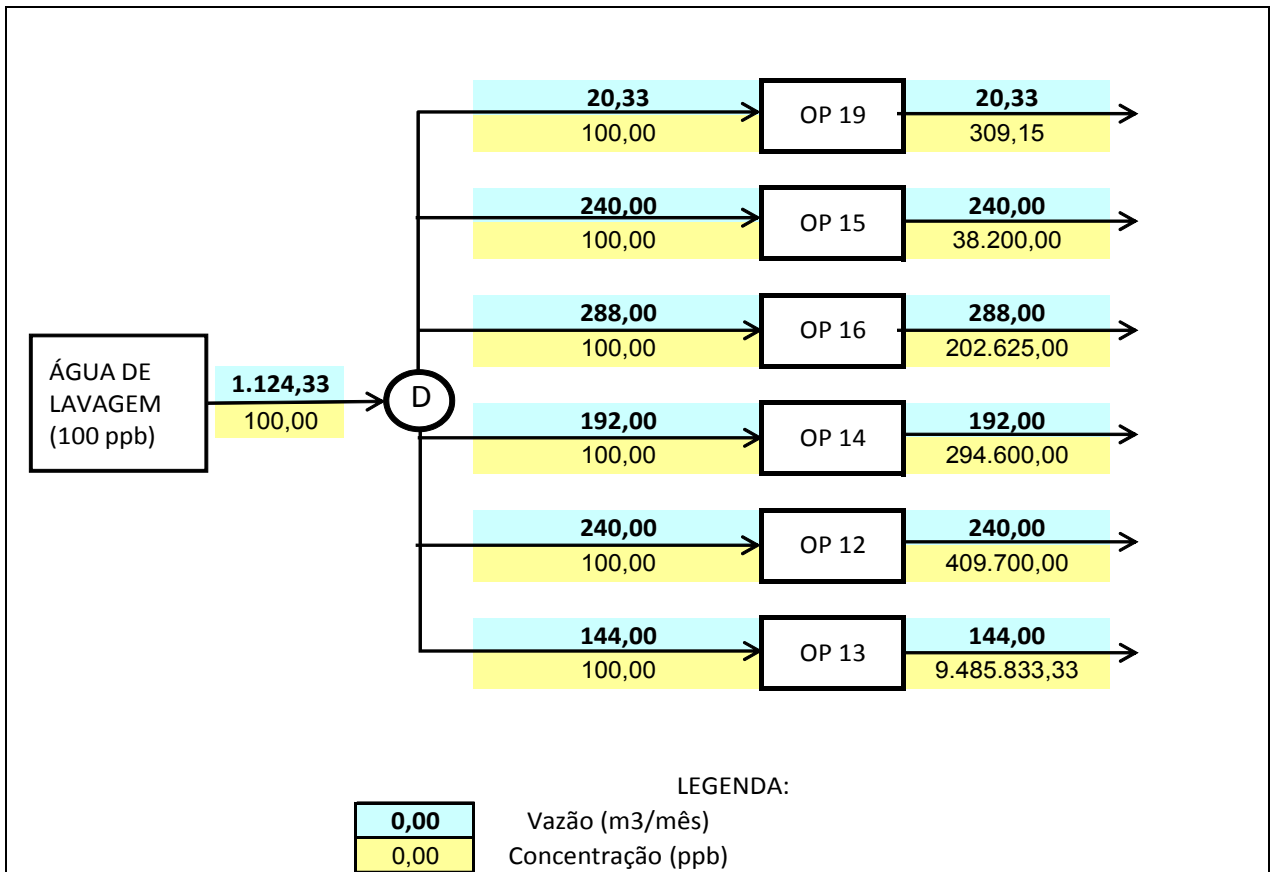


Figura 5.2: RTM para o cenário 1 do contaminante Sílica.

Na Quadro 5.3 é apresentada a condição geral das operações com suas concentrações máximas de entrada e de saída das operações para o contaminante Sílica na UTA.

Operação	Vazão limite (m ³ /mês)	C _e Máx (ppb)	C _s Máx (ppb)	Δm (Kg/mês)
19	20,33	300,00	509,17	0,004
15	240	15.000,00	53.100,00	9,14
16	288	15.000,00	217.525,00	58,33
14	192	20.000,00	314.500,00	56,54
12	240	20.000,00	429.600,00	98,30
13	144	20.000,00	9.505.733,33	1365,95

Quadro 5.3: Concentrações máximas para Sílica permitidas nas operações.

Aplicando o DFA e valendo-se das restrições e das fontes de água, foi possível construir cenários diferentes com suas respectivas peculiaridades:

5.1.2 Cenário 2:

Este cenário foi construído considerando as fontes Água de Lavagem e Água Filtrada. Neste caso, o consumo de Água de Lavagem e de Água Filtrada foi de 3112,1 e 1104 m³/mês, respectivamente. Na operação 19, pelos cálculos do DFA, Figura 5.3, deveriam ser gastos 10,39 m³/mês, no entanto, foram gastos 20,33 m³/mês em função da restrição geral número 1. Para o consumo total de água, não houve uma redução em relação às condições atuais de operação da UTA. Já para o efluente gerado, a redução foi de 0,46% em comparação com as condições atuais de geração. Isto se deve ao fato de todo o efluente gerado pela operação 19 ter sido reutilizado na Unidade de Clarificação da UTA. A nova RTM proposta é mostrada na Figura 5.4.

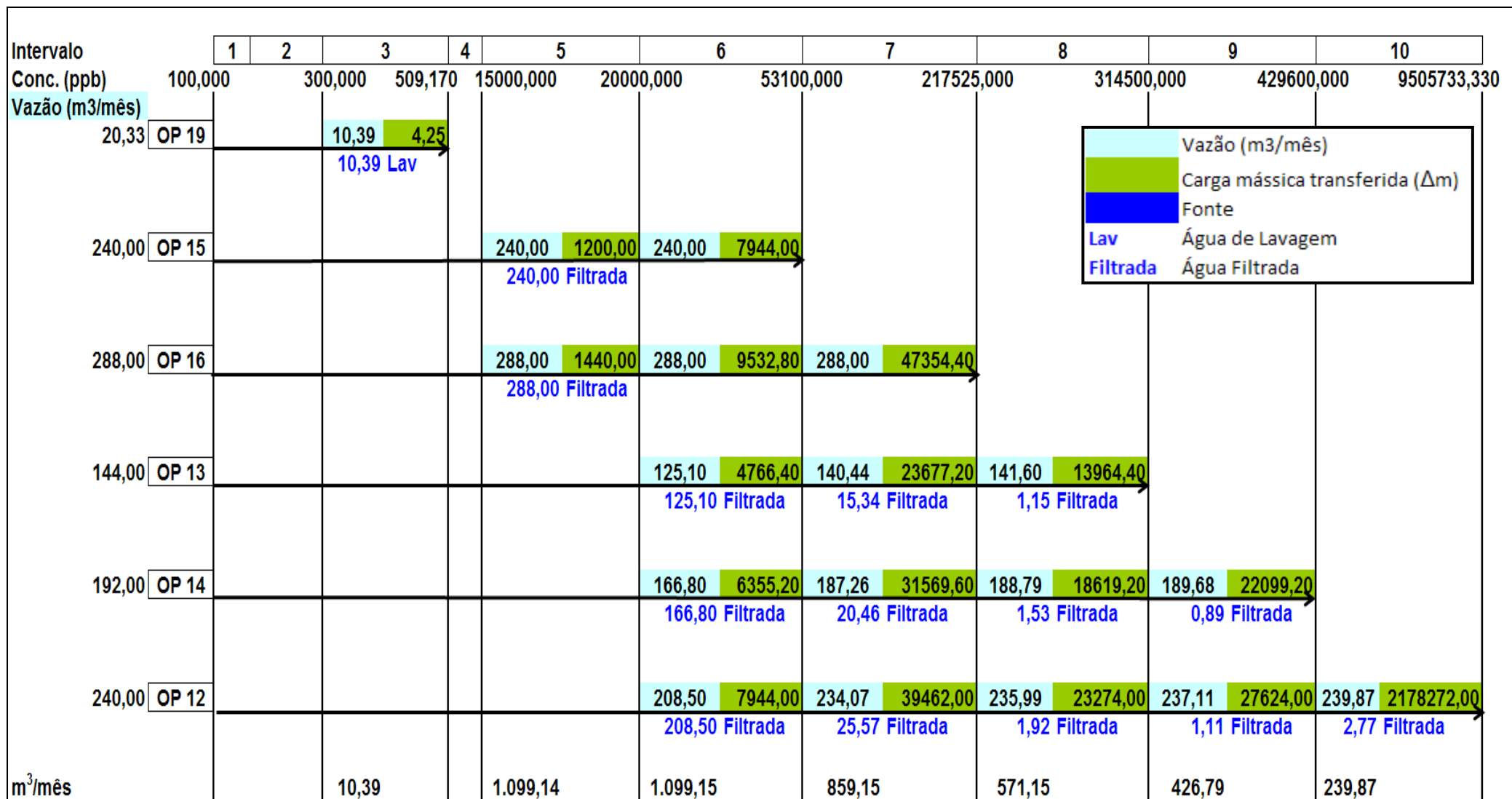


Figura 5.3: DFA para o cenário 2 do contaminante Sílica.

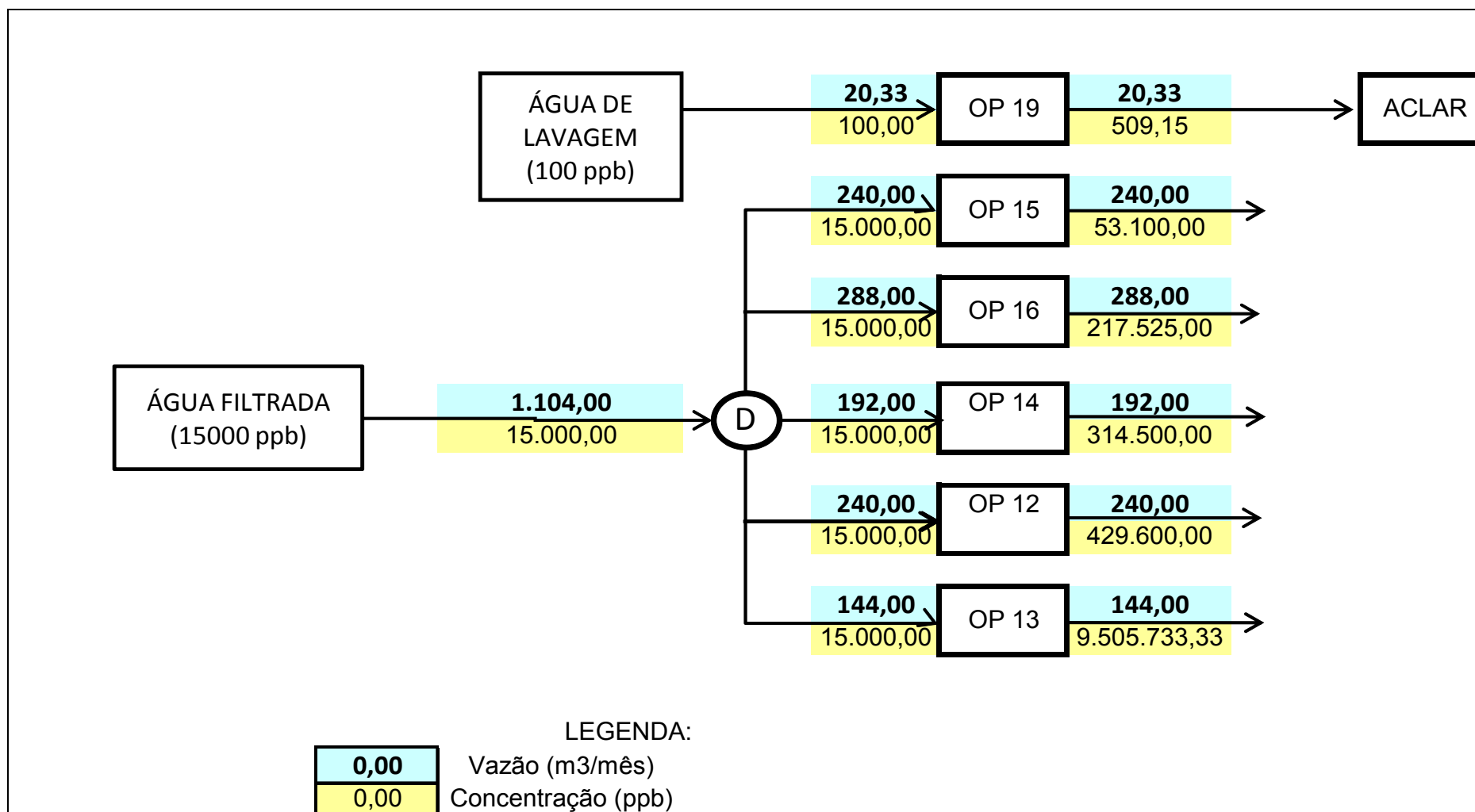


Figura 5.4: RTM para o cenário 2 do contaminante Sílica.

5.1.3 Cenário 3:

Este cenário foi construído considerando as fontes Água de Lavagem e Água Subterrânea. Neste caso, o consumo de Água de Lavagem e de Água Subterrânea foi de 3152,1 e 1064 m³/mês, respectivamente. Para o consumo total de água, não ocorreu redução em relação às condições atuais de operação da UTA. Entretanto, o cenário 3 utilizou mais Água de Lavagem do que o cenário 2, ou seja, consumiu mais de uma fonte que, teoricamente, possui um custo zero de aquisição. Em relação ao efluente, ocorreu a mesma melhoria apresentada no cenário 2, ou seja, redução de 0,46%. A restrição da vazão fixa (R1) foi usada na operação 19, sendo o DFA mostrado na Figura 5.5. A nova RTM proposta (Figura 5.6) integrou essa operação com a Unidade de Clarificação.

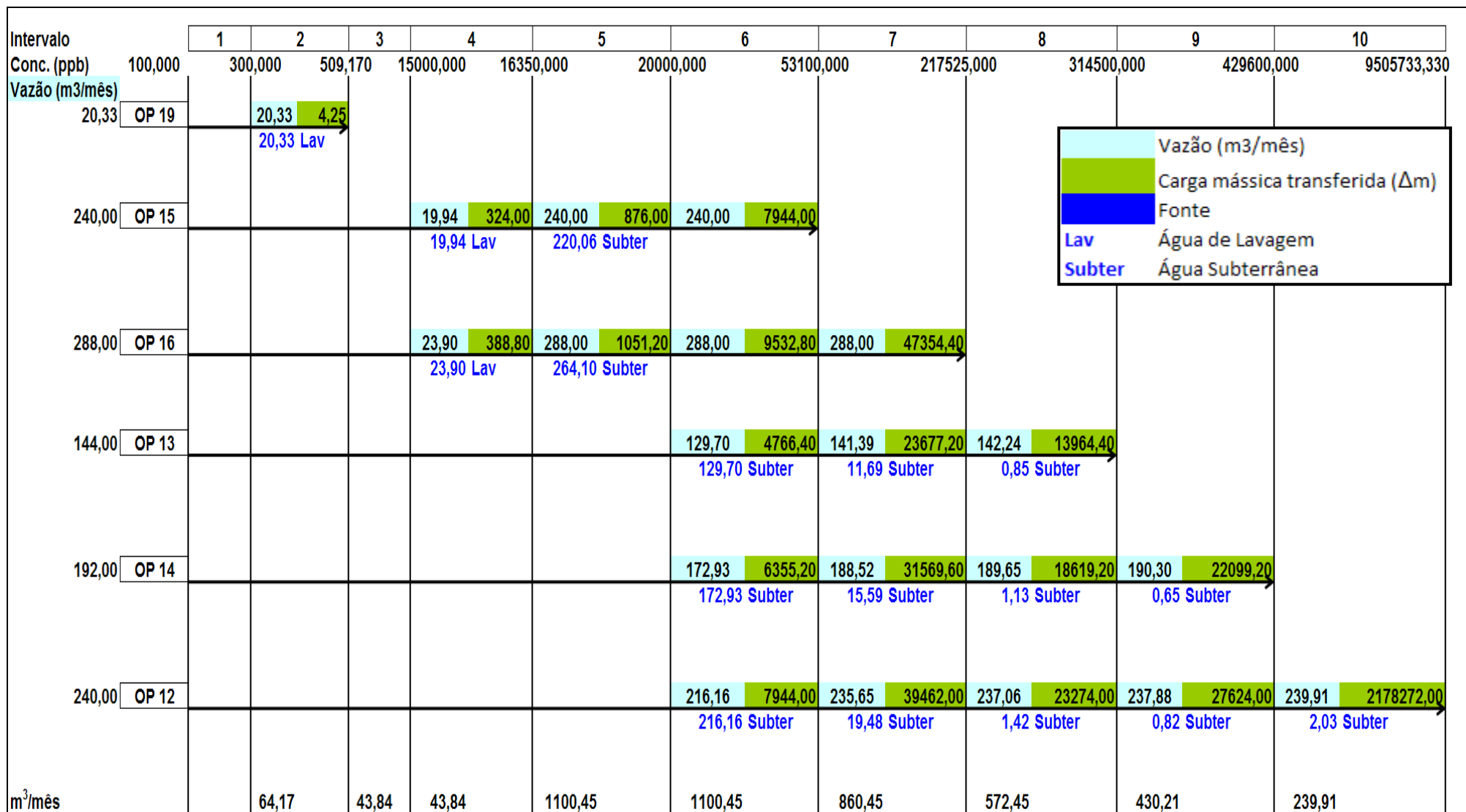


Figura 5.5: DFA para o cenário 3 do contaminante Sílica.

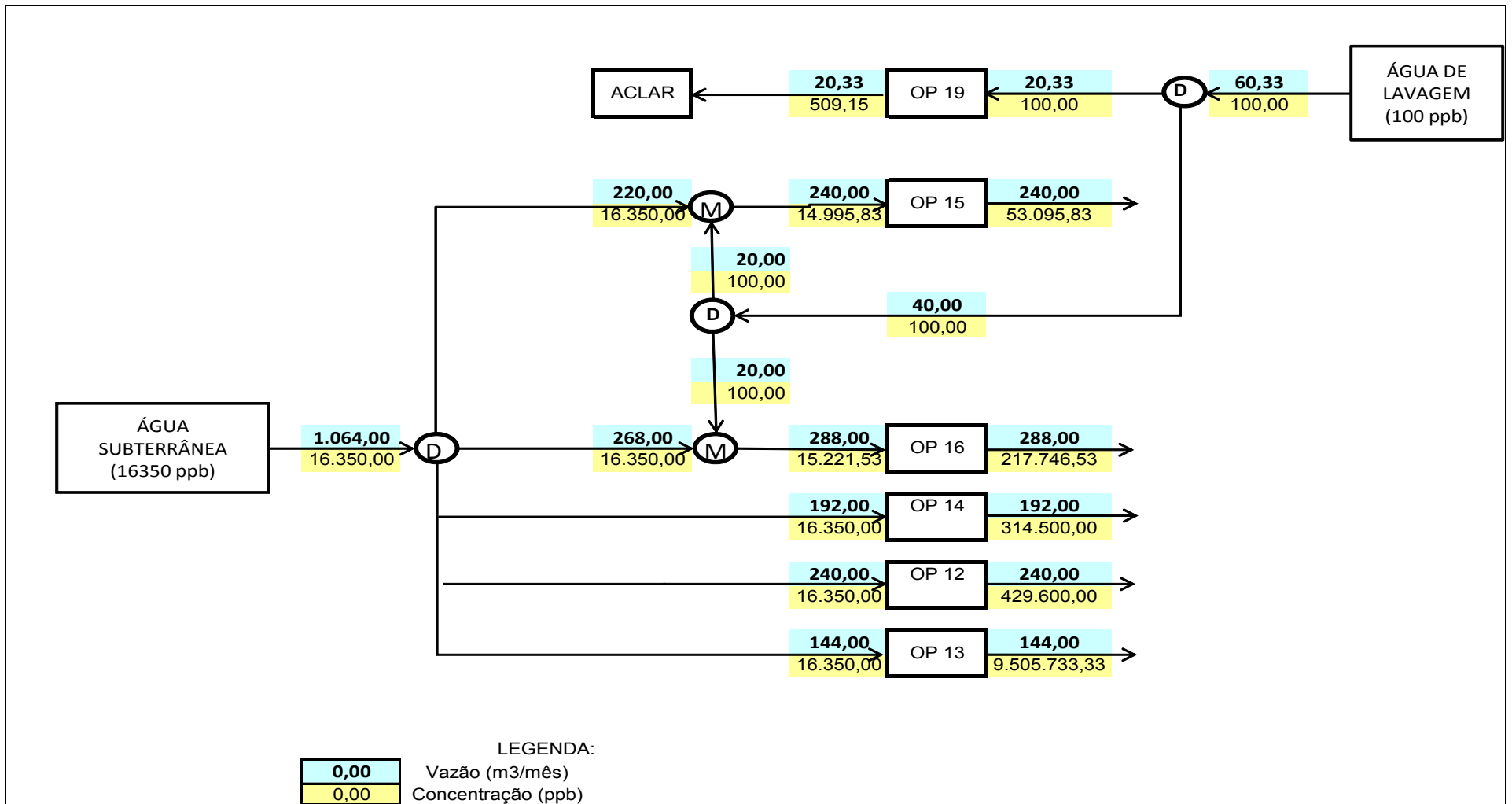


Figura 5.6: RTM para o cenário 3 do contaminante Sílica.

