



Desenvolvimento de *software* em Scilab[®] para aplicação do Diagrama de Fontes de Água

Jéssica da Silva Rodrigues

Projeto Final de Curso

Orientadores

Kese Pontes Freitas Alberton, D.Sc

Flávio da Silva Francisco, D.Sc

Marcellus Guedes Fernandes de Moraes, M.Sc

Fevereiro de 2020

Desenvolvimento de *software* em Scilab[®] para aplicação do Diagrama de Fontes de Água

Jéssica da Silva Rodrigues

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

Aprovado por:

Raquel Massad Cavalcante

André Ferreira Young

Pedro Palhano de Oliveira

Orientado por:

Kese Pontes Freitas Alberton, D.Sc

Flávio da Silva Francisco, D.Sc

Marcellus Guedes Fernandes de Moraes, M.Sc

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Fevereiro de 2020

Rodrigues, Jéssica da Silva.

Desenvolvimento de *software* em Scilab® para aplicação do Diagrama de Fontes de Água/Jéssica da Silva Rodrigues. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2020.

x, 78 p., il.

Orientador: Kese Pontes Freitas Alberton.

Coorientadores: Flávio da Silva Francisco e Marcellus Guedes Fernandes de Moraes

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Bacharel em Engenharia Química, 2020.

1. Reúso de Efluentes. 2. Diagrama de Fontes. 3. Simulação de Processos. 4. Scilab. 5. Projeto Final. (Graduação – UFRJ/EQ) 6. Kese Pontes Freitas Alberton, orient. 7. Flávio da Silva Francisco, coorient. 8. Marcellus Guedes Fernandes de Moraes, coorient. I. Título.

[...] Através da ignorância ou da indiferença podemos causar danos maciços e irreversíveis ao meio ambiente, do qual nossa vida e bem-estar dependem. Por outro lado, através do maior conhecimento e de ações mais sábias, podemos conquistar uma vida melhor para nós e para a posteridade, com um meio ambiente em sintonia com as necessidades e esperanças humanas [...].

*Declaração da Conferência da ONU sobre o Meio Ambiente
Estocolmo, 1972, parágrafo 6*

AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho, primeiramente, a Deus por toda força e coragem que me deu para alcançar os meus objetivos. Agradeço à minha família, em especial aos meus pais Maria do Carmo e Manoel, por terem acreditado no meu potencial e permanecerem ao meu lado em todos os momentos, vocês são a minha vida. Agradeço ao meu namorado Rafael por todo o suporte e compreensão, essa conquista também é sua. Agradeço aos meus amigos que me acompanharam durante essa etapa da minha vida acadêmica, vocês foram fundamentais e tem minha eterna gratidão por todas as risadas, por todos os conselhos, por todo o apoio e por toda a amizade. Agradeço profundamente aos meus professores da Escola de Química, que fizeram toda a diferença na minha formação. Agradeço à Universidade Federal do Rio de Janeiro por me proporcionar uma educação pública de qualidade inquestionável, a sua luta também é a minha.

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

DESENVOLVIMENTO DE *SOFTWARE* EM SCILAB[®] PARA APLICAÇÃO DO DIAGRAMA DE FONTES DE ÁGUA

Jéssica da Silva Rodrigues

Fevereiro, 2020

Orientadores: Kese Pontes Freitas Alberton, D.Sc

Flávio da Silva Francisco, D.Sc

Marcellus Guedes Fernandes de Moraes, M.Sc

Diversas indústrias estão buscando alternativas no campo da integração de processos, aperfeiçoando técnicas já existentes e desenvolvendo métodos de produção mais limpa, com geração mínima de resíduos. Tal fato se deve a necessidade de atender as políticas ambientais recentes, visando preservar o meio ambiente e garantir o desenvolvimento sustentável. O Diagrama de Fontes de Água (DFA) surge como uma ferramenta de integração mássica que permite a maximização do reúso de efluentes dentro de uma planta industrial e a minimização do descarte de rejeitos contaminados em corpos hídricos. Além disso, ainda é possível reduzir a captação de água potável e, conseqüentemente, os custos de produção. A grande quantidade de operações e contaminantes existentes nessas plantas inviabiliza qualquer otimização manual do problema. Portanto, com o intuito de automatizar os cálculos e simplificar a obtenção de fluxogramas, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um *software* na linguagem Scilab[®] baseado na metodologia do DFA. O programa foi validado a partir da execução de exemplos que foram solucionados em trabalhos anteriores. Os resultados obtidos são coerentes e similares aos apresentados pelos autores. São disponibilizados através de tabela e do diagrama de fontes, facilitando a interpretação dos resultados e geração manual da Rede de Transferência de Massa pelo usuário.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 A importância da Água.....	1
1.2 Objetivo do trabalho.....	2
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Histórico do DFA.....	4
2.2 Automatização do DFA.....	6
2.3 O <i>Scilab</i> [®]	10
CAPÍTULO 3 – DFA APLICADO NA LINGUAGEM SCILAB [®]	11
3.1 Metodologias	11
3.1.1 Aplicação do DFA para um contaminante	11
3.1.1.1 Em caso de Máximo Reúso	12
3.1.1.2 Em caso de Múltiplas Fontes Externas.....	18
3.1.1.3 Em caso de Regeneração com Reciclo	20
3.1.2 Aplicação do DFA para multicontaminantes.....	21
3.2 <i>Software</i> desenvolvido na linguagem <i>Scilab</i> [®]	32
CAPÍTULO 4 – VALIDAÇÃO DO <i>SOFTWARE</i>	35
4.1 Estudos de Caso	35
4.1.1 O caso de Máximo Reúso de Wang e Smith (1994)	35
4.1.2 O caso de Máximo Reúso de Relvas (2005).....	37
4.1.3 O caso de Múltiplas Fontes Externas de Wang e Smith (1994)	38
4.1.4 O caso de Regeneração com Reciclo de Wang e Smith (1994).....	40
4.1.5 O caso de Regeneração com Reciclo de Relvas (2005)	41
4.1.6 O caso de Multicontaminantes de Wang e Smith (1994)	42
4.1.7 O caso de Multicontaminantes de Doyle e Smith (1997).....	44
4.1.8 O caso de Multicontaminantes de Yang <i>et al.</i> (2000).....	46

4.2 Comparação dos Resultados	48
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO	52
CAPÍTULO 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
ANEXO 1	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Formas de minimização do consumo de água primária, através de (a) reúso; (b) regeneração com reúso; e (c) regeneração com reciclo	5
Figura 2 – Representação de um equipamento de transferência de massa	6
Figura 3 – <i>Softwares</i> utilizados para síntese de redes na Integração de Processos	8
Figura 4 – Representação inicial do método DFA.....	13
Figura 5 – Representação da 2ª etapa do método DFA.....	14
Figura 6 – Representação da síntese do DFA.....	16
Figura 7 – RTM para o caso de máximo reúso.....	17
Figura 8 – Outra possibilidade de RTM para o caso de máximo reúso.	18
Figura 9 – Representação do diagrama considerando duas múltiplas fontes externas	19
Figura 10 – RTM do exemplo com duas fontes externas.....	20
Figura 11 – Representação do diagrama para o caso de Regeneração e Reciclo	21
Figura 12 – RTM considerando Regeneração e Reciclo.....	21
Figura 13 – Algoritmo para determinação da operação de referência	24
Figura 14 – Algoritmo para determinação do contaminante de referência	26
Figura 15 – DFA baseado no contaminante de referência A	30
Figura 16 – RTM para máximo reúso obtida através do diagrama de fontes	30
Figura 17 – Exemplo da planilha preenchida com os dados do problema.....	32
Figura 18 – Especificação do diretório	33
Figura 19 – Seleção da planilha (a), da aba (b) e do relatório (c) no <i>software</i>	33
Figura 20 – Algoritmo do software desenvolvido em Scilab®	34
Figura 21 – DFA do caso 4.1.1.....	36
Figura 22 - Relatório final do caso 4.1.1.....	37
Figura 23 – DFA do caso 4.1.2.....	38
Figura 24 – Relatório final do caso 4.1.2.....	38

Figura 25 – DFA do caso 4.1.3.....	39
Figura 26 – Relatório final do caso 4.1.3	39
Figura 27 - DFA do caso 4.1.4	40
Figura 28 – Relatório final do caso 4.1.4	41
Figura 29 – DFA do caso 4.1.5.....	42
Figura 30 – Relatório final do caso 4.1.5	42
Figura 31 – DFA do caso 4.1.6.....	44
Figura 32 – Relatório de vazões e de violações do caso 4.1.6	44
Figura 33 – DFA do caso 4.1.7.....	46
Figura 34 – Relatório de vazões e de violações do caso 4.1.7	46
Figura 35 – DFA do caso 4.1.8.....	48
Figura 36 – Relatório de vazões e de violações do caso 4.1.8	48

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos métodos aplicados à Integração de Processos	7
Tabela 2 – Dados limites do exemplo envolvendo um contaminante	12
Tabela 3 – Dados limites do exemplo envolvendo multicontaminantes.....	22
Tabela 4 – Dados das concentrações após ajustes	28
Tabela 5 – Dados para aplicação do método DFA considerando o contaminante de referência	29
Tabela 6 – Dados limites do problema com um contaminante de Relvas (2005)	37
Tabela 7 – Dados limites do problema com multicontaminantes de Wang e Smith (1994)	43
Tabela 8 – Dados limites do problema com multicontaminantes de Doyle e Smith (1997)....	45
Tabela 9 – Dados limites do problema com multicontaminantes de Yang <i>et al.</i> (2000).....	47
Tabela 10 – Comparação entre os resultados encontrados pelos autores e pelo software desenvolvido.....	49
Tabela 11 – Comparação das metodologias do caso 4.1.6.....	50
Tabela 12 – Comparação dos resultados para o caso 4.1.8.....	51

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 A IMPORTÂNCIA DA ÁGUA

Estima-se que 97,5 % da água existente no mundo é salgada e não é adequada ao nosso consumo direto nem à irrigação da plantação. Dos 2,5 % de água doce, a maior parte (69 %) é de difícil acesso, pois está concentrada nas geleiras, 30 % são águas subterrâneas (armazenadas em aquíferos) e 1% encontra-se nos rios (ANA, 2020).

Além disso, segundo o relatório da UNESCO de 2019, o consumo de água pela população mundial aumenta a uma taxa de 1 % ao ano desde a década de 1980, o que significa que esse número representará, até 2050, um acréscimo da demanda por água de 20 a 30 % em relação ao nível atual de uso (BUREK *et al.*, 2016 *apud* UNESCO, 2019). Isso pode ser explicado, em grande parte, pelo aumento do uso de água pelos setores agropecuário, urbano e industrial, sendo atribuído ao crescimento populacional, desenvolvimento econômico e mudanças nos padrões de consumo (ONU, 2020).

Para frear o consumo descontrolado de insumos naturais, surge a necessidade global de discutir uma saída para esse problema. Através da ONU, o mundo começou a discutir sobre o Desenvolvimento Sustentável dos recursos finitos de água doce e a sua importância para o progresso da humanidade. Em 1987, esse termo foi definido pelo Relatório Brundtland como:

[...] o desenvolvimento sustentável é um processo de mudança no qual a exploração dos recursos, o direcionamento dos investimentos, a orientação do desenvolvimento tecnológico e a mudança institucional estão em harmonia e reforçam o atual e futuro potencial para satisfazer as aspirações e necessidades humanas. (Relatório Brundtland, 1987, p. 25).

Em 1992, a ONU promoveu a Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento, mais conhecido como ECO-92, no Rio de Janeiro. Nessa reunião, diversos países, incluindo o Brasil, se comprometeram a seguir o documento “Agenda 21”, que visa o estabelecimento de um planejamento estratégico para alcançar o desenvolvimento sustentável da sociedade, conciliando métodos de proteção ambiental, justiça social e eficiência econômica.

Uma das ações resultantes desse plano foi a criação de um Sistema de Gerenciamento Ambiental, implantado nas empresas como uma ferramenta de adequação dos interesses empresariais privados à manutenção da qualidade ambiental coletiva. Para padronizar a forma

como esse sistema de gestão era aplicado, foi elaborado o conjunto de normas ISO 14000, permitindo a identificação preventiva das possíveis melhorias a serem realizadas para atingir a proporção correta entre a lucratividade empresarial e a proteção ambiental (LAYRARGUES, 2000).

Apesar de ser uma certificação ambiental com um caráter voluntário, as indústrias sentiram a necessidade de incorporar a ISO 14000 em seus processos para continuarem competitivas no mercado. Com isso, a adoção de tecnologias limpas no cenário industrial se tornou cada vez mais comum. Elas representam o conjunto de técnicas e métodos aplicados aos processos de uma empresa que objetiva a atenuação dos impactos ambientais.

No caso do controle dos recursos hídricos das indústrias, as tecnologias limpas mais utilizadas atualmente focam no tratamento “*end of pipe*”, onde os efluentes das operações são tratados e, em seguida, despejados no meio ambiente (OVERCASH, 1997). Porém, esse tipo de técnica permite o reúso indireto do efluente por outros usuários localizados a jusante da fonte do descarte, o que nem sempre é o mais adequado, pois existe a possibilidade de a água não apresentar a qualidade requerida.

A eficiência da aplicação de tecnologias limpas no gerenciamento de recursos hídricos pode ser elevada através do desenvolvimento de técnicas de reúso direto de efluentes. Nesse caso, o usuário final costuma ser o próprio produtor do efluente e, por isso, consegue minimizar o descarte de água residuária no meio ambiente e maximizar o seu reúso dentro da mesma planta, tornando o processo industrial mais sustentável.

No âmbito do gerenciamento ambiental das indústrias, a Integração de Processos se torna uma importante ferramenta aplicada na busca por soluções capazes de conciliar um baixo investimento com a redução de impactos ambientais. Isso porque ela atua na modificação de processos, sem gerar prejuízos à qualidade do produto, e permite o uso eficiente de insumos que, muitas vezes, são desperdiçados ao final do processo.

Contudo, indústrias de médio e grande porte costumam ter dificuldades para integrar todo o seu sistema de produção por conta da complexidade das operações envolvidas. Na maioria das vezes, resultam em problemas de otimização mássica e energética não triviais que exigem ferramentas computacionais para auxiliar na resolução dos problemas.

1.2 OBJETIVO DO TRABALHO

Para facilitar a obtenção de processos mais eficientes envolvendo os recursos hídricos de uma indústria, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de um *software* programado na linguagem Scilab[®] que objetiva a aplicação da metodologia de Diagrama de Fontes de Água para obtenção de Redes de Transferência de Massa (RTM) a partir da maximização do reúso de efluentes dentro de uma planta industrial. O Scilab[®] foi escolhido como ambiente de programação por ser um *software* livre e de fácil manipulação. Além disso, ele dispõe de ótimos pacotes de cálculo numérico para resolução de problemas gerais no ramo das engenharias.

O trabalho foi conduzido a fim de atender os seguintes objetivos específicos:

1. propor um *software* capaz de resolver problemas de maximização do reúso de efluentes de operações de carga fixa, contemplando os casos de máximo reúso, múltiplas fontes externas e regeneração com reciclo para um e multicontaminantes;
2. oferecer um ambiente de fácil utilização, de modo que o usuário interfira minimamente no programa quando for executá-lo;
3. facilitar a interpretação dos resultados pelo usuário através da disponibilização de uma tabela contendo todas as informações de vazão captada e reusada, de concentração dos contaminantes e de violações ocorridas;
4. demonstrar, através da representação do Diagrama de Fontes, o arranjo de reúso obtido e, assim, facilitar a geração do fluxograma de forma manual pelo usuário.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HISTÓRICO DO DFA

Na década de 1970, o mundo enfrentou uma grande crise energética iniciada pela diminuição na oferta de petróleo e pela grande dependência mundial dessa matriz. Com isso, houve um aumento considerável dos investimentos em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) na área tecnológica, o que impulsionou a busca pelo aproveitamento racional de matérias-primas e de recursos energéticos para o sistema de produção industrial (MIRRE *et al.*, 2015).

Foi nessa época que a Integração de Processos alavancou e foi enquadrada como um dos ramos mais importantes da Engenharia de Processos. Com a possibilidade de minimizar os custos de produção, garantir a máxima eficiência com relação ao uso de insumos e reduzir os danos ao meio ambiente, a Integração de Processos se refere a um conjunto de métodos sistemáticos que são aplicados aos processos produtivos com diversas finalidades (MIRRE *et al.*, 2015).

A Integração de Processos teve como base o desenvolvimento de redes de trocadores de calor, onde é possível gerar fluxogramas com perfis de minimização de consumo de energia, aproveitando o potencial energético de correntes de processo (MIRRE *et al.*, 2015). Em 1978, Linnhoff e Flower começaram a desenvolver a Tecnologia *Pinch* – Ponto de Estrangulamento –, um método heurístico-teórico baseado em fundamentos da termodinâmica que analisa de forma sistemática o comportamento das correntes de processos (VALLE, 2005).

Posteriormente, esse método foi estendido a sistemas de transferência de massa por El-Halwagi e Manousiouthakis (1989), iniciando os estudos no campo da minimização de efluentes (VALLE, 2005). Os autores propuseram a transferência de rejeitos gasosos de correntes mais ricas para correntes mais pobres em contaminantes, considerando uma diferença mínima entre concentrações, mantendo um procedimento análogo ao que é aplicado no caso energético (PEIXOTO, 2011).

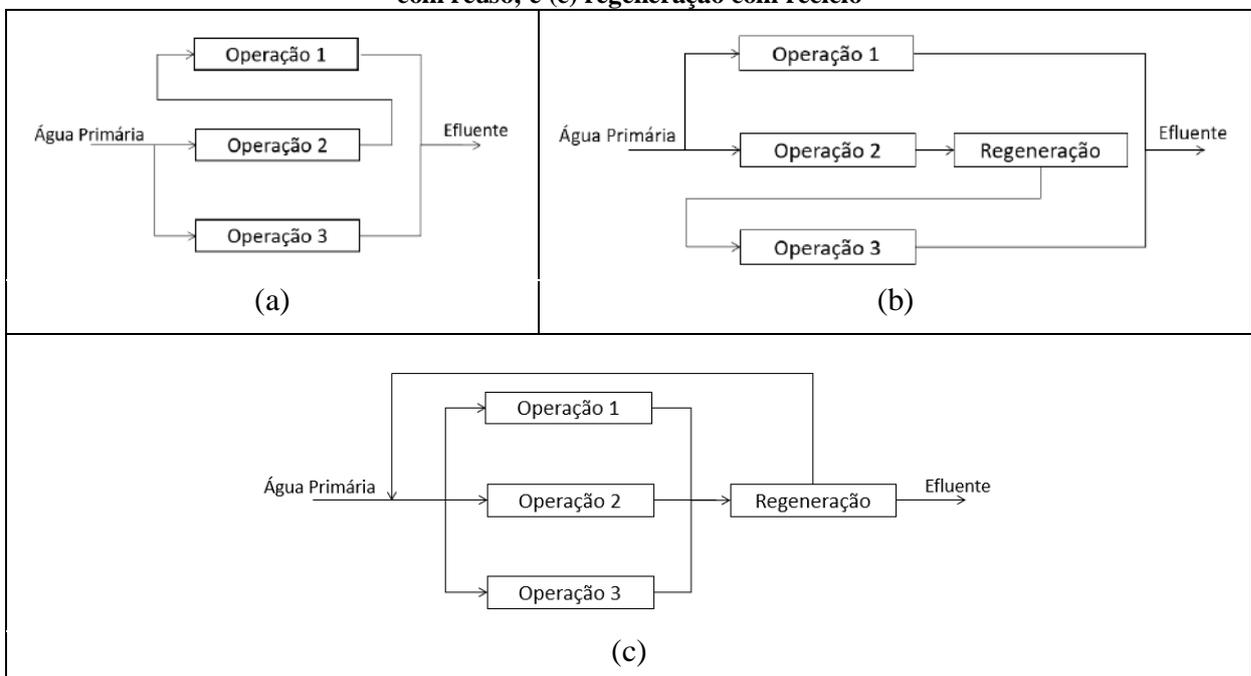
Em 1994, Wang e Smith se basearam nas ideias de Linnhoff e Hindmarsh (1983) para aplicar, pela primeira vez, o método de integração mássica em processos que utilizam água. Nos trabalhos publicados pelos autores, foram apresentadas técnicas para determinação da quantidade mínima de água a ser utilizada em processos e da mínima vazão de efluentes, além

de definir as regras para síntese da rede de transferência, abordando casos com um e multicontaminantes (VALLE, 2005).

Ainda na mesma década, Castro *et al.* (1999) provou que o método de Wang e Smith (1994) não funcionava para todos os problemas e propôs uma metodologia alternativa onde o cálculo de consumo mínimo de água e a síntese da rede de transferência de massa eram obtidos simultaneamente. Logo depois, Gomez *et al.* (2000) apresentou um algoritmo baseado na construção de um diagrama de intervalos de concentração (GOMES, 2007).

Embasado pela tecnologia *Pinch* e pelos trabalhos de Castro *et al.* (1999) e Gomez *et al.* (2000), Gomes *et al.* (2002) desenvolveu um novo modelo algorítmico-heurístico para minimização de efluentes aquosos chamado Diagrama de Fontes de Água (DFA). Esse algoritmo permitiu determinar as metas de consumo de água externa e a síntese da RTM de forma simultânea, podendo ser aplicado na solução de problemas com um ou multicontaminantes. Os casos passíveis de resolução incluem o reúso (Figura 1a), regeneração com reúso (Figura 1b) e regeneração com reciclo (Figura 1c) envolvendo processos com restrição de vazão, com múltiplas fontes externas e com perdas inerentes ao processo.

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



Fonte: Baseado em Mirre *et al.*, 2012.

Os autores citados acima aplicaram essa metodologia somente para processos com operações de carga fixa de contaminante. Nesse tipo de situação, é considerada a qualidade das correntes com relação à concentração limite de entrada e saída dos contaminantes. Além

disso, também é preciso respeitar os valores limites de vazão impostos pelo processo, mantendo-os iguais na entrada e na saída de cada operação (FAN *et al.*, 2012 *apud* FRANCISCO, 2017). Portanto, em operações de carga fixa, são utilizados apenas equipamentos de transferência de massa, como é mostrado na Figura 2, sendo $C_{in,j}^{lim}$ a concentração limite de entrada do contaminante j ; $C_{out,j}^{lim}$ a concentração limite de saída do contaminante j ; $C_{in,j}^{água}$ a concentração de entrada do contaminante j presente na água; $C_{out,j}^{água}$ a concentração de saída do contaminante j presente na água.

Figura 2 – Representação de um equipamento de transferência de massa



Fonte: Baseado em Francisco, 2017.

Após a publicação de Gomes *et al.* (2002), vários outros trabalhos foram desenvolvidos propondo a evolução do método do Diagrama de Fontes de Água. Para o caso de multicontaminantes, Francisco (2017) se baseou nos trabalhos de Mirre (2007), Santos (2007), Carvalho *et al.* (2009), Calixto (2011) e Calixto *et al.* (2015) para propor algoritmos mais aprimorados do que os apresentados por Gomes *et al.* (2013) a fim de escolher a operação e o contaminante de referência. Dessa forma, pode-se reduzir o número de violações na RTM obtida através do DFA. Esses procedimentos são descritos com mais detalhes no Capítulo 3 (item 3.1.2).

2.2 AUTOMATIZAÇÃO DO DFA

Devido à complexidade encontrada nos processos industriais, tem-se a necessidade de aplicar os métodos de Integração de Processos a partir de *softwares*, solucionando os problemas de otimização de forma mais simples e rápida.

De acordo com o levantamento realizado por Peixoto (2011), diversos métodos já foram propostos para a minimização do consumo de água e do descarte de efluentes na indústria. Tais metodologias podem ser classificadas de duas formas: uma com a abordagem termodinâmica-heurística-evolutiva e outra com a abordagem da programação matemática e otimização (VALLE, 2005). As diferenças entre elas estão listadas na Tabela 1.

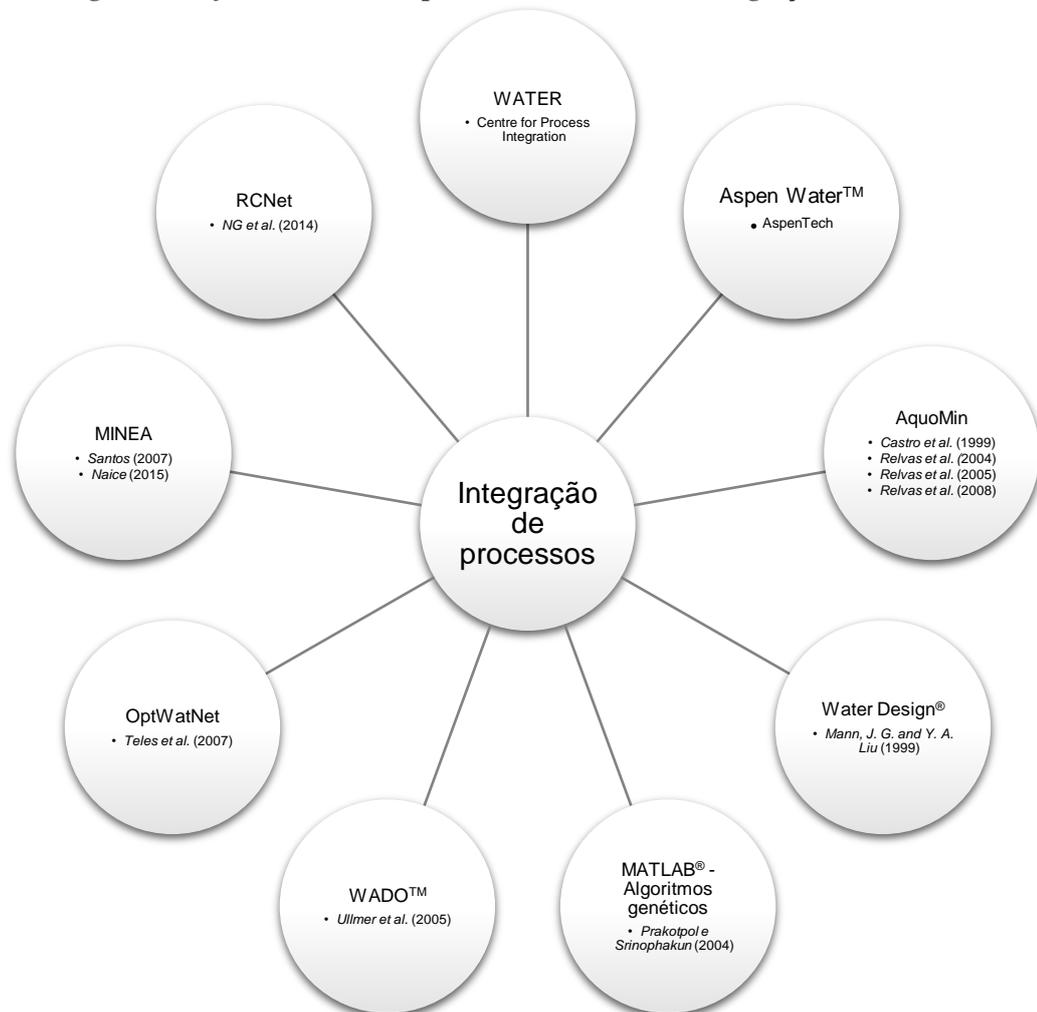
Tabela 1 – Classificação dos métodos aplicados à Integração de Processos

<i>Método</i>	<i>Termodinâmica-heurística-evolutiva</i>	<i>Programação matemática e otimização</i>
<i>Características</i>	<ul style="list-style-type: none"> → Parte de princípios de teorias termodinâmicas e heurísticas; → A sequência lógica da evolução do fluxograma segue regras geradas com base em experiências prévias. 	<ul style="list-style-type: none"> → Minimização ou maximização da função objetivo; → Maior facilidade em se trabalhar com multicontaminantes; → Síntese da rede é resultado do método de otimização.
<i>Limitações</i>	<ul style="list-style-type: none"> → O coeficiente de transferência de massa é uma função linear da composição (não é sempre realidade); → Restrição na quantidade de contaminantes que podem ser incluídos no problema (nos métodos mais antigos); → Síntese da rede não é feita de forma automática. 	<ul style="list-style-type: none"> → Problemas de otimização devido a não linearidade das restrições; → Dificuldades em encontrar um ótimo global.
<i>Exemplos</i>	<ul style="list-style-type: none"> → Metodologia Pinch; → DFA. 	<ul style="list-style-type: none"> → Programação linear: Método SIMPLEX; → Programação linear inteira mista: “branch and bound” e “branch and cut”; → Programação não linear: Newton-Raphson, método de maior gradiente, método de Hooke e Jeeves e Rosenbrock; → Programação não linear inteira mista: lagrangianos aumentados e “branch and bound”; → Programação binária: Algoritmo de Balas.

Fonte: Construção própria baseada em Peixoto, 2011.

Naice (2015) elencou diversos programas desenvolvidos na área de otimização de redes hídricas, sendo alguns deles comerciais, como é mostrado na Figura 3. Com isso, se torna visível a quantidade de *softwares* implementados para a solução de problemas relacionados à minimização do consumo de água, evidenciando a importância do assunto.

Figura 3 – Softwares utilizados para síntese de redes na Integração de Processos



Fonte: Construção própria baseada em Naice, 2015.

De acordo com Naice (2015):

- o WATER foi desenvolvido em programação matemática e é voltado para o projeto dos sistemas que utilizam água nas indústrias de processo. Seu uso é restrito a membros do *Centre for Process Integration*, da Universidade de Manchester;
- o *Aspen Water™*, da *AspenTech®*, utiliza a otimização matemática para a redução da geração de efluentes e dos custos operacionais. É uma ferramenta para a síntese de rede dos processos que utilizam água, identificando os pontos de otimização da planta;
- o *software AquoMin* foi baseado na tecnologia *pinch* e na programação matemática. Visa a construção de redes de transferência de massa para problemas com um contaminante. Relvas et al. (2004) o atualizou para permitir a utilização conjunta com o *General Algebraic Modeling System (GAMS)*, possibilitando a solução de

regeneração com reúso. No ano seguinte, Relvas *et al.* (2005) incluiu a possibilidade de regeneração com reciclo. Apesar de todas as atualizações, o *AquoMin* soluciona apenas problemas envolvendo um contaminante, além de ser limitado pelo número de operações, fontes externas e regeneradores;

- Prakotpol e Srinophakun (2004) desenvolveram um modelo baseado em algoritmos genéticos (programação não-linear inteira mista) em MATLAB[®] para resolver o problema de minimização de efluentes industriais;
- Ullmer *et al.* (2005) desenvolveram o *software WADOTM*, que possui inicialização por regras heurísticas seguida de otimização matemática para efetuar o problema de programação não-linear inteira mista e encontrar o menor custo da rede;
- Teles *et al.* (2007) criaram o *OptWatNet*, um *software* de síntese de rede de água de sistemas multicontaminantes. São disponibilizadas quatro estratégias diferentes, sendo duas de programação linear, para inicializar o problema geral de programação não-linear;
- o MINEA foi desenvolvido por Santos (2007), com uma base de cálculo heurística (DFA). Com esse método, o *software* processa os problemas de um e multicontaminantes. Para esse último caso, a escolha da operação de referência e o ajuste das concentrações são baseados no cálculo do Fator Restritivo de Santos (2007);
- o *software RCNet* (NG *et al.*, 2014) é baseado na análise *pinch* para determinar as metas de consumo mínimo de recursos e utiliza as técnicas de programação matemática para gerar a Rede de Transferência de um ou multicontaminantes.

Para esse trabalho, o *software Water Design[®]* foi consultado para complementar a pesquisa de Naice (2015), porém o seu desenvolvimento se deu em *Visual Basic 6.0*, que já está obsoleto. Trata-se de um *software* para desenvolvimento de análises e sínteses do método *pinch*.

Quando disponíveis, a maioria dos *softwares* possui um alto custo para aquisição de licença ou é de uso restrito à um grupo de pessoas. Além disso, percebe-se que poucos atendem por completo a necessidade da indústria, contemplando apenas parte dos casos prováveis de ocorrer. Por isso, é importante ressaltar a necessidade do desenvolvimento de *softwares* acessíveis que combinem a facilidade do método heurístico com a robustez da

programação matemática e que sejam capazes de resolver os mais variados problemas industriais existentes atualmente.

2.3 O SCILAB[®]

O Scilab[®] é um *software* livre e de código aberto a qualquer usuário, voltado para o cálculo numérico, com uma linguagem de programação de alto nível. Com isso, esse *software* é utilizado em aplicações científicas e de engenharia, sendo possível modificá-lo e distribuí-lo conforme a necessidade (ESI Group, 2019). Ele possui bibliotecas com diversas funcionalidades, o que o torna uma alternativa viável a outros programas pagos comumente utilizados por empresas e pelo mundo acadêmico, como o MATLAB[®].

Neste trabalho, o Scilab[®] (versão 6.0.2) foi escolhido como ferramenta para o desenvolvimento do código baseado na metodologia do DFA. A preferência foi motivada pela característica gratuita e acessível do *software*, além de ser uma linguagem de programação viável de ser difundida no meio acadêmico.

CAPÍTULO 3 – DFA APLICADO NA LINGUAGEM SCILAB[®]

Com o intuito facilitar a resolução de problemas complexos, o método de Diagrama de Fontes de Água, desenvolvido por Gomes *et al.* (2002), foi programado na linguagem Scilab[®] neste trabalho. O algoritmo utilizado foi baseado no aprimoramento dos procedimentos de Castro *et al.* (1999) e Gomez *et al.* (2000). Apresentado por Gomes *et al.* (2007), esse método contemplava sistemas com apenas um contaminante, assumindo as possibilidades de máximo reúso com uma ou múltiplas fontes externas de água e regeneração com reciclo.

Para o caso de sistemas com multicontaminantes, foi adotado o algoritmo demonstrado por Gomes *et al.* (2013), considerando a transferência de massa de contaminantes de maneira simultânea em cada operação de carga fixa. Entretanto, com o propósito de aplicar uma abordagem mais atual para a escolha do contaminante de referência e da operação de referência, o trabalho de Francisco (2017) foi empregado nas duas primeiras etapas do método.

Neste capítulo, são apresentadas as metodologias que embasaram a construção do código em linguagem Scilab[®]. Além disso, é definido o procedimento para a execução do *software* desenvolvido nesse trabalho.

3.1 METODOLOGIAS

3.1.1 APLICAÇÃO DO DFA PARA UM CONTAMINANTE

Os dados de entrada do problema se resumem às características dos processos industriais analisados, que incluem:

- a informação se possui reciclo ou não;
- a quantidade de operações;
- as vazões limites de cada operação ($f_{L,op}$);
- a concentração máxima do contaminante de cada fonte externa (C_{fe});
- a concentração máxima do contaminante na entrada de cada operação ($C_{in,op}^{max}$);
- a concentração máxima do contaminante na saída de cada operação ($C_{out,op}^{max}$);
- a concentração do contaminante da saída do processo de regeneração (C_{reg}), se houver.

3.1.1.1 EM CASO DE MÁXIMO REÚSO

- **1ª etapa:** Representação inicial do diagrama a partir dos dados de entrada

Os dados limites de entrada do problema são dispostos na Tabela 2, de modo a facilitar a visualização das informações de entrada.

Tabela 2 – Dados limites do exemplo envolvendo um contaminante

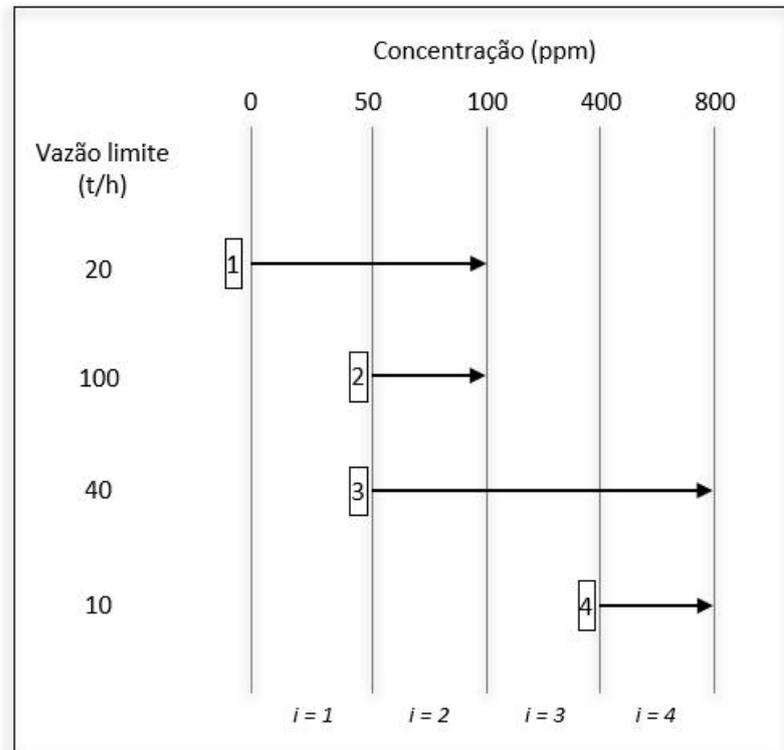
Operação	f_L (t/h)	$C_{in,max}$ (ppm)	$C_{out,max}$ (ppm)	Δm (g/h)
1	20	0	100	2000
2	100	50	100	5000
3	40	50	800	30000
4	10	400	800	4000

Fonte: Wang e Smith, 1994.

As operações são organizadas em ordem crescente de C_{in} . Se houver mais de uma operação com a mesma C_{in} , deve-se ordenar de forma crescente de C_{out} . Se existir mais de uma operação com C_{in} e C_{out} iguais, é preciso ordenar em relação aos valores crescentes de vazão (FRANCISCO, 2017).

Na Figura 4, graficamente, as concentrações serão os limites de cada intervalo, indicadas por linhas verticais e organizadas do menor para o maior valor. Já as operações, são representadas por setas horizontais, começando pelo C_{in} e terminando no C_{out} da respectiva operação. No lado esquerdo do diagrama, são disponibilizadas as vazões limites de cada operação a título de informação. A fonte externa deve ser incluída no diagrama apenas como mais um intervalo de concentração, onde a vazão é considerada ilimitada.

Figura 4 – Representação inicial do método DFA



Fonte: Gomes *et al.*, 2007.

➤ **2ª etapa:** Cálculo da quantidade de contaminante transferido

Através da Equação 1, deve-se calcular a quantidade de contaminante que será transferido por cada operação *op* em cada intervalo *i*.

$$\Delta m_{op,i} = f_{L,op} \times (C_{out,i} - C_{in,i}) \quad (1)$$

em que:

$\Delta m_{op,i}$ → quantidade de massa transferida de contaminante de uma certa operação *op* de um certo intervalo *i*, em g/h;

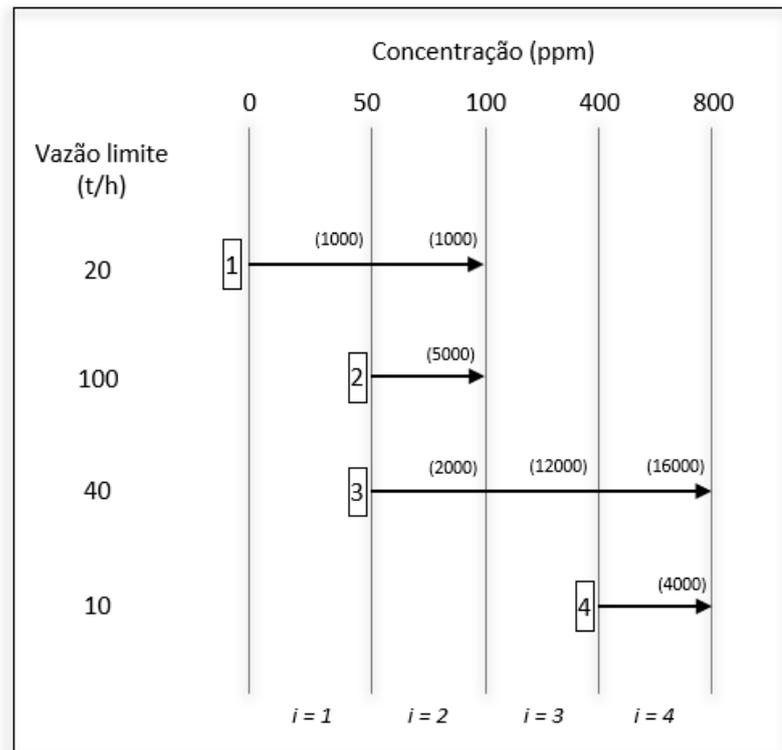
$f_{L,op}$ → vazão limite da operação *op*, em t/h;

$C_{in,i}$ → concentração de entrada do contaminante no intervalo *i*, em ppm;

$C_{out,i}$ → concentração de saída do contaminante no intervalo *i*, em ppm;

Na representação, o $\Delta m_{op,i}$ é exibido entre parênteses em cima da respectiva operação, dentro de cada intervalo de concentração, conforme a Figura 5.

Figura 5 – Representação da 2ª etapa do método DFA



Fonte: Gomes *et al.*, 2007.

➤ **3ª etapa:** Cálculo da vazão necessária para atender cada operação em cada intervalo

A alimentação das operações dependerá das vazões das fontes externas, consideradas ilimitadas, e das vazões máximas de cada fonte interna. Com isso, é preciso avaliar a vazão necessária para transferir toda a quantidade de contaminante existente em cada intervalo.

Segundo Gomes *et al.* (2007), algumas regras heurísticas devem ser adotadas para a aplicação do DFA, a saber:

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

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

(iii) para operações que estão presentes em mais de um intervalo, a prioridade de alocação provém da corrente da mesma operação.

No problema abordado, considera-se apenas uma fonte externa com a concentração de 0 ppm de contaminante. Em $i = 1$ e $i = 2$, ela será responsável por ceder água para todas as operações que não possuem fontes internas com $C_{out} \leq C_{in,i}$. Portanto, as operações 1, 2 e 3 serão alimentadas pela fonte externa de 0 ppm nos primeiros intervalos de cada operação,

garantindo o atendimento da regra (i). A vazão de alimentação será calculada a partir da Equação 2.

$$f_{e,op,i} = \frac{\Delta m_{op,i}}{(C_{out,i} - C_{e,k})} \quad (2)$$

em que:

$f_{e,op,i}$ → vazão cedida pela fonte externa à operação op no intervalo i , em t/h;

$C_{e,k}$ → concentração da fonte externa k , em ppm.

Em $i = 2$, ainda é necessário definir qual será a fonte irá alimentar a operação 1. Para garantir o máximo reúso dentro da planta, a regra (iii) deve ser seguida. Sendo assim, a vazão disponível no primeiro intervalo da operação 1 será transferida para o seu segundo intervalo. A fim de verificar se essa vazão consegue assimilar a quantidade de contaminante a ser transferido pelo intervalo 2, calcula-se o $\Delta m_{1,2}$ através da Equação 1, substituindo o valor da vazão limite (f_L) pelo valor da vazão transferida do intervalo anterior ($fi_{1,1}$). Se o Δm calculado com f_L for diferente do Δm calculado com $fi_{1,1}$, então essa operação precisará de mais fontes de reúso. No caso do exemplo, a operação 1 consegue ser satisfeita com o reúso da própria operação.

Em $i = 3$, a operação 3 deverá ser alimentada da mesma forma que a operação 1, com $fi_{3,2}$, primeiramente. Então, é calculado o novo Δm com $fi_{3,2}$ e comparado com o Δm calculado com f_L . Percebe-se que a vazão transferida do intervalo anterior não é suficiente para atender ao Δm do intervalo de concentração de 100 a 400 ppm. A vazão restante necessária é calculada a partir da Equação 3. As operações 1 e 2 podem ser reusadas na operação 3, pois elas são fontes internas caracterizadas por ter vazão suficiente para a alimentação com $C_{out} \leq 100$ ppm.

Na análise de máximo reúso, não existe uma regra fixa para escolha entre as fontes internas 1 e 2, já que ambas dispõem da mesma C_{out} . Haveria regras se as concentrações de saída das fontes internas possuísem valores de C_{out} distintos (o maior C_{out} dentre as fontes seria escolhido) ou se a análise econômica do problema fosse o objetivo. Como esse não é o caso do exemplo citado, a corrente de saída da operação 1 foi a escolhida para o reúso na operação 3.

Em $i = 4$, a operação 3 consegue ser satisfeita com o reúso da própria operação. Já a operação 4 pode ser alimentada apenas pela fonte interna 2, visto que toda a vazão disponível da operação 1 foi utilizada no intervalo anterior, e pela fonte externa 0 ppm. A escolha será

pautada pela regra de preferência pelo reúso interno no lugar do uso da fonte externa. A vazão necessária é calculada pela Equação 3. Se a $fi_{2,2}$ não fosse suficiente para suprir o $\Delta m_{4,4}$, então seria preciso resgatar água da fonte externa, porém esse não é o caso do exemplo.

$$fi_{op,i} = \frac{\Delta m_{op,i}}{(C_{out,i} - C_{out,j})} \quad (3)$$

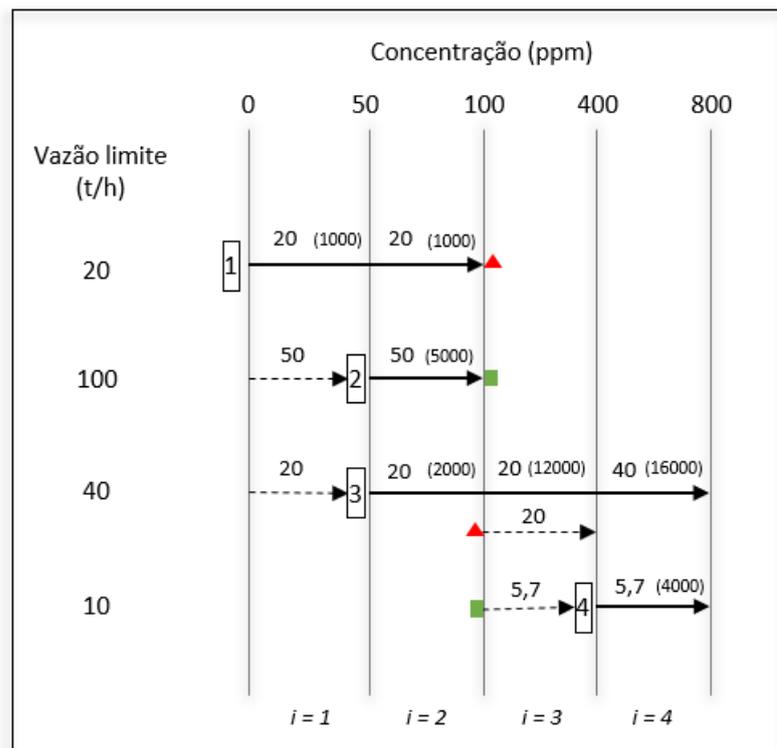
em que:

$fi_{op,i}$ → corresponde à vazão cedida pela fonte interna à operação op no intervalo i , em t/h;

$C_{out,j}$ → corresponde à concentração de saída da fonte interna j , em ppm.

Todas as alimentações são representadas através de linhas tracejadas no diagrama (Figura 6).

Figura 6 – Representação da síntese do DFA



Fonte: Gomes *et al.*, 2007.

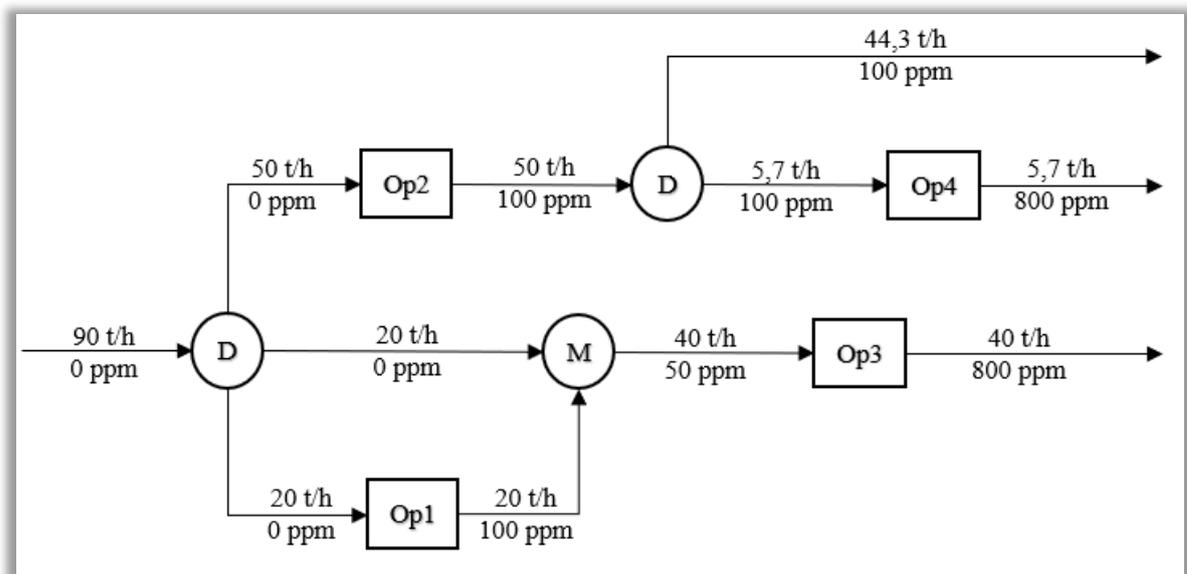
➤ **4ª etapa:** Geração da Rede de Transferência de Massas

A RTM é um fluxograma gerado a partir dos resultados obtidos com o diagrama de fontes. Nele são mostrados os misturadores, os separadores, as operações e os sentidos das

correntes. De forma bem simples, é possível obter uma visão macro da planta com a melhor opção para o máximo reúso.

Para o exemplo, o fluxograma da rede de água obtido é o apresentado na Figura 7. Ele mostra que 90 t/h foi captado da fonte externa para alimentação das operações 1, 2 e 3; que toda a operação 1 foi reutilizada na operação 3; que 5,7 t/h da operação 2 foi empregada na operação 4; e que 45,7 t/h de efluente com 800 ppm de contaminante e 44,3 t/h de efluente com 100 ppm, foram enviados para a unidade de tratamento de resíduos.

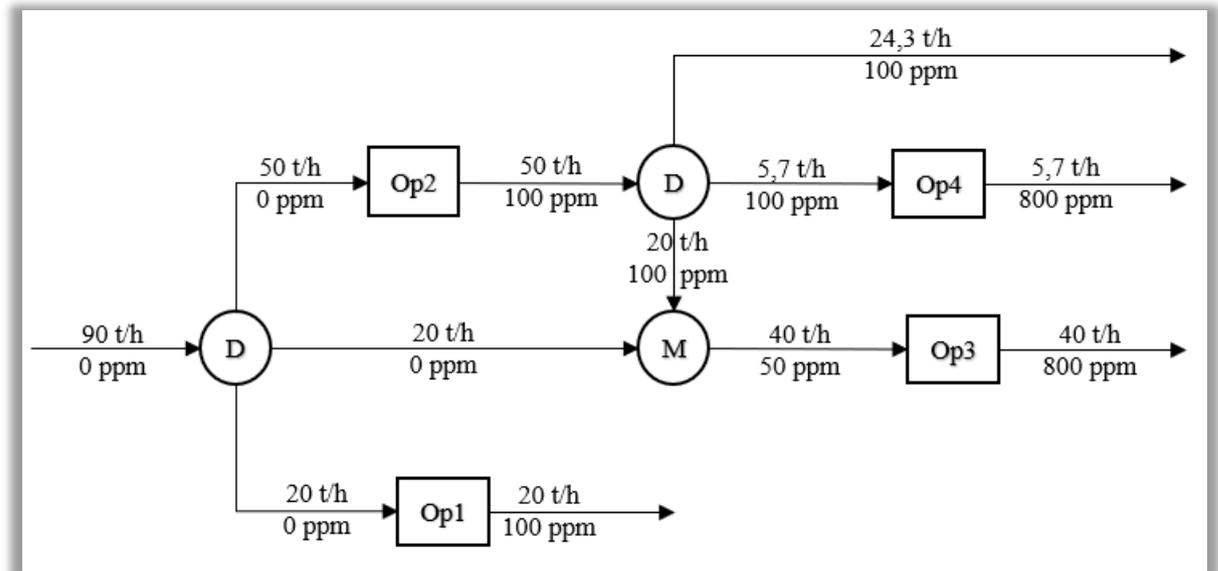
Figura 7 – RTM para o caso de máximo reúso



Fonte: Gomes *et al.*, 2007.

A disposição das correntes desse fluxograma foi baseada, principalmente, pela escolha aleatória do reúso da fonte interna 1 na operação 3. Porém, a RTM ficaria um pouco diferente se a seleção de reúso fosse pela fonte interna 2, como é mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Outra possibilidade de RTM para o caso de máximo reúso.