5.1.4 Cenário 4:

Este cenário foi construído considerando as fontes externas Água de Lavagem e Água Subterrânea, e as fontes internas OP11 e OP2. Neste caso, o consumo de Água de Lavagem, de Água Subterrânea e das operações 11, 2 e 19 foi de 3112,1; 921,8; 66,35; 100 e 20,33 m³/mês, respectivamente. Para o consumo total de água houve uma redução de 4,32% em relação à condição atual de consumo da UTA. E para a geração de efluentes houve uma redução de 4,20% em relação ao cenário atual de operação. Ficou claro, até o momento, que este é o cenário com maior redução em relação às condições atuais de operação da UTA. Além disso, o cenário também apresenta um baixo consumo de água subterrânea e isso implicará, diretamente, numa redução do custo de captação desta água. Soma-se a esta vantagem a redução da realização de estudos hidrogeológicos, com a finalidade de monitorar os aspectos qualitativos e quantitativos do aquífero, visto que a água subterrânea pode não ser tão abundante quando se contabiliza a contaminação do solo. Esta redução aparente de custos está fundada no reuso do efluente gerado pelas operações 2, 11 e 19. A restrição da vazão fixa (R1) foi usada na operação 19 e o DFA é mostrado na Figura 5.7. A nova RTM proposta (Figura 5.8) integrou a fração não reutilizada dessa operação com a Unidade de Clarificação.

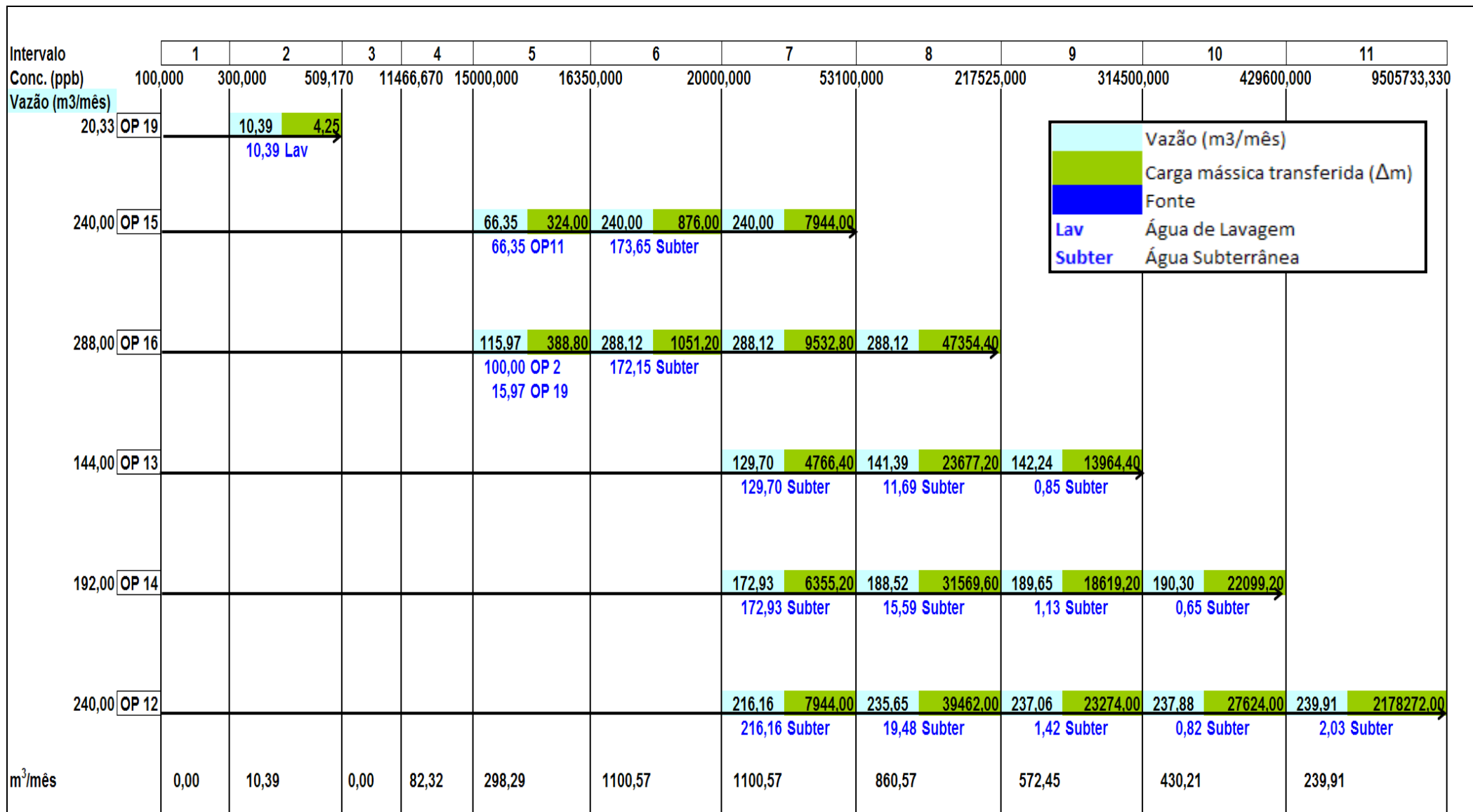


Figura 5.7: DFA para o cenário 4 do contaminante Sílica.

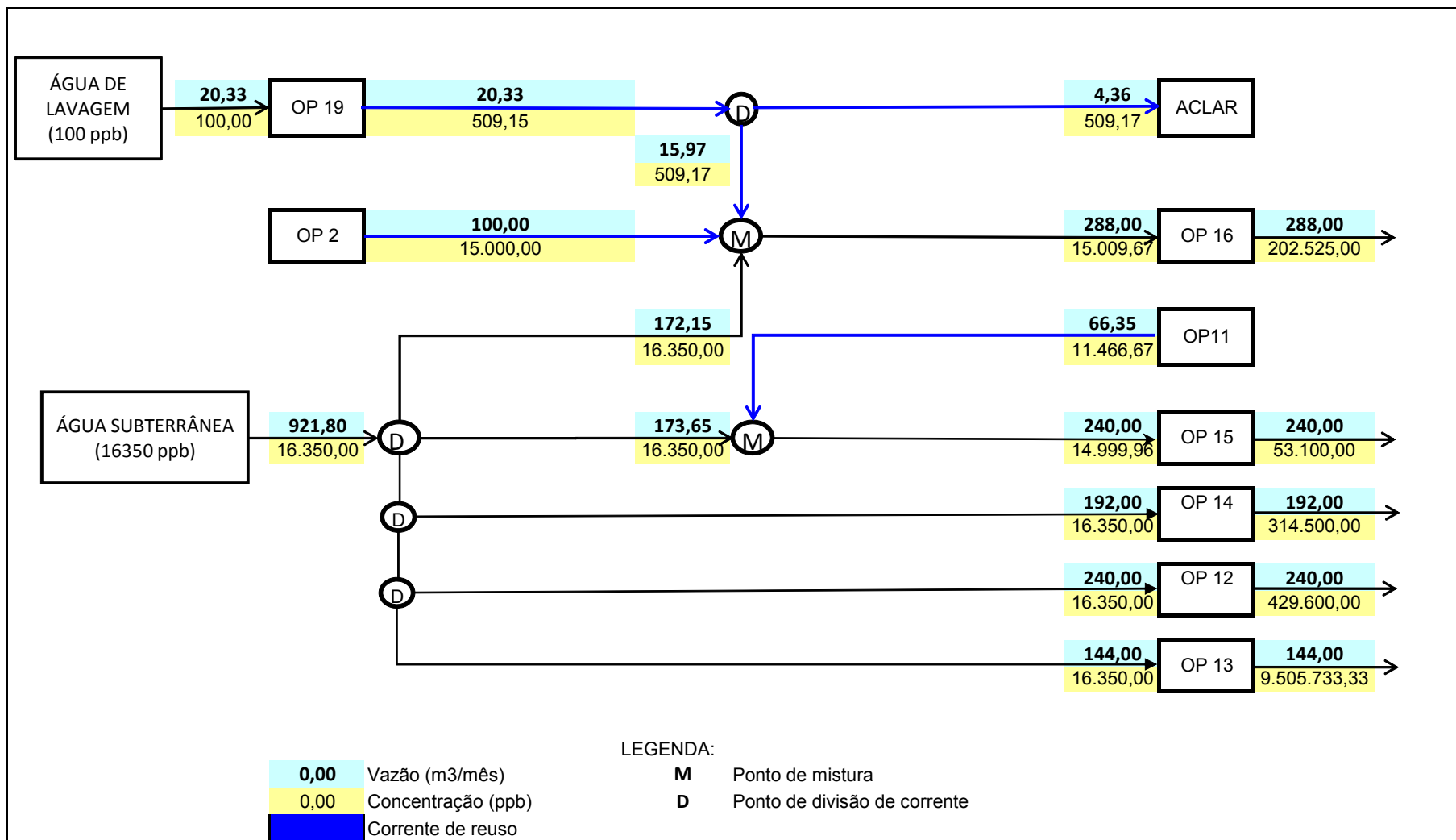


Figura 5.8: RTM para o cenário 4 do contaminante Sílica.

5.1.5 Cenário 5:

Este cenário foi construído considerando as fontes externas Água de Lavagem e Água Subterrânea e as fontes internas OP11 e OP22. Neste caso, o consumo de Água de Lavagem, de Água Subterrânea, das operações 11, 22, 19 e 15 foi de 3112,2; 888,41, 100; 24,64; 20,45 e 240 m³/mês, respectivamente. Ocorreu uma redução no consumo total de água primária de 5,11% em relação às condições atuais de consumo da UTA. Este é o cenário onde não há gasto com água filtrada, e isso implicará, diretamente, numa redução do custo de obtenção desta água. Esta redução aparente de custos está fundada no reúso do efluente gerado pelas operações 22, 11, 19 e 15 e da opção de utilização da água subterrânea, que apresenta um custo de captação, teoricamente, menor do que o da água filtrada. Em virtude do reúso, a geração de efluente também é reduzida em 8,67%. A restrição da vazão fixa (R1) foi usada na operação 19 e o DFA é mostrado na Figura 5.9. A nova RTM proposta (Figura 5.10) não integrou essa operação com a Unidade de Clarificação, visto que foi toda reutilizada.

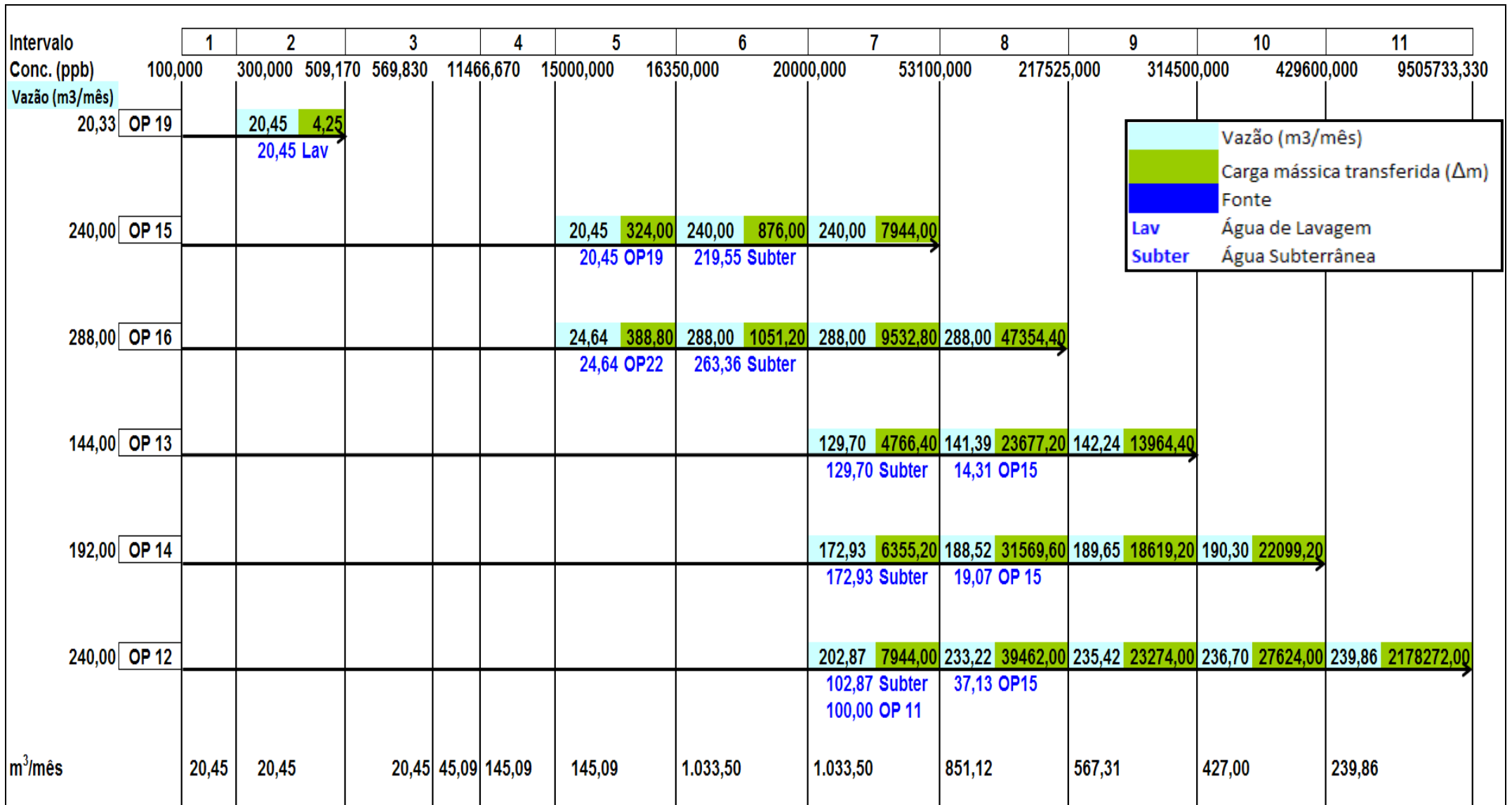


Figura 5.9: DFA para o cenário 5 do contaminante Sílica.

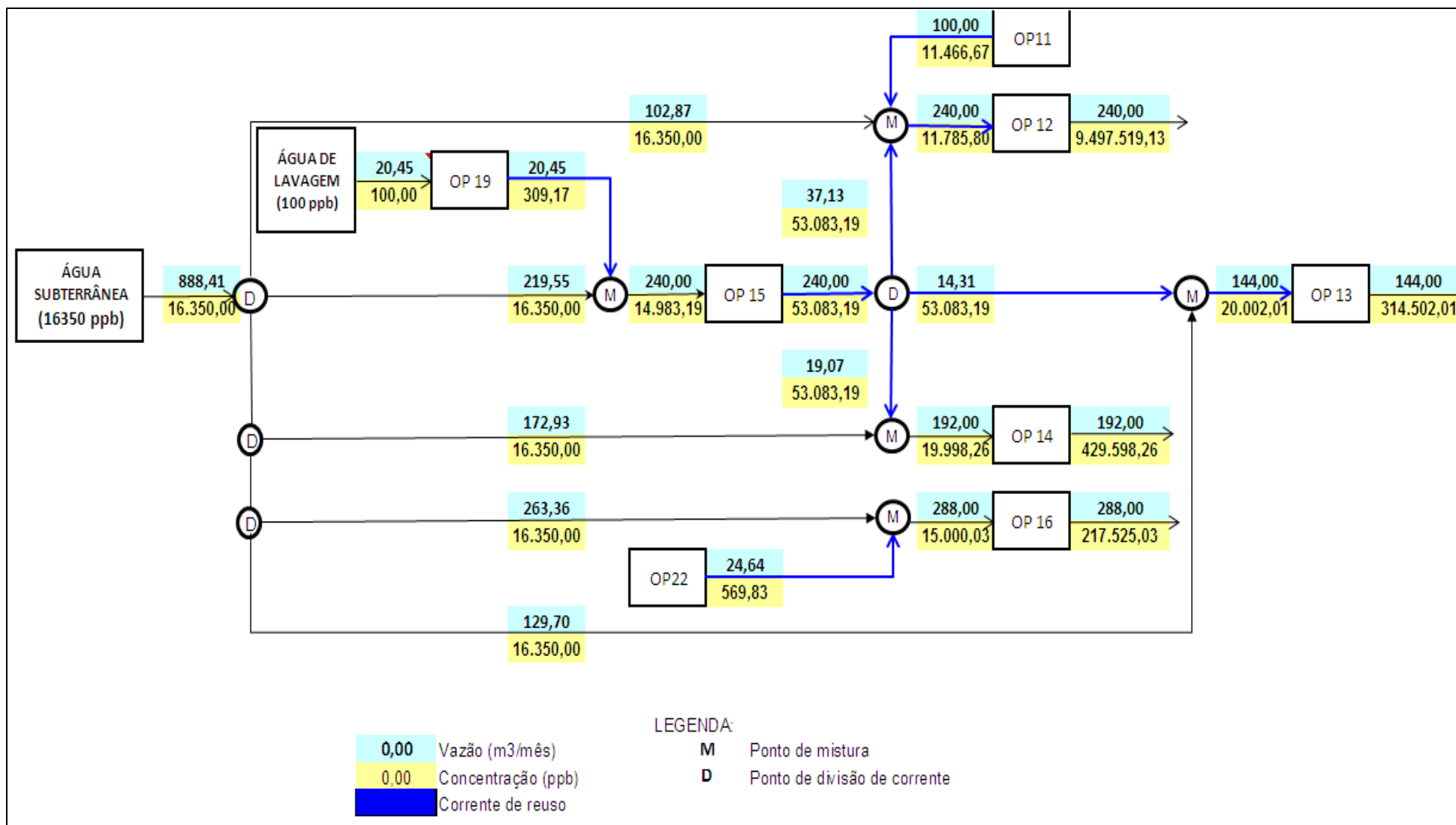


Figura 5.10: RTM para o cenário 5 do contaminante Sílica.