Fonte: Perlingeiro, 2016.

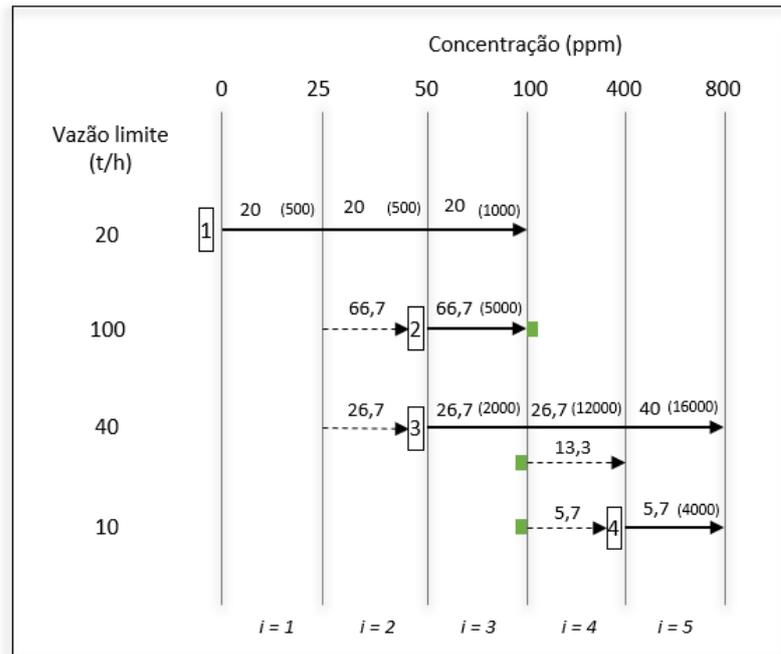
Para uma aplicação onde os custos com tubulações, bombas, entre outros equipamentos, não são considerados, a escolha da fonte interna nas condições apresentadas pode ser realizada de forma aleatória. Porém, se os valores com investimento e manutenção da planta forem levados em conta, a correta seleção da fonte, a fim de gerar o arranjo da rede de transferência de massa de menor custo, fará toda a diferença na decisão.

3.1.1.2 EM CASO DE MÚLTIPLAS FONTES EXTERNAS

O procedimento para resolução do caso em que existe mais de uma fonte externa é muito parecido com o adotado para o máximo reúso. A única alteração a ser feita é a adição das linhas verticais com a concentração das fontes externas no diagrama. Com isso, a disponibilidade de água irá aumentar, assim como a quantidade de intervalos e possibilidade de uso de fontes externas mais “sujas”, ou seja, com concentrações maiores de contaminante. Isso se torna importante quando o custo de captação é considerado, pois as fontes com as concentrações mais altas costumam ser as mais baratas do mercado (GOMES *et al.*, 2007). Por isso, a seleção do uso entre as fontes externas será realizada pelo critério de custo, apesar de não estarmos realizando esse tipo de análise nesse exemplo.

Sendo assim, um novo diagrama é obtido (Figura 9) com a consideração de duas fontes externas no exemplo: $f_{e,1}$, com a $C_{e,1} = 0$ ppm, e $f_{e,2}$, com a $C_{e,2} = 25$ ppm.

Figura 9 – Representação do diagrama considerando duas múltiplas fontes externas



Fonte: Gomes *et al.*, 2007.

Em $i = 1$, a operação 1 foi atendida pela fonte externa de 0 ppm, única fonte disponível para alimentá-la. Após essa captação, o Δm de todos os intervalos da operação 1 foi satisfeito.

Em $i = 2$, as operações 2 e 3 acabam sendo supridas pela fonte externa com maior concentração de contaminante (25 ppm). Os valores das vazões calculados pela Equação 2 sofrem alteração em relação ao exemplo de máximo reúso devido à mudança de C_e . Agora, é necessário captar mais água com concentração de 25 ppm, pois ela consegue assimilar uma menor quantidade de contaminante se comparada com a água com 0 ppm.

Em $i = 3$, a operação 2 é totalmente completada e a operação 3 é parcialmente satisfeita.

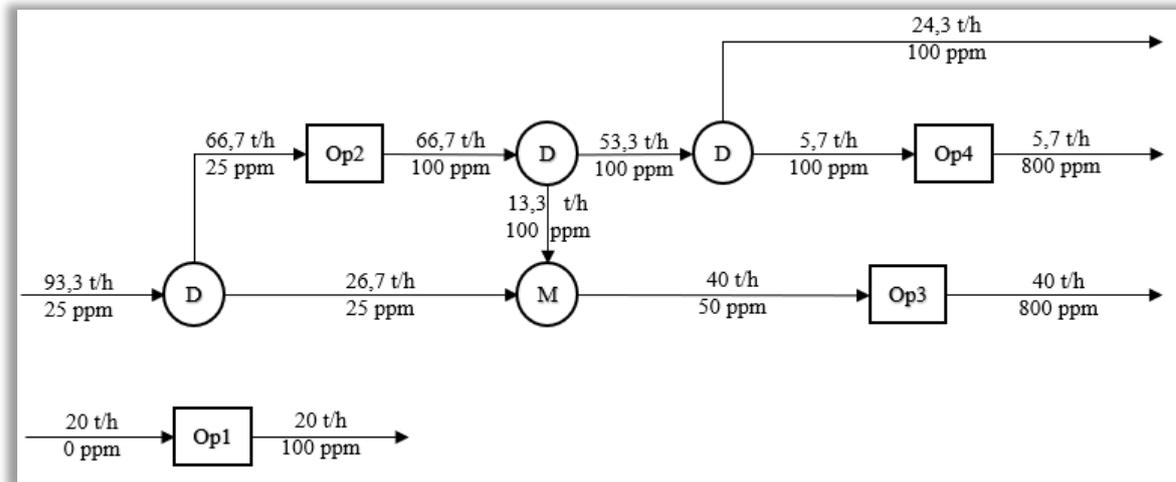
Em $i = 4$, é verificado, através da Equação 1, que a operação 3 necessita de mais vazão uma maior quantidade de água para assimilar o Δm do intervalo. Com isso, as fontes internas 1 e 2, seguidas das duas fontes externas em ordem decrescente de concentração, estão aptas a ceder água, pois possuem a $C_{out} \leq C_{in,4}$. Uma parte da corrente de saída da operação 2 foi alocada para alimentar a operação 3.

Em $i = 5$, a operação 3 já foi completamente satisfeita. Já a operação 4 precisa ser suprida com alguma fonte com concentração menor que 400 ppm. Para isso, as fontes internas 1 e 2 e as fontes externas são apropriadas para serem as suas fornecedoras. Com base na

Equação 3, calcula-se a vazão necessária para atender ao Δm do intervalo. No exemplo, a fonte interna 2 foi selecionada para ceder seu efluente para a operação 4.

Após executar todas essas etapas, o fluxograma gerado é o mostrado Figura 10.

Figura 10 – RTM do exemplo com duas fontes externas



Fonte: Gomes *et al.*, 2007.

No final, 20 t/h da fonte externa de 0 ppm foi utilizada na operação 1. Além disso, 93,3 t/h da fonte externa de 25 ppm foi alocado nas operações 2 e 3, sendo 66,7 t/h na primeira e 26,7 t/h na segunda, respectivamente. A operação 2, com $C_{out} = 100$ ppm, alimenta a operação 4 com uma vazão igual a 5,7 t/h. E a operação 3, além de receber água da fonte externa, também possui como fornecedora a fonte interna 2, que cede 13,3 t/h de efluente. Foram enviados para a estação de tratamento uma corrente de 44,3 t/h com 100 ppm de contaminante e outra corrente de 45,7 t/h com 800 ppm.

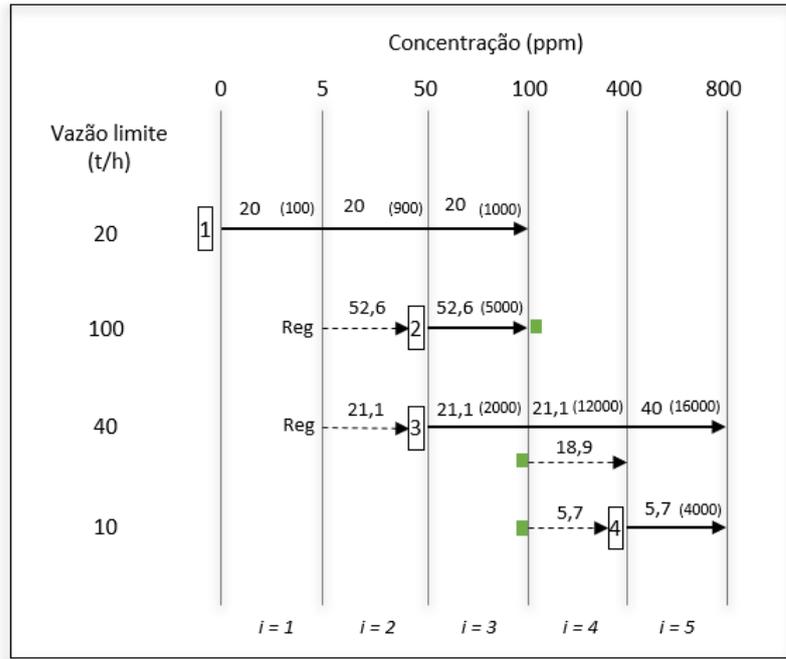
3.1.1.3 EM CASO DE REGENERAÇÃO COM RECICLO

O caso em que as operações reusam um efluente regenerado é chamado de Regeneração com Reciclo. Quando a planta dispõe de processos de tratamento, é possível conciliar a captação de água em fontes externas e o reciclo de efluente tratado dentro das instalações, buscando sempre a melhor opção em relação aos custos operacionais e ao meio ambiente.

O procedimento para regeneração com reciclo é muito parecido com o de múltiplas fontes externas. A concentração de contaminante C_{reg} da corrente regenerada é adicionada ao diagrama de fontes e sua vazão é considerada ilimitada. Assim, a síntese do problema ocorre como descrito no tópico anterior.

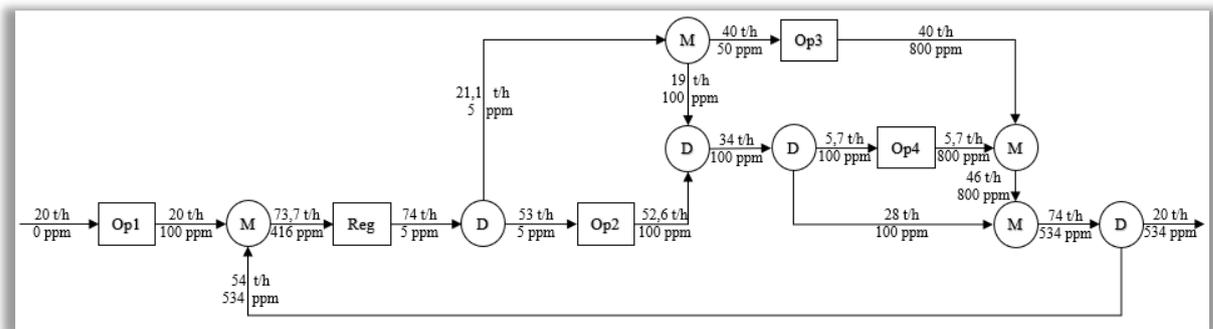
No exemplo, é considerado que existe uma corrente regenerada com concentração de 5 ppm. Seguindo todas as etapas, obtemos o diagrama de fontes da Figura 11 e, conseqüentemente, o fluxograma da Figura 12.

Figura 11 – Representação do diagrama para o caso de Regeneração e Reciclo



Fonte: Gomes *et al.*, 2007.

Figura 12 – RTM considerando Regeneração e Reciclo



Fonte: Gomes *et al.*, 2007.

O resultado é o consumo de 20 t/h da fonte externa a 0 ppm e de 73,7 t/h do efluente regenerado. Apenas 20 t/h de efluente com concentração de contaminante de 534 ppm é direcionado para a estação de tratamento.

3.1.2 APLICAÇÃO DO DFA PARA MULTICONTAMINANTES

O procedimento para aplicação do DFA em processos com multicontaminantes é muito parecido com o método aplicado no item anterior, tendo como diferença as etapas onde determinamos o contaminante e a operação de referência e verificamos as violações ocorridas na rede após a execução do procedimento. Além disso, é necessário definir:

- a quantidade de contaminantes;
- a concentração máxima de cada contaminante na entrada de cada operação ($C_{in,c,op}^{max}$);
- a concentração máxima de cada contaminante na saída de cada operação ($C_{out,c,op}^{max}$).

A discussão desse procedimento será baseada no exemplo apresentado por Wang e Smith (1994) e os dados de entrada estão representados na Tabela 3. No problema, é considerada uma fonte externa de água a 0 ppm para os contaminantes A e B.

Tabela 3 – Dados limites do exemplo envolvendo multicontaminantes

Operação (op)	f_L (t/h)	Contaminante (c)	$C_{in,max}$ (ppm)	$C_{out,max}$ (ppm)	Δm (g/h)
1	40	A	0	100	4000
		B	25	75	2000
2	35	A	80	240	5600
		B	30	90	2100

Fonte: Wang e Smith, 1994.

➤ **1ª etapa:** Determinação da Operação de Referência

A operação de referência é aquela que demanda uma alimentação com água de maior qualidade (FRANCISCO, 2017). Isso significa que o seu efluente é, comumente, usado na alimentação das outras operações e que a operação de referência dificilmente poderá utilizar o recurso do reúso.

Para a sua escolha, é considerado o Fator de Restrição $R_{c,op}$ (Equação 4), que fornece uma ideia da quantidade de água que pode ser economizada em uma dada operação, considerando-se uma determinada operação de referência. Portanto, quanto menor o valor de $R_{c,op}$, menor é o grau de restrição do reúso da operação de referência em outras operações, ou seja, aumenta o número de possibilidades de reúso a partir da operação de referência escolhida (FRANCISCO, 2017).

A seleção da operação de referência é dada a partir das seguintes regras:

- i.* se houver uma operação com, pelo menos, um contaminante com a concentração de entrada igual a 0 ppm, essa é a operação de referência;
- ii.* se houver mais de uma operação com, pelo menos, um contaminante com concentração de entrada igual a 0 ppm, deve-se escolher a operação com a menor concentração de saída de seus contaminantes;
- iii.* se não houver operações com concentração de entrada de contaminante igual a 0 ppm, deve-se escolher a operação com a menor concentração de entrada entre todos os contaminantes;
- iv.* se houver mais de uma operação com valores iguais de concentração de entrada, deve-se escolher a operação com a menor concentração de saída do contaminante em questão. Se apresentarem valores iguais para todas as concentrações de contaminantes, escolher a operação com a maior vazão;
- v.* se houver mais de uma operação com valores distintos de concentração de entrada de contaminante e a diferença entre os valores for menor ou igual a 30 ppm, deve-se calcular o Fator Restritivo (Equação 4) para cada operação e escolher o menor entre eles.

$$R_{c,op} = \frac{C_{out,c,ref}}{C_{in,c,op}} \quad (4)$$

em que:

$R_{c,op}$ → fator restritivo do contaminante c na operação op ;

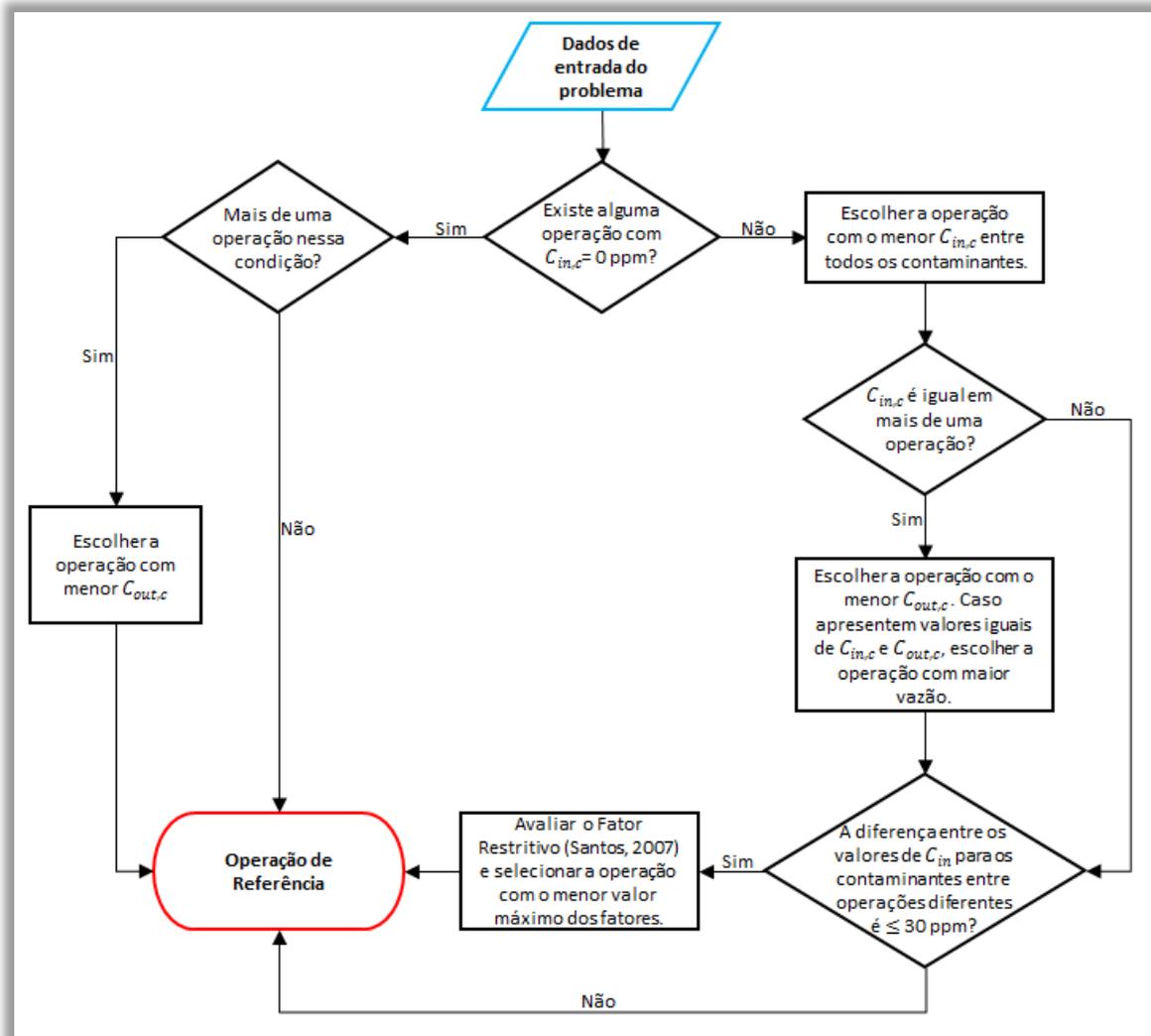
$C_{out,c,ref}$ → concentração de saída do contaminante c na operação de referência;

$C_{in,c,op}$ → concentração de entrada do contaminante c na operação op .

O algoritmo utilizado para a determinação da operação de referência é indicado pelo diagrama da Figura 13.

Para o exemplo de Wang e Smith (1994) apresentado na Tabela 3, a operação de referência seria a de número 1, pois ela possui o único contaminante (A) com concentração de entrada igual a 0 ppm, seguindo a regra (*i*) descrita acima.

Figura 13 – Algoritmo para determinação da operação de referência



Fonte: Construção própria baseada em Francisco, 2017.

➤ **2ª etapa:** Determinação do Contaminante de Referência

Para realizar a escolha dentre os contaminantes presentes no processo, são seguidos os critérios de monotonicidade do contaminante e do Parâmetro $G_{c,op}^w$ (Equação 5), ambos definidos por Savelski e Bagajewicz (2003). O primeiro indica que as concentrações de saída do contaminante de referência devem apresentar crescimento monotônico através das operações (NAICE, 2015). Já o segundo garante a escolha do contaminante que utiliza a maior quantidade de água primária se o maior valor de $G_{c,op}^w$ for escolhido. Assim, o contaminante de referência possuirá o maior potencial de reúso dentro do processo (FRANCISCO, 2017).

Sendo assim, as regras abaixo, descritas por Francisco (2017), devem ser adotadas para a escolha do contaminante de referência:

- i. se no processo analisado houver apenas um contaminante que apresente $C_{in} = 0$ ppm e que atenda ao critério de monotonicidade das concentrações no conjunto das operações, ele será o contaminante de referência;
- ii. se houver mais de um contaminante com $C_{in} = 0$ ppm, atendendo ao critério de monotonicidade das concentrações, deve-se calcular o parâmetro $G_{c,op}^w$ (Equação 5). O contaminante de referência será aquele que apresentar o maior valor global do parâmetro $G_{c,op}^w$.

$$G_{c,op}^w = \frac{\Delta m_{c,op}}{C_{out,c,op}^{max}} \quad (5)$$

em que:

$G_{c,op}^w$ → parâmetro G do contaminante c na operação op .

$\Delta m_{c,op}$ → quantidade de massa transferida do contaminante c na operação op ;

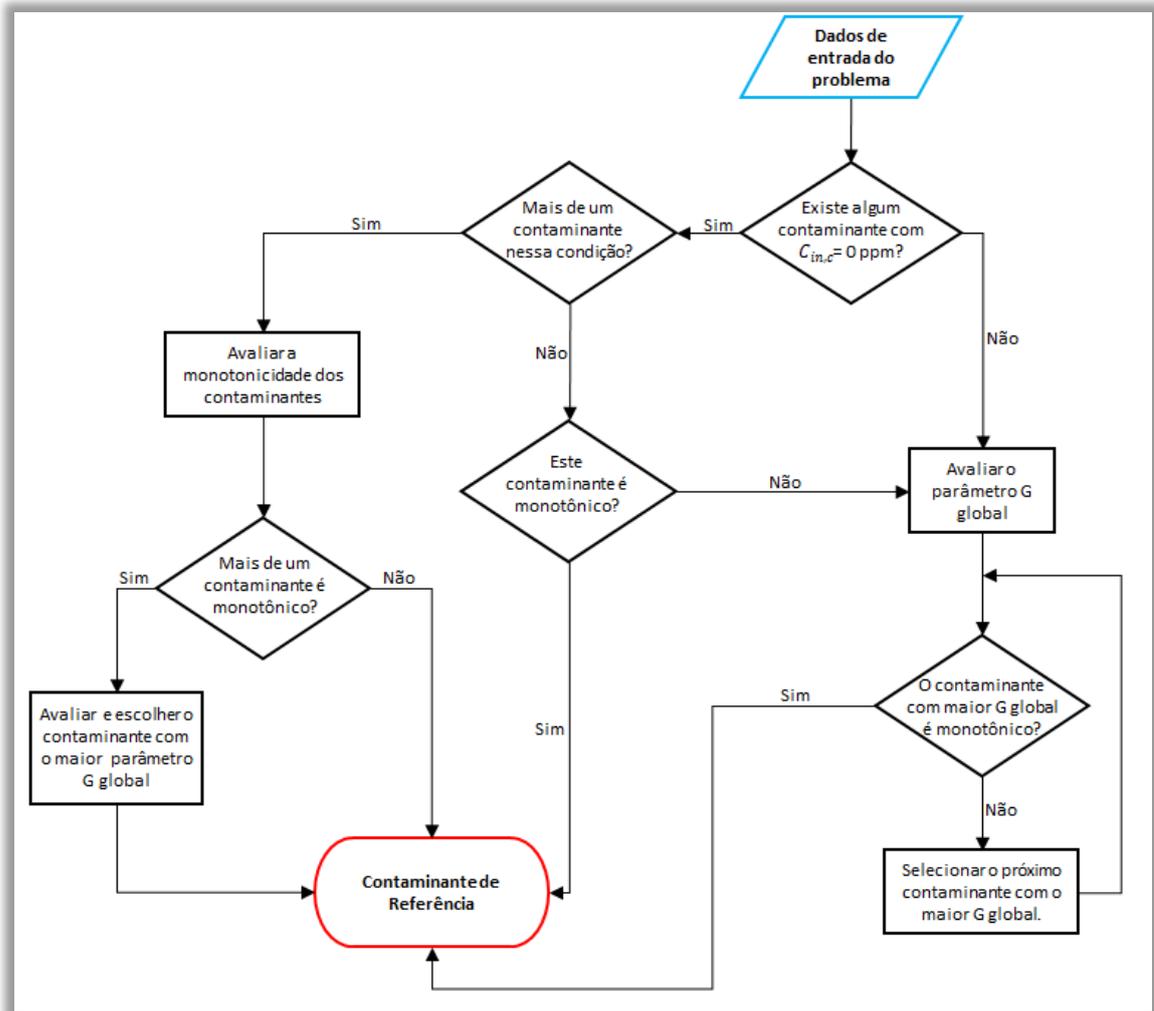
$C_{out,c,op}^{max}$ → máxima concentração de saída do contaminante c na operação op ;

- iii. se o contaminante com o maior $G_{c,op}^w$ não atender ao critério de monotonicidade das concentrações, deve-se repetir essa análise com o próximo contaminante com o segundo maior $G_{c,op}^w$ e, assim, sucessivamente, até encontrar um contaminante monotônico;
- iv. se o único contaminante com $C_{in} = 0$ não seja monotônico ou se não houver contaminantes com $C_{in} = 0$, então deve-se avaliar o parâmetro $G_{c,op}^w$, selecionando o contaminante monotônico com o maior valor de $G_{c,op}^w$.

O algoritmo utilizado para a determinação do contaminante de referência é indicado pelo diagrama da Figura 14.

No exemplo estudado na Tabela 3, o contaminante A seria tomado como referência por ser único com concentração de entrada igual a 0 ppm. Além disso, as suas concentrações de saída apresenta crescimento monotônico através das operações, fazendo com que ele fosse escolhido.

Figura 14 – Algoritmo para determinação do contaminante de referência



Fonte: Construção própria baseada em Francisco, 2017.

- **3ª etapa:** Deslocamento das concentrações dos contaminantes na operação de referência

No problema com multicontaminantes, é preciso considerar a simultaneidade de transferência de massa de todos os contaminantes envolvidos. Então, seguindo essa premissa, deve-se convencionar a entrada de contaminantes com a concentração da fonte externa na operação de referência. Com isso, aumenta-se as possibilidades de reúso em outras operações, minimizando o risco de violações e maximizando o reúso no diagrama de fontes.