5.1.6 Cenário 6:

Este cenário foi construído com a fonte externa Água de Lavagem e as fontes internas OP 2, OP11e OP22. Neste caso, o consumo de Água de Lavagem, das operações 2, 11, 22, 19 e 15 foi de 3728,94; 100; 100; 25; 20,33 e 240 m³/mês, respectivamente. Este cenário é o que apresenta o melhor resultado em relação ao consumo e ao custo. Toda a água necessária para as operações é oriunda de reúso, seja ele externo à Desmin (como é o caso da Água de Lavagem) ou interno (como é o caso das operações 2,11,19,15 e 22). Ademais, é o cenário onde não há consumo de Água Filtrada nem de Água Subterrânea e isso implicará, diretamente, numa redução do custo de obtenção destas águas. Com isso, será possível restringir estas a finalidades nobres (como uso potável, geração de vapor e torres de refrigeração, por exemplo). Para o consumo de água houve uma redução de 11,55% em relação ao cenário atual de operação da UTA. Já para a geração de efluentes, ocorreu uma redução de 10,93% em relação ao cenário atual de operação. A restrição da vazão fixa (R1) foi usada na operação 19 e o DFA é mostrado na Figura 5.11. A nova RTM proposta (Figura 5.12) não integrou essa operação com a Unidade de Clarificação, visto que foi toda reutilizada.

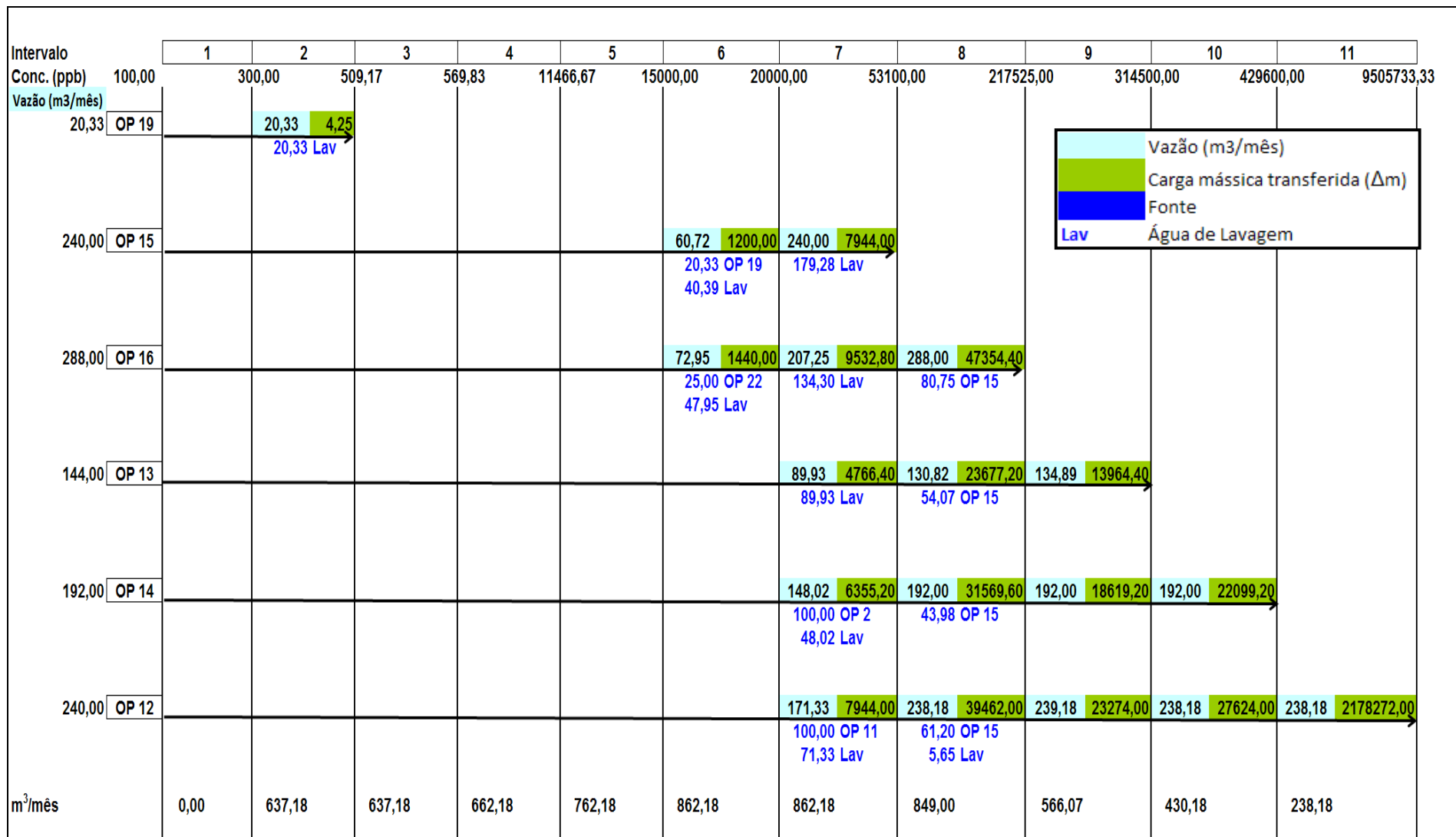


Figura 5.11: DFA para o cenário 6 do contaminante Sílica.

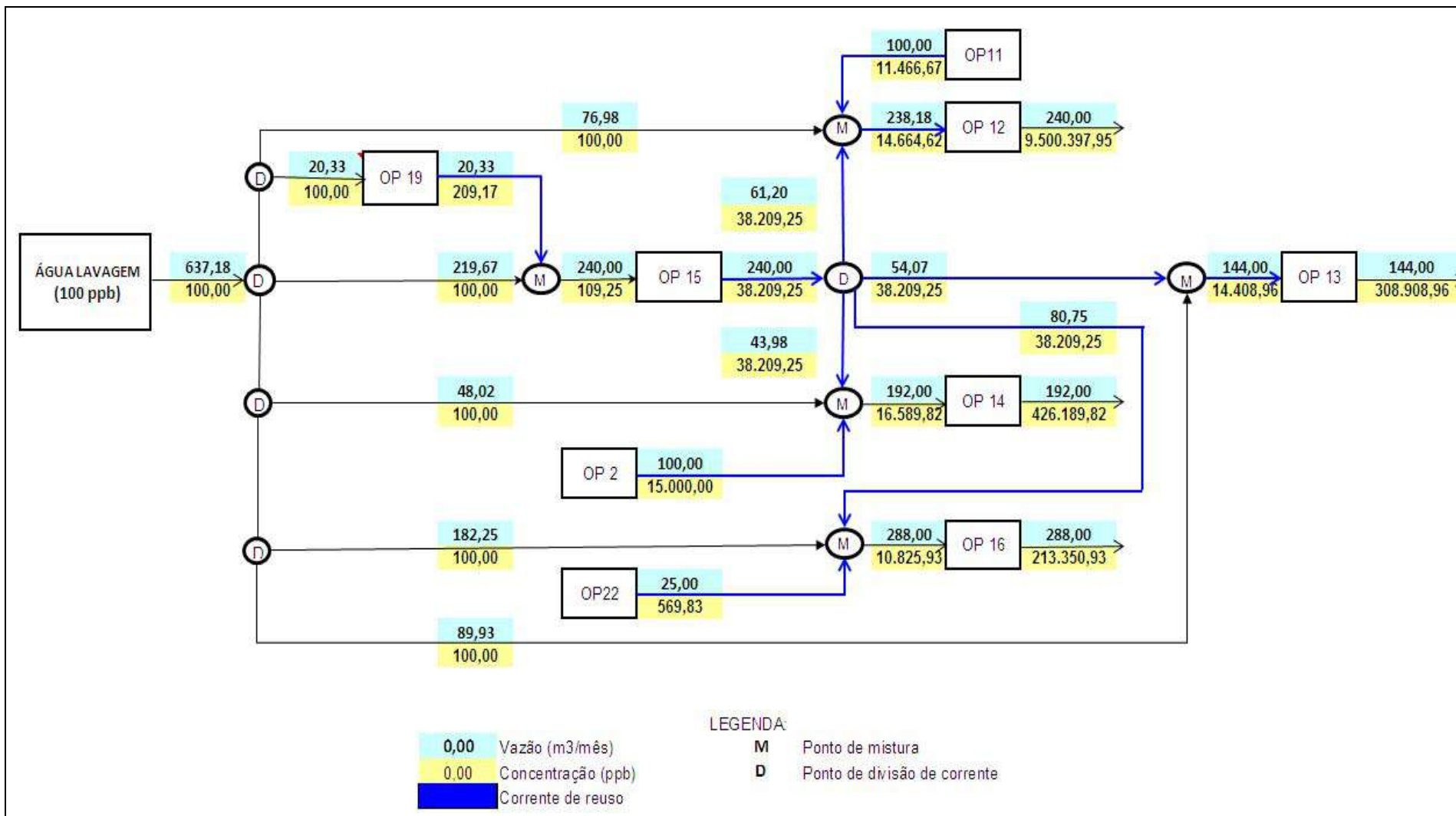


Figura 5.12: RTM para o cenário 6 do contaminante Sílica.

Conforme analisado, todos os cenários gerados para o contaminante Sílica apresentaram um comportamento próprio em termos dos resultados e custos. As melhorias obtidas são convertidas em redução dos custos de operação da Unidade de Desmin. A redução do consumo tanto de água subterrânea quanto de água filtrada constituiu uma enorme economia para a operação. Isto por que, pensando em toda a UTA, a Água de Lavagem já representa um reúso, por se tratar de um efluente da Unidade de Filtração e por ser a que apresenta custo zero de obtenção. O incentivo ao seu consumo também está calcado no fato de poupar os sistemas de Clarificação e Filtração da UTA, o que se reflete na redução de custos destas. A Água Subterrânea, por apresentar uma excelente qualidade, poderá ser poupada e utilizada para fins mais nobres, como água potável ou para os sistemas de refrigeração e caldeiras.

A principal resistência quanto à implantação do DFA está baseada na reestruturação das unidades (se estas já existem) ou numa maior complexidade em virtude do aumento da quantidade de tubulações e interligações. No entanto, isto não torna a operação impraticável. Unidades muito mais complexas funcionam com alta eficiência como é o caso, por exemplo, de plataformas de petróleo e refinarias. Atualmente, para se reduzir os custos de instalação e produção, as plantas químicas modernas estão se tornando cada vez mais complexas, integradas e automatizadas, com muitas correntes de reciclo, causando um aumento nas interações entre as subunidades.

5.2 Estudo de caso para o contaminante Sólidos Totais Dissolvidos

No Quadro 5.4 são apresentadas as fontes externas e internas utilizadas nos cenários e suas respectivas concentrações de Sólidos Totais Dissolvidos (STD). Em cada cenário é deixado claro se e qual fonte foi utilizada.

Operação	Vazão limite (m ³ /mês)	C _s Máx (ppm)	Fonte	Descrição da operação
2	100	155,33	Interna	Remoção dos Cátions I
11	100	14,33	Interna	Remoção dos Ânions I
22	25	4155,00	Interna	Remoção dos Leitos Misto I e II
Água de Lavagem	"infinita"	1,00	Externa	Água de lavagem
Água Filtrada	"infinita"	40,00	Externa	Água filtrada

Quadro 5.4: Fontes externas e internas e suas respectivas concentrações de STD.

A vazão das operações que não foram utilizadas para gerar os DFAs é fixa e vale 100,67 m³/mês.

5.2.1 Cenário 1:

O Quadro 5.5 apresenta a atual condição das operações da UTA, com suas concentrações e informações gerais.

Este cenário foi construído com as concentrações atuais de operação (Quadro 5.5) e com a fonte primária água de lavagem. Ele representa o cenário atual de operação da UTA, onde não é feito nenhum reuso de água. O DFA foi gerado para o contaminante STD, Figura 5.13 e 5.14, de acordo com a metodologia descrita anteriormente (Capítulo 3). Em seguida foi construída a respectiva RTM, Figura 5.15.

Neste cenário o consumo de água primária (1 ppm de STD) é de 4216,10 m³/mês e a carga de efluente a ser tratada é 4441,10 m³/mês.

Operação	Vazão limite (m ³ /mês)	C _e (ppm)	C _s (ppm)	Δm (kg/h)	Descrição da operação
15	240,00	1,00	6520,00	1564,56	Deslocamento dos Ânions I
12	240,00	1,00	85700,00	20567,76	Aplicação dos Ânions I
14	192,00	3,00	17682,00	3394,37	Aplicação II dos Ânions II
13	144,00	3,00	46509,67	6696,96	Aplicação I dos Ânions II
16	288,00	3,00	50550,00	14557,54	Deslocamento I dos Ânions II
7	856,67	46,00	4176,50	3538,48	Enxágue dos Cátions I e II
1	91,43	71,25	112,50	3,77	Contra-lavagem dos Cátions I e II
17	200,00	100,00	5600,00	1100	Deslocamento II dos Ânions II
4	213,33	100,00	20156,67	4278,69	Aplicação I dos Cátions II
5	240,00	100,00	56133,33	13448	Aplicação II dos Cátions II
18	90,00	118,50	3495,67	303,95	Enxágue dos Ânions I e II
6	820,00	120,00	65260,00	53414,8	Deslocamento dos Cátions I e II
3	500,00	140,00	62385,33	31122,67	Aplicação dos Cátions I

Quadro 5.5: Dados operacionais atuais para o contaminante STD.

0,00	Vazão (m3/mês)
0,00	Carga mássica transferida (Δm)

Intervalo		1	2	3	4	5	6	7	8	9									
Conc. (ppm)		1,00	3,00	46,00	71,25	100,00	112,50	118,50	120,00	140,00	3495,67								
Vazão (m3/mês)																			
240,00	OP 15	240,00	0,48	240,00	10,32	240,00	6,06	240,00	6,90	240,00	3,00	240,00	1,44	240,00	0,36	240,00	4,80	240,00	805,36
240,00	OP 12	240,00	0,48	240,00	10,32	240,00	6,06	240,00	6,90	240,00	3,00	240,00	1,44	240,00	0,36	240,00	4,80	240,00	805,36
192,00	OP 14		183,47	8,26	186,53	4,85	188,12	5,52	188,56	2,40	188,73	1,15	188,77	0,29	189,24	3,84	191,89	644,29	
			183,47	Lav	3,07	Lav	1,59	Lav	0,43	Lav	0,18	Lav	0,04	Lav	0,46	Lav	2,65	Lav	
144,00	OP 13		137,60	6,19	139,90	3,64	141,09	4,14	141,42	1,80	141,55	0,86	141,58	0,22	141,93	2,88	143,92	483,22	
			137,60	Lav	2,30	Lav	1,19	Lav	0,33	Lav	0,13	Lav	0,03	Lav	0,35	Lav	1,99	Lav	
288,00	OP 16		275,20	12,38	279,80	7,27	282,18	8,28	282,83	3,60	283,10	1,73	283,16	0,43	283,86	5,76	287,84	966,43	
			275,20	Lav	4,60	Lav	2,38	Lav	0,65	Lav	0,26	Lav	0,06	Lav	0,70	Lav	3,98	Lav	
856,67	OP 7			307,91	21,63	467,27	24,63	510,93	10,71	528,58	5,14	532,72	1,29	579,33	17,13	845,64	2874,70		
				307,91	Lav	159,36	Lav	43,65	Lav	17,65	Lav	4,14	Lav	46,61	Lav	266,31	Lav		
91,43	OP 1				26,55	2,63	91,43	1,14	91,43	1,14									
					26,55	Lav	64,88	Lav	64,88	Lav									
200,00	OP 17					22,42	2,50	31,49	1,20	33,61	0,30	57,55	4,00	194,33	671,13				
						22,42	Lav	9,07	Lav	2,12	Lav	23,94	Lav	136,78	Lav				
213,33	OP 4					23,92	2,67	33,59	1,28	35,85	0,32	61,39	4,27	207,29	715,87				
						23,92	Lav	9,67	Lav	2,27	Lav	25,54	Lav	145,90	Lav				
240,00	OP 5					26,91	3,00	37,79	1,44	40,34	0,36	69,06	4,80	233,20	805,36				
						26,91	Lav	10,88	Lav	2,55	Lav	28,73	Lav	164,14	Lav				
90,00	OP 18									1,13	0,14	13,92	1,80	90,00	302,01				
										1,13	Lav	12,79	Lav	76,08	Lav				
820,00	OP 6											117,99	16,40	792,08	2751,65				
												117,99	Lav	674,09	Lav				
500,00	OP 3													480,11	1677,84				
														480,11	Lav				
		4115,43	4115,43	4115,43	4115,43	4115,43	4124,00	4124,00	4124,00	4124,00	4124,00								

Figura 5.13: DFA para o cenário 1 do contaminante STD (parte A).

0,00	Vazão (m3/mês)
0,00	Carga mássica transferida (Δm)

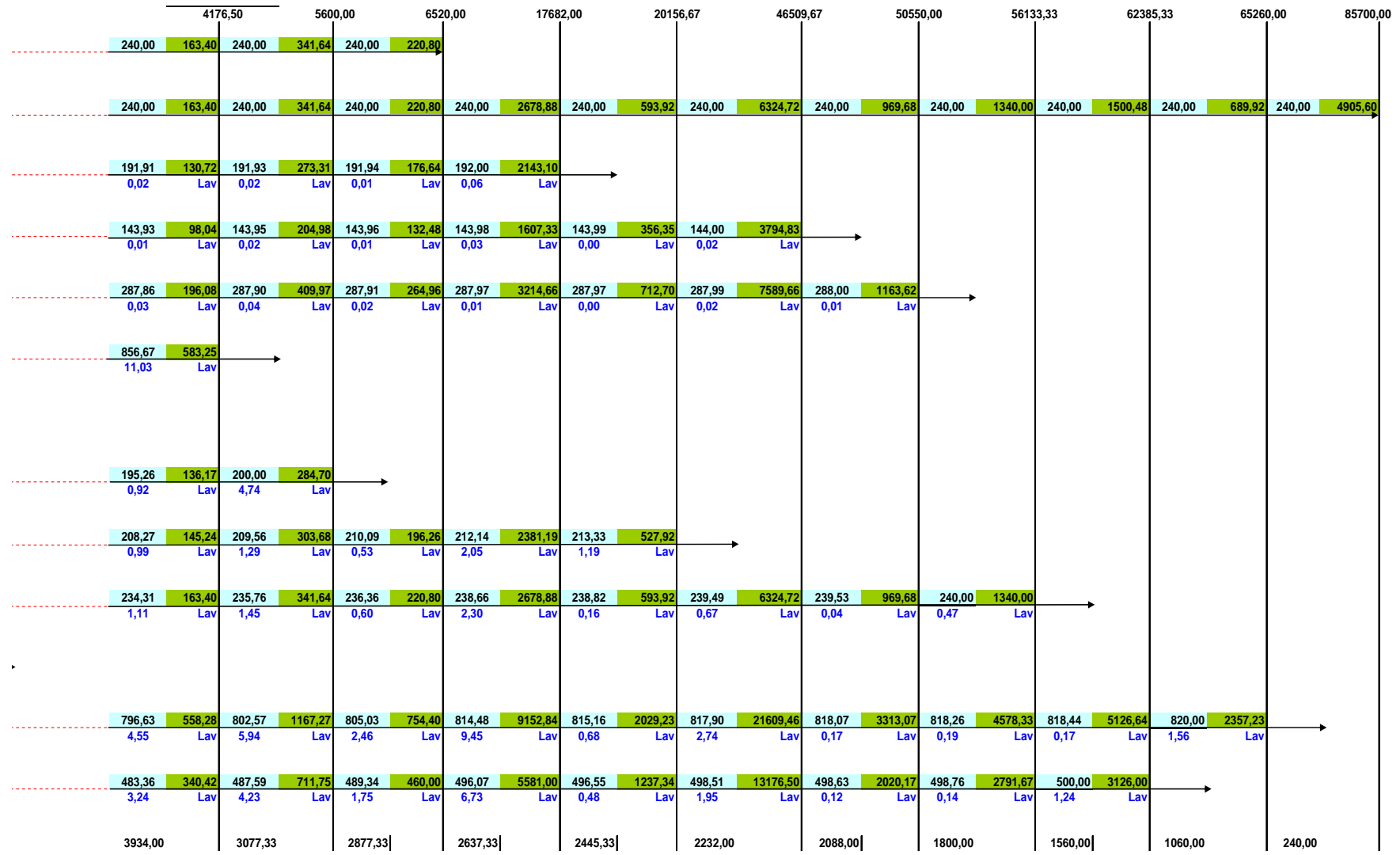


Figura 5.14: DFA para o cenário 1 do contaminante STD (parte B).

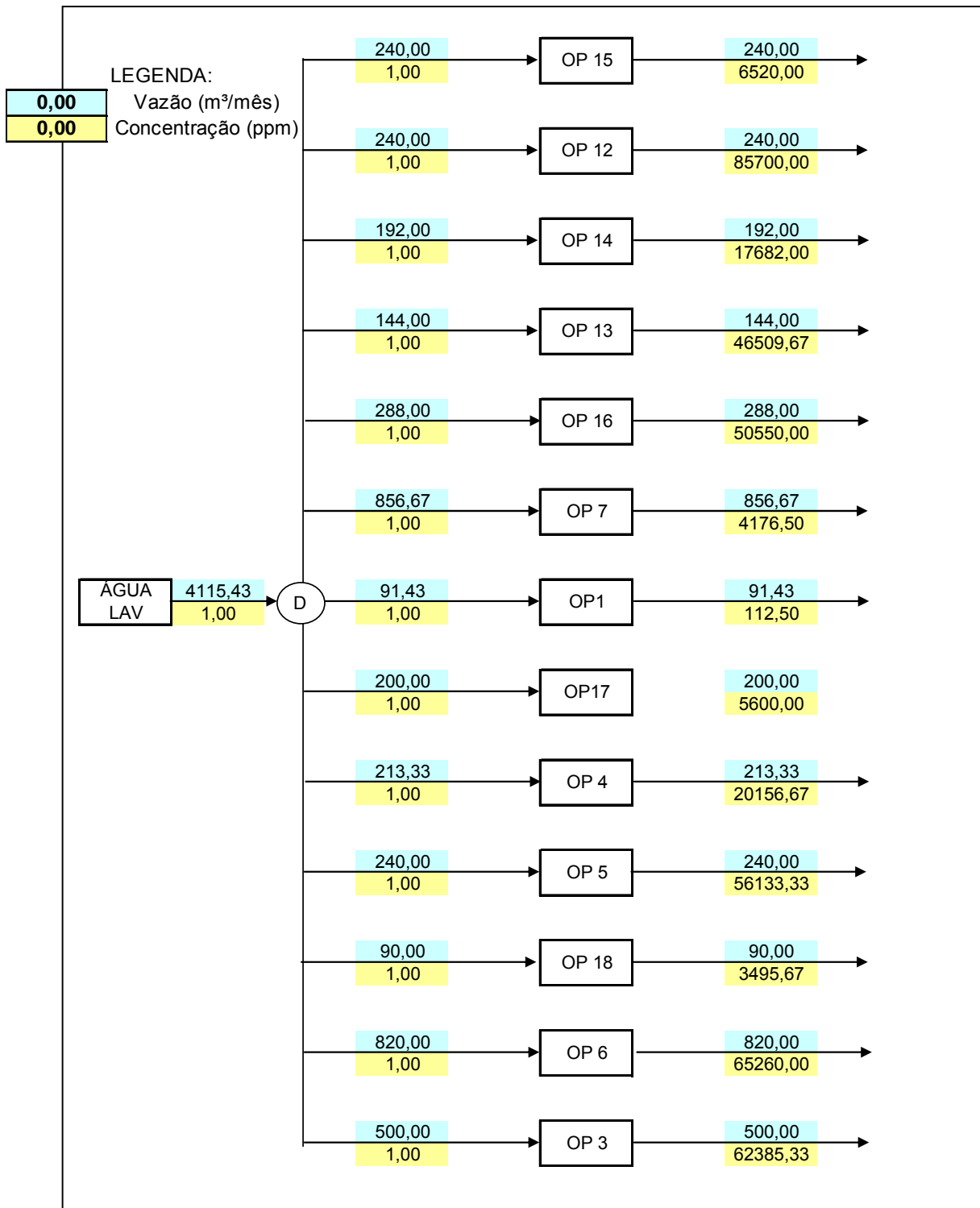


Figura 5.15: RTM para o cenário 1 do contaminante STD.

No Quadro 5.6 é apresentada a condição geral das operações, com suas concentrações máximas de entrada e de saída para o contaminante STD na Unidade de Tratamento de Água (UTA). Os cenários seguintes utilizarão os dados presentes nele.

Operação	Vazão limite (m ³ /mês)	C _e Máx (ppm)	C _s Máx (ppm)
7	856,67	52,00	4182,50
17	200,00	100,00	5600,00
16	288,00	100,00	50647,17
18	90,00	137,00	3514,17
15	240,00	137,00	6655,50
6	820,00	140,00	65280,00
1	91,43	200,00	241,25
14	192,00	1000,00	18679,00
4	213,33	1000,00	21056,67
13	144,00	1000,00	47506,67
5	240,00	1000,00	57033,33
3	500,00	1000,00	63245,33
12	240,00	1000,00	86698,50

Quadro 5.6: Concentrações máximas para STD nas operações.

5.2.2 Cenário 2:

Este cenário foi construído considerando a fonte primária água de lavagem e as fontes internas OP2, OP11 e OP22. Aqui é feito reúso de água das operações 1, 2, 7, 11, 18 e 22. O cenário mostra um consumo de água primária de 3496,95 m³/mês e uma quantidade de efluente a ser tratada de 3779,28 m³/mês. Observa-se uma redução em relação ao cenário atual de operação da UTA de 17,06% para o consumo de água primária e 14,90% para a quantidade de efluente a ser tratado. A seguir são apresentados o DFA (Figura 5.15 e 5.16) e a RTM (Figura 5.16) para o cenário.

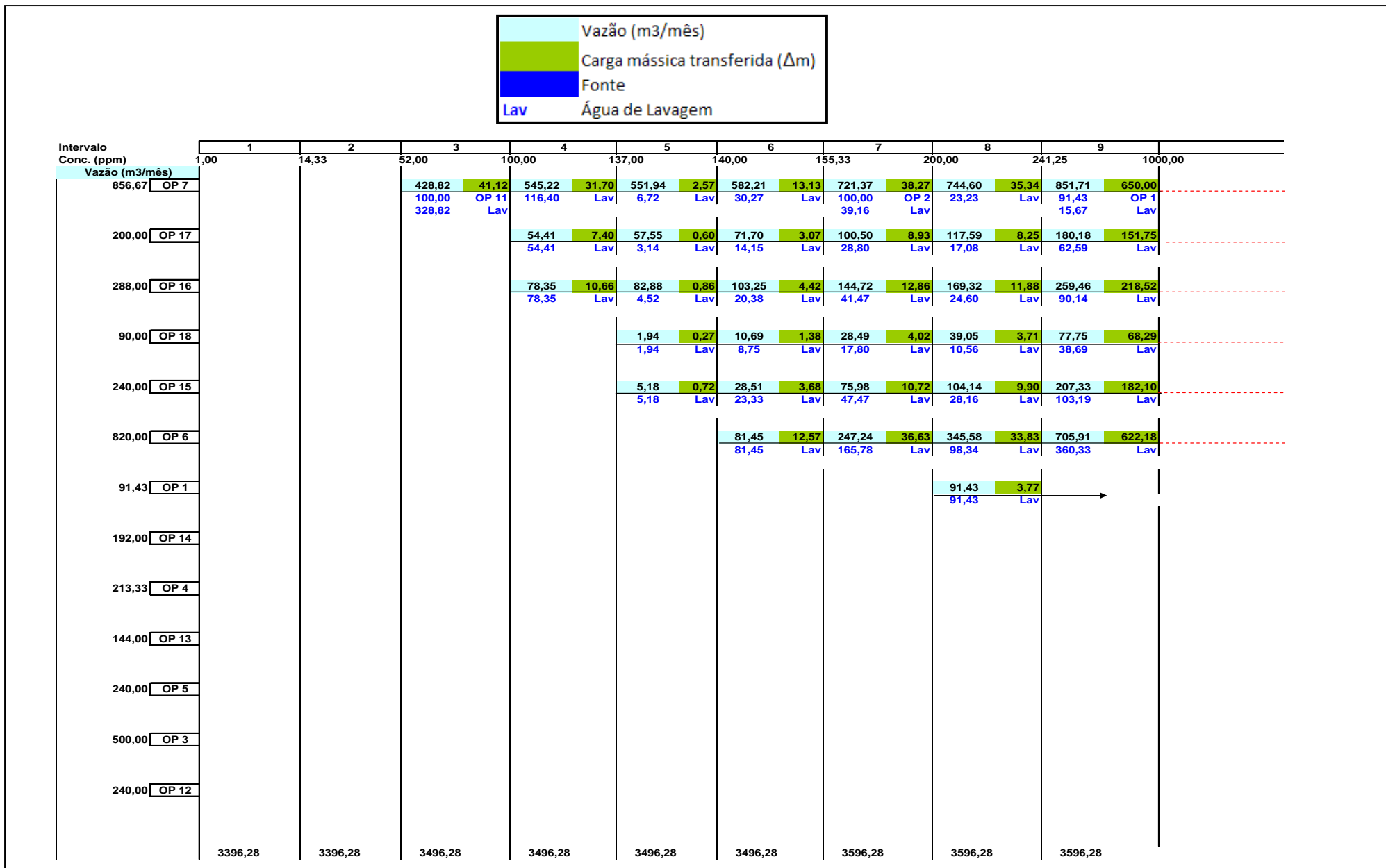


Figura 5.16: DFA para o cenário 2 do contaminante STD (parte A).

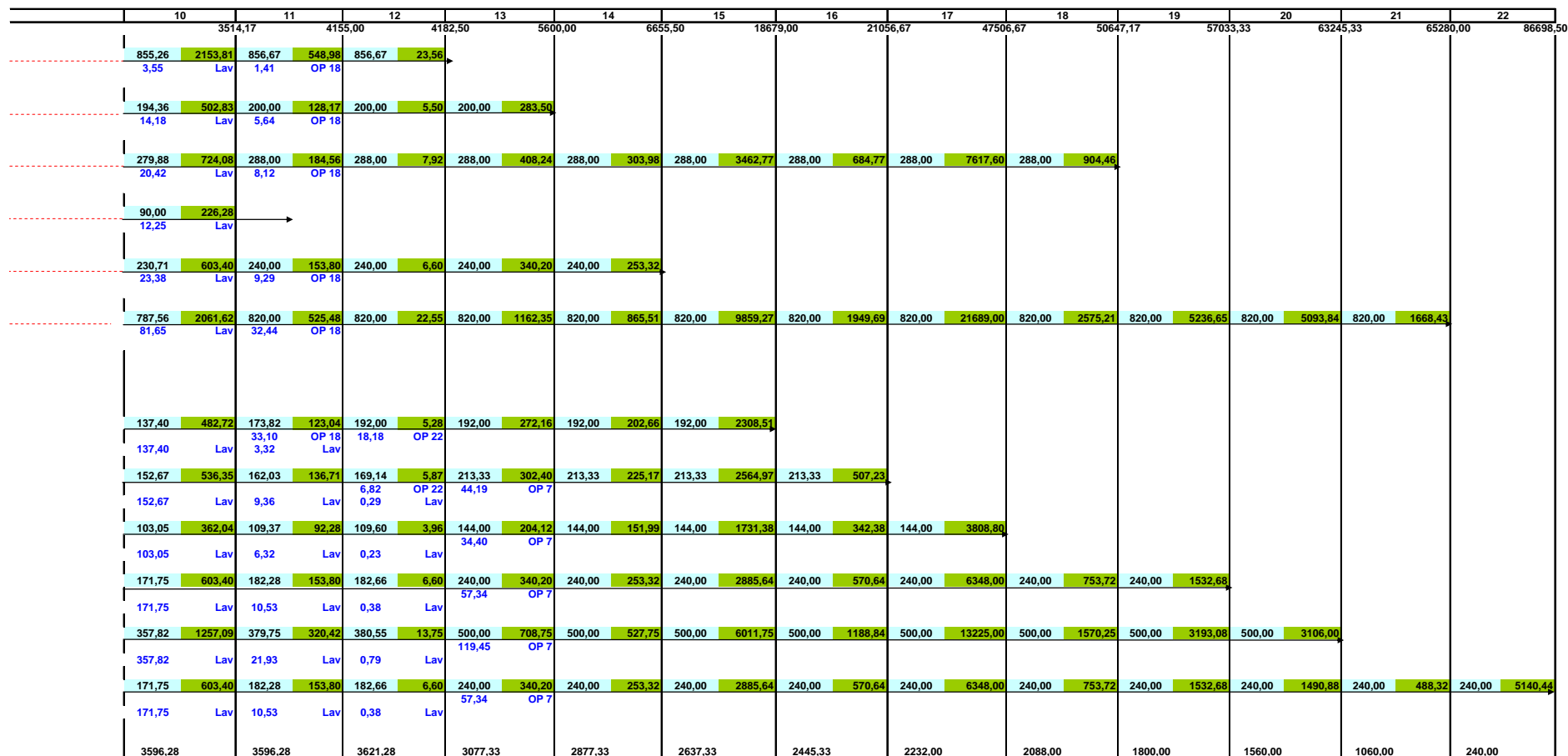
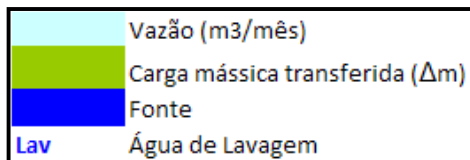


Figura 5.17: DFA para o cenário 2 do contaminante STD (parte B).

LEGENDA:

0,00
0,00

Vazão (m³/mês)
 Concentração (ppm)
 Corrente de reúso

M Ponto de Mistura
 D Ponto de divisão de corrente

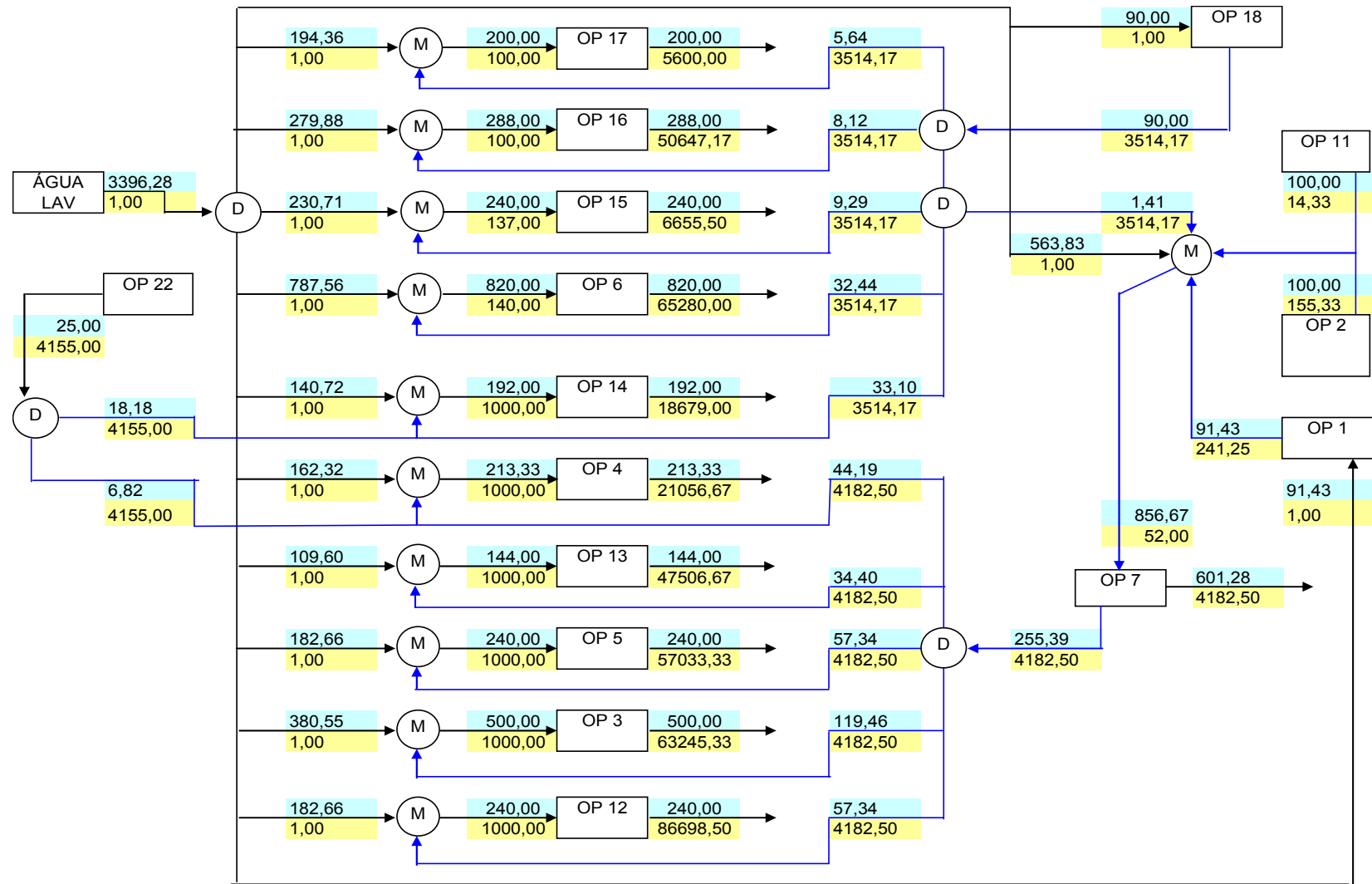
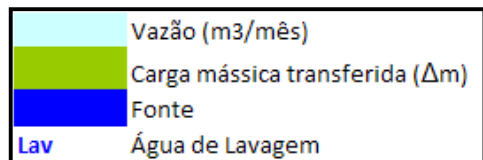


Figura 5.18: RTM para o cenário 2 do contaminante STD.

5.2.3 Cenário 3:

Este cenário foi construído considerando a fonte primária água filtrada e as fontes internas OP2, OP11 e OP22. Vale ressaltar que para sua construção foram incluídas as fontes primárias água de lavagem e água subterrânea, porém não foi necessário o uso das mesmas. Isto se deve ao fato de que a fonte primária água filtrada tem uma concentração de STD maior que as demais, por isso ela é utilizada prioritariamente. Aqui é feito reúso de água das operações 1, 2, 7, 11, 18 e 22. O cenário mostra um consumo de água filtrada de 3527,22 m³/mês e uma quantidade de efluente a ser tratada de 3752,21 m³/mês. Observa-se uma redução em relação ao cenário atual de operação da UTA de 16,34% para o consumo de água primária e 15,51% para a quantidade de efluente a ser tratado. A seguir são apresentados o DFA (Figura 5.19 e 5.20) e a RTM (Figura 5.21) para o cenário.