No caso do exemplo apresentado, é necessário ajustar as concentrações de entrada e de saída do contaminante B, mantendo o Δm inicialmente dado. Por isso, o $C_{in,B,1} = 0$ ppm, pois é a mesma concentração da fonte externa considerada, e o $C_{out,B,1} = 50$ ppm, pois mantém o $\Delta m = 2000$ g/h, com a vazão máxima de 40 t/h.

➤ **4ª etapa:** Identificação da necessidade de ajustes das operações restantes

O objetivo dessa etapa é assegurar que as possibilidades de reúso da corrente de saída da operação de referência nas operações restantes estarão presentes no diagrama de fontes, baseando-se apenas no contaminante de referência (GOMES *et al.*, 2013). Para isso, deve-se avaliar as situações abaixo:

- i.* se os contaminantes que não são referência da operação de referência possuem uma concentração de saída menor comparada a todas as concentrações de entrada do mesmo contaminante nas operações restantes, nenhum ajuste precisa ser realizado;
- ii.* se houver apenas um contaminante que não atenda ao item *i*, então é necessário ajustar as concentrações do contaminante de referência em cada operação, exceto na de referência, a fim de permitir a alimentação do efluente da operação de referência nas outras operações sem a violação de regras;
- iii.* se houver mais de um contaminante descumprindo o item *i*, deve-se escolher o contaminante que apresentar a pior situação, ou seja, com a maior diferença entre $C_{out,c,ref}$ e $C_{in,c,op}$, e realizar o ajuste das concentrações do contaminante de referência em cada operação, exceto na de referência.

No caso do exemplo apresentado, o contaminante B não satisfaz a condição do item *i*, pois o $C_{out,B,1}$ (50 ppm) é maior que o $C_{in,B,2}$ (30 ppm). Então, as concentrações de entrada e saída do contaminante de referência A na operação 2 devem ser ajustadas conforme as concentrações de B, seguindo o método da próxima etapa.

➤ **5ª etapa:** Deslocamento das concentrações do contaminante de referência

Nessa etapa, as concentrações do contaminante de referência serão ajustadas com base nas concentrações do outro contaminante que não satisfaz a condição do item *i* através de uma relação linear baseada na razão de transferência de massa de contaminantes. Com isso, é possível manter a compatibilidade das concentrações e, então, investigar as possibilidades de reúso da corrente de saída da operação de referência (GOMES *et al.*, 2013).

Nesse caso, devem ser determinadas as concentrações do contaminante de referência correspondentes à entrada e à saída da operação analisada (*op*), baseando-se nas razões de

transferência de massa na operação de referência e na operação *op*, respectivamente. Essas razões são calculadas através da Equação 6:

$$K_{c,ref,op} = \frac{\Delta C_{c,op}}{\Delta C_{ref,op}} \quad (6)$$

em que:

$K_{c,ref,op}$ → Razão de transferência de massa do contaminante *c* na operação *op* em relação à concentração do contaminante de referência *ref* na mesma operação *op*;

$\Delta C_{c,op}$ → Transferência de massa do contaminante *c* na operação *op*;

$\Delta C_{ref,op}$ → Transferência de massa do contaminante de referência *ref* na operação *op*.

No exemplo estudado, a razão da variação das concentrações dos contaminantes B e A (referência) na operação de referência é calculada, obtendo uma constante igual a 0,5. A partir desse resultado, determinamos a concentração de entrada do contaminante de referência A da operação 2 com base no contaminante B da mesma operação.

$$K_{B,A,1} = \frac{\Delta C_{B,1}}{\Delta C_{A,1}} = \frac{50 - 0}{100 - 0} = 0,5 \quad \rightarrow \quad \frac{C_{in,B,2} - C_{in,B,1}}{C_{in,A,2} - C_{in,A,1}} = \frac{30 - 0}{C_{in,A,2} - 0} = 0,5$$

$$\therefore C_{in,A,2} = 60 \text{ ppm}$$

Agora, com o valor de $C_{in,A,2}$, calculamos a concentração do contaminante de referência A na saída da operação 2. Para isso, pode-se utilizar tanto a razão de transferência de massa da operação 2, quanto a lei de transferência de massa, pois é sabido que os valores de vazão limite da operação 2 e de quantidade de massa transferida do contaminante A nessa mesma operação devem se manter os mesmos.

$$\Delta m_{A,2} = f_{L,2}(C_{out,A,2} - C_{in,A,2}) \quad \rightarrow \quad 5600 = 35(C_{out,A,2} - 60)$$

$$\therefore C_{out,A,2} = 220 \text{ ppm}$$

Com isso, os novos valores de concentrações estão representados entre colchetes na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados das concentrações após ajustes

Operação (op)	f_L (t/h)	Contaminante (c)	$C_{in,max}$ (ppm)	$C_{out,max}$ (ppm)	Δm (g/h)
1	40	A	0	100	4000
		B	[0]	[50]	2000

2	35	A	[60]	[220]	5600
		B	30	90	2100

Fonte: Adaptado de Gomes *et al.*, 2013.

Na Tabela 5, estão apresentados os dados do exemplo que serão aplicados nos próximos passos do procedimento. As concentrações de entrada e saída do contaminante de referência A estão atualizadas em todas as operações, tornando o problema adequado para aplicação do método DFA para apenas um contaminante.

Tabela 5 – Dados para aplicação do método DFA considerando o contaminante de referência

Operação (op)	f_L (t/h)	Contaminante (c)	$C_{in,max}$ (ppm)	$C_{out,max}$ (ppm)	Δm (g/h)
1	40	A	0	100	4000
2	35	A	60	220	5600

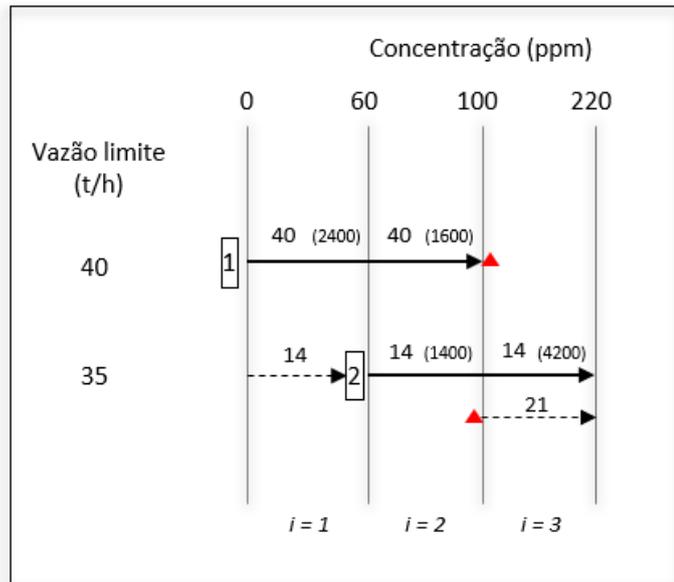
Fonte: Gomes *et al.*, 2013.

➤ **6ª etapa:** Aplicação do método de DFA para um contaminante

A partir da aplicação dos dados da Tabela 5 no método de máximo reúso para um contaminante, o diagrama de fontes (Figura 15) é facilmente obtido, considerando apenas o contaminante de referência A.

De acordo com o diagrama, as operações 1 e 2 consumiram no total 54 t/h de água da fonte externa com 0 ppm de contaminante e a operação 2 reusou 21 t/h de efluente da operação 1 com 100 ppm de contaminante.

Figura 15 – DFA baseado no contaminante de referência A



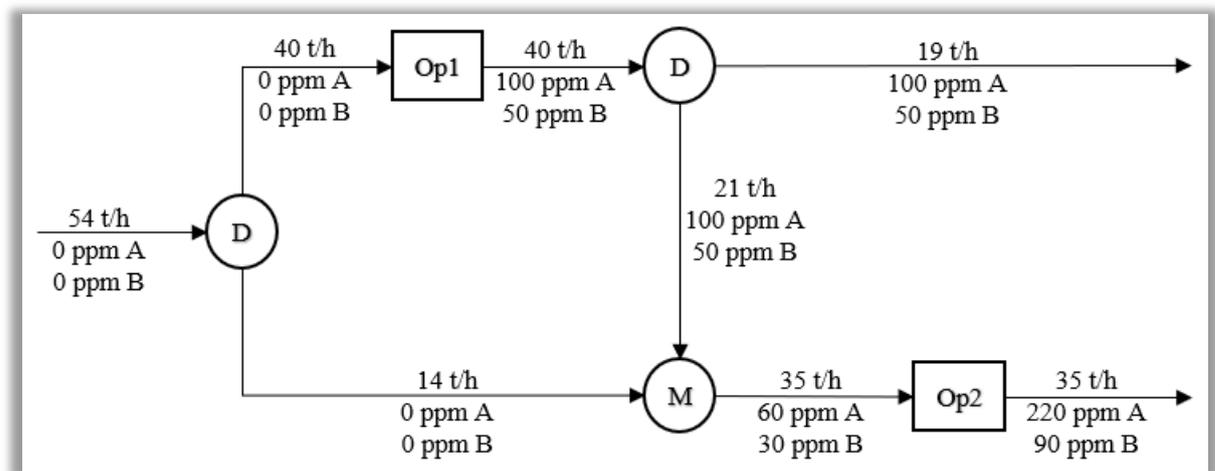
Fonte: Gomes *et al.*, 2013.

➤ **7ª etapa:** Esboço do RTM e análise de violações de concentrações

A RTM pode ser esboçada a partir dos resultados obtidos na etapa anterior. Com isso, pode-se avaliar se algum valor limite foi violado, ou seja, se as concentrações de entrada e saída de todos os contaminantes atendem aos limites especificados na Tabela 3. Se isso acontecer, a concentração do contaminante da corrente em questão deve ser ajustada seguindo as propostas descritas na próxima etapa.

A Figura 16 representa o fluxograma do exemplo proposto, que é gerado a partir do diagrama de fontes da Figura 15.

Figura 16 – RTM para máximo reúso obtida através do diagrama de fontes



Fonte: Gomes *et al.*, 2013.

Com base na RTM apresentada, verifica-se se existem violações nas concentrações de todos os contaminantes realizando o balanço material em cada operação.

Analisando a operação 1, observa-se que ela só recebe água da fonte externa com 0 ppm de A e de B, portanto, se for aplicada a lei de transferência de massa para descobrir a concentração de saída dos contaminantes A e B, descobre-se que Δm e f_L foram satisfeitos com as mesmas concentrações apresentadas na Tabela 3.

Já a operação 2 foi alimentada com 14 t/h de água da fonte externa e 21 t/h de efluente originado da operação 1. Desse modo, realiza-se uma ponderação utilizando a vazão e a concentração do efluente, conforme é mostrado a seguir.

Contaminante A (operação 2)

$$C_{in,A,2} = \frac{(14 \times 0) + (21 \times 100)}{14 + 21} = \frac{2100}{35} = 60 \text{ ppm}$$

O valor da concentração de entrada do contaminante A na operação 2 obtido corresponde ao valor apresentado na Tabela 4, portanto, não é necessário calcular a concentração de saída, já que o valor de 220 ppm definido previamente garante o Δm de 5600 g/h.

Contaminante B (operação 2)

$$C_{in,B,2} = \frac{(14 \times 0) + (21 \times 50)}{14 + 21} = \frac{1050}{35} = 30 \text{ ppm}$$

Esse valor também coincide com o da Tabela 4, então, a sua concentração de saída continua sendo 90 ppm.

Portanto, conclui-se que a RTM não necessita de modificações, pois não há violações nas concentrações dos contaminantes.

➤ **8ª etapa: Evolução da rede de transferência de massa**

Nos casos em que violações são identificadas na RTM, o aumento no consumo de água da fonte externa pode ser uma das soluções utilizadas para corrigir as concentrações de contaminantes. Outro recurso empregado é o direcionamento de saídas de alguma corrente que fica a montante da operação onde a violação é observada. Isso pode remover a violação sem aumentar o consumo da fonte externa (GOMES *et al.*, 2013). As operações de carga fixa

que possuam um elevado valor de vazão devem ter prioridade no recebimento de efluentes das demais operações, pois elas assimilam uma maior quantidade de contaminante, o que torna o processo de reúso mais simples (FRANCISCO, 2017). Além disso, também é possível adicionar um processo local de regeneração, se isso for a opção mais viável.

Com a violação removida, os balanços de massa devem ser realizados a jusante da estrutura para recalcular as novas concentrações. Se mesmo após isso a violação ainda persistir, o procedimento de eliminação deve ser repetido até que todas sejam removidas (GOMES *et al.*, 2013). Deve-se atentar para o alcance do valor de concentração máxima de pelo menos um dos contaminantes na operação analisada, pois, segundo o Princípio de Otimalidade de Salvetski e Bagajewicz (2003), tal afirmação deve ser verdadeira se o reúso máximo é requerido. Se a concentração máxima de ao menos um contaminante não for alcançada, é possível que a operação reduza o seu consumo de água primária ou receba efluentes de outras operações (FRANCISCO, 2017).

3.2 SOFTWARE DESENVOLVIDO NA LINGUAGEM SCILAB®

Para iniciar a automatização do método DFA a partir do software desenvolvido em linguagem Scilab, o usuário necessita construir uma planilha Excel® com os dados do problema, conforme o padrão exemplificado na Figura 17. Todos os valores devem ser colocados, obrigatoriamente, a partir da 2ª linha da planilha, pois a 1ª linha refere-se à identificação de cada coluna.

Figura 17 – Exemplo da planilha preenchida com os dados do problema

	A	B	C	D	E
1	Operação	Cin	Cout	Vazão Limite	Contaminantes
2	1	0	100	40	a
3	1	25	75	40	b
4	2	80	240	35	a
5	2	30	90	35	b
6	-1	0	0	0	a
7	-1	0	0	0	b

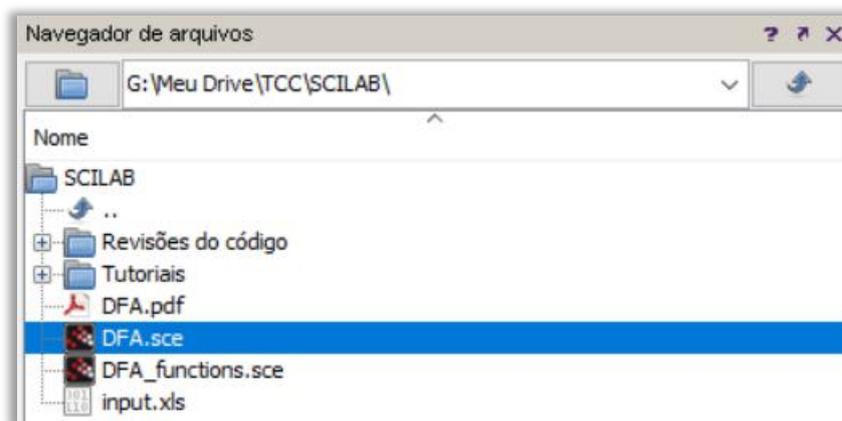
Fonte: Acervo pessoal.

- Coluna A: Número da operação.
 - ✓ Fontes externas e regeneradas: identificar com números negativos sequenciais (exemplo: -1, -2, -3, ...).

- ✓ Unicontaminante: identificar com números positivos sequenciais (exemplo: 1, 2, 3, ...).
- ✓ Multicontaminante: identificar com números positivos sequenciais, repetindo o número da operação a cada novo contaminante.
- Coluna B: Concentrações de entrada dos contaminantes.
- Coluna C: Concentrações de saída dos contaminantes;
- Coluna D: Vazões limites das operações;
- Coluna E: Nome do contaminante (apenas para casos com multicontaminantes).

Para inicializar o programa, é necessário designar, no navegador de arquivos do Scilab®, o diretório onde os códigos estão localizados, conforme é apresentado na Figura 18.

Figura 18 – Especificação do diretório

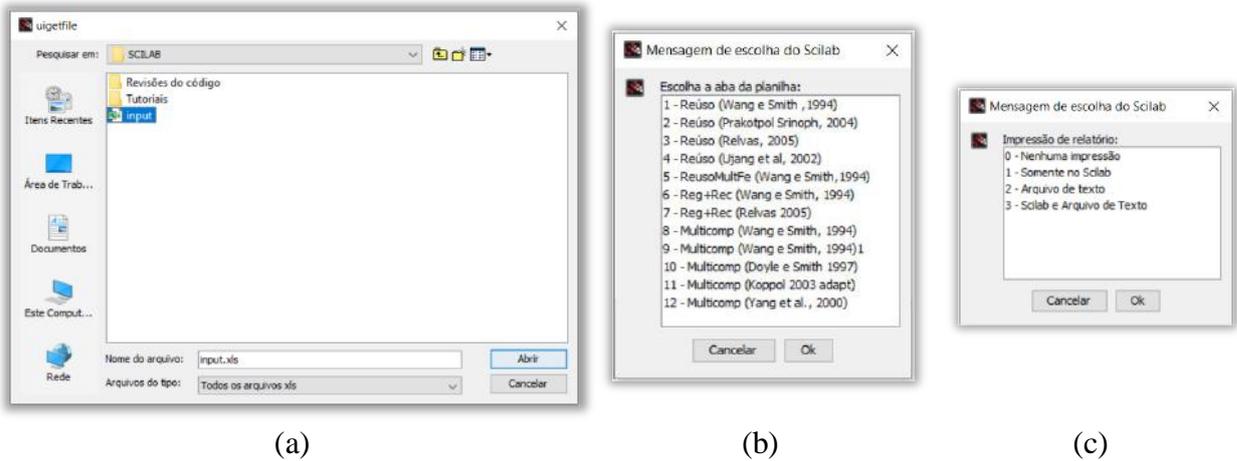


Fonte: Acervo pessoal.

Após executar o arquivo “*DFA.sce*”, o usuário deverá selecionar a planilha Excel® onde foram inseridos os dados do problema (Figura 19a). O programa também solicitará a escolha da aba da planilha (Figura 19b), onde o exemplo foi especificado, e do tipo de relatório (Figura 19c) que o usuário deseja emitir.

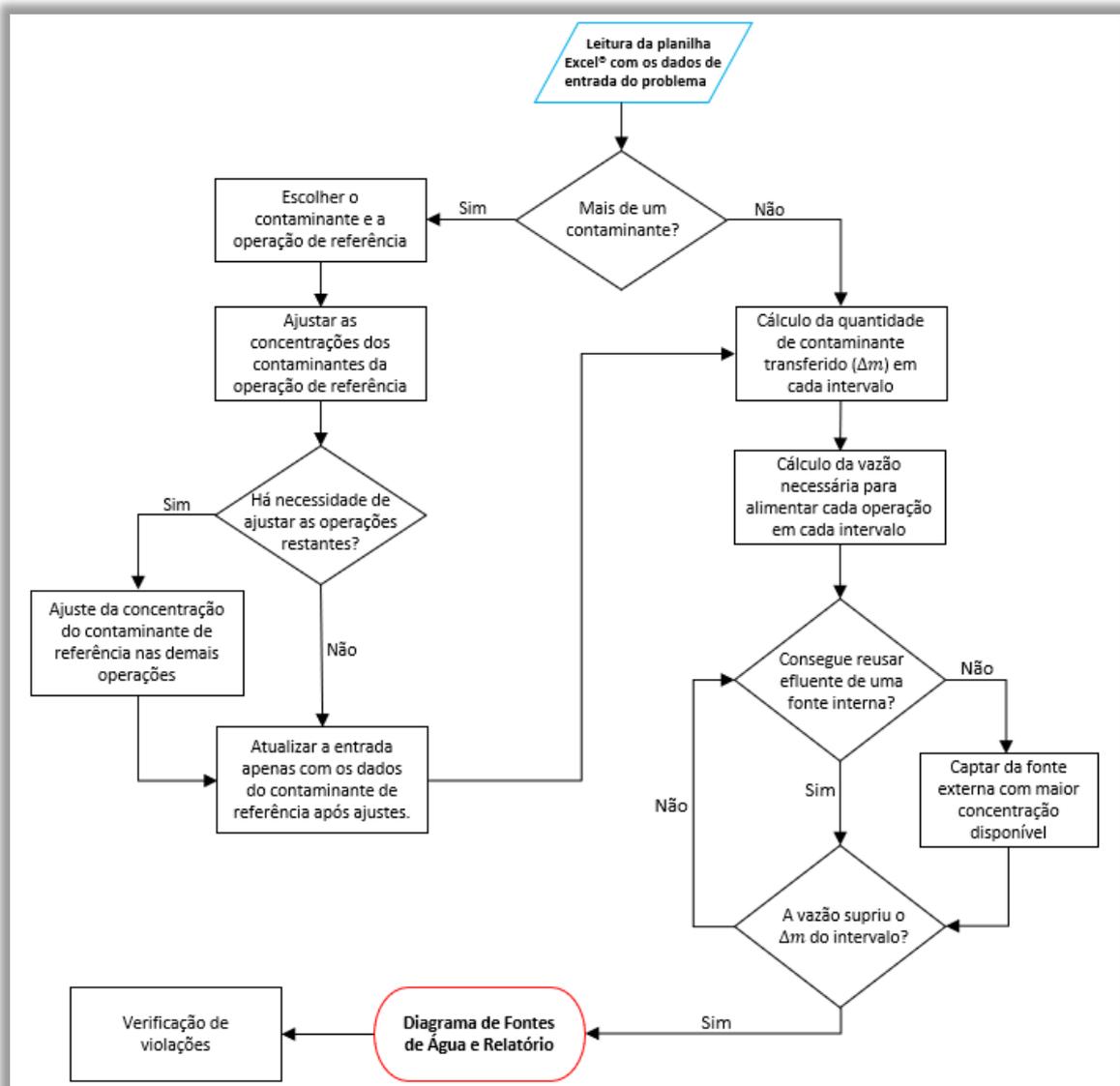
Com essas informações, o DFA é gerado e o programa retorna um relatório contendo os valores das vazões utilizadas a partir das fontes internas e externas. Para o caso de multicontaminantes, ainda é verificado se existem violações de concentração nos resultados. Caso exista, o usuário é o responsável por analisar e aplicar a 8ª etapa do procedimento, além de gerar a RTM em todos os casos. O algoritmo seguido é o apresentado na Figura 20.

Figura 19 – Seleção da planilha (a), da aba (b) e do relatório (c) no software



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 20 – Algoritmo do software desenvolvido em Scilab®



Fonte: Acervo pessoal.

CAPÍTULO 4 – VALIDAÇÃO DO SOFTWARE

O *software* é executado através da inserção dos dados das correntes do processo, o que significa que as características restritivas de cada operação devem estar disponíveis ao usuário. A partir disso, é obtido um diagrama que indica a necessidade de captação de água bruta pelo processo e os direcionamentos das correntes de saída de cada operação, sempre atendendo a premissa da não violação dos parâmetros limitantes. Além disso, é emitido um relatório final com os dados de vazão de água captada, de vazão de efluente reusado, de concentração dos contaminantes na entrada e na saída de cada operação e de violações ocorridas após a execução do DFA. Isso permite que o usuário implemente as mudanças de processo necessárias para corrigir as violações sinalizadas e gere manualmente a RTM com facilidade.

Vale ressaltar que o presente *software* não possui a função para síntese da RTM, que seria o fluxograma resultante da otimização. Entretanto, ele pode ser obtido, sem grandes complicações, a partir da relação entre as operações apresentadas no diagrama de fontes gerado e no relatório final.

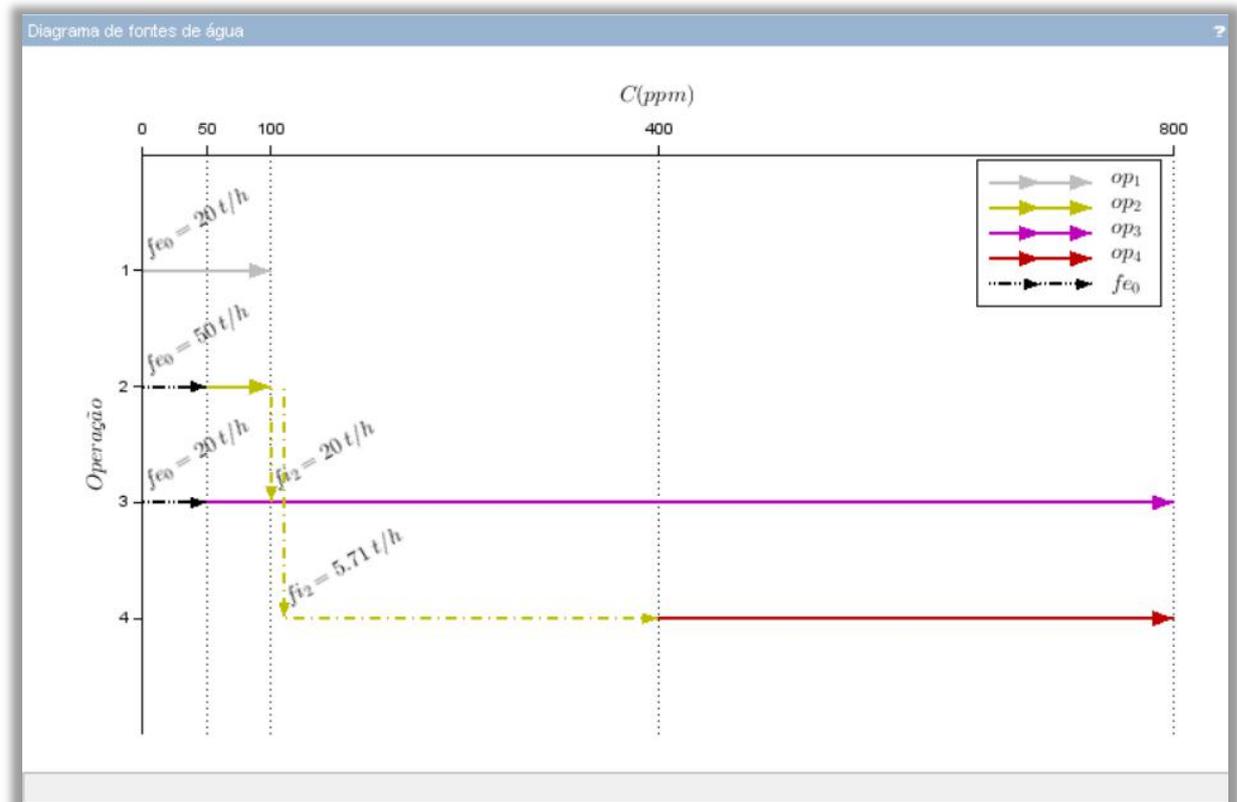
Este capítulo apresenta alguns dos problemas de DFA mais clássicos da literatura sendo aplicados no programa computacional desenvolvido na linguagem Scilab[®]. O intuito é validar o *software*, executando exemplos que abordam os casos de DFA implementados, como o máximo reúso, múltiplas fontes externas e regeneração com reciclo, sendo esses três casos aplicados em operações que trabalham com apenas um contaminante, e o máximo reúso para processos com multicontaminantes. O relatório final completo e o gráfico do DFA de cada caso resolvido podem ser encontrados no Anexo deste trabalho.

4.1 ESTUDOS DE CASO

4.1.1 O CASO DE MÁXIMO REÚSO DE WANG E SMITH (1994)

Na publicação de 1994, Wang e Smith apresentou um dos exemplos mais utilizados quando o assunto é reúso de água. Nesse caso, é abordado o caso de máximo reúso em processos com apenas um contaminante, considerando quatro operações de carga fixa e uma fonte externa com 0 ppm de contaminante. As entradas foram apresentadas na Tabela 2.

Figura 21 – DFA do caso 4.1.1



Fonte: Acervo pessoal.

O diagrama de fontes gerado é uma forma de orientar o usuário sobre como proceder na criação da RTM. Para o exemplo em questão, as redes possíveis estão representadas pela Figura 7 e Figura 8. Os resultados apresentados no relatório final (Figura 22), obtido com o programa, são idênticos se comparados aos valores encontrados pelos autores Gomes *et al.* (2007) e Naice (2015), que também aplicaram o DFA para esse mesmo caso. São captados um total de 90 t/h da fonte externa pelas operações 1, 2 e 3 e a operação 2 se torna uma opção de fonte interna para as operações 3 e 4, sendo reutilizado um total de 25,7 t/h de efluente. Segundo dados de Wang e Smith (1994), a vazão captada de água bruta em um caso não otimizado seria de 112,5 t/h, o que confirma uma significativa redução de 20% no consumo da fonte externa quando aplicado o DFA.

Figura 22 - Relatório final do caso 4.1.1

```

<<< Relatório Final >>>
|  Operação  FE0 (t/h)  FI1 (t/h)  FI2 (t/h)  FI3 (t/h)  FI4 (t/h)  |
|      1      20      0      0      0      0      |
|      2      50      0      0      0      0      |
|      3      20      0      20     0      0      |
|      4       0      0      5.71    0      0      |
|    Total    90      0  25.714286  0      0      |
<<< Relatório Final >>>

```

Fonte: Acervo pessoal.

4.1.2 O CASO DE MÁXIMO REÚSO DE RELVAS (2005)

Outro caso analisado para máximo reúso foi o de Relvas (2005) *apud* Naice (2015). Além do resultado ter sido exposto no próprio trabalho da autora, esse problema também foi testado no *software* MINEA 2.0 por Naice (2015). Os resultados obtidos após aplicação no programa desenvolvido em Scilab[®] são iguais aos valores encontrados pelas autoras.

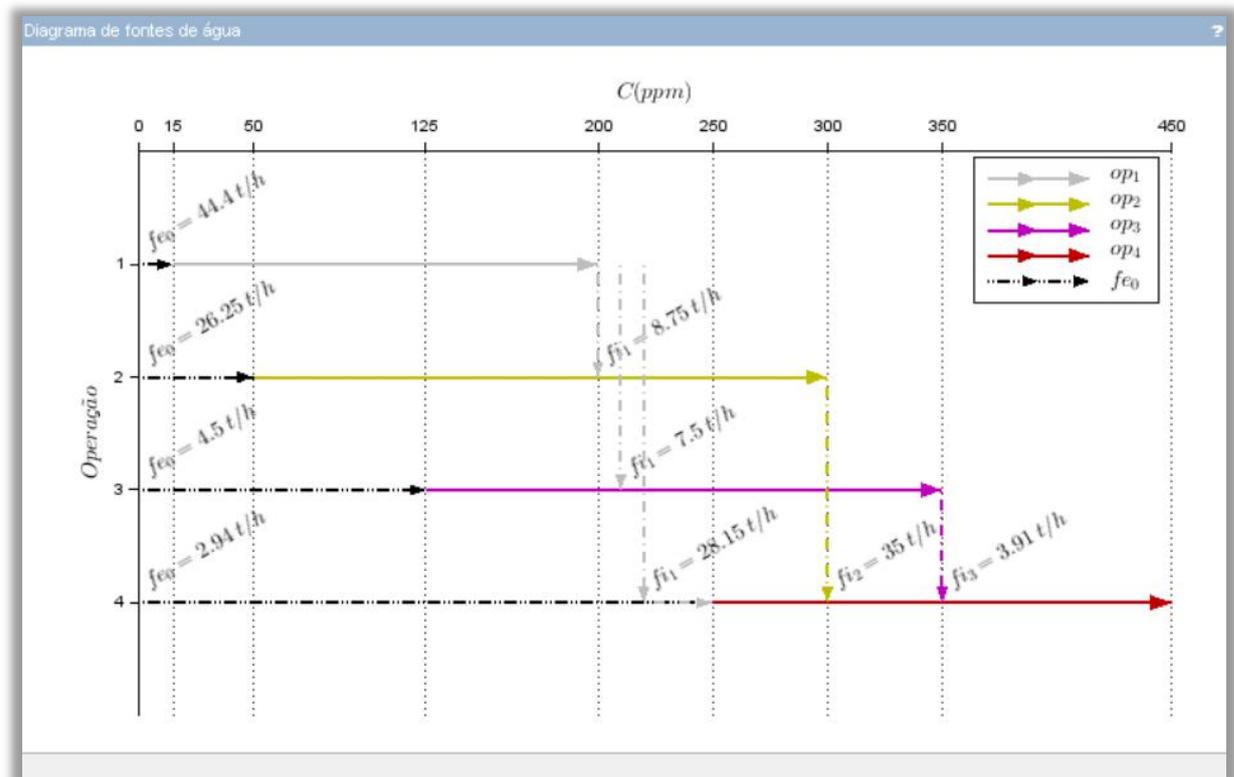
Tabela 6 – Dados limites do problema com um contaminante de Relvas (2005)

Operação	f_L (t/h)	$C_{in,max}$ (ppm)	$C_{out,max}$ (ppm)	Δm (g/h)
1	48	15	200	8880
2	35	50	300	8750
3	12	125	350	2700
4	70	250	450	14000

Fonte: Relvas, 2005.

Esse exemplo utiliza os dados limites da Tabela 6 e uma fonte externa com 0 ppm de contaminantes. O diagrama e o relatório final obtidos são mostrados na Figura 23 e Figura 24, respectivamente. Os cálculos alcançaram o uso de 78,1 t/h de fonte externa (0ppm); 44,4 t/h de reúso da fonte interna 1, alimentando as operações 2, 3 e 4; 35 t/h de reúso da fonte interna 2, contribuindo com a operação 4; e 3,9 t/h de reúso da fonte interna 3 na operação 4. No total, foi atingido o máximo reúso de 83,3 t/h de efluente dentro do próprio processo e foram captados 78,1 t/h de água bruta. Com isso, pode-se identificar uma redução de 30% do uso da fonte externa, já que o processo inicial não otimizado utilizaria a vazão de 112,4 t/h dessa mesma fonte.

Figura 23 – DFA do caso 4.1.2



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 24 – Relatório final do caso 4.1.2

```

<<< Relatório Final >>>
| Operação  FE0 (t/h)  FI1 (t/h)  FI2 (t/h)  FI3 (t/h)  FI4 (t/h)  |
|      1      44.4      0          0          0          0          |
|      2      26.25    8.75      0          0          0          |
|      3       4.5      7.5      0          0          0          |
|      4       2.94    28.15    35         3.91      0          |
|      Total  78.085714   44.4      35   3.9142857  0          |
<<< Relatório Final >>>

```

Fonte: Acervo pessoal.

4.1.3 O CASO DE MÚLTIPLAS FONTES EXTERNAS DE WANG E SMITH (1994)

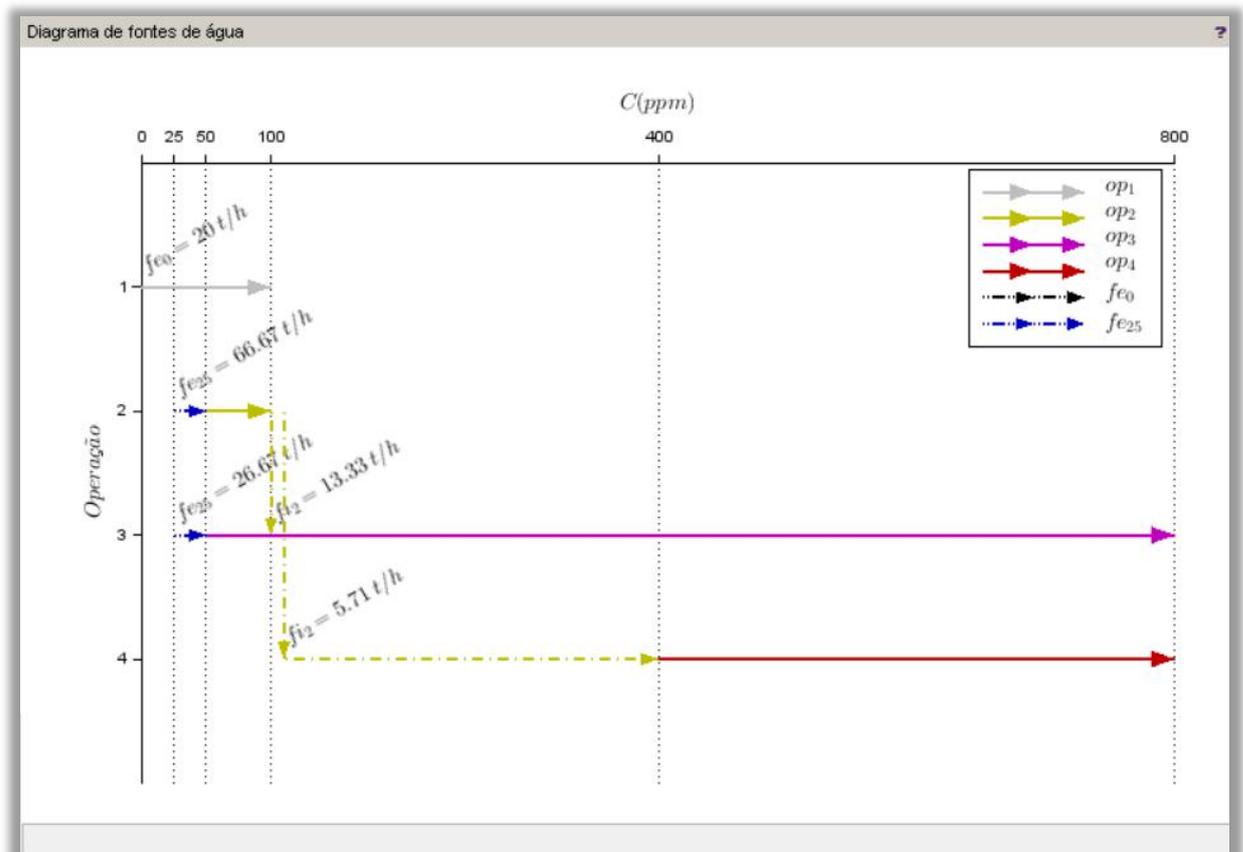
Nesse caso, são consideradas duas fontes externas (1 e 2) com concentrações de contaminante iguais a 0 e 25 ppm, respectivamente. Os dados limites do problema são apresentados na Tabela 2.

A partir dos resultados de Gomes *et al.* (2007), confirmou-se o direcionamento de 20 t/h da fonte externa 1 para a primeira operação. Optando pela demanda de maior vazão, a fonte externa 2, com 25 ppm de contaminante, foi a responsável por alimentar as operações 2 e 3, totalizando uma captação de 93,3 t/h. A corrente da fonte interna 2 foi reusada nas

operações 3 e 4, suprindo as vazões necessárias de cada operação. O reúso, nesse exemplo, somou 19 t/h de efluente. A fonte interna 1 também poderia ter sido escolhida pelo programa para realizar o reúso sem alterar o resultado do relatório final, porém a RTM seria diferente, envolvendo outra disposição de tubulações e equipamentos.

A aplicação desse exemplo no programa gerou o diagrama de fontes da Figura 25 e o relatório final da Figura 26, que confirmaram os resultados obtidos no trabalho supracitado.

Figura 25 – DFA do caso 4.1.3



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 26 – Relatório final do caso 4.1.3

```
<<< Relatório Final >>>
```

Operação	FE0 (t/h)	FE25 (t/h)	FI1 (t/h)	FI2 (t/h)	FI3 (t/h)	FI4 (t/h)
1	20	0	0	0	0	0
2	0	66.67	0	0	0	0
3	0	26.67	0	13.33	0	0
4	0	0	0	5.71	0	0
Total	20	93.333333	0	19.047619	0	0

```
<<< Relatório Final >>>
```

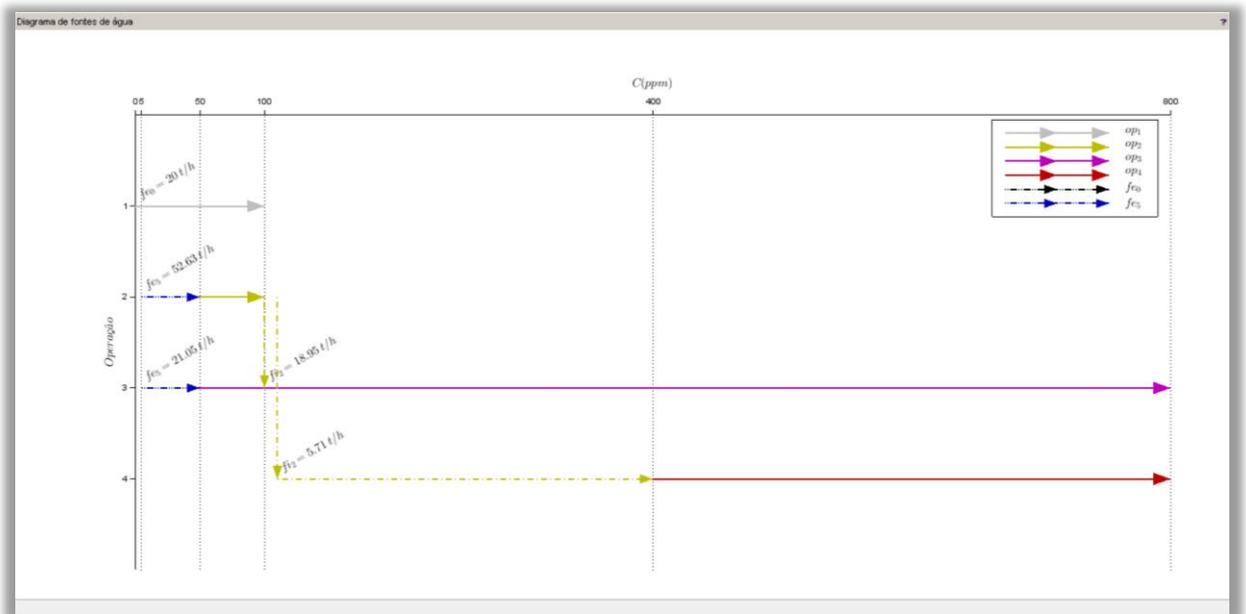
Fonte: Acervo pessoal.

4.1.4 O CASO DE REGENERAÇÃO COM RECICLO DE WANG E SMITH (1994)

O programa resolve casos de regeneração com reciclo considerando-os como uma fonte externa adicional. No diagrama de fontes, a linha da concentração da saída do processo de regeneração é adicionada na posição vertical e, no relatório final, é adicionada com a nomenclatura “FE”, seguida do valor de C_{reg} . No exemplo em questão, a concentração de regeneração é igual a 5 ppm, então essa corrente foi inserida no relatório como “FE5”.

Os dados limites são os mesmos da Tabela 2, adicionando apenas a informação da regeneração a 5 ppm com reciclo. O DFA (Figura 27) e o relatório final (Figura 28) apresentaram resultados iguais aos do trabalho de Gomes *et al.* (2007), onde foi aplicada a mesma metodologia. A primeira operação foi alimentada com 20 t/h de água fresca da fonte externa; a segunda operação usou 52,6 t/h de efluente regenerado a 5 ppm e reciclado; a terceira operação, além de usar 21 t/h de efluente com $C_{reg} = 5$ ppm, também precisou de 19 t/h da fonte interna 2; e a última operação reaproveitou 5,7 t/h do descarte da operação 2.

Figura 27 - DFA do caso 4.1.4



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 28 – Relatório final do caso 4.1.4

```

<<< Relatório Final >>>
| Operação  FE0 (t/h)  FE5 (t/h)  FI1 (t/h)  FI2 (t/h)  FI3 (t/h)  FI4 (t/h)  |
|      1      20      0      0      0      0      0      |
|      2      0      52.63  0      0      0      0      |
|      3      0      21.05  0      18.95  0      0      |
|      4      0      0      0      5.71  0      0      |
|      Total  20  73.684211  0  24.661654  0      0      |
<<< Relatório Final >>>

```

Fonte: Acervo pessoal.

Se o efluente não fosse regenerado e reciclado, o exemplo cairia nas mesmas condições do item 4.1.1 desse trabalho, utilizando 90 t/h de água fresca ao invés de apenas 20 t/h. É incontestável que é necessário realizar as avaliações econômicas pertinentes para garantir o máximo reúso e, ao mesmo tempo, o ganho financeiro, porém é preciso salientar que o programa não está considerando os gastos com os processos de regeneração ou com a captação de água de fontes externas. Essa avaliação, cabe ao usuário realizar.

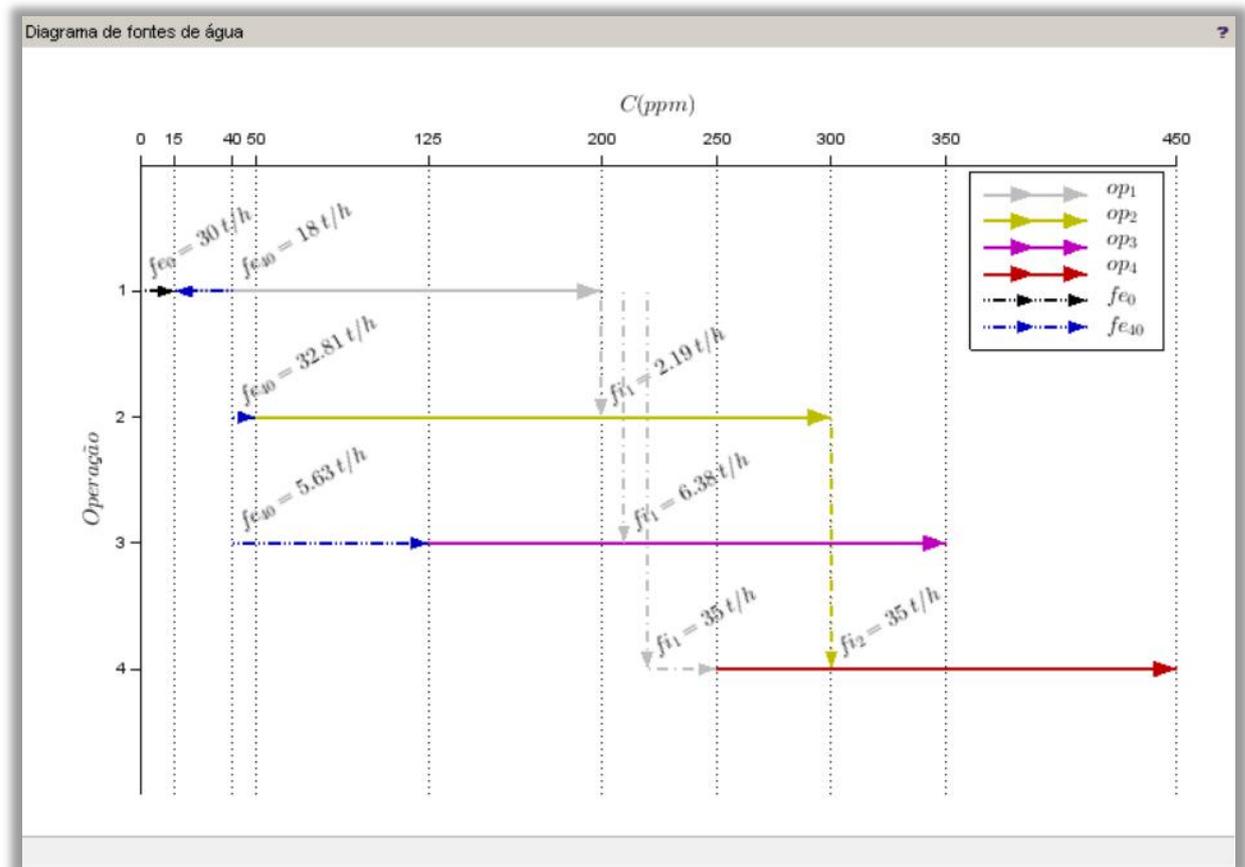
4.1.5 O CASO DE REGENERAÇÃO COM RECICLO DE RELVAS (2005)

Esse problema, apresentado por Naice (2015) com a abordagem do DFA, também discute a questão do efluente que é regenerado e reciclado a partir de uma certa concentração. A Tabela 6 expõe os dados limite do trabalho de Relvas (2005) *apud* Naice (2015). Nesse caso, o efluente tratado possui a concentração de 40 ppm e a fonte externa, 0 ppm.

Após a execução do exemplo no *software*, obteve-se o diagrama da Figura 29 e o relatório final apresentado na Figura 30. Foi alcançada uma redução de 73% do consumo de água bruta em relação ao problema sem otimização. Além disso, foram captados 30 t/h da fonte externa e regenerados 56,4 t/h de efluente. Também foram reaproveitados 43,6 t/h e 35 t/h das fontes internas 1 e 2, respectivamente, dentro do mesmo processo.

É importante destacar que a redução citada reflete apenas na quantidade de água fresca captada e não considera a lado econômico do processo de regeneração.

Figura 29 – DFA do caso 4.1.5



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 30 – Relatório final do caso 4.1.5

<<< Relatório Final >>>

Operação	FE0 (t/h)	FE40 (t/h)	FI1 (t/h)	FI2 (t/h)	FI3 (t/h)	FI4 (t/h)
1	30	18	0	0	0	0
2	0	32.81	2.19	0	0	0
3	0	5.63	6.38	0	0	0
4	0	0	35	35	0	0
Total	30	56.4375	43.5625	35	0	0

<<< Relatório Final >>>

Fonte: Acervo pessoal.

4.1.6 O CASO DE MULTICONTAMINANTES DE WANG E SMITH (1994)

O estudo de caso abordado nesse tópico é baseado em três processos muito comuns em refinarias de petróleo: a destilação com injeção de vapor, o processo de hidrodessulfurização e a dessalinização. Todos esses processos utilizam a água para retirar compostos inorgânicos de correntes provenientes do refino. Com isso, Wang e Smith (1994) *apud* Gomes *et al.* (2013) analisaram o processo de reaproveitamento de água dentro de uma refinaria considerando três

correntes com três contaminantes – Hidrocarbonetos (HC), H₂S e Sais – e uma fonte externa (0 ppm). Os dados limites são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 – Dados limites do problema com multicontaminantes de Wang e Smith (1994)

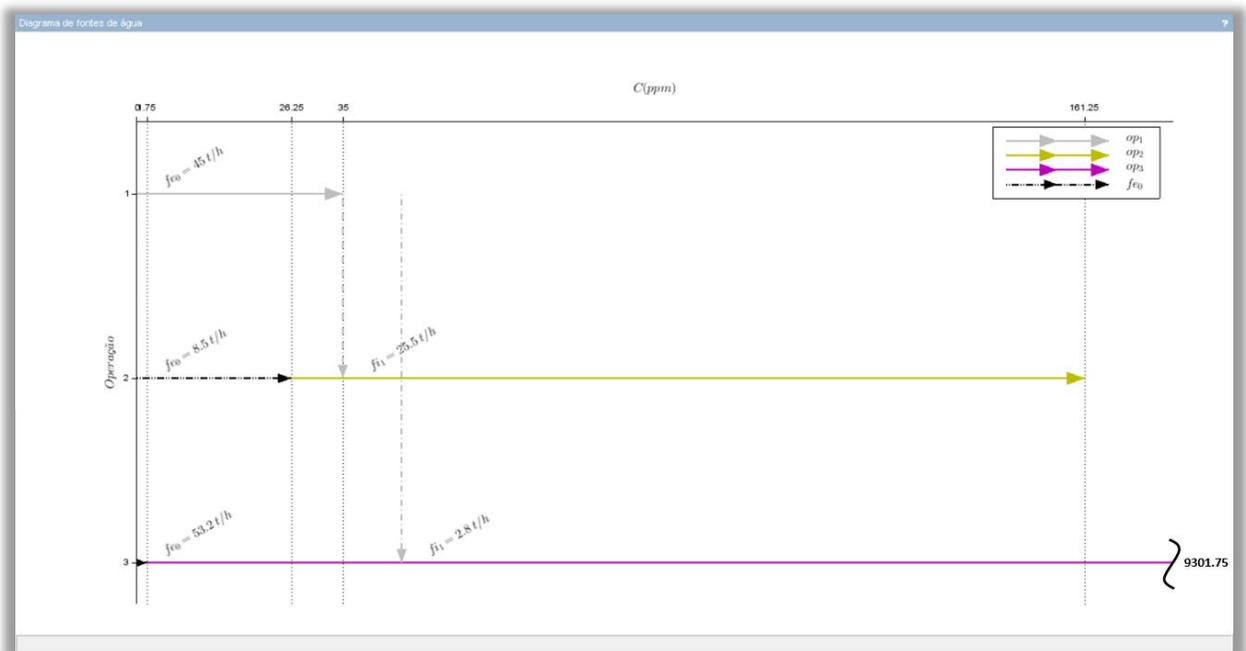
Operação (op)	f_L (t/h)	Contaminante (c)	$C_{in,max}$ (ppm)	$C_{out,max}$ (ppm)	Δm (g/h)
1	45	HC	0	15	675
		H ₂ S	0	400	18000
		Sais	0	35	1575
2	34	HC	20	120	3400
		H ₂ S	300	12500	414800
		Sais	45	180	4590
3	56	HC	120	220	5600
		H ₂ S	20	45	1400
		Sais	200	9500	520800

Fonte: Wang e Smith, 1994.