Tanto o cenário 2 quanto o cenário 3 apresentaram reduções significativas do consumo de água e da geração de efluentes. O cenário 3 utiliza água filtrada, que é uma água de processo. Já o cenário 2 utiliza água de lavagem, que é uma água considerada sem custos, por ser um efluente da Unidade de Filtração. Sendo assim, o cenário 2 é considerado o melhor cenário para o contaminante STD.



Intervalo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11								
Conc. (ppm)	14,330	27,000	40,000	52,000	100,000	137,000	140,000	155,330	200,000	241,250	1000,000	3514,170							
Vazão (m3/mês)																			
856,67 OP 7				642,55	41,12	724,23	31,70	728,20	2,57	745,28	13,13	848,46	38,27	850,14	35,34	856,67	650,00	856,67	2153,81
				100,00	OP11	81,67	Filtr	3,97	Filtr	17,08	Filtr	100,00	OP2	1,68	Filtr	6,53	OP1		
				542,55	Filtr							3,18	Filtr						
200,00 OP 17				76,29	7,40	80,00	0,60	95,95	3,07	125,00	8,93	140,37	8,25	200,00	151,75	200,00	502,83		
				76,29	Filtr	3,71	Filtr	15,95	Filtr	29,05	Filtr	15,37	Filtr	59,63	OP1				
288,00 OP 16				109,86	10,66	115,20	0,86	138,17	4,42	180,00	12,86	202,14	11,88	275,30	218,52	284,49	724,08		
				109,86	Filtr	5,34	Filtr	22,97	Filtr	41,83	Filtr	22,14	Filtr	25,27	OP1	9,19	724,08		
														47,89	Filtr				
90,00 OP 18				2,70	0,27	14,30	1,38	35,44	4,02	46,62	3,71	80,91	68,29	90,000	226,28				
				2,70	Filtr	11,60	Filtr	21,13	Filtr	11,18	Filtr	34,29	Filtr	9,09	Filtr				
240,00 OP 15				7,20	0,72	38,14	3,68	94,50	10,72	124,32	9,90	215,75	182,10	233,30	603,40				
				7,20	Filtr	30,94	Filtr	56,36	Filtr	29,82	Filtr	91,43	Filtr	17,55	Filtr				
820,00 OP 6				109,00	12,57	307,50	36,63	412,55	33,83	734,58	622,18	796,40	2061,62						
				109,00	Filtr	198,50	Filtr	105,05	Filtr	322,04	Filtr	61,81	Filtr						
91,43 OP 1										91,430	3,77								
										91,43	Filtr								
192,00 OP 14												138,95	482,72						
												138,95	Filtr						
213,33 OP 4												154,38	536,35						
												154,38	Filtr						
144,00 OP 13												104,21	362,04						
												104,21	Filtr						
240,00 OP 5												173,68	603,40						
												173,68	Filtr						
500,00 OP 3												361,84	1257,09						
												361,84	Filtr						
240,00 OP 12												173,68	603,40						
												173,68	Filtr						
100,00 OP14			3426,54	3526,54	3526,54	3526,54	3526,54	3526,54	3626,54	3626,54	3626,54	3626,54							

Figura 5.19: DFA para o cenário 3 do contaminante STD (parte A).

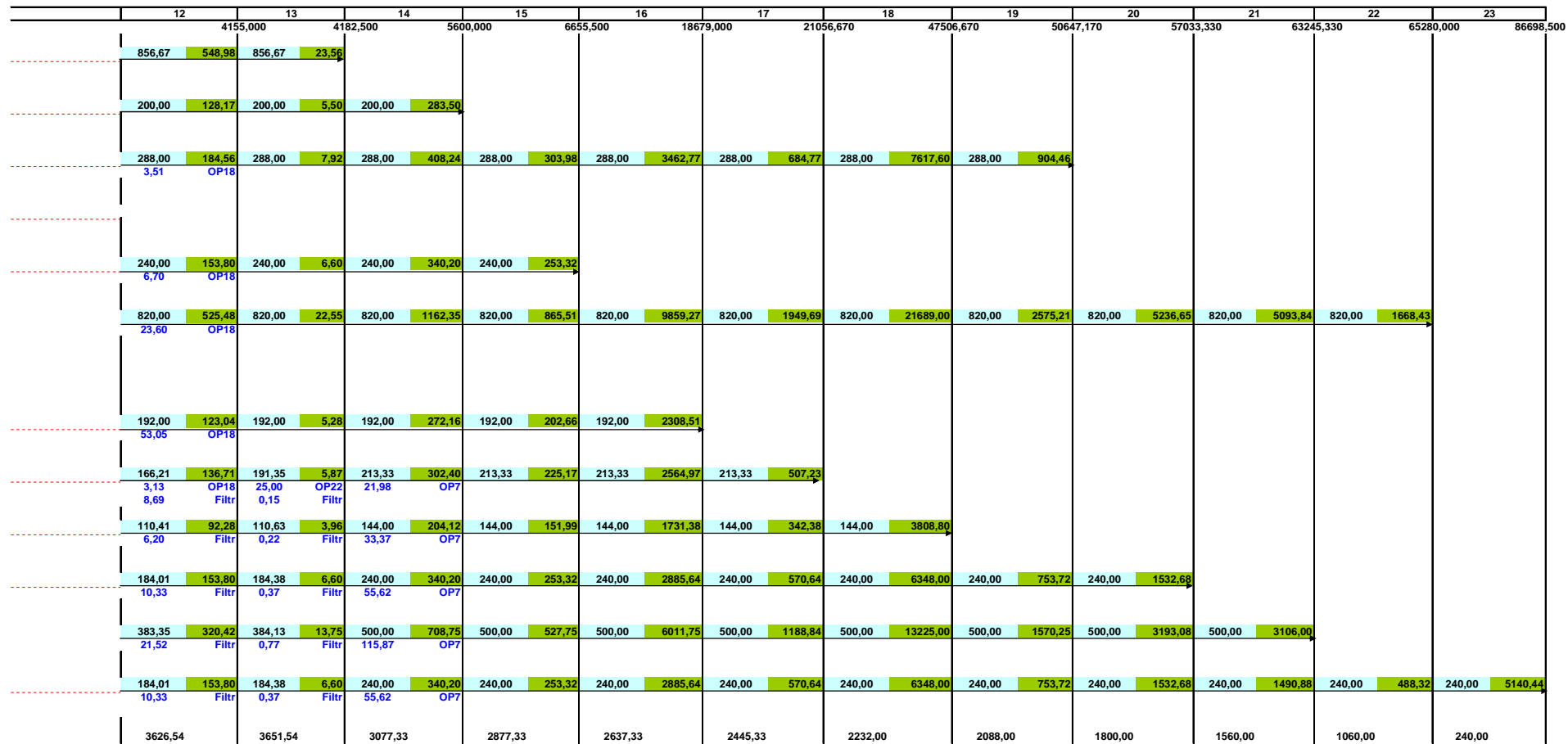
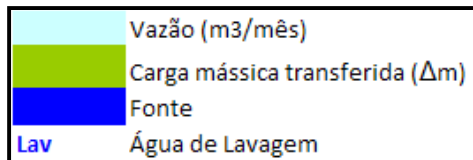


Figura 5.20: DFA para o cenário 3 do contaminante STD (parte B).

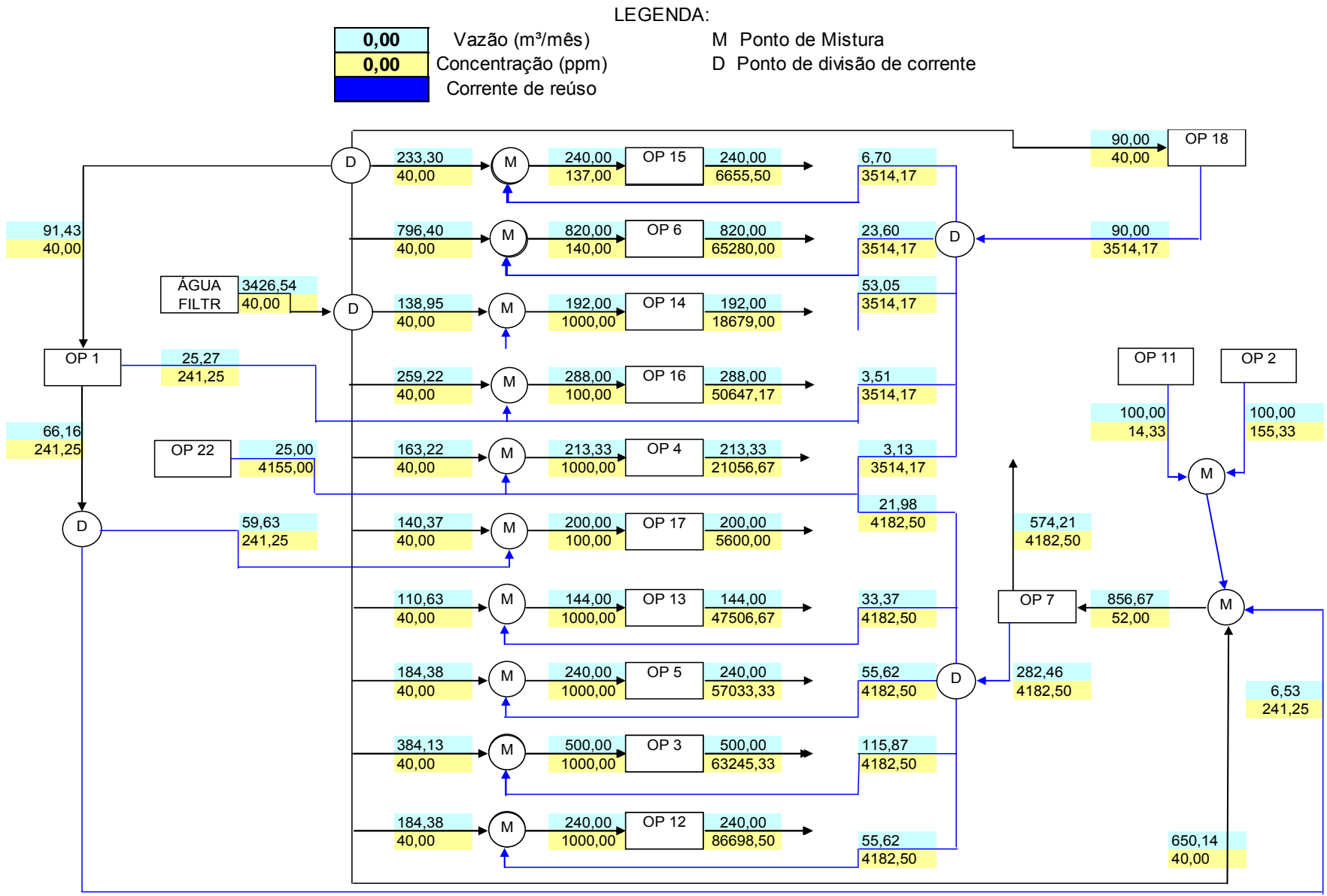


Figura 5.21: RTM para o cenário 3 do contaminante STD.

5.3 Estudo de caso para o contaminante Sólidos Suspensos

A vazão das operações que não foram utilizadas para gerar os DFAs é fixa e vale 80,33 m³/mês.

5.3.1 Cenário 1:

No Quadro 5.7 é apresentada a condição geral das operações, com suas concentrações atuais de operação para o contaminante Sólidos Suspensos (SS) na UTA.

Operação	Vazão limite (m ³ /mês)	C _e (ppm)	C _s (ppm)	Δm (kg/h)	Descrição da operação
12	240,00	0,00	4,00	0,96	Aplicação dos Ânions I
3	500,00	0,00	8,00	4,00	Aplicação dos Cátions I
17	200,00	0,00	10,00	2,00	Deslocamento II dos Ânions II
19	20,33	0,00	14,83	0,30	Contra-lavagem dos leitos Mistos I e II
15	240,00	0,00	16,67	4,01	Deslocamentos dos Ânions I
16	288,00	0,00	19,00	5,47	Deslocamento I dos Ânions II
7	856,67	0,00	22,00	18,85	Enxágüe dos Cátions I e II
14	192,00	0,00	25,00	4,80	Aplicação II dos Ânions II
18	90,00	0,00	25,67	2,31	Enxágüe dos Ânions I e II
5	240,000	0,00	31,33	7,52	Aplicação II dos Cátions II
6	820,00	0,00	33,00	27,06	Deslocamento dos Cátions I e II
4	213,33	0,00	33,33	7,11	Aplicação I dos Cátions II
13	144,00	0,00	42,33	6,09	Aplicação I dos Ânions II
1	91,43	0,00	47,00	4,30	Contra-lavagem dos Cátions I e II

Quadro 5.7: Dados operacionais atuais para SS.

A fonte externa a 0 ppm utilizada neste cenário é a água de lavagem, oriunda na subunidade de filtração. Vale ressaltar que existem outras fontes de água a 0 ppm de SS (água subterrânea e água filtrada), porém, a utilização da água de lavagem é mais vantajosa, visto que o uso das outras fontes representaria um aumento de custo.

Com os dados do Quadro 5.7 foi construído o DFA para o contaminante SS, Figura 5.22, de acordo com a metodologia descrita no Capítulo 3. Em seguida foi construída a respectiva RTM, Figura 5.23.

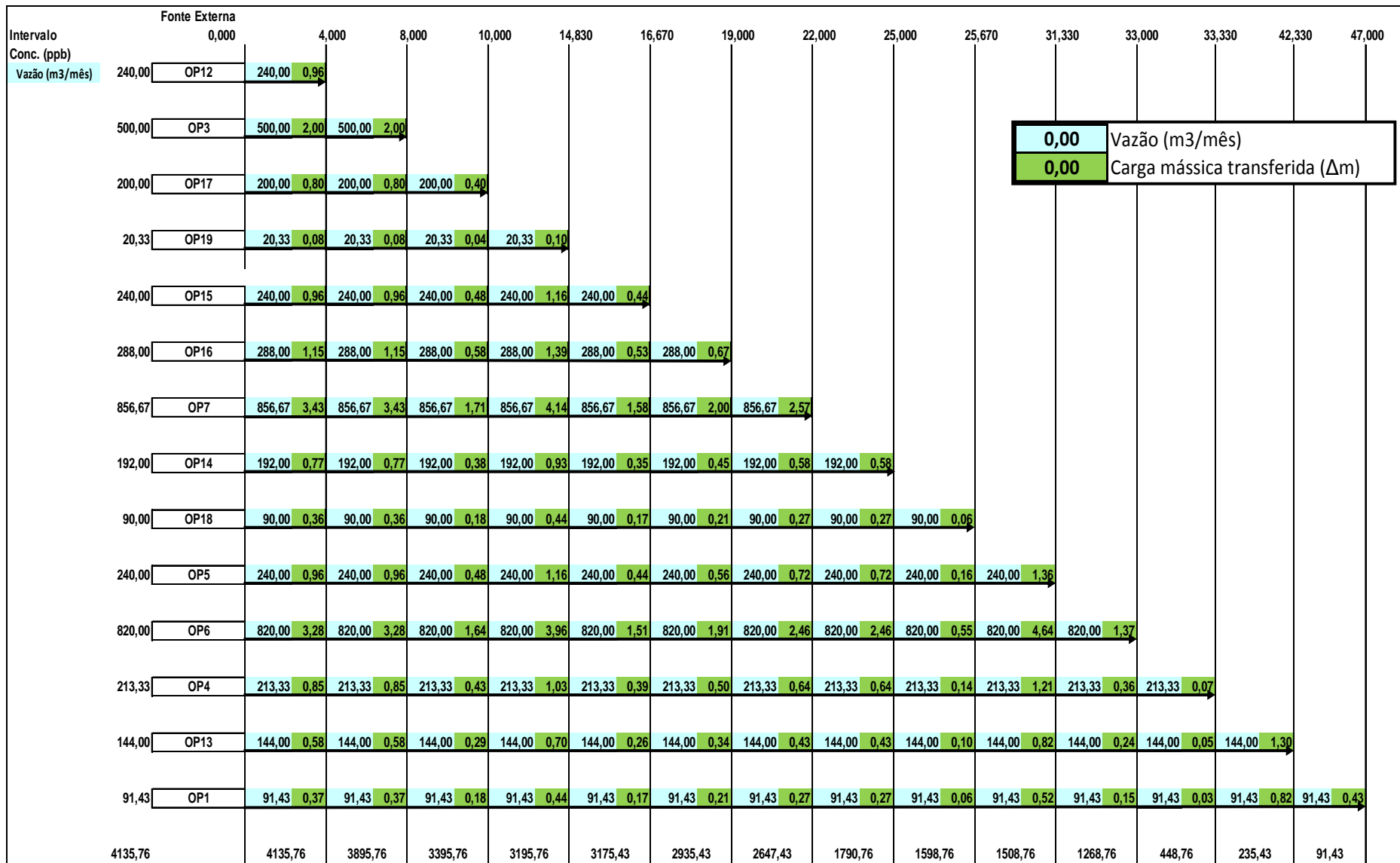


Figura 5.22: DFA para o cenário 1 do contaminante SS.

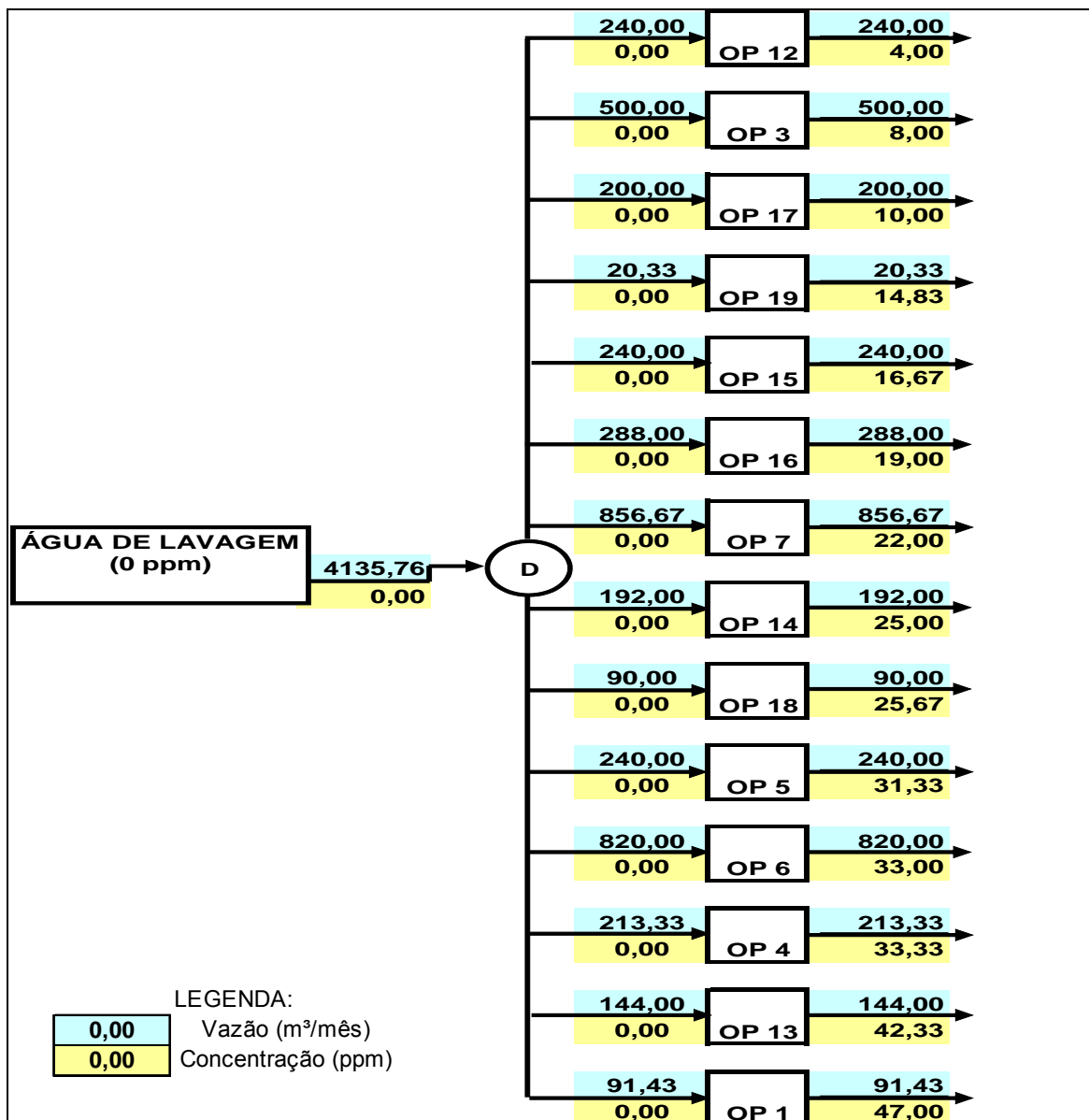


Figura 5.23: RTM para o cenário 1 do contaminante SS.