O diagrama e o relatório final são apresentados na Figura 31 e Figura 32, respectivamente. Nesse exemplo, não foram encontradas violações de concentração, portanto o fluxograma da rede pode ser facilmente obtido sem a necessidade de ajustes, com base no DFA do contaminante de referência “Sais”. Para isso, o usuário pode se guiar pelos valores de concentração dos contaminantes da entrada e da saída de cada operação disponíveis na tabela “*Verificando violações*” do relatório.

Com o reúso aplicado, a vazão total de água captada da fonte externa foi igual a 106,7 t/h contra a vazão de 133 t/h obtida com um processo sem reaproveitamento. Já a vazão de efluente reutilizado foi igual a 28,3 t/h, resultando em uma redução de, aproximadamente, 20 % no uso de água bruta. Gomes *et al.* (2013) encontrou o mesmo valor de água captada e reusada, mesmo escolhendo outro contaminante de referência (HC). É necessário lembrar que os métodos utilizados na escolha do contaminante de referência no trabalho de Gomes *et al.* (2013) e na implementação do *software* aqui apresentado são diferentes, devido à consideração do parâmetro $G_{c,op}^w$ no algoritmo.

Figura 31 – DFA do caso 4.1.6



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 32 – Relatório de vazões e de violações do caso 4.1.6

```

<<< Relatório Final >>>
| Operação  FE0 (t/h)  FI1 (t/h)  FI2 (t/h)  FI3 (t/h) |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1          45         0          0          0          |
| 2          8.5        25.5       0          0          |
| 3         53.2        2.8        0          0          |
| Total     106.7       28.3       0          0          |
<<< Relatório Final >>>

<<< Verificando violações >>>
| Operação  Contaminante  Cin-especificado  Cin-calculado  Violação (Cin)  Cout-especificado  Cout-calculado  Violação (Cout) |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1          HC          0                0                0                15                15                |
| 1          H2S         0                0                0                400               400               |
| 1          Sais         0                0                0                35                35                |
| 2          HC          20               11.25           0                120               111.25           |
| 2          H2S         300              300             0                12500             12500            |
| 2          Sais         45               26.25           0                180               161.25           |
| 3          HC          120              0.75            0                220               100.75           |
| 3          H2S         20               20              0                45                45                |
| 3          Sais         200              1.75            0                9500              9301.75          |
<<< Verificando violações >>>
    
```

Fonte: Acervo pessoal.

4.1.7 O CASO DE MULTICONTAMINANTES DE DOYLE E SMITH (1997)

Para o exemplo de Doyle e Smith (1997) *apud* Naice (2015), é considerado o caso de máximo reúso, com quatro operações e três contaminantes. Também é apontada uma fonte externa com 0 ppm para os três contaminantes. O problema está baseado nas informações da Tabela 8.

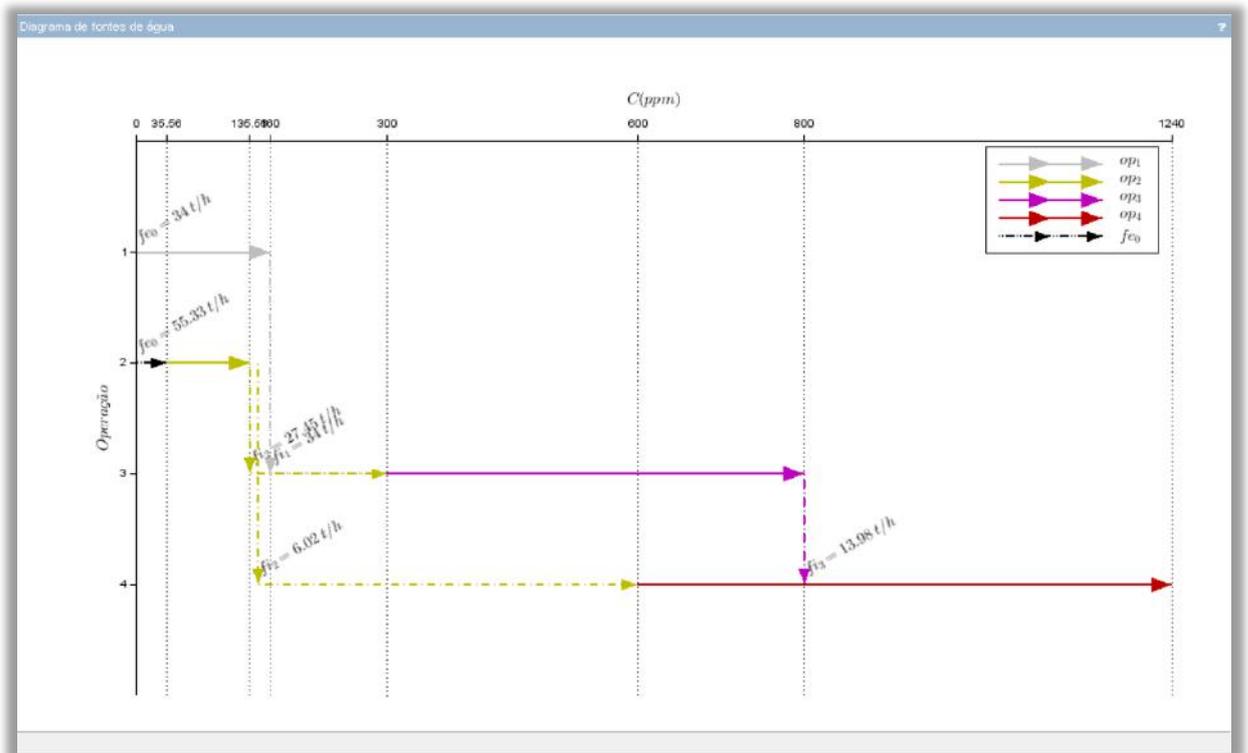
Tabela 8 – Dados limites do problema com multicontaminantes de Doyle e Smith (1997)

Operação (op)	f_L (t/h)	Contaminante (c)	$C_{in,max}$ (ppm)	$C_{out,max}$ (ppm)	Δm (g/h)
1	34	A	0	160	5440
		B	0	450	15300
		C	0	30	1020
2	75	A	200	300	7500
		B	100	270	12750
		C	500	740	18000
3	80	A	300	800	40000
		B	460	930	37600
		C	400	900	40000
4	20	A	600	1240	12800
		B	850	1400	11000
		C	390	1580	23800

Fonte: Doyle e Smith, 1997.

Após a obtenção do diagrama da Figura 33, é possível verificar que foram utilizados 89,3 t/h de água bruta. Além disso, o programa sinalizou uma violação do contaminante B na saída da operação 3 e duas violações do contaminante C na entrada e na saída da operação 4. Esses resultados foram corroborados pelo trabalho de Naice (2015) após a simulação no *software* MINEA 2.0, antes da evolução da RTM. Sabendo disso, o usuário deve aplicar a 8ª etapa da metodologia para multicontaminantes (item 3.1.2), realizando todos os devidos balanços materiais, com o intuito de obter um fluxograma sem violações.

Figura 33 – DFA do caso 4.1.7



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 34 – Relatório de vazões e de violações do caso 4.1.7

```
<<< Relatório Final >>>
```

Operação	FE0 (t/h)	FI1 (t/h)	FI2 (t/h)	FI3 (t/h)	FI4 (t/h)
1	34	0	0	0	0
2	55.33	0	0	0	0
3	0	34	27.45	0	0
4	0	0	6.02	13.98	0
Total	89.327869	34	33.471572	13.979933	0

```
<<< Relatório Final >>>
```



```
<<< Verificando violações >>>
```

Operação	Contaminante	Cin-especificado	Cin-calculado	Violação (Cin)	Cout-especificado	Cout-calculado	Violação (Cout)
1	a	0	0		160	160	
1	b	0	0		450	450	
1	c	0	0		30	30	
2	a	200	0		300	135.56	
2	b	100	0		270	230.44	
2	c	500	0		740	325.33	
3	a	300	149.08		800	800	
3	b	460	351.92		930	963.79	Sim
3	c	400	161.93		900	812.85	
4	a	600	600		1240	1240	
4	b	850	743.05		1400	1293.05	
4	c	390	666.11	Sim	1580	1856.11	Sim

```
<<< Verificando violações >>>
```

Fonte: Acervo pessoal.

4.1.8 O CASO DE MULTICONTAMINANTES DE YANG *ET AL.* (2000)

O caso de Yang *et al.* (2000) *apud* Marques (2008) se baseia em um processo de produção de papel e considera o máximo reúso com sete operações de carga fixa e dois

contaminantes: Sólidos Suspensos Totais (SST) e Químicos Dissolvidos (QD). Os dados limites são os apresentados da Tabela 9.

Tabela 9 – Dados limites do problema com multicontaminantes de Yang *et al.* (2000)

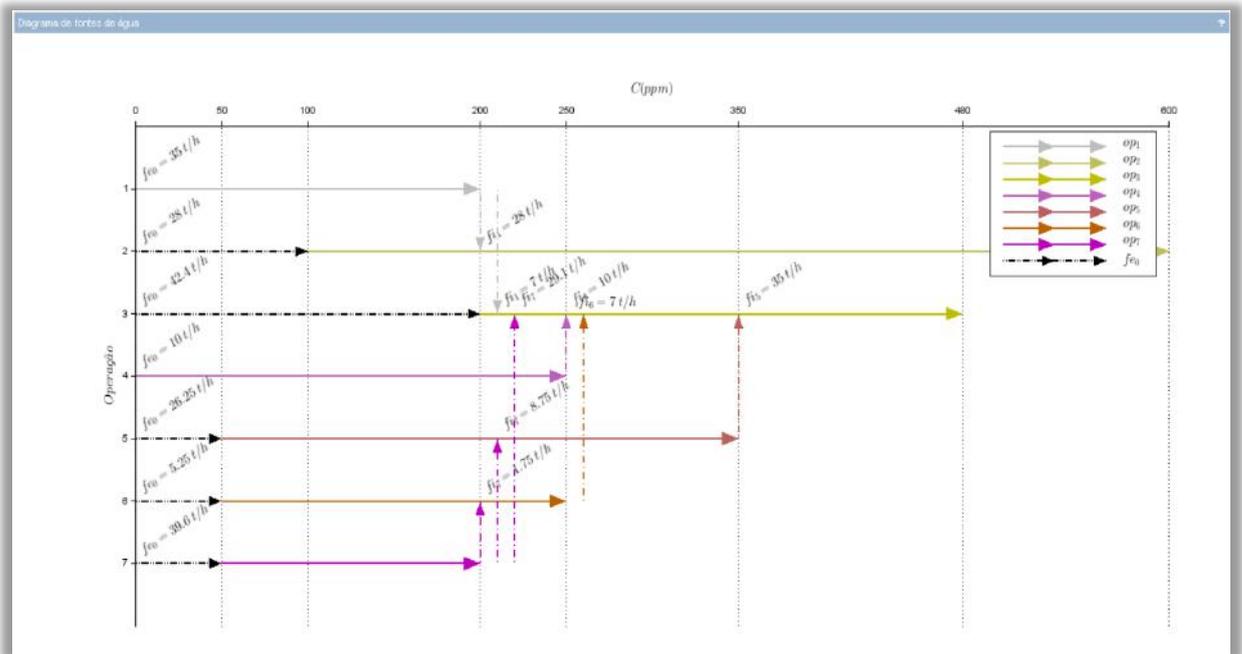
Operação (op)	f_L (t/h)	Contaminante (c)	$C_{in,max}$ (ppm)	$C_{out,max}$ (ppm)	Δm (g/h)
1	35	SST	0	200	7000
		QD	0	200	7000
2	56	SST	100	500	22400
		QD	100	600	28000
3	139	SST	200	650	62550
		QD	220	500	38920
4	10	SST	0	200	2000
		QD	50	300	2500
5	35	SST	50	300	8750
		QD	50	350	10500
6	7	SST	50	200	1050
		QD	50	250	1400
7	52,8	SST	50	300	13200
		QD	50	200	7920

Fonte: Yang *et al.*, 2000.

A partir dessas informações, foram obtidos o DFA (Figura 35), com base no contaminante de referência QD, e o relatório final (Figura 36), com a lista das violações de concentração do contaminante SST nas operações 3, 5, 6 e 7 e com as vazões utilizadas por cada operação. A vazão de água captada da fonte externa foi igual a 186,5 t/h, mesmo valor encontrado por Marques (2008), porém o número de violações identificadas divergiu do resultado da autora. A razão dessa diferença é explicada no item 4.2 deste trabalho.

Para a evolução da RTM, é necessário que o usuário avalie os ganhos econômicos e ambientais a partir da aplicação de um processo de regeneração local e/ou da diluição da corrente violada com água de fontes externas e internas.

Figura 35 – DFA do caso 4.1.8



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 36 – Relatório de vazões e de violações do caso 4.1.8

```
<<< Relatório Final >>>
```

Operação	FE0 (t/h)	FI1 (t/h)	FI2 (t/h)	FI3 (t/h)	FI4 (t/h)	FI5 (t/h)	FI6 (t/h)	FI7 (t/h)
1	35	0	0	0	0	0	0	0
2	28	28	0	0	0	0	0	0
3	42.4	7	0	0	10	35	7	29.1
4	10	0	0	0	0	0	0	0
5	26.25	0	0	0	0	0	0	8.75
6	5.25	0	0	0	0	0	0	1.75
7	39.6	0	0	0	0	0	0	0
Total	186.5	35	0	0	10	35	7	39.6

```
<<< Relatório Final >>>
```

```
<<< Verificando violações >>>
```

Operação	Contaminante	Cin-especificado	Cin-calculado	Violação (Cin)	Cout-especificado	Cout-calculado	Violação (Cout)
1	TSS	0	0		200	200	
1	DC	0	0		200	200	
2	TSS	100	100		500	500	
2	DC	100	100		600	600	
3	TSS	200	202.3	Sim	650	681.61	Sim
3	DC	220	181.76		500	480	
4	TSS	0	0		200	200	
4	DC	50	0		300	250	
5	TSS	50	83.33	Sim	300	333.33	Sim
5	DC	50	50		350	350	
6	TSS	50	83.33	Sim	200	233.33	Sim
6	DC	50	50		250	250	
7	TSS	50	0		300	333.33	Sim
7	DC	50	0		200	200	

```
<<< Verificando violações >>>
```

Fonte: Acervo pessoal.

4.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Os casos estudados no item anterior pertencem à autores que aplicaram outras metodologias para integração mássica, como por exemplo os métodos gráficos e de

otimização não-linear baseada em superestruturas. Por esse motivo, a comparação foi realizada a partir de trabalhos que adotaram o DFA como metodologia para resolução dos mesmos exemplos.

Conforme apresentado na Tabela 10, na maioria dos casos, foi observado que os resultados obtidos são iguais se comparados às referências. Porém, houve divergências nos casos 4.1.6 e 4.1.8.

Tabela 10 – Comparação entre os resultados encontrados pelos autores e pelo software desenvolvido

<i>Casos (Ref.)</i>	<i>Vazão captada da fonte externa (t/h)</i>		<i>Operação de referência</i>		<i>Cont. de Referência</i>		<i>Violações (Operação)</i>	
	<i>Ref.</i>	<i>Calc.</i>	<i>Ref.</i>	<i>Calc.</i>	<i>Ref.</i>	<i>Calc.</i>	<i>Ref.</i>	<i>Calc.</i>
4.1.1 Gomes, 2007	90	90,00	-	-	-	-	-	-
4.1.2 Naice, 2015	78,09	78,09	-	-	-	-	-	-
4.1.3 Gomes, 2007	20 (0 ppm) 93,3 (25 ppm)	20,00 (0 ppm) 93,33 (25 ppm)	-	-	-	-	-	-
4.1.4 Gomes, 2007	20 73,7 (Reg.)	20,00 73,68 (Reg.)	-	-	-	-	-	-
4.1.5 Naice, 2015	30 56,44 (Reg.)	30,00 56,44 (Reg.)	-	-	-	-	-	-
4.1.6 Gomes, 2013	106,7	106,70	1	1	HC	Sais	Não	Não
4.1.7 Naice, 2015 e Gomes, 2013	89,33	89,33	1	1	A	A	3 4	3 4
4.1.8 Marques, 2008	186,5	186,50	1	1	DC	DC	3 7	3 5 6 7

Fonte: Acervo pessoal.

O caso 4.1.6 refere-se ao exemplo de multicontaminantes de Wang e Smith (1994) resolvido por Gomes *et al.* (2013). Apesar da similaridade dos valores de vazão, o

contaminante de referência “HC” foi escolhido pela autora, enquanto que “Sais” foi o escolhido pelo *software* desenvolvido. Para a seleção, Gomes *et al.* (2013) considera o critério de escolha do contaminante com menor concentração de entrada na maioria das operações, dentre os contaminantes com crescimento monotônico. Já o programa considera a lógica apresentada na Figura 14, que assume o uso do parâmetro $G_{c,op}^w$. Logo, pode-se observar na Tabela 11 que o maior $G_{c,op}^w$ encontrado foi o do contaminante “Sais”.

Tabela 11 – Comparação das metodologias do caso 4.1.6

Operação	Contaminante	$C_{in,max}$ (ppm)	$C_{out,max}$ (ppm)	$G_{c,op}^w$ (g/h)
1	HC	0	15	45
	H2S	0	400	45
	Sais	0	35	45
2	HC	20	120	28
	H2S	300	12500	33
	Sais	45	180	26
3	HC	120	220	25
	H2S	20	45	31
	Sais	200	9500	55

Fonte: Acervo pessoal.

O caso 4.1.8 refere-se ao exemplo de multicontaminantes de Yang *et al.* (2000) resolvido por Marques (2008). O *software* apresentou um número maior de violações, comparado ao trabalho de referência. A provável justificativa está no critério utilizado para a ordenação das operações, descrito neste trabalho no item 3.1.1.1. No *software*, considera-se que a ordem de cálculo das operações deve seguir a disposição crescente dos valores de C_{in} e, como critério de desempate, a ordem crescente de C_{out} das operações. Isso resultou em um arranjo de reúso diferente do apresentado por Marques (2008).

Conforme demonstrado na Tabela 12, Marques (2008) fez considerações diferentes para alimentar as operações 3, 5 e 6, pois o cálculo do DFA foi realizado seguindo a ordem das operações descrita na Tabela 9: 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7. Já o *software* reorganizou as operações, de forma que o cálculo seguiu a ordem: 1, 4, 7, 6, 5, 2 e 3.

Tabela 12 – Comparação dos resultados para o caso 4.1.8

<i>Operação alimentada</i>	<i>Marques, 2008</i>		<i>Software desenvolvido</i>	
	<i>Fonte externa</i>	<i>Fontes internas</i>	<i>Fonte externa</i>	<i>Fontes internas</i>
<i>OP 1 (t/h)</i>	35	-	35	-
<i>OP 2 (t/h)</i>	28	28 (OP1)	28	28 (OP 1)
<i>OP 3 (t/h)</i>	38,34	7 (OP 1) 10 (OP 4) 30 (OP 5) 5,6 (OP 6) 39,6 (OP 7)	42,4	7 (OP 1) 10 (OP 4) 35 (OP 5) 7,0 (OP 6) 29,1 (OP 7)
<i>OP 4 (t/h)</i>	10	-	10	-
<i>OP 5 (t/h)</i>	30	-	26,25	8,75 (OP 7)
<i>OP 6 (t/h)</i>	5,6	-	5,25	1,75 (OP 7)
<i>OP 7 (t/h)</i>	39,6	-	39,6	-

Fonte: Construção própria baseada em Marques, 2008.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO

Com o intuito de facilitar a resolução e a análise de casos complexos de reúso de efluentes em diferentes tipos de indústrias, envolvendo muitas operações e vários contaminantes, foi desenvolvido um *software* na linguagem Scilab[®] para aplicação do método do Diagrama de Fontes de Água. O resultado obtido pelo *software* pode ser facilmente interpretado, tornando-o acessível e didático tanto para usuários do meio acadêmico quanto para os da indústria.

O programa foi validado com casos já difundidos na literatura. Com isso, foi possível observar a obtenção de resultados similares e coerentes, se comparados aos valores encontrados pelos autores citados.

A obtenção do diagrama com o arranjo de reúso e do relatório com as vazões, as violações e as concentrações de contaminantes na entrada e na saída de cada operação, certamente, facilitou a geração manual da RTM otimizada, atingindo o objetivo do método do DFA.

Alguns tipos de situações previstas nos trabalhos de Gomes *et al.* de 2007 e de 2013 não foram abordadas no *software*, mas sugere-se, em trabalhos futuros, expandi-lo para atender a problemas mais complexos que envolvem os casos de operações com perda e ganho de água, restrições de vazão e regeneração com reúso. A questão da evolução da RTM também pode ser explorada no *software* a partir da proposição de soluções que resolvam as violações do caso de multicontaminantes. A fim de melhorar a exposição dos resultados ao usuário, é necessário implementar uma rotina para geração do fluxograma do processo.

Além disso, recomenda-se a implementação de um módulo para a análise econômica do caso, considerando os custos com compras de materiais (Ex.: tubulações) e equipamentos, com serviços de instalação e manutenção, com captação de água fresca e com processos de regeneração.

CAPÍTULO 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Águas. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/panorama-das-aguas/agua-no-mundo>>. Acesso em: 11 de janeiro de 2020.

BELMONTE, J.P.C. **Algoritmo Diagrama de Fontes de Água na síntese com processos regenerativos em sistemas multicomponentes.** Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

BORGES, J.L. **Diagrama de Fontes de Hidrogênio.** Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 183, 2009.

CALIXTO, E.E.S.; QUARESMA, A.C.L.; QUEIROZ, E.M.; *et al.* **Water Sources Diagram in Multiple Contaminant Industrial Case Studies: Adoption of a Decomposition Approach.** Industrial and Engineering Chemistry Research, v. 54, n. 41, p. 10040–10053, 2015.

CALIXTO, E.E.S.; FRANCISCO, F.S.; PESSOA, F.L.P.; *et al.* **A Novel Approach to Predict Violations and to Define the Reference Contaminant and Operation in Water Using Networks.** Elsevier, 2015.

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/informacoes-basicas/tpos-de-agua/reuso-de-agua>>. Acesso em: 26 de janeiro de 2020.

PERLINGEIRO, C.A.G. **Diagrama de Fontes de Água: Ferramenta para reúso de efluentes Industriais.** 2016. 51 Slides. Disponível em: <<http://www.eq.ufrj.br/docentes/per/Diagrama%20de%20Fontes%20de%20C3%81gua%202.ppt>> . Acesso em: 07 de fevereiro de 2020.

DOYLE, S.J.; FELLOW, R. Smith. **Multiple Contaminants.** 1997

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.** AIChE Journal, v. 35, n. 8, p. 1233-1244, 1989.

FIGUEIREDO, E.A.H. **Aplicação do Diagrama de Fontes de Hidrogênio em Refinarias de Petróleo.** Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

FRANCISCO, F.S. **Aperfeiçoamento e Extensão do Diagrama de Fontes visando a Sustentabilidade.** Dissertação (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

FRANCISCO, F.S.; MIRRE, R.C.; CALIXTO, E.E.S.; *et al.* **Water sources diagram method in systems with multiple contaminants in fixed flowrate and fixed load processes.** *Journal of Cleaner Production*, v. 172, p. 3186–3200, 2018.

GOMES, J.F.S.; QUEIROZ, E.M.; PESSOA, F.L.P. **Design procedure for water/wastewater minimization: single contaminant.** *Journal of Cleaner Production*, v. 15, n. 5, p. 474–485, 2007.

GOMES, J.F.S.; MIRRE, R.C.; DELGADO, B.E.P.C.; *et al.* **Water sources diagram in multiple contaminant processes: Maximum reuse.** *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v. 52, n. 4, p. 1667–1677, 2013.

LAYRARGUES, P.P. **Sistemas de gerenciamento ambiental, tecnologia limpa e consumidor verde: a delicada relação empresa-meio ambiente no ecocapitalismo.** *Revista de Administração de Empresas*, v. 40, n. 2, p. 80–88, 2000.

LI, B.H.; CHANG, C.T. **Multiobjective optimization of water-using networks with multiple contaminants.** *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v. 50, n. 9, p. 5651–5660, 2011.

MARQUES, S.V. **Minimização do consumo de água e da geração de efluentes aquosos – Estudos de Casos.** Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

MATLAB[®]. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/index.html>>.

Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/agenda-21>>. Acesso em: 11 de janeiro de 2020.

MIRRE, R.C. **Metodologia para o Gerenciamento Sustentável do Reúso de Águas e Efluentes Industriais por meio da Integração de Processos.** Dissertação (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 685, 2012.

MIRRE, R.C.; YOKOYAMA, L.; PESSOA, F.L.P. **Reúso de Água em Processos Químicos – Modelo Integrado para Gerenciamento Sustentável.** 1ª Edição, Curitiba: Appris, 2015.

MIRRE, R.C.; FRANCISCO, F.S.; CALIXTO, E.E.S.; *et al.* **MINEA, Software para a Minimização do Consumo de Água em Processos Químicos com Base no Diagrama de Fontes de Água (DFA).** 11º Congreso Interamericano de Computación Aplicada a la Industria de Procesos - CAIP, v. 1, n. 1, 2013.

Nações Unidas Brasil. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/acao/meio-ambiente>>. Acesso em: 21 de dezembro de 2019.

Nações Unidas Brasil. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/acao/agua>>. Acesso em: 26 de janeiro de 2020.

NAICE, F.P. **Automatização do Diagrama de Fontes de Água.** Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

OVERCASH, M. **Environmental management for the future**. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, v. 355, n. 1728, p. 1299–1308, 1997.

PEIXOTO, T. **Reúso de Água: Comparação entre os métodos DFA, Programação Linear e Programação Não Linear**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

RELVAS, S.; MATOS, H.A.; FERNANDES, M.C.; *et al.* **AquoMin: Targeting and design of mass-exchange networks featuring regeneration recycle**. Computer Aided Chemical Engineering, v. 20, n. C, p. 685–690, 2005.

RESENDE, M.G. **Desenvolvimento de um programa computacional em Scilab® baseado no método Pinch de integração energética**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos), Universidade Federal de São Carlos, p. 81, 2013.

SAVELSKI, M.; BAGAJEWICZ, M.. **Algorithmic procedure to design water utilization systems featuring a single contaminant in process plants**. Chemical Engineering Science, 2000.

SAVELSKI, M.; BAGAJEWICZ, M. **On the necessary conditions of optimality of water utilization systems in process plants with multiple contaminants**. Chemical Engineering Science, v. 58, n. 23–24, p. 5349–5362, 2003.