Verifica-se no DFA dos dados atuais de SS (Figura 5.19), que não há nenhuma oportunidade de reúso de correntes dentro da UTA. No cenário atual, todas as operações têm como concentração inicial 0 ppm de SS caracterizando-o como um cenário de máxima utilização de água de lavagem. No presente cenário o consumo desta água é de 4216,09 m³/mês. A carga de efluente a ser tratada será de 4441,09 m³/mês.

O Quadro 5.8 é um quadro geral das operações, com suas concentrações máximas de entrada e de saída para o contaminante SS na UTA. No Quadro 5.9 são apresentadas as fontes internas e externas que serão utilizadas nos próximos cenários.

Operação	Vazão limite (m ³ /mês)	C _e Máx (ppm)	C _s Máx (ppm)	Δm (kg/h)
17	200,00	0,00	10,00	2,00
7	856,67	0,00	22,00	18,85
18	90,00	0,00	25,67	2,31
12	240,00	5,00	9,00	0,96
3	500,00	5,00	13,00	4,00
19	20,33	5,00	19,83	0,30
15	240,00	5,00	21,67	4,01
16	288,00	5,00	24,00	5,47
14	192,00	5,00	30,00	4,80
5	240,000	5,00	36,33	7,52
6	820,00	5,00	38,00	27,06
4	213,33	5,00	38,33	7,11
13	144,00	5,00	47,33	6,09
1	91,43	5,00	52,00	4,30

Quadro 5.8: Concentrações máximas para SS nas operações.

Operação	Vazão limite (m ³ /mês)	Ce Máx (ppm)	Fonte	Descrição da operação
2	100	7,33	Interna	Remoção dos Cátions I
11	100	4,67	Interna	Remoção dos Ânions I
22	25	12,00	Interna	Remoção dos Leitos Misto I e II
Água de Lavagem	"infinita"	0,00	Externa	Água de Lavagem

Quadro 5.9: Fontes externas e internas e suas concentrações de SS.

Aplicando o DFA e valendo-se das restrições e das fontes de água, foi possível construir cenários diferentes com suas respectivas peculiaridades, apresentados a seguir.

5.3.2 Cenário 2:

Com os dados dos Quadros 5.8 e 5.9 foi construído o DFA para o contaminante SS, Figura 5.24, de acordo com a metodologia descrita no Capítulo 3. Em seguida foi construída a respectiva RTM, Figura 5.25.

Neste cenário utilizou-se água de lavagem e as operações 2, 11 e 22. O consumo de água primária foi de 2923,73 m³/mês, o que corresponde a uma redução de 30,65 % em relação ao consumo do cenário atual. Já a quantidade de água destinada a tratamento foi de 3148,97 m³/mês, representando uma redução de 29,1 % em relação ao cenário atual.

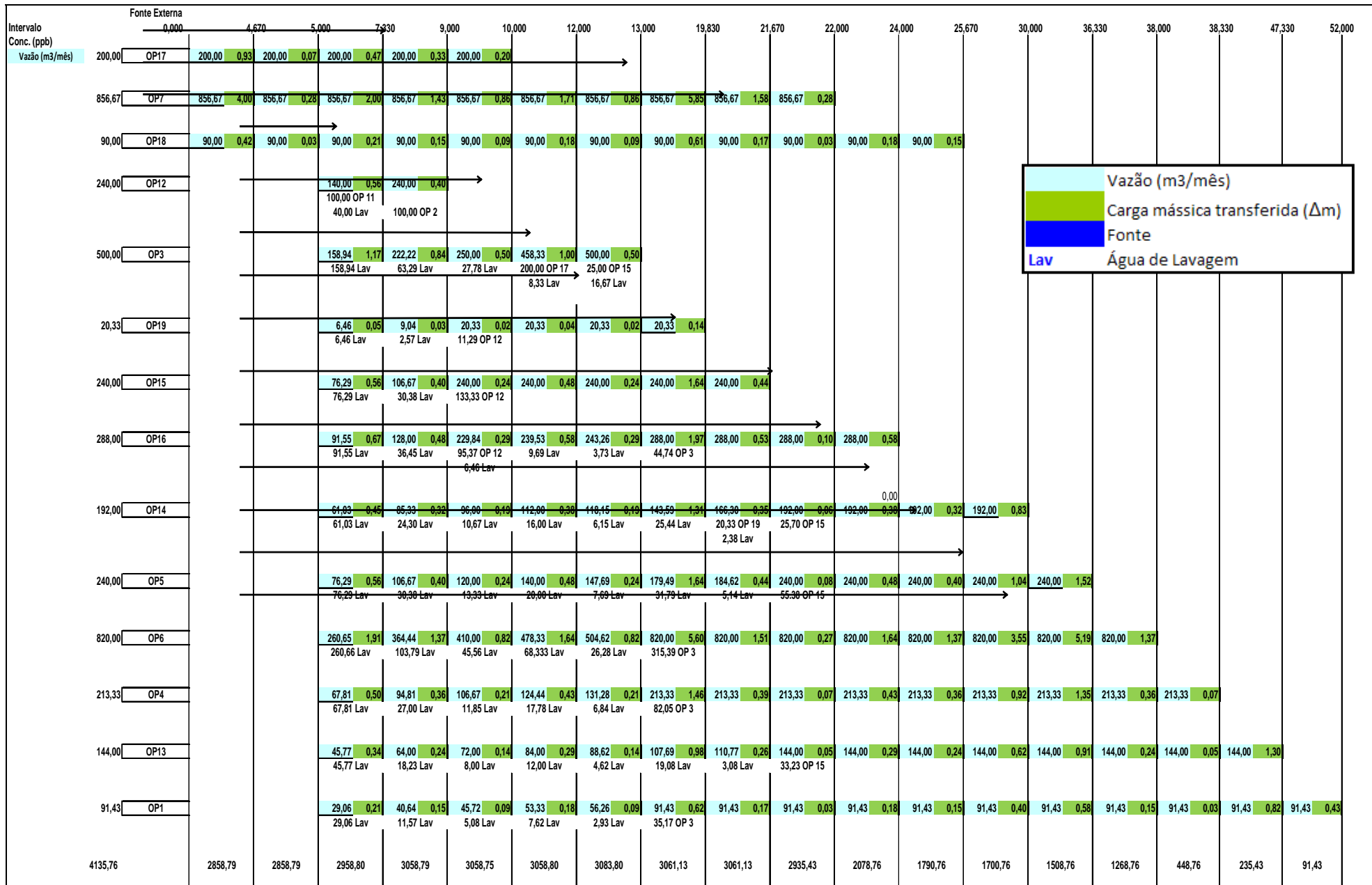


Figura 5.24: DFA para o cenário 2 do contaminante SS.

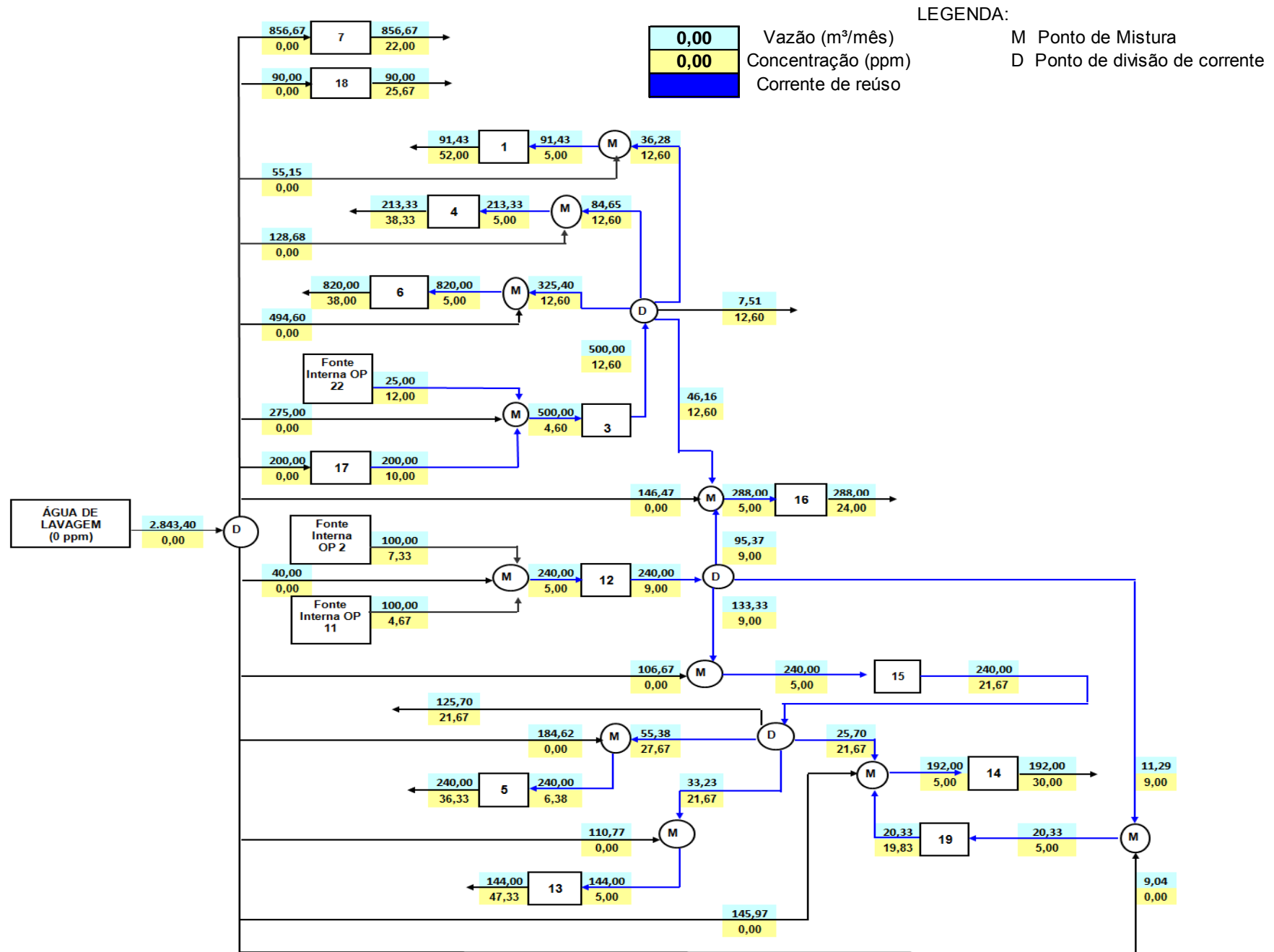


Figura 5.25: RTM para o cenário 2 do contaminante SS.

5.3.3 Cenário 3:

Neste cenário foram utilizadas as mesmas fontes internas e externa do cenário 2. Além das restrições inerentes ao processo, vetou-se o uso das fontes internas nas operações 17, 7 e 18 (no cenário 2 estas consumiram toda água das fontes internas) a fim de tentar viabilizar uma utilização mais eficiente das mesmas e, assim, diminuir o volume de água destinada a tratamento de efluentes. Observou-se, a partir do DFA (Figura 5.26) e da RTM (Figura 5.27), que neste cenário a vazão de água à 0 ppm utilizada foi de 2931,98 m³/mês e a vazão destinada a tratamento foi de 3156,98 m³/mês. Comparando-se com cenário 2, tais valores representam um aumento de 0,28% e de 0,25% no consumo de água à 0 ppm e na vazão de água destinada ao tratamento de efluentes, respectivamente. Em relação ao cenário atual, o decréscimo foi de 30,5% e de 28,9% respectivamente. A redução, tanto no consumo quanto na vazão de efluentes, foi menos expressiva que no cenário 2. Uma possível justificativa para isto é o fato da fonte interna 22 não ter sido utilizada no presente cenário, mesmo estando disponível no MINEA.

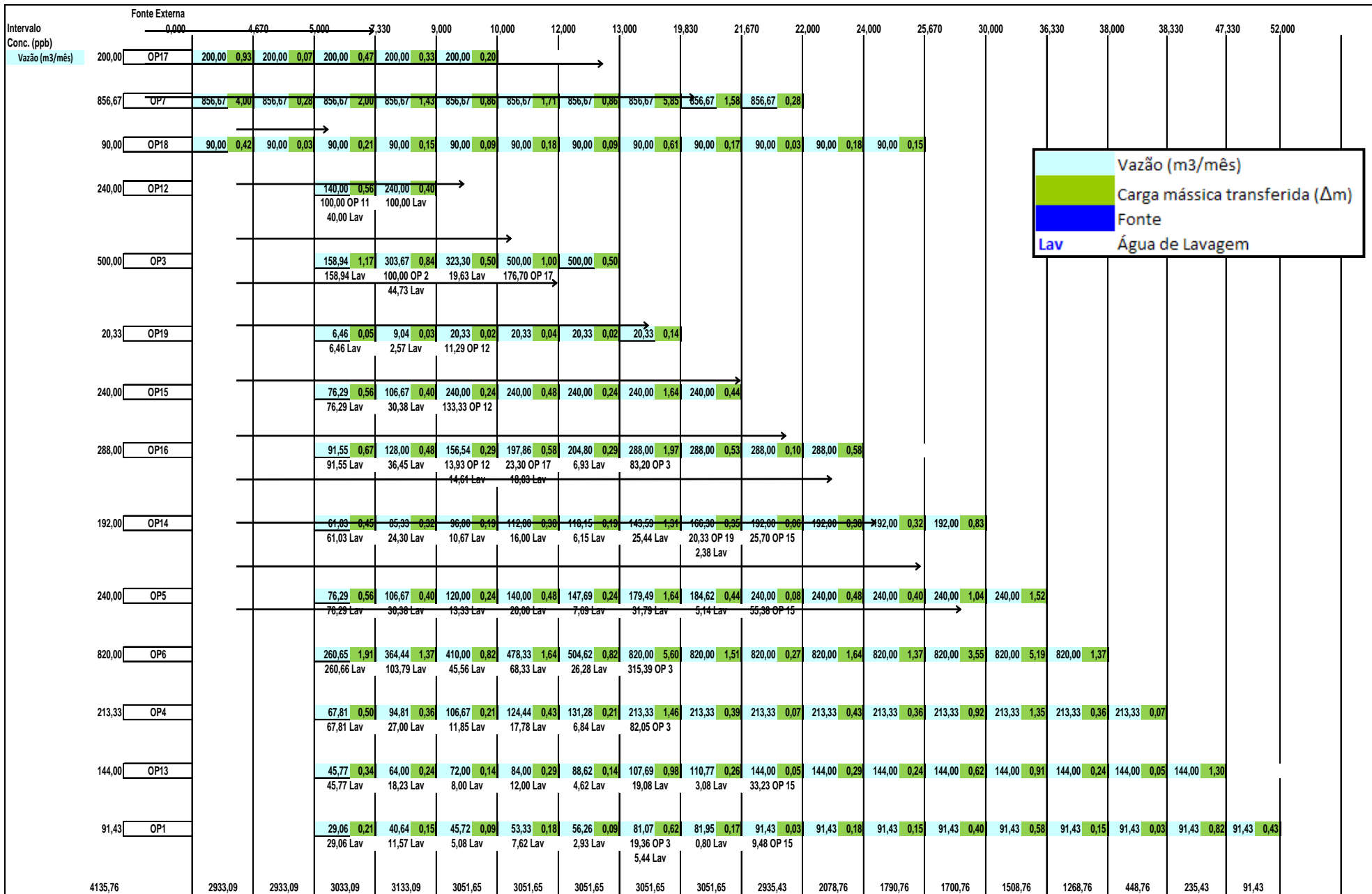
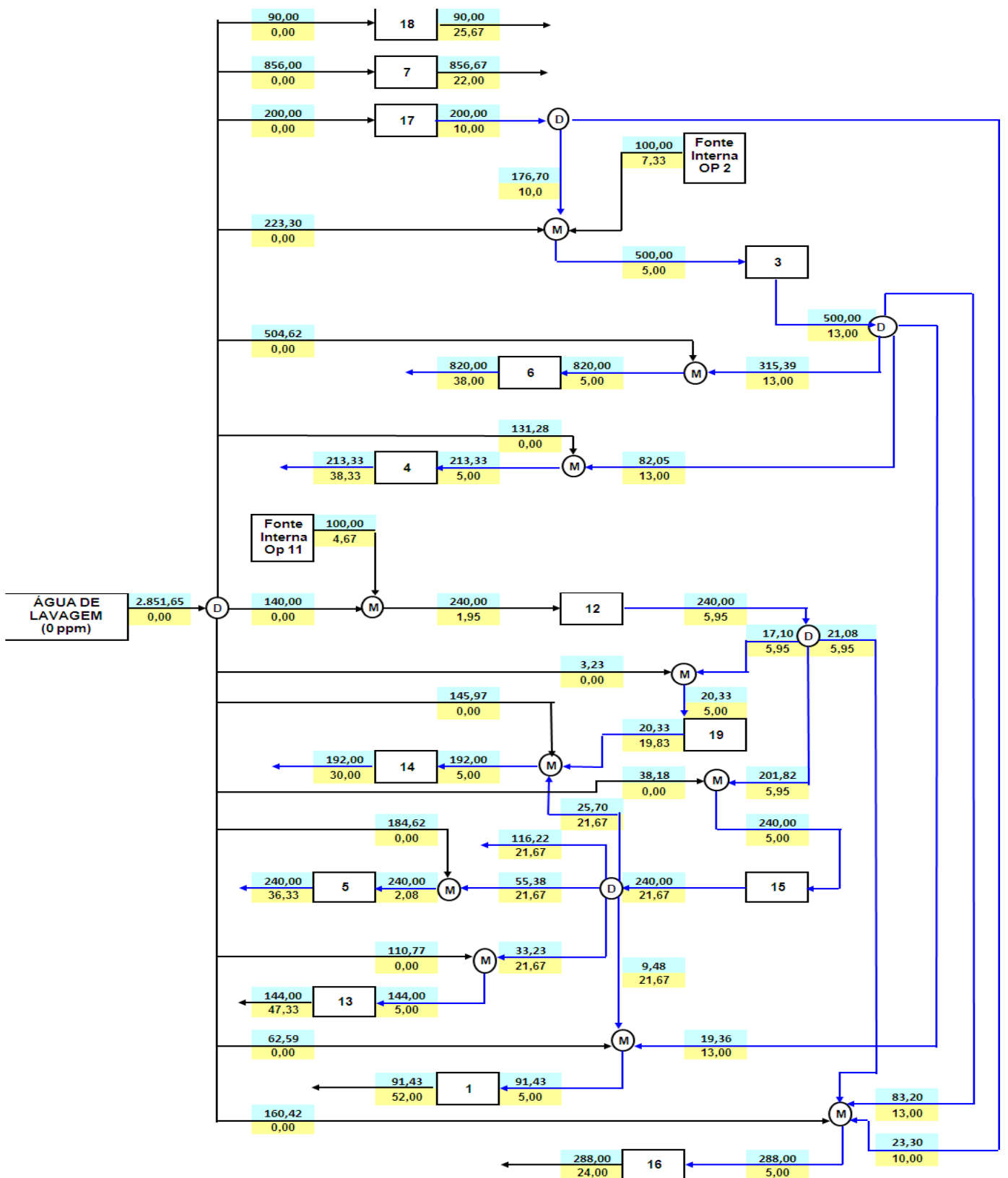


Figura 5.26: DFA para o cenário 3 do contaminante SS.