SCARLATI, P.R.S. **Redução do consumo de água na indústria petroquímica**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

Scilab®. Disponível em: <<https://www.scilab.org/>>. Acesso em: 21 de dezembro de 2019.

YANG, Y.H.; LOU, H.H.; HUANG, Y.L. **Synthesis of an optimal wastewater reuse network**. Waste Management, v. 20, n. 4, p. 311–319, 2000.

WANG, B.; FENG, X.; ZHANG, Z. **A design methodology for multiple-contaminant water networks with single internal water main**. Computers and Chemical Engineering, v. 27, n. 7, p. 903–911, 2003.

WANG, Y.P.; SMITH, R. **Wastewater minimisation**. Chemical Engineering Science, v. 49, n. 7, p. 981–1006, 1994.

Water Design®. Disponível em: <<https://www.design.che.vt.edu/waterdesign/waterdesign.html>>. Acesso em: 26 de janeiro de 2020.

VALLE, E.C. **Minimização do uso de água e efluentes com considerações econômicas e operacionais via Programação Matemática**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, p. 287, 2005.

ANEXO 1

A seguir, são apresentados os relatórios e os diagramas de fontes obtidos pelo software a partir dos exemplos simulados.

✓ **Estudo de caso 4.1.1:**

Relatório completo do caso de máximo reúso de Wang e Smith (1994)

```

Início de caso
Problema unicontaminante

Análise da operação 1
<<< busca_fonte >>>
Intervalo = [0,50] ppm
  FE 0 ppm alimenta com vazão de 20t/h.
Intervalo = [50,100] ppm
  Intervalo já atendido
<<< busca_fonte >>>

Análise da operação 2
<<< busca_fonte >>>
Intervalo = [50,100] ppm
  FE 0 ppm alimenta com vazão de 50t/h.
<<< busca_fonte >>>

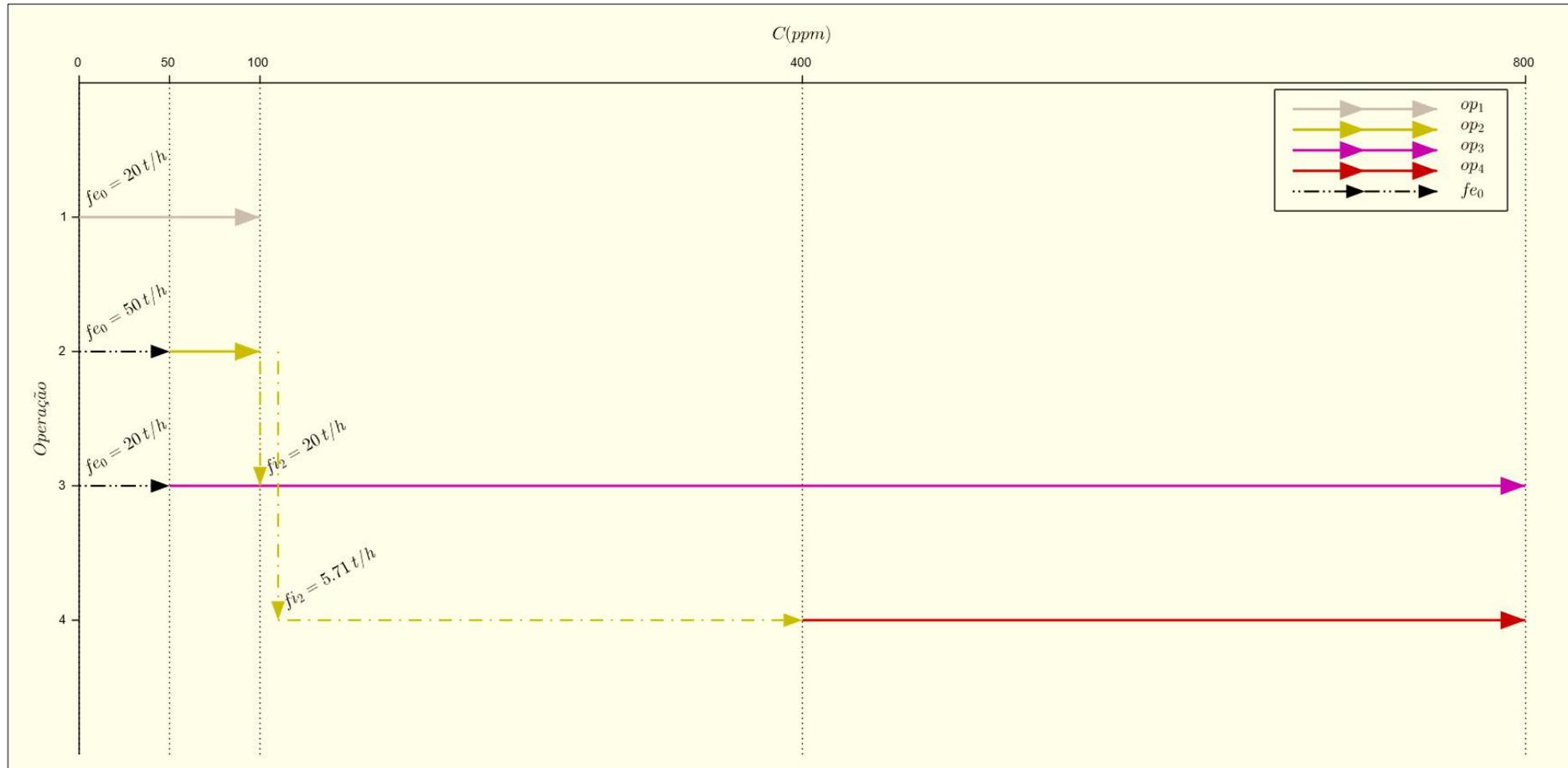
Análise da operação 3
<<< busca_fonte >>>
Intervalo = [50,100] ppm
  FE 0 ppm alimenta com vazão de 20t/h.
Intervalo = [100,400] ppm
  FI2 (100 ppm) alimenta com vazão de 20 t/h.
Intervalo = [400,800] ppm
  Intervalo já atendido
<<< busca_fonte >>>

Análise da operação 4
<<< busca_fonte >>>
Intervalo = [400,800] ppm
  FI2 (100 ppm) alimenta com vazão de 5.71 t/h.
<<< busca_fonte >>>

<<< Relatório Final >>>
| Operação  FE0 (t/h)  FI1 (t/h)  FI2 (t/h)  FI3 (t/h)  FI4 (t/h)  |
|      1      20        0         0         0         0 |
|      2      50        0         0         0         0 |
|      3      20        0        20         0         0 |
|      4       0         0         5.71        0         0 |
|    Total    90        0    25.714286    0         0 |
<<< Relatório Final >>>

```

DFA do caso de máximo reúso de Wang e Smith (1994)



✓ **Estudo de caso 4.1.2:**

Relatório completo do caso de máximo reúso de Relvas (2005)

```

Início de caso
Problema unicontaminante

Análise da operação 1
<<< busca_fonte >>>
Intervalo = [15,50] ppm
  FE 0 ppm alimenta com vazão de 33.6t/h.
Intervalo = [50,125] ppm
  FE 0 ppm alimenta com vazão de 8.64t/h.
Intervalo = [125,200] ppm
  FE 0 ppm alimenta com vazão de 2.16t/h.
<<< busca_fonte >>>

Análise da operação 2
<<< busca_fonte >>>
Intervalo = [50,125] ppm
  FE 0 ppm alimenta com vazão de 21t/h.
Intervalo = [125,200] ppm
  FE 0 ppm alimenta com vazão de 5.25t/h.
Intervalo = [200,250] ppm
  FI1 (200 ppm) alimenta com vazão de 8.75 t/h.
Intervalo = [250,300] ppm
  Intervalo já atendido
<<< busca_fonte >>>

Análise da operação 3
<<< busca_fonte >>>
Intervalo = [125,200] ppm
  FE 0 ppm alimenta com vazão de 4.5t/h.
Intervalo = [200,250] ppm
  FI1 (200 ppm) alimenta com vazão de 7.5 t/h.
Intervalo = [250,300] ppm
  Intervalo já atendido
Intervalo = [300,350] ppm
  Intervalo já atendido
<<< busca_fonte >>>

Análise da operação 4
<<< busca_fonte >>>
Intervalo = [250,300] ppm
  FI1 (200 ppm) alimenta com vazão de 28.15 t/h.
  Vazão Calculada 35 t/h regulada para 28.15 t/h.
  FE 0 ppm alimenta com vazão de 2.28t/h.
Intervalo = [300,350] ppm
  FI2 (300 ppm) alimenta com vazão de 35 t/h.
  Vazão Calculada 39.566667 t/h regulada para 35 t/h.
  FI1 (200 ppm) alimenta com vazão de 0 t/h.
  Vazão Calculada 1.5222222 t/h regulada para 0 t/h.
  FE 0 ppm alimenta com vazão de 0.65t/h.
Intervalo = [350,450] ppm
  FI3 (350 ppm) alimenta com vazão de 3.91 t/h.
<<< busca_fonte >>>

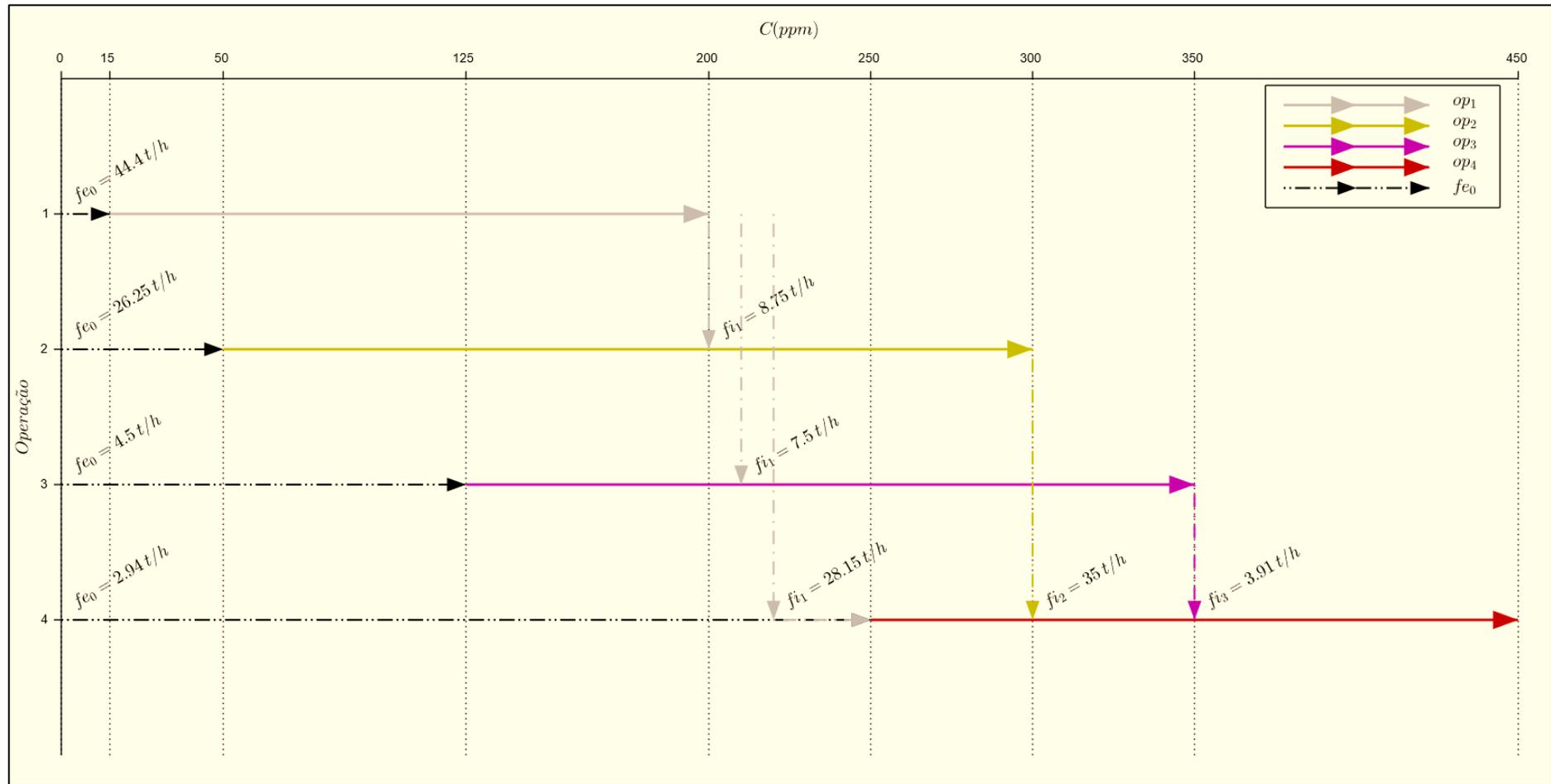
```

<<< Relatório Final >>>

	Operação	FE0 (t/h)	FI1 (t/h)	FI2 (t/h)	FI3 (t/h)	FI4 (t/h)	
	1	44.4	0	0	0	0	
	2	26.25	8.75	0	0	0	
	3	4.5	7.5	0	0	0	
	4	2.94	28.15	35	3.91	0	
	Total	78.085714	44.4	35	3.9142857	0	

<<< Relatório Final >>>

DFA do caso de máximo reúso de Relvas (2005)



✓ **Estudo de caso 4.1.3:**

Relatório completo do caso de múltiplas fontes externas de Wang e Smith (1994)

```

Início de caso
Problema unicontaminante

Análise da operação 1
<<< busca_fonte >>>
Intervalo = [0,25] ppm
  FE 0 ppm alimenta com vazão de 20t/h.
Intervalo = [25,50] ppm
  Intervalo já atendido
Intervalo = [50,100] ppm
  Intervalo já atendido
<<< busca_fonte >>>

Análise da operação 2
<<< busca_fonte >>>
Intervalo = [50,100] ppm
  FE 25 ppm alimenta com vazão de 66.67t/h.
<<< busca_fonte >>>

Análise da operação 3
<<< busca_fonte >>>
Intervalo = [50,100] ppm
  FE 25 ppm alimenta com vazão de 26.67t/h.
Intervalo = [100,400] ppm
  FI2 (100 ppm) alimenta com vazão de 13.33 t/h.
Intervalo = [400,800] ppm
  Intervalo já atendido
<<< busca_fonte >>>

Análise da operação 4
<<< busca_fonte >>>
Intervalo = [400,800] ppm
  FI2 (100 ppm) alimenta com vazão de 5.71 t/h.
<<< busca_fonte >>>

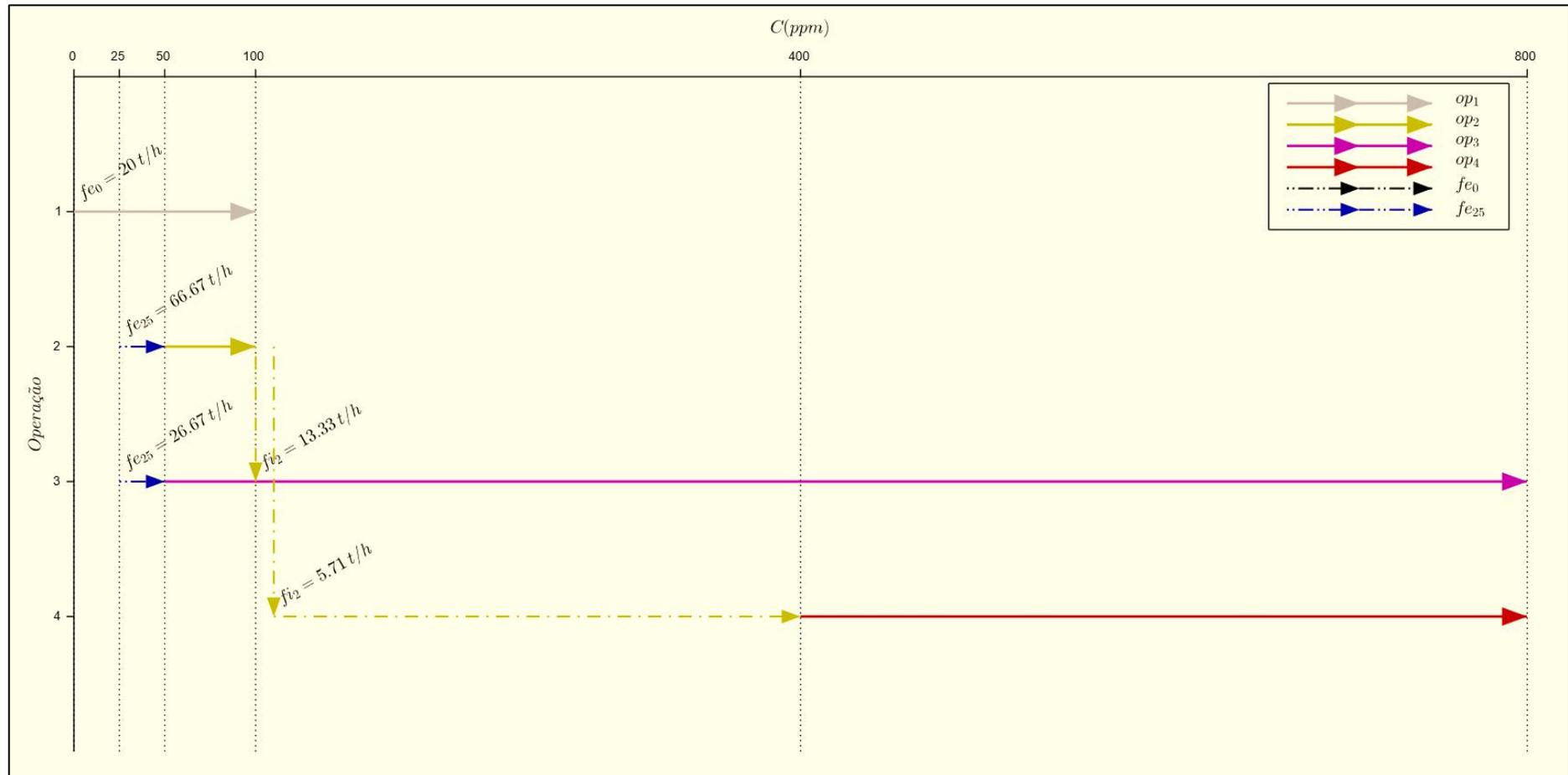
<<< Relatório Final >>>

| Operação  FE0 (t/h)  FE25 (t/h)  FI1 (t/h)  FI2 (t/h)  FI3 (t/h)  FI4 (t/h) |
|      1      20         0          0          0          0          0 |
|      2       0        66.67         0          0          0          0 |
|      3       0        26.67         0        13.33         0          0 |
|      4       0         0          0         5.71         0          0 |
|    Total    20       93.333333         0       19.047619         0          0 |

<<< Relatório Final >>>

```

DFA do caso de múltiplas fontes externas de Wang e Smith (1994)



✓ **Estudo de caso 4.1.4:**

Relatório completo do caso de regeneração com reciclo de Wang e Smith (1994)

Início de caso
Problema unicontaminante

Análise da operação 1

<<< busca_fonte >>>

Intervalo = [0,5] ppm

FE 0 ppm alimenta com vazão de 20t/h.

Intervalo = [5,50] ppm

Intervalo já atendido

Intervalo = [50,100] ppm

Intervalo já atendido

<<< busca_fonte >>>

Análise da operação 2

<<< busca_fonte >>>

Intervalo = [50,100] ppm

FE 5 ppm alimenta com vazão de 52.63t/h.

<<< busca_fonte >>>

Análise da operação 3

<<< busca_fonte >>>

Intervalo = [50,100] ppm

FE 5 ppm alimenta com vazão de 21.05t/h.

Intervalo = [100,400] ppm

FI2 (100 ppm) alimenta com vazão de 18.95 t/h.

Intervalo = [400,800] ppm

Intervalo já atendido

<<< busca_fonte >>>

Análise da operação 4

<<< busca_fonte >>>

Intervalo = [400,800] ppm

FI2 (100 ppm) alimenta com vazão de 5.71 t/h.

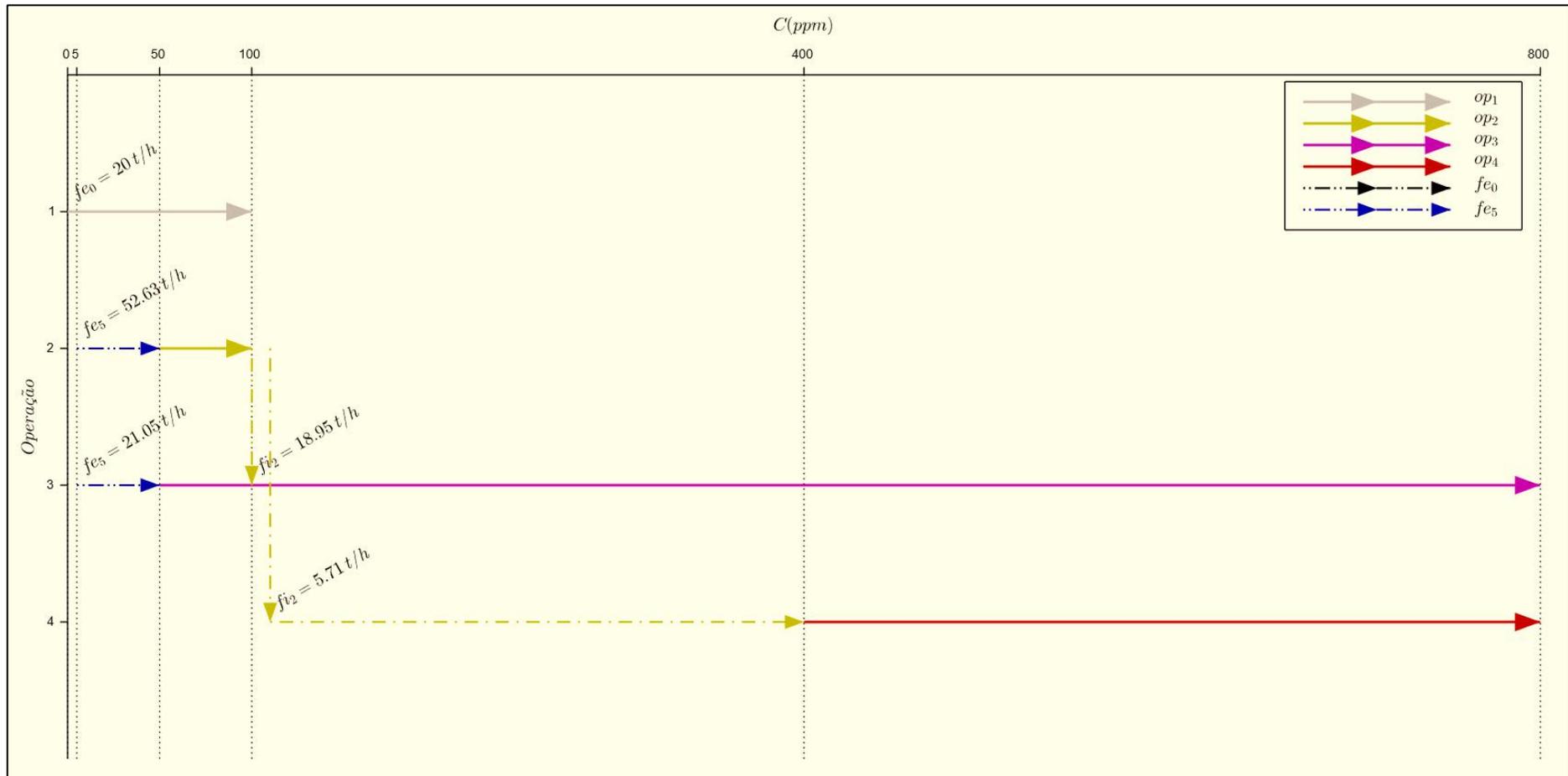
<<< busca_fonte >>>

<<< Relatório Final >>>

Operação	FE0 (t/h)	FE5 (t/h)	FI1 (t/h)	FI2 (t/h)	FI3 (t/h)	FI4 (t/h)
1	20	0	0	0	0	0
2	0	52.63	0	0	0	0
3	0	21.05	0	18.95	0	0
4	0	0	0	5.71	0	0
Total	20	73.684211	0	24.661654	0	0

<<< Relatório Final >>>

DFA do caso de regeneração com reciclo de Wang e Smith (1994)