LEGENDA:

0,00	Vazão (m³/mês)	M	Ponto de Mistura
0,00	Concentração (ppm)	D	Ponto de divisão de corrente
	Corrente de reúso		

Figura 5.27: RTM para o cenário 3 do contaminante SS.

5.3.4 Cenário 4:

Acrescentou-se às restrições do cenário 3 restrições específicas para cada operação da UTA, de modo a impedir o reúso em operações que não sejam da mesma resina da operação de origem. Foram obtidas, neste cenário, vazões de água a 0 ppm e de água destinada a tratamento de 2944,37 m³/mês e 3139,84 m³/mês, respectivamente. Comparando-se ao cenário atual, a redução no consumo de água a 0 ppm foi de 30,2% e a carga destinada a tratamento de efluentes reduziu em 29,3%. Observa-se que neste cenário a operação 22 foi reusada, o que representaria um ganho em relação ao cenário 3. Porém, isto não representou um reúso mais eficiente das operações. Embora as restrições utilizadas representem, aparentemente, maior viabilidade quanto ao tipo de água a ser reusada (todas geradas a partir do mesmo tipo de resina), e quanto à distância entre as operações (admite-se que a distância entre operações de uma mesma resina seja menor que a distância entre operações de resinas diferentes), este cenário é o menos eficiente quanto a redução da vazão utilizada de água de fonte externa. O DFA é mostrado na Figura 5.28 e a RTM na Figura 5.29.

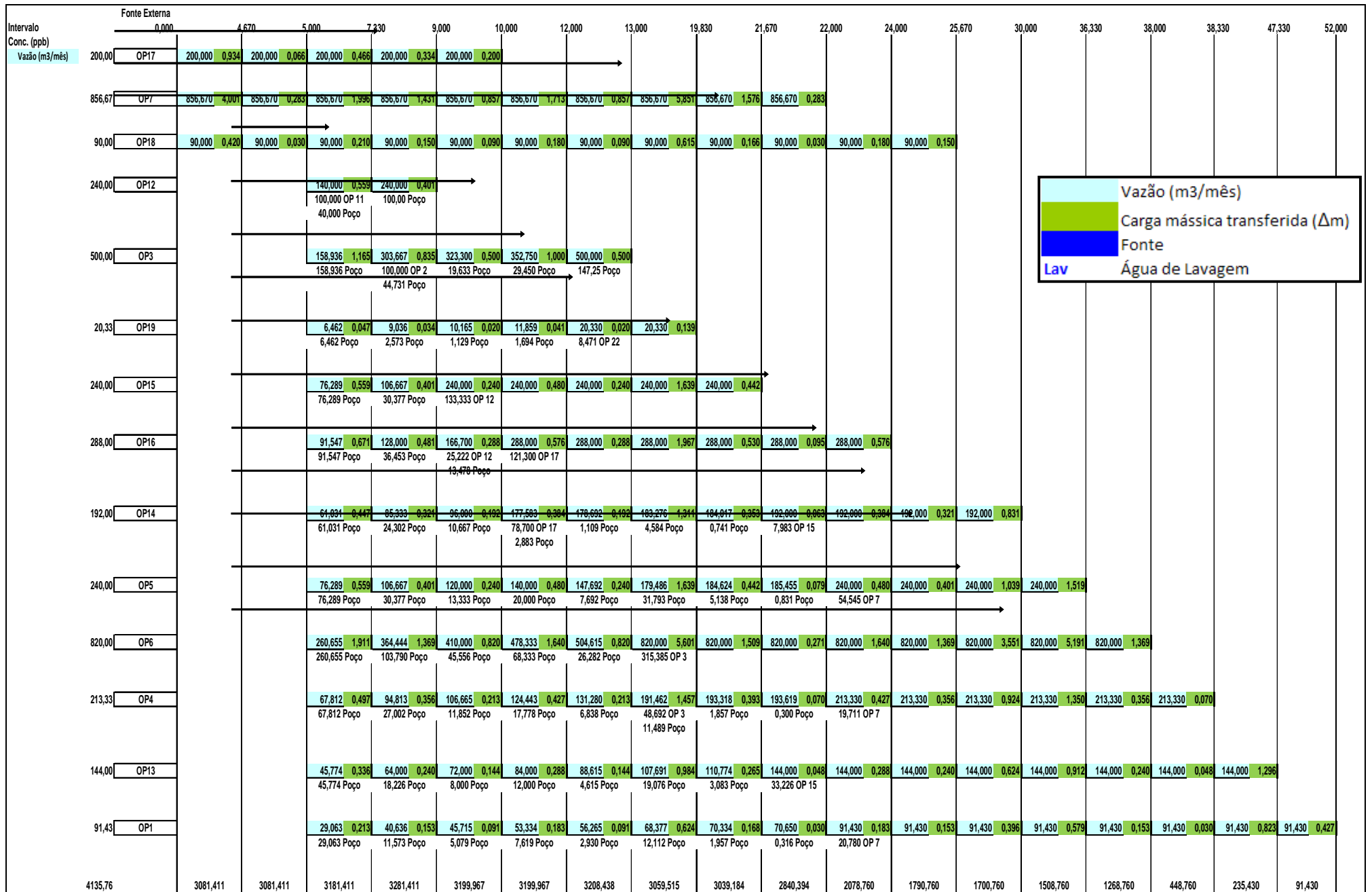


Figura 5.28: DFA para o cenário 4 do contaminante SS.

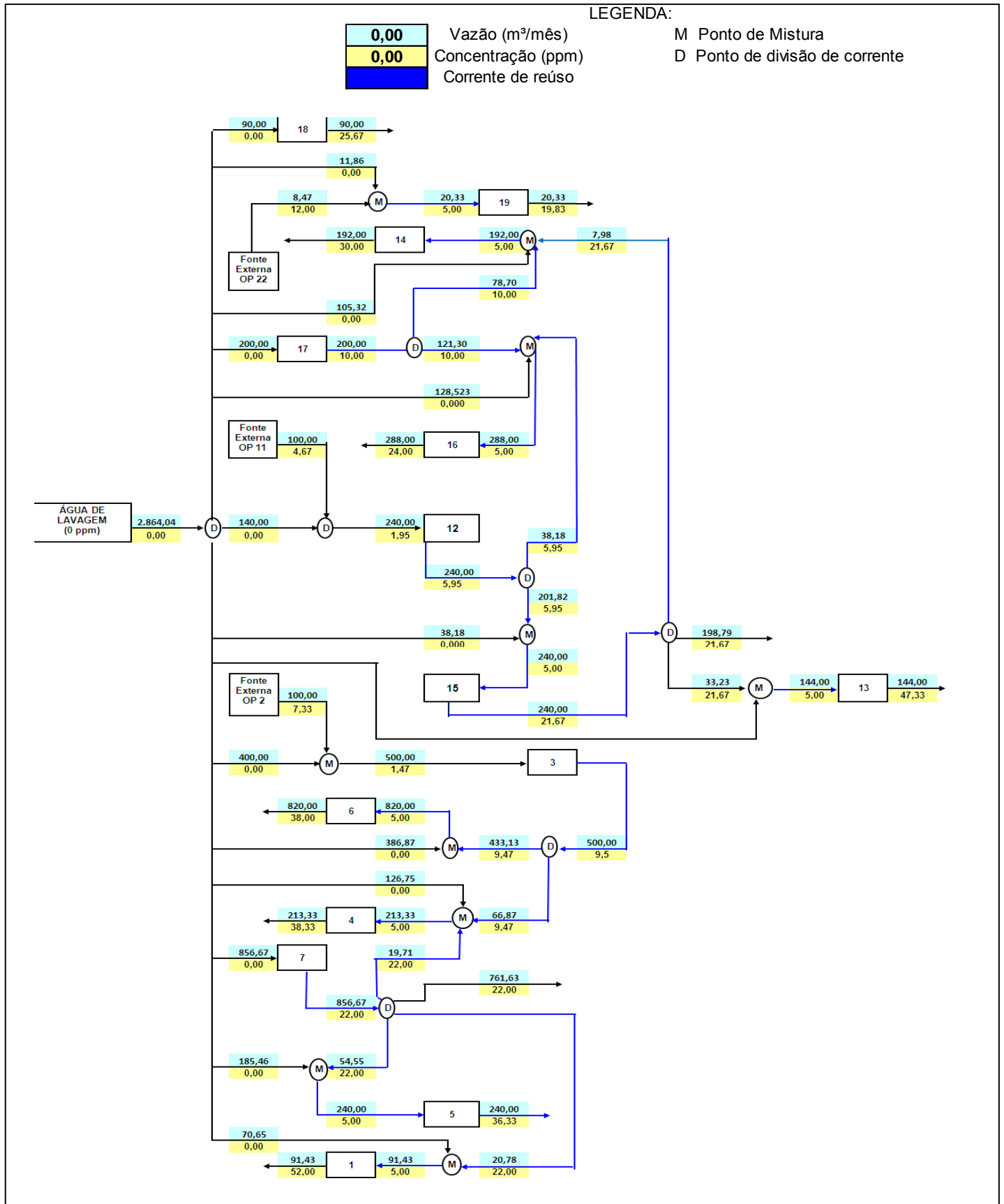


Figura 5.29: RTM para o cenário 4 do contaminante SS.

No Quadro 5.10 são apresentados todos os resultados obtidos para cada um dos contaminantes, em cada cenário estudado. Cada primeiro cenário representa o cenário atual de operação da UTA e, por isso, não há valores correspondentes à redução do consumo de água nem à redução da geração de efluentes.

Para o contaminante Sílica, o cenário 6 foi o melhor cenário dentre os estudados. O cenário 2 foi o melhor para o contaminante STD. Já o contaminante SS, apresenta o cenário 2 como o melhor cenário estudado.

CONTAMINANTE	CENÁRIO	REDUÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA	REDUÇÃO DA GERAÇÃO DE EFLUENTES
Sílica	1	---	---
	2	0%	0,46%
	3	0%	0,46%
	4	4,32%	4,20%
	5	5,11%	8,67%
	6	11,55%	10,93%
STD	1	---	---
	2	17,06%	14,90%
	3	16,34%	15,51%
SS	1	---	---
	2	30,65%	29,10%
	3	30,50%	28,90%
	4	30,20%	29,30%

Quadro 5.10: Resultados obtidos para cada contaminante.

Capítulo 6

Estudos de casos para múltiplos contaminantes

Após a abordagem da problemática de reúso na Desmin, através da aplicação do DFA para cada um dos contaminantes, no Capítulo 5, a próxima etapa será o estudo das possibilidades de reúso quando se analisa os três contaminantes (SS, STD e Sílica) simultaneamente. Posto que os resultados obtidos com esta abordagem apresentam uma aproximação maior com a realidade, foi feita a metodologia do DFA para múltiplos contaminantes, descrita no item 3.2.

Os cenários foram gerados levando-se em conta todas as operações utilizadas na análise para o contaminante sólidos suspensos (SS) no Capítulo 5. Isto se deu em virtude desta análise ter utilizado o maior número de operações dentre os três contaminantes estudados, conforme observado no Quadro 6.1.

Ao final do capítulo os resultados dos estudos de casos serão apresentados em um quadro, de forma a facilitar sua visualização.

Operação	Contaminante	Vazão limite (m ³ /mês)	C _e Máx (ppm)	C _s (ppm)	Carga mássica transferida (Δm)
17	SS	200,00	0,00	10,00	2
	STD		100	5600	1100
	Sílica		15000	15000	0
7	SS	856,67	0,00	22,00	18,85
	STD		52	4182,5	3538,48
	Sílica		20000	20000	0
18	SS	90,00	0,00	25,67	2,31
	STD		137	3514,17	303,95
	Sílica		15000	15000	0
12	SS	240,00	5,00	9,00	0,96
	STD		1000	86698,5	20567,64
	Sílica		20000	429600	98,30
3	SS	500,00	5,00	13,00	4
	STD		1000	63245,33	31122,67
	Sílica		20000	20000	0
19	SS	20,33	5,00	19,83	0,3
	STD		1,5	1,5	0
	Sílica		300	509,17	0,004
15	SS	240,00	5,00	21,67	4
	STD		137	6655,5	1564,44
	Sílica		15000	53100	9,14
16	SS	288,00	5,00	24,00	5,47
	STD		100	50647	14557,54
	Sílica		15000	217525	58,33
14	SS	192,00	5,00	30,00	4,8
	STD		1000	18679	3394,37
	Sílica		20000	314500	56,54
5	SS	240	5,00	36,33	7,52
	STD		1000	57033,33	13448
	Sílica		20000	20000	0
6	SS	820,00	5,00	38,00	27,06
	STD		140	65280	53414,8
	Sílica		20000	20000	0
4	SS	213,33	5,00	38,33	7,11
	STD		1000	21056,67	4278,69
	Sílica		20000	20000	0
13	SS	144,00	5,00	47,33	6,10
	STD		1000	47506,67	6696,96
	Sílica		20000	9505733	1365,95
1	SS	91,43	5,00	52,00	4,3
	STD		200	241,25	3,77
	Sílica		20000	20000	0

Quadro 6.1: Dados das operações e suas concentrações para todos os contaminantes (Sílica, STD, SS).

6.1 Cenário 1:

Este cenário foi gerado com a fonte externa Água de Lavagem e as fontes internas OP 2, OP11 e OP22. Neste caso, o consumo de Água de Lavagem, das operações 2, 3 e 11 foi de 4032,13; 63,1; 20,9 e 100 m³/mês, respectivamente. Houve uma redução de 4,36% em relação ao consumo atual da Desmin. Em relação à geração de efluentes, ocorreu uma redução de 4,14% em relação à geração atual. No DFA gerado, Figura 6.1, as operações 1, 3, 4 e 16 violaram a restrição número 1, que diz respeito em manter as vazões das operações constantes. A RTM gerada está representada na Figura 6.2.

Intervalo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21		
Conc. (ppb)	0,000	0,100	0,250	0,360	1,820	4,670	5,820	7,330	9,820	10,900	12,000	14,830	16,920	19,180	22,090	25,670	28,620	33,150	33,250	35,150	44,150	47,300	
Vazão (m³/mês)																							
288,00 OP 16		80,64 Lav	144,00 Lav	259,52 Lav	276,90 Lav	279,00 Lav	280,93 Lav	282,72 Lav	282,82 Lav	283,68 Lav	284,50 Lav	284,04 Lav	285,30 Lav										
192,00 OP 14					117,17 Lav	131,96 Lav	144,33 Lav	192,00 Lav	192,00 Lav	192,00 Lav	192,00 Lav	192,00 Lav	192,00 Lav	192,00 Lav	192,00 Lav	192,00 Lav	192,00 Lav						
240,00 OP 5					146,47 Lav	184,95 Lav	240,00 Lav	240,00 Lav	240,00 Lav	240,00 Lav	240,00 Lav	240,00 Lav	240,00 Lav	240,00 Lav	240,00 Lav	240,00 Lav	240,00 Lav	240,00 Lav	240,00 Lav	240,00 Lav			
820,00 OP 6		250,56 Lav	707,38 Lav	776,10 Lav	784,78 Lav	792,03 Lav	799,12 Lav	820,00 Lav	820,00 Lav	820,00 Lav	820,00 Lav	820,00 Lav	820,00 Lav	820,00 Lav	820,00 Lav	820,00 Lav	820,00 Lav	820,00 Lav	820,00 Lav	820,00 Lav	820,00 Lav	820,00 Lav	
213,33 OP 4					130,19 Lav	146,62 Lav	186,36 Lav	173,79 Lav	174,50 Lav	186,97 Lav	187,15 Lav	190,38 Lav	193,09 Lav	195,88 Lav	198,20 Lav	198,85 Lav	201,02 Lav	201,65 Lav	202,28 Lav	202,28 Lav	202,28 Lav	202,28 Lav	
144,00 OP 13					87,88 Lav	98,97 Lav	128,57 Lav	144,00 Lav	144,00 Lav	144,00 Lav	144,00 Lav	144,00 Lav	144,00 Lav	144,00 Lav	144,00 Lav	144,00 Lav	144,00 Lav	144,00 Lav	144,00 Lav	144,00 Lav	144,00 Lav	144,00 Lav	
91,43 OP 1				73,34 Lav	84,30 Lav	85,77 Lav	86,94 Lav	88,08 Lav	88,14 Lav	88,69 Lav	89,21 Lav	89,48 Lav	89,71 Lav	89,93 Lav	90,15 Lav	90,20 Lav	90,44 Lav	90,44 Lav	90,44 Lav	90,44 Lav	90,44 Lav	90,74 Lav	
200,00 OP 17	200,00 Lav	200,00 Lav	200,00 Lav	200,00 Lav	200,00 Lav	200,00 Lav	200,00 Lav	200,00 Lav	200,00 Lav	200,00 Lav	200,00 Lav												
856,67 OP 7	856,67 Lav	856,67 Lav	856,67 Lav	856,67 Lav	856,67 Lav	856,67 Lav	856,67 Lav	856,67 Lav	856,67 Lav	856,67 Lav	856,67 Lav	856,67 Lav	856,67 Lav	856,67 Lav	856,67 Lav	856,67 Lav	856,67 Lav	856,67 Lav	856,67 Lav	856,67 Lav	856,67 Lav	856,67 Lav	
90,00 OP 18	90,00 Lav	90,00 Lav	90,00 Lav	90,00 Lav	90,00 Lav	90,00 Lav	90,00 Lav	90,00 Lav	90,00 Lav	90,00 Lav	90,00 Lav	90,00 Lav	90,00 Lav	90,00 Lav	90,00 Lav	90,00 Lav	90,00 Lav	90,00 Lav	90,00 Lav	90,00 Lav	90,00 Lav	90,00 Lav	
240,00 OP 12					146,47 Lav	147,47 Lav	147,47 Lav																
500,00 OP 3					305,14 Lav	306,14 Lav	306,14 Lav	306,14 Lav	306,14 Lav	306,14 Lav	306,14 Lav	306,14 Lav	306,14 Lav	306,14 Lav	306,14 Lav	306,14 Lav	306,14 Lav	306,14 Lav	306,14 Lav	306,14 Lav	306,14 Lav	306,14 Lav	
20,33 OP 19	20,33 Lav	20,33 Lav	20,33 Lav	20,33 Lav	20,33 Lav	20,33 Lav	20,33 Lav	20,33 Lav	20,33 Lav	20,33 Lav	20,33 Lav	20,33 Lav	20,33 Lav	20,33 Lav	20,33 Lav	20,33 Lav	20,33 Lav	20,33 Lav	20,33 Lav	20,33 Lav	20,33 Lav	20,33 Lav	
240,00 OP 15			73,33 Lav	207,03 Lav	227,15 Lav	229,69 Lav	231,81 Lav	233,89 Lav	234,00 Lav	235,00 Lav	235,95 Lav	236,45 Lav											
	3782,992	3782,992	3782,992	3782,992	3782,992	3877,525	3637,525	3653,952	3268,496	3068,496	3068,496	3048,166	2811,712	2526,415	1669,745	1579,745	1387,745	1147,745	327,745	125,461			

Vazão (m³/mês)

Carga mássica transferida (Δm)

Fonte

Lav Água de Lavagem

Figura 6.1: DFA para o cenário 1 de múltiplos contaminantes.