✓ **Estudo de caso 4.1.5:****Relatório completo do caso de regeneração com reciclo de Relvas (2005)**

```
Início de caso
Problema unicontaminante

Análise da operação 1
<<< busca_fonte >>>
Intervalo = [15,40] ppm
  FE 0 ppm alimenta com vazão de 30t/h.
Intervalo = [40,50] ppm
  FE 40 ppm alimenta com vazão de 18t/h.
Intervalo = [50,125] ppm
  Intervalo já atendido
Intervalo = [125,200] ppm
  Intervalo já atendido
<<< busca_fonte >>>

Análise da operação 2
<<< busca_fonte >>>
Intervalo = [50,125] ppm
  FE 40 ppm alimenta com vazão de 30.88t/h.
Intervalo = [125,200] ppm
  FE 40 ppm alimenta com vazão de 1.93t/h.
Intervalo = [200,250] ppm
  FI1 (200 ppm) alimenta com vazão de 2.19 t/h.
Intervalo = [250,300] ppm
  Intervalo já atendido
<<< busca_fonte >>>

Análise da operação 3
<<< busca_fonte >>>
Intervalo = [125,200] ppm
  FE 40 ppm alimenta com vazão de 5.63t/h.
Intervalo = [200,250] ppm
  FI1 (200 ppm) alimenta com vazão de 6.38 t/h.
Intervalo = [250,300] ppm
  Intervalo já atendido
Intervalo = [300,350] ppm
  Intervalo já atendido
<<< busca_fonte >>>

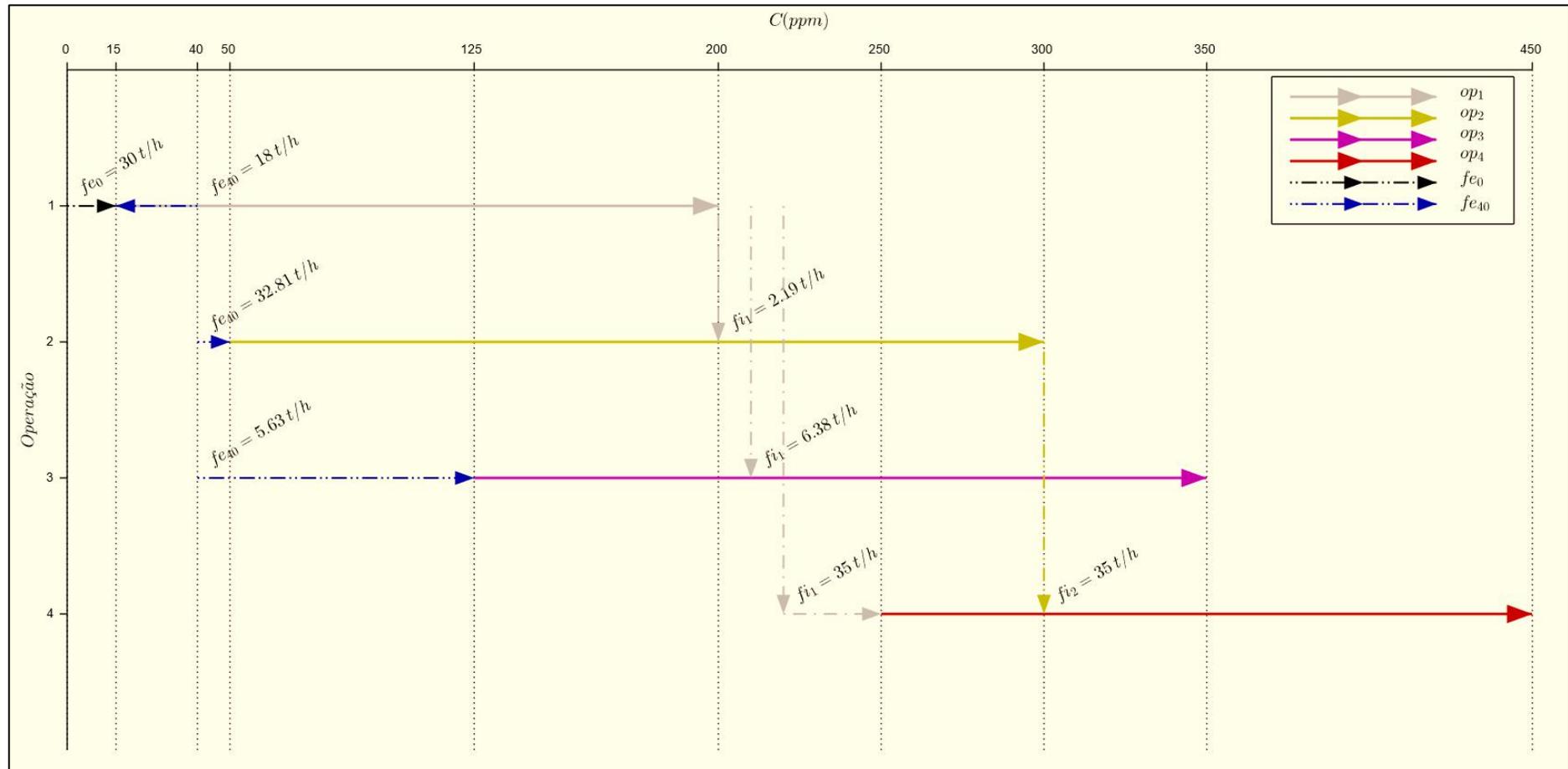
Análise da operação 4
<<< busca_fonte >>>
Intervalo = [250,300] ppm
  FI1 (200 ppm) alimenta com vazão de 35 t/h.
Intervalo = [300,350] ppm
  FI2 (300 ppm) alimenta com vazão de 35 t/h.
Intervalo = [350,450] ppm
  Intervalo já atendido
<<< busca_fonte >>>
```

<<< Relatório Final >>>

	Operação	FE0 (t/h)	FE40 (t/h)	FI1 (t/h)	FI2 (t/h)	FI3 (t/h)	FI4 (t/h)	
	1	30	18	0	0	0	0	
	2	0	32.81	2.19	0	0	0	
	3	0	5.63	6.38	0	0	0	
	4	0	0	35	35	0	0	
	Total	30	56.4375	43.5625	35	0	0	

<<< Relatório Final >>>

DFA do caso de regeneração com reciclo de Relvas (2005)



✓ **Estudo de caso 4.1.6:**

Relatório completo do caso de multicontaminantes de Wang e Smith (1994)

```

Início de caso
Problema multicontaminantes

<<< Multicontaminantes >>>
OP_1 foi escolhida como operação de referência.

<<< Análise do crescimento monotônico >>>
|   Contaminante   Monot. Cresc. |
|           'HC'           'Sim' |
|           'H2S'          'Não'  |
|           'Sais'          'Sim'  |

O contaminante de referência é: 'Sais'

Realizando os ajustes de intervalos
  Ajustando operação de referência: OP_1
|   Contaminante   Cin   Cout   |
|           HC      0     15   |
|           H2S     0     400  |
|           Sais    0     35   |
OP_2_'HC' não precisa ter seu intervalo ajustado
  [20,120] --> [20,120]
OP_3_'HC' não precisa ter seu intervalo ajustado
  [120,220] --> [120,220]
  Ajustando operação: OP_2_Sais
    [45,180] --> [26.25,161.25]
  Ajustando operação: OP_3_Sais
    [200,9500] --> [1.75,9301.75]

Dados de entrada para o DFA:
| Operação   Cin     Cout   Vazão Limite |
|           1      0      35      45 |
|           2 26.25 161.25  34 |
|           3  1.75 9301.75  56 |

<<< Multicontaminantes >>>

Análise da operação 1
<<< busca_fonte >>>
Intervalo = [0,1.75] ppm
  FE 0 ppm alimenta com vazão de 45t/h.
Intervalo = [1.75,26.25] ppm
  Intervalo já atendido
Intervalo = [26.25,35] ppm
  Intervalo já atendido
<<< busca_fonte >>>

```

Análise da operação 3

<<< busca_fonte >>>

Intervalo = [1.75,26.25] ppm

FE 0 ppm alimenta com vazão de 52.27t/h.

Intervalo = [26.25,35] ppm

FE 0 ppm alimenta com vazão de 0.93t/h.

Intervalo = [35,161.25] ppm

FI1 (35 ppm) alimenta com vazão de 2.8 t/h.

Intervalo = [161.25,9301.75] ppm

Intervalo já atendido

<<< busca_fonte >>>

Análise da operação 2

<<< busca_fonte >>>

Intervalo = [26.25,35] ppm

FE 0 ppm alimenta com vazão de 8.5t/h.

Intervalo = [35,161.25] ppm

FI1 (35 ppm) alimenta com vazão de 25.5 t/h.

<<< busca_fonte >>>

<<< Relatório Final >>>

Operação	FE0 (t/h)	FI1 (t/h)	FI2 (t/h)	FI3 (t/h)
1	45	0	0	0
2	8.5	25.5	0	0
3	53.2	2.8	0	0
Total	106.7	28.3	0	0

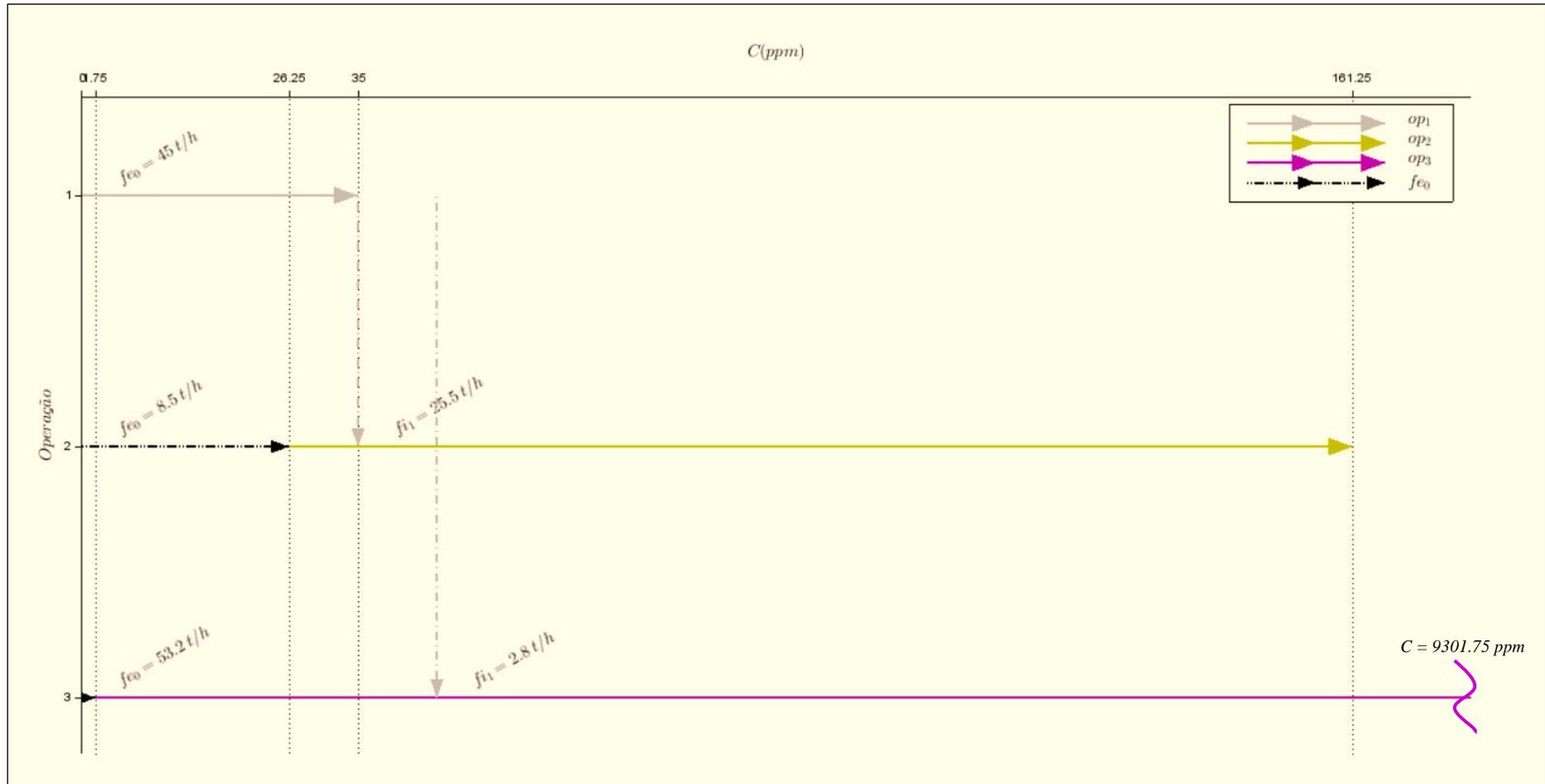
<<< Relatório Final >>>

<<< Verificando violações >>>

Operação	Contaminante	Cin-especif.	Cin-calc.	Violação(Cin)	Cout-especif.	Cout-calc.	Violação(Cout)
1	HC	0	0		15	15	
1	H2S	0	0		400	400	
1	Sais	0	0		35	35	
2	HC	20	11.25		120	111.25	
2	H2S	300	300		12500	12500	
2	Sais	45	26.25		180	161.25	
3	HC	120	0.75		220	100.75	
3	H2S	20	20		45	45	
3	Sais	200	1.75		9500	9301.75	

<<< Verificando violações >>>

DFA do caso de multicontaminantes de Wang e Smith (1994)



✓ **Estudo de caso 4.1.7:**

Relatório completo do caso de multicontaminantes de Doyle e Smith (1997)

```

Início de caso
Problema multicontaminantes

<<< Multicontaminantes >>>
OP_1 foi escolhida como operação de referência.

<<< Análise do crescimento monotônico >>>
|   Contaminante   Monot. Cresc. |
|           'a'           'Sim'   |
|           'b'           'Não'   |
|           'c'           'Sim'   |

O contaminante de referência é: 'a'

Realizando os ajustes de intervalos
  Ajustando operação de referência: OP_1
|   Contaminante   Cin   Cout   |
|           a       0     160   |
|           b       0     450   |
|           c       0      30   |
  Ajustando operação: OP_2_a
  [200,300] --> [35.555556,135.55556]
OP_3_'b' não precisa ter seu intervalo ajustado
  [460,930] --> [460,930]
OP_4_'b' não precisa ter seu intervalo ajustado
  [850,1400] --> [850,1400]
OP_2_'c' não precisa ter seu intervalo ajustado
  [500,740] --> [500,740]
OP_3_'c' não precisa ter seu intervalo ajustado
  [400,900] --> [400,900]
OP_4_'c' não precisa ter seu intervalo ajustado
  [390,1580] --> [390,1580]

Dados de entrada para o DFA:
| Operação   Cin   Cout   Vazão Limite |
|           1     0     160         34 |
|           2 35.56 135.56         75 |
|           3   300     800         80 |
|           4   600    1240         20 |

<<< Multicontaminantes >>>

Análise da operação 1
<<< busca_fonte >>>
Intervalo = [0,35.555556] ppm
  FE 0 ppm alimenta com vazão de 34t/h.
Intervalo = [35.555556,135.55556] ppm
  Intervalo já atendido
Intervalo = [135.55556,160] ppm
  Intervalo já atendido
<<< busca_fonte >>>

```

Análise da operação 2

<<< busca_fonte >>>

Intervalo = [35.555556,135.55556] ppm

FE 0 ppm alimenta com vazão de 55.33t/h.

<<< busca_fonte >>>

Análise da operação 3

<<< busca_fonte >>>

Intervalo = [300,600] ppm

FI1 (160 ppm) alimenta com vazão de 34 t/h.

Vazão Calculada 54.545455 t/h regulada para 34 t/h.

FI2 (135.55556 ppm) alimenta com vazão de 19.46 t/h.

Intervalo = [600,800] ppm

FI1 (160 ppm) alimenta com vazão de 0 t/h.

Vazão Calculada 8.2924641 t/h regulada para 0 t/h.

FI2 (135.55556 ppm) alimenta com vazão de 7.99 t/h.

<<< busca_fonte >>>

Análise da operação 4

<<< busca_fonte >>>

Intervalo = [600,800] ppm

FI1 (160 ppm) alimenta com vazão de 0 t/h.

Vazão Calculada 6.25 t/h regulada para 0 t/h.

FI2 (135.55556 ppm) alimenta com vazão de 6.02 t/h.

Intervalo = [800,1240] ppm

FI3 (800 ppm) alimenta com vazão de 13.98 t/h.

<<< busca_fonte >>>

<<< Relatório Final >>>

Operação	FE0 (t/h)	FI1 (t/h)	FI2 (t/h)	FI3 (t/h)	FI4 (t/h)
1	34	0	0	0	0
2	55.33	0	0	0	0
3	0	34	27.45	0	0
4	0	0	6.02	13.98	0
Total	89.327869	34	33.471572	13.979933	0

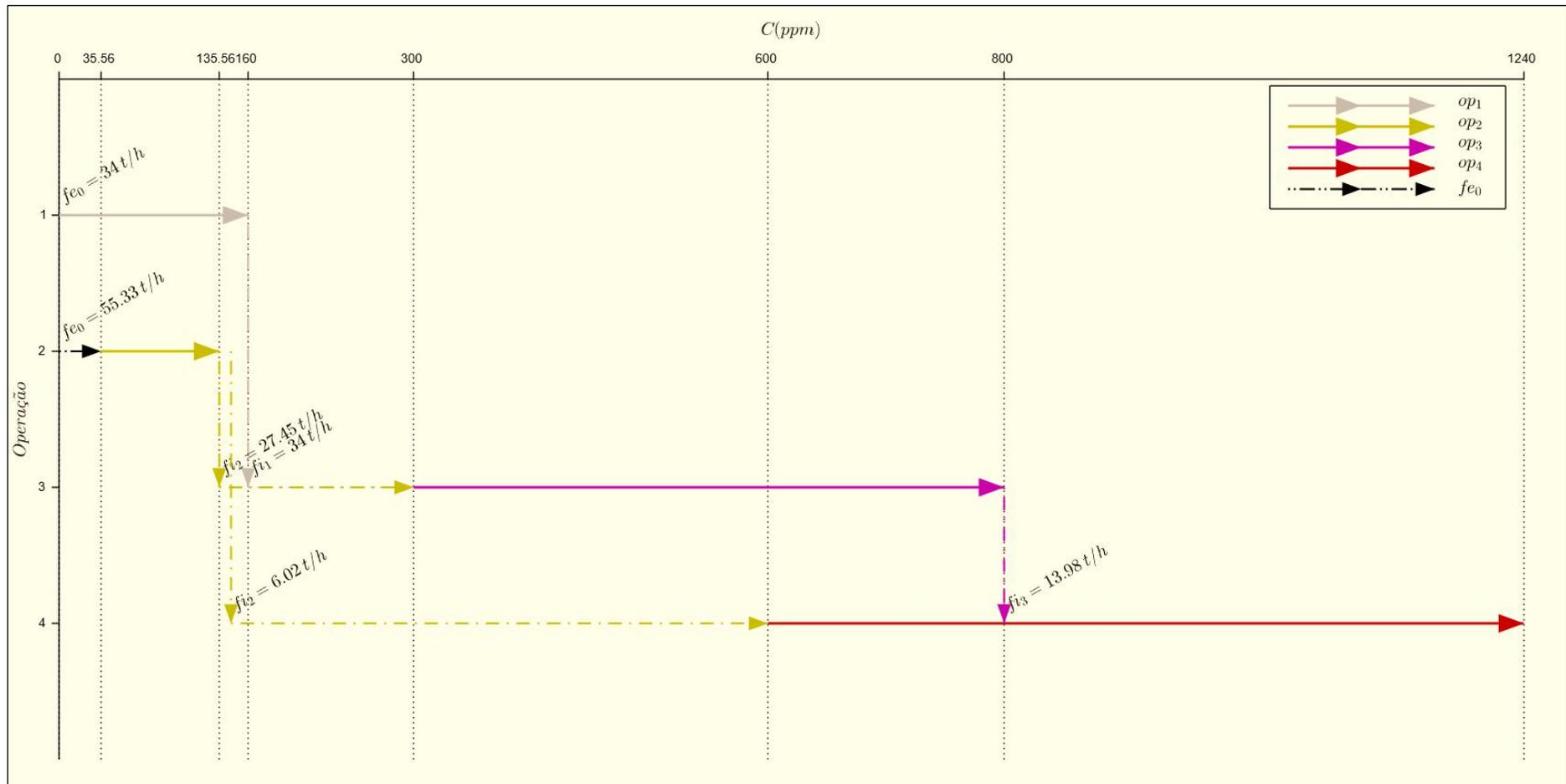
<<< Relatório Final >>>

<<< Verificando violações >>>

Operação	Contaminante	Cin-especif.	Cin-calc.	Violação(Cin)	Cout-especif.	Cout-calc.	Violação(Cout)
1	a	0	0		160	160	
1	b	0	0		450	450	
1	c	0	0		30	30	
2	a	200	0		300	135.56	
2	b	100	0		270	230.44	
2	c	500	0		740	325.33	
3	a	300	149.08		800	800	
3	b	460	351.92		930	963.79	Sim
3	c	400	161.93		900	812.85	
4	a	600	600		1240	1240	
4	b	850	743.05		1400	1293.05	
4	c	390	666.11	Sim	1580	1856.11	Sim

<<< Verificando violações >>>

DFA do caso de multicontaminantes de Doyle e Smith (1997)



✓ **Estudo de caso 4.1.8:**

Relatório completo do caso de multicontaminantes de Yang *et al.* (2000)

```

Início de caso
Problema multicontaminantes

<<< Multicontaminantes >>>
OP1 é uma possível operação de referência.
OP4 é uma possível operação de referência.
OP1 foi escolhida como operação de referência

<<< Análise do crescimento monotônico >>>
|   Contaminante   Monot. Cresc.   |
|         'TSS'         'Não'     |
|         'DC'         'Não'     |

O contaminante de referência é: 'DC'

Realizando os ajustes de intervalos
  Ajustando operação de referência: OP_1
|   Contaminante   Cin   Cout   |
|         TSS      0    200   |
|         DC       0    200   |
  Ajustando operação: OP_2_DC
  [100,600] --> [100,600]
  Ajustando operação: OP_3_DC
  [220,500] --> [200,480]
  Ajustando operação: OP_4_DC
  [50,300] --> [0,250]
  Ajustando operação: OP_5_DC
  [50,350] --> [50,350]
  Ajustando operação: OP_6_DC
  [50,250] --> [50,250]
  Ajustando operação: OP_7_DC
  [50,200] --> [50,200]

Dados de entrada para o DFA:
| Operação   Cin   Cout   Vazão Limite |
|          1     0    200        35 |
|          2    100   600        56 |
|          3    200   480       139 |
|          4     0    250         10 |
|          5     50   350         35 |
|          6     50   250          7 |
|          7     50   200       52.8 |

<<< Multicontaminantes >>>

Análise da operação 1
<<< busca_fonte >>>
Intervalo = [0,50] ppm
  FE 0 ppm alimenta com vazão de 35t/h.
Intervalo = [50,100] ppm
  Intervalo já atendido
Intervalo = [100,200] ppm
  Intervalo já atendido
<<< busca_fonte >>>

```

```
Análise da operação 4
<<< busca_fonte >>>
Intervalo = [0,50] ppm
  FE 0 ppm alimenta com vazão de 10t/h.
Intervalo = [50,100] ppm
  Intervalo já atendido
Intervalo = [100,200] ppm
  Intervalo já atendido
Intervalo = [200,250] ppm
  Intervalo já atendido
<<< busca_fonte >>>

Análise da operação 7
<<< busca_fonte >>>
Intervalo = [50,100] ppm
  FE 0 ppm alimenta com vazão de 26.4t/h.
Intervalo = [100,200] ppm
  FE 0 ppm alimenta com vazão de 13.2t/h.
<<< busca_fonte >>>

Análise da operação 6
<<< busca_fonte >>>
Intervalo = [50,100] ppm
  FE 0 ppm alimenta com vazão de 3.5t/h.
Intervalo = [100,200] ppm
  FE 0 ppm alimenta com vazão de 1.75t/h.
Intervalo = [200,250] ppm
  FI7 (200 ppm) alimenta com vazão de 1.75 t/h.
<<< busca_fonte >>>

Análise da operação 5
<<< busca_fonte >>>
Intervalo = [50,100] ppm
  FE 0 ppm alimenta com vazão de 17.5t/h.
Intervalo = [100,200] ppm
  FE 0 ppm alimenta com vazão de 8.75t/h.
Intervalo = [200,250] ppm
  FI7 (200 ppm) alimenta com vazão de 8.75 t/h.
Intervalo = [250,350] ppm
  Intervalo já atendido
<<< busca_fonte >>>

Análise da operação 2
<<< busca_fonte >>>
Intervalo = [100,200] ppm
  FE 0 ppm alimenta com vazão de 28t/h.
Intervalo = [200,250] ppm
  FI1 (200 ppm) alimenta com vazão de 28 t/h.
Intervalo = [250,350] ppm
  Intervalo já atendido
Intervalo = [350,480] ppm
  Intervalo já atendido
Intervalo = [480,600] ppm
  Intervalo já atendido
<<< busca_fonte >>>
```

Análise da operação 3

<<< busca_fonte >>>

Intervalo = [200,250] ppm

FI7 (200 ppm) alimenta com vazão de 29.1 t/h.
 Vazão Calculada 139 t/h regulada para 29.1 t/h.
 FI1 (200 ppm) alimenta com vazão de 7 t/h.
 Vazão Calculada 109.9 t/h regulada para 7 t/h.
 FE 0 ppm alimenta com vazão de 20.58t/h.

Intervalo = [250,350] ppm

FI4 (250 ppm) alimenta com vazão de 10 t/h.
 Vazão Calculada 82.32 t/h regulada para 10 t/h.
 FI6 (250 ppm) alimenta com vazão de 7 t/h.
 Vazão Calculada 72.32 t/h regulada para 7 t/h.
 FI7 (200 ppm) alimenta com vazão de 0 t/h.
 Vazão Calculada 43.546667 t/h regulada para 0 t/h.
 FI7 (200 ppm) alimenta com vazão de 0 t/h.
 Vazão Calculada 43.546667 t/h regulada para 0 t/h.
 FE 0 ppm alimenta com vazão de 18.66t/h.

Intervalo = [350,480] ppm

FI5 (350 ppm) alimenta com vazão de 35 t/h.
 Vazão Calculada 46.657143 t/h regulada para 35 t/h.
 FI6 (250 ppm) alimenta com vazão de 0 t/h.
 Vazão Calculada 6.5888199 t/h regulada para 0 t/h.
 FI6 (250 ppm) alimenta com vazão de 0 t/h.
 Vazão Calculada 6.5888199 t/h regulada para 0 t/h.
 FI7 (200 ppm) alimenta com vazão de 0 t/h.
 Vazão Calculada 5.4122449 t/h regulada para 0 t/h.
 FI7 (200 ppm) alimenta com vazão de 0 t/h.
 Vazão Calculada 5.4122449 t/h regulada para 0 t/h.
 FE 0 ppm alimenta com vazão de 3.16t/h.

<<< busca_fonte >>>

<<< Relatório Final >>>

Operação	FE0 (t/h)	FI1 (t/h)	FI2 (t/h)	FI3 (t/h)	FI4 (t/h)	FI5 (t/h)	FI6 (t/h)	FI7 (t/h)
1	35	0	0	0	0	0	0	0
2	28	28	0	0	0	0	0	0
3	42.4	7	0	0	10	35	7	29.1
4	10	0	0	0	0	0	0	0
5	26.25	0	0	0	0	0	0	8.75
6	5.25	0	0	0	0	0	0	1.75
7	39.6	0	0	0	0	0	0	0
Total	186.5	35	0	0	10	35	7	39.6

<<< Relatório Final >>>

<<< Verificando violações >>>

Operação	Contaminante	Cin-especif.	Cin-calc.	Violação(Cin)	Cout-especif.	Cout-calc.	Violação(Cout)
1	TSS	0	0		200	200	
1	DC	0	0		200	200	
2	TSS	100	100		500	500	
2	DC	100	100		600	600	
3	TSS	200	202.3	Sim	650	681.61	Sim
3	DC	220	181.76		500	480	
4	TSS	0	0		200	200	
4	DC	50	0		300	250	
5	TSS	50	83.33	Sim	300	333.33	Sim
5	DC	50	50		350	350	
6	TSS	50	83.33	Sim	200	233.33	Sim
6	DC	50	50		250	250	
7	TSS	50	0		300	333.33	Sim
7	DC	50	0		200	200	

<<< Verificando violações >>>

DFA do caso de multicontaminantes de Yang *et al.* (2000)