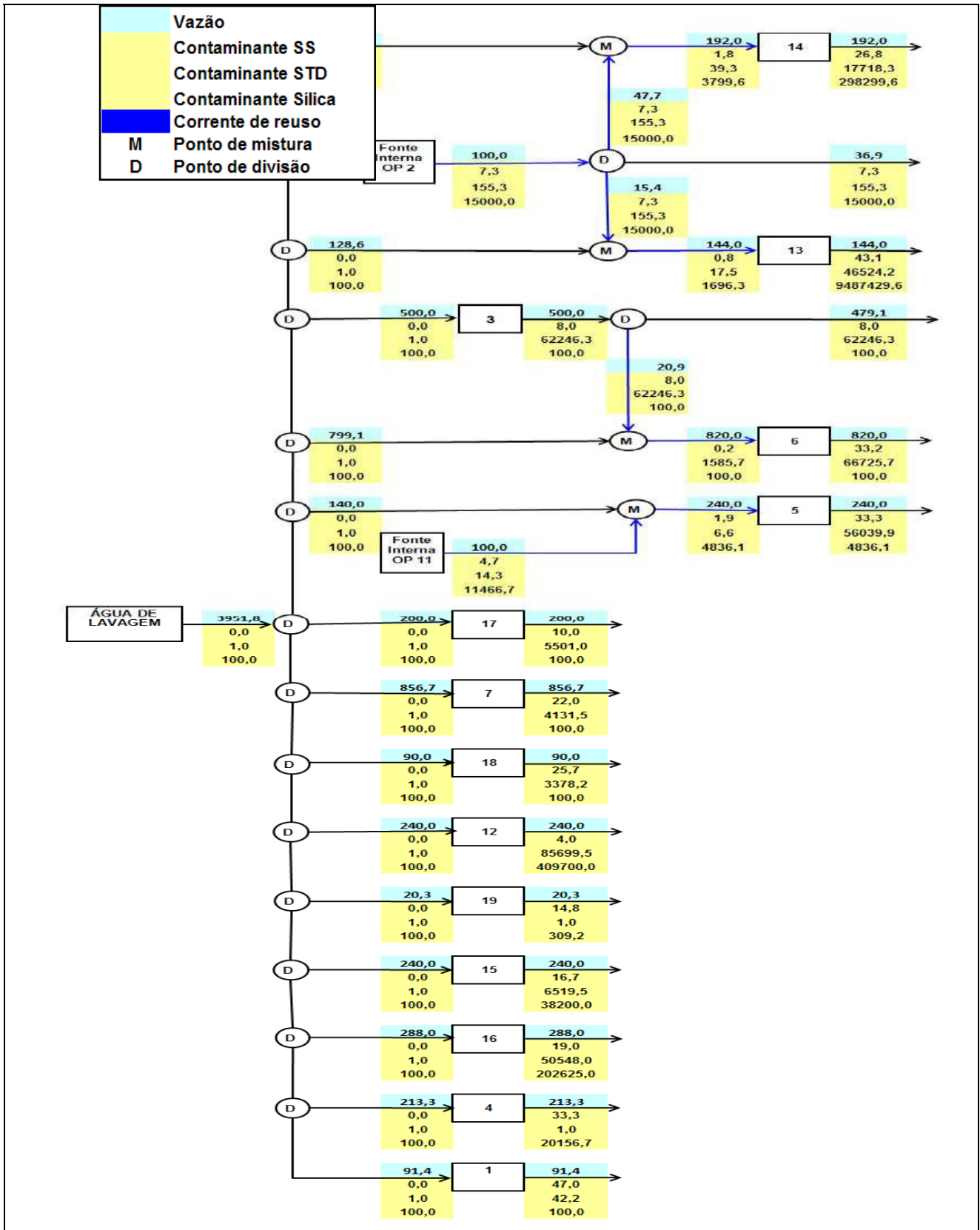


Figura 6.2: RTM para o cenário 1 de múltiplos contaminantes.

6.2 Cenário 2:

Este cenário foi gerado com a fonte externa Água de Lavagem. O consumo de Água de Lavagem foi de 3951,0 m³/mês e a carga de efluentes gerada é de 4117,2 m³/mês. Aqui ocorre reúso das operações 3, 12 e 17. O cenário apresenta redução do consumo de água primária de 6,3% em relação ao cenário atual de operação da UTA. Já para a geração de efluentes, ocorre uma redução de 7,3% em relação ao cenário atual. O DFA é mostrado na Figura 6.3 e a RTM na Figura 6.4.

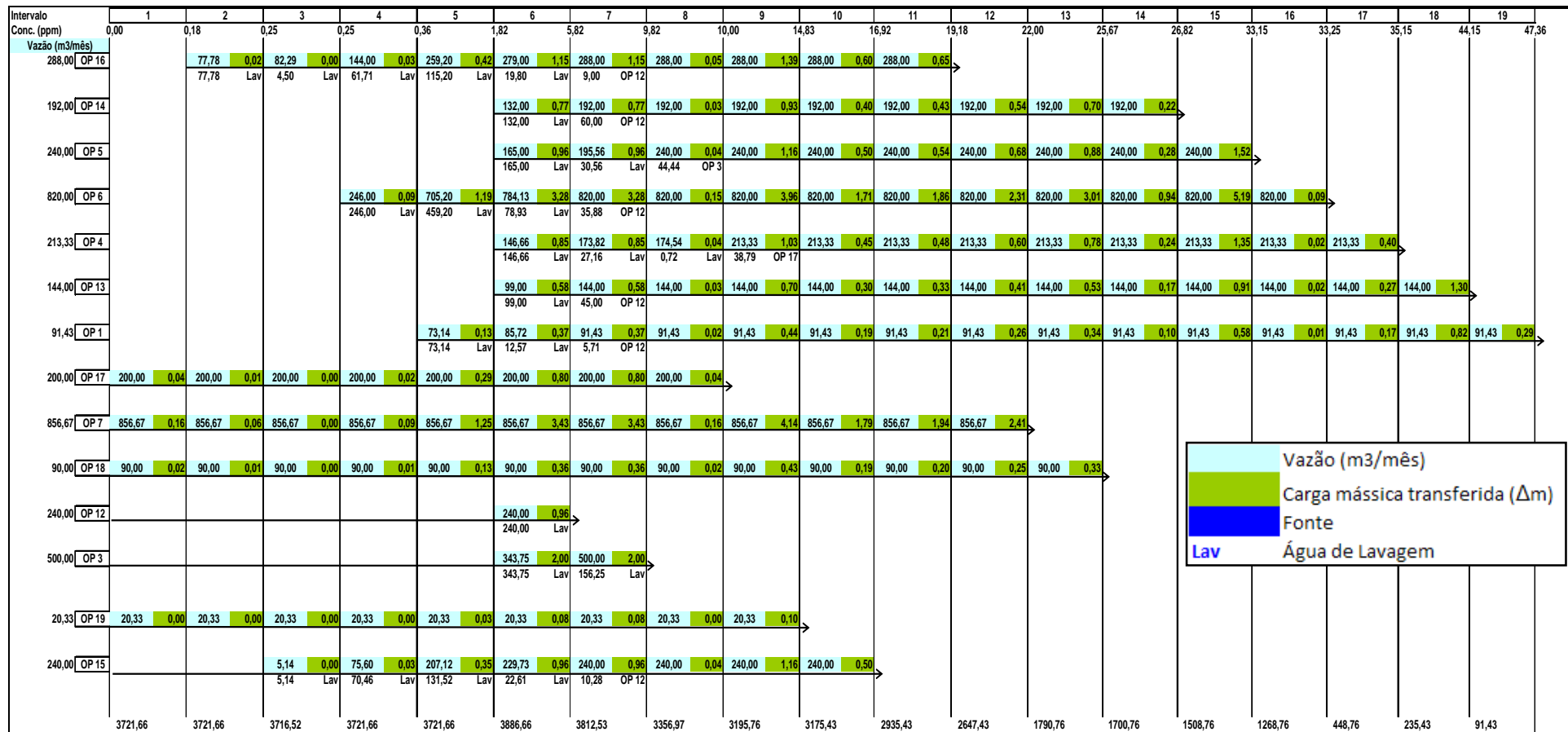


Figura 6.3: DFA para o cenário 2 de múltiplos contaminantes.

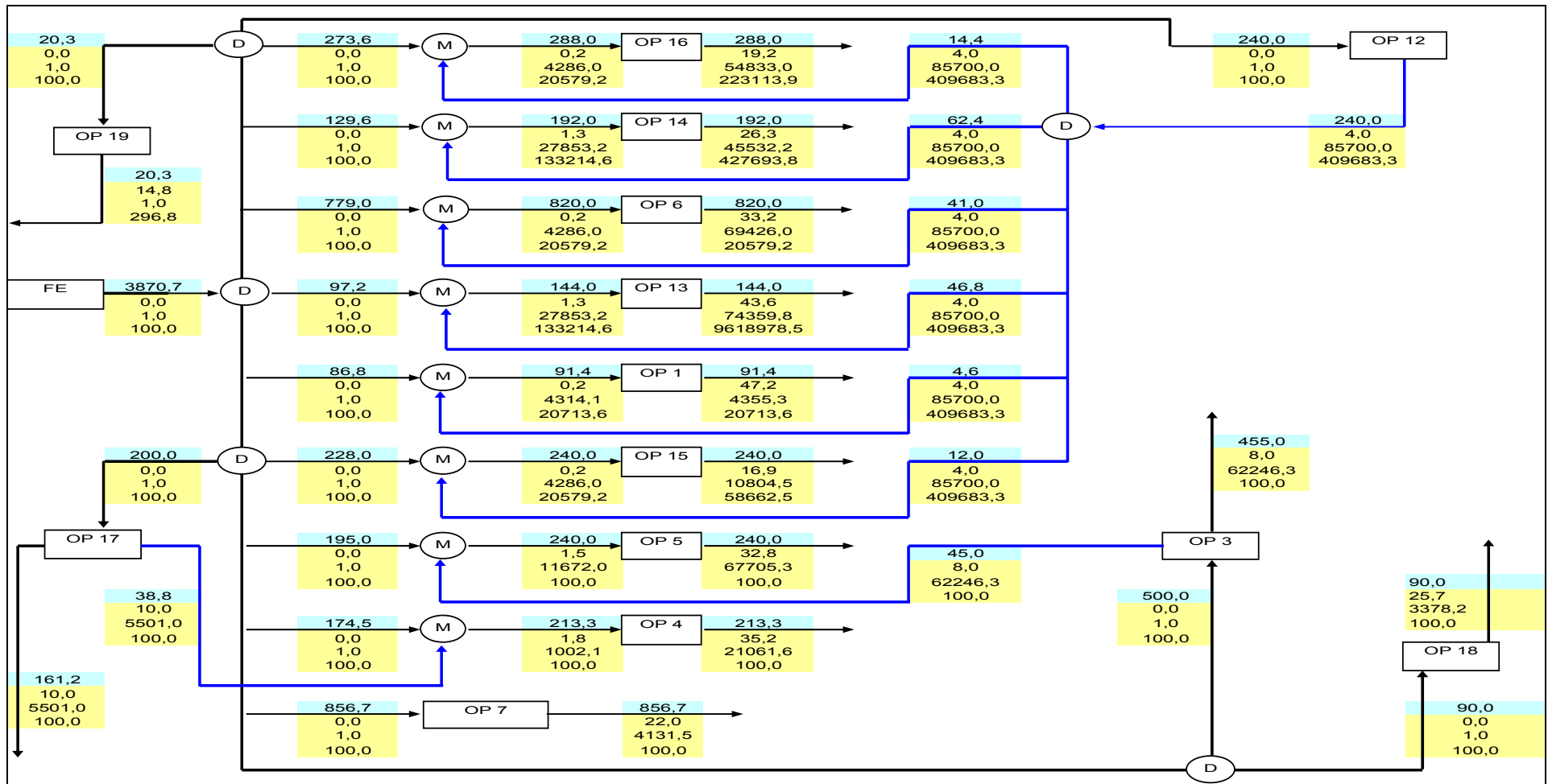


Figura 6.4: RTM para o cenário 2 de múltiplos contaminantes.

No Quadro 6.2 são apresentados todos os resultados obtidos para múltiplos contaminantes, em cada cenário estudado.

Embora não tenha feito uso de nenhuma das fontes internas, o cenário 2 fez uma maior quantidade de reúso de água, sendo considerado o melhor cenário.

CENÁRIO	REDUÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA	REDUÇÃO DA GERAÇÃO DE EFLUENTES
1	4,36%	4,14%
2	6,3%	7,3%

Quadro 6.2: Resultados obtidos para múltiplos contaminantes.

Capítulo 7

Conclusão e Sugestões

7.1 Conclusões

A utilização do Diagrama de Fontes de Águas neste trabalho possibilitou a minimização do consumo de água bem como a redução na geração de efluentes líquidos da subunidade de Desmineralização da UTA do Polo Petroquímico em questão.

Parte-se da premissa que toda a UTA, exceto a subunidade de Desmineralização, já foi esquematizada de forma a consumir a menor vazão de água subterrânea possível. Sendo assim, os diversos cenários gerados para a subunidade de Desmineralização só vieram a confirmar a hipótese inicial, de que este consumo ainda poderia ser minimizado a partir do reúso de águas das operações internas à Desmin.

Dentre os cenários gerados para o estudo de múltiplos contaminantes, o cenário 2 foi o melhor cenário. Ele apresenta, em relação cenário atual de operação da UTA, redução do consumo de água primária de 6,3% e redução da carga gerada de efluentes de 7,3%. Ainda que não tenha utilizado as fontes internas 2, 11 e 22, neste cenário ocorre reúso das operações 12 e 17, apresentando reduções mais representativas que o cenário 1.

Embora neste trabalho não tenha sido feita uma avaliação econômica, o uso de água de lavagem representa uma possível redução de custo. Essa redução se deve ao fato de que a utilização dessas águas é uma opção à utilização de água subterrânea. Esta tem um custo de obtenção, enquanto que aquelas são fontes inerentes ao processo.

7.2 Sugestões

Seguem abaixo algumas propostas para trabalhos futuros:

- Para múltiplos contaminantes propõe-se um cenário que divida as operações em redes. Após efetuar o deslocamento nos blocos de operações, realiza-se a média ponderada das diversas correntes de entrada e saída das operações de cada bloco e se obtêm novas vazões e concentrações referentes a cada bloco;
- Realização de uma análise econômica efetiva, considerando o custo real de captação de água e o custo de tubulações e bombeamento;
- Aumento de limite do número de operações e de fontes no MINEA, a fim de viabilizar a sua aplicação a problemas complexos, com n operações e n fontes;
- Ajuste de erros relativos à violação da restrição de vazão limite no MINEA, quando se desejar manter as vazões fixas.

Capítulo 8

Referências Bibliográficas

A água no planeta, Declaração da água, Carta de princípios: Universidade da Água. Disponível em: <http://www.uniagua.org.br>. Acesso em: 29 nov. 2008.

AL-REDHWAN, S.A., CRITTENDEN, B.D., LABABIDI, H.M.S., “Wastewater minimization under uncertain operational conditions”, *Computers and Chemical Engineering*, 29, 1009-1021, 2005.

BAGAJEWICZ, M., “Review of recent design procedures for water networks in refineries and process plants”, *Computers and Chemical Engineering*, 24, 2093-2113, 2000.

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

CPRM. Água subterrânea – fonte mal-explorada no conhecimento e na sua utilização. Disponível em: www.cprm.gov.br/água1001.htm. 1997. Acesso em: 29 nov. 2008.

DOYLE, S.J., SMITH, R., “Targeting water reuse with multiple contaminants”, *Transactions of International of Chemical Engineering*, 75(B), 181-189, 1997.

EL-HALWAGI, M.M., MANOUSIOUTHAKIS, V., “Synthesis of mass exchange networks”, *American Institute of Chemical Engineering Journal*, 35 (8), 1233-1244, 1989.

FREITAS, I.S.F., COSTA, C.A.V., BOAVENTURA, R.A.R., "Conceptual design of industrial wastewater treatment processes: primary treatment", Computers and Chemical Engineering, 24, 1725-1730, 2000.

GALAN, B., GROSSMANN, I.E., "Optimal design of distributed wastewater treatment networks" Industrial and Engineering Chemistry Research, 37, 4036-4048, 1998.

Gestão da água: CETESB. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br>. Acesso em: 30 nov. 2008.

GOMES, J.F.S. Procedimento para Minimização de Efluentes Aquosos. 2002. 228 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos), Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

GOMES, J.F.S., QUEIROZ, E.M., PESSOA, F.L.P., "Design procedure for water/wastewater minimization: single contaminant", Journal of Cleaner Production, 15, 474-485, 2007.

HALLALE, N., "Burning bright trends in process integration", Chemical Engineering Progress, July, 30-40, 2001.

HUANG, C-H., CHANG, C-T., LING, H-C., "A mathematical programming model for water usage and treatment network design", Industrial and Engineering Chemistry Research, 38, 2666-2679, 1999.

JIYONG, K., JINKYUNG, K., JUNGHWAN, K., CHANGKYU, Y., IL, M., "A simultaneous optimization approach for the design of wastewater and heat exchange networks based on cost estimation". Journal of Cleaner Production, XXX, 1-10, 2008.

KOPPOL, A.P.R., BAGAJEWICZ, M.J., DERICKS, B.J., SAVELSKI, M.J., “On zero water discharge solutions in the process industry”, *Advances in Environmental Research*, 8, 151-171, 2003.

LIAO, Z., WU, J., JIANG, B., WANG, J., YANG, Y., „Design energy efficient water utilization systems allowing operation split“, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 16(1), 16-20, 2008.

LINNHOFF, B., HINDMARSH, E., “The pinch design method of heat exchanger networks”, *Chemical Engineering Science*, 38 (5), 745-763, 1983.

MARQUES, S.V. Minimização do Consumo de Água e da Geração de Efluentes Aquosos – Estudos de Casos. 2008. 212 p. Tese (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos), Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

NETO, R.F.M. Água para o desenvolvimento sustentável. *A Água em Revista*, Belo Horizonte, n.9, p.21-32, 1997.

QUEIROZ, E.M., PESSOA, F.L.P., “Integração de Processos: uma ferramenta para minimizar o consumo energético e o impacto ambiental”, In: MELO Jr., P.A. (Org.), *Fronteiras da Engenharia Química 1*, Série Escola Piloto de Engenharia Química, PEQ/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro: Ed. e-papers, 2005.

REBOUÇAS, A.C. Água no Brasil: abundância, desperdício e escassez. *BAHIA ANÁLISE & DADOS Salvador*, v. 13, n. ESPECIAL, p. 341-345, 2003.

SANTOS, R.P. Extensão e automatização do Diagrama de Fontes de Água usado no gerenciamento e redução do consumo de água em plantas industriais. 2007. 161 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos), Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

WANG, B., FENG, X., ZHANG, Z., „A design methodology for multiple-contaminant water networks with single internal water main“, Computers and Chemical Engineering, 27, 903-911, 2003.

WANG, Y.P., SMITH,R., “Wastewater minimization”, Chemical Engineering Science, 49(7), 981-1006, 1994a.

ZHENG, P., FENG, X., QIAN, F., CAO, D., “Water system integration of a chemical plant”. Energy Conversion and Management, 47, 2470-2478, 2006